Composants à hauts facteurs de forme pour les résonateurs acousto-électriques et les dispositifs électro-optiques sur substrats mono-cristallins

Fabien Henrot

▶ **To cite this version:**

Fabien Henrot. Composants à hauts facteurs de forme pour les résonateurs acousto-électriques et les dispositifs électro-optiques sur substrats mono-cristallins. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université de Franche-Comté, 2015. Français. NNT : 2015BESA2032 . tel-01668524

HAL Id: tel-01668524
https://theses.hal.science/tel-01668524

Submitted on 20 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SPIM

Thèse de Doctorat

école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**

UFC UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Composants à hauts facteurs de forme pour les résonateurs acousto-électriques et les dispositifs électro-optiques sur substrats mono-cristallins

Fabien Henrot

SPIM

Thèse de Doctorat

UFC

école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

N° | X | X | X |

THÈSE présentée par

FABIEN HENROT

pour obtenir le

Grade de Docteur de
l'Université de Franche-Comté

Spécialité : **Science pour l'ingénieur**

Composants à hauts facteurs de forme pour les résonateurs acousto-électriques et les dispositifs électro-optiques sur substrats mono-cristallins

Soutenue publiquement le 31 mars 2015 devant le Jury composé de :

MARC DE MICHELI	Rapporteur	Directeur de recherche, UNICE
BERTRAND DUBUS	Rapporteur	Directeur de recherche, IEMN
THOMAS SIGNAMARCHEIX	Examinateur	Directeur du laboratoire des substrats avancés, Leti
MATHIEU CHAUVET	Examinateur	Professeur, Université de Franche-Comte
NADÈGE COURJAL	Examinateur	Maître de conférence, Université de Franche-Comte
GWENN ULLIAC	Examinateur	Ingénieur de recherche, Institut FEMTO-ST
SYLVAIN BALLANDRAS	Directeur de thèse	Président et fondateur de la société frec|n|sys.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier M. Sylvain Ballandras qui a assuré la direction de ma thèse et m'a donné l'opportunité de participer à ce projet. Ses compétences scientifiques et techniques ainsi que son expérience ont permis des échanges particulièrement instructifs. Aussi, j'espère avoir été à la hauteur de la tâche qui m'a été confiée.

Merci à messieurs Marc De Micheli et Bertrand Dubus pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury en tant que rapporteurs et pour avoir lu l'intégralité de mon manuscrit avec attention.

Je remercie également Thomas Signamarcheix pour avoir examiné mon travail de thèse et participé à mon jury.

Merci à Michel De Labachelerie, directeur de l'institut FEMTO-ST à mon arrivée et à Nicolas Chaillet, directeur de l'institut FEMTO-ST de m'avoir accueilli au sein des structures qui m'ont permis de mener à bien cette thèse.

Merci à Bernard Dulmet, Vincent Giordano et Serge Galliou, pour m'avoir accueilli au sein du département temps-fréquence dont ils ont assuré la direction durant ma thèse.

Je remercie également Hervé Maillotte pour son accueil au sein du département d'optique dont il a la responsabilité.

Je souhaite porter une attention particulière au rôle de Nadège Courjal, qui m'a toujours soutenu durant ma thèse et notamment dans mes démarches d'exploration technologique pour la réalisation de dispositifs innovants. Je suis particulièrement admiratif de sa volonté et son implication en ce qui concerne l'aboutissement des démarches de protection intellectuelle – auxquelles je suis part ailleurs heureux d'avoir contribué. Son aide dans le domaine de l'optique m'a permis de découvrir un domaine scientifique particulièrement intéressant. Je tiens ainsi à lui exprimer toute ma gratitude pour notre collaboration et son encadrement durant ces trois années.

Les idées novatrices et l'implication dans son rôle de co-encadrant de thèse de Gwenn Ulliac m'ont été particulièrement utiles et je tiens à l'en remercier. Ses compétences techniques et scientifiques m'ont été maintes fois nécessaires pour les différentes réalisations entreprises.

Je remercie Mathieu Chauvet pour son implication au sein du projet, son aide, ses conseils avisés et ses explications toujours pédagogiques. Son implication et sa promptitude durant la rédaction de mon manuscrit de thèse m'ont été plus que nécessaires.

J'adresse un remerciement particulier à Florent Bassignot, ami et collègue qui m'a soutenu à multiples reprises dans divers domaines comme la simulation numérique, les techniques de salle blanche, l'inversion de domaine ferroélectrique, la caractérisation acoustique, etc. et sans qui je n'aurais pu mener ce projet à termes avec autant de sérénité.

Merci à Blandine Guichardaz de m'avoir initié à la découpe à la scie, brique technologique essentielle de mon projet. Sa rigueur de travail m'a permis d'aborder les problématiques liées à cette technologie en toute quiétude.

Je remercie Jean-Yves Rauch pour son apport de compétences techniques sur la découpe à la scie et les techniques de salle blanche, ainsi que pour les différentes solutions techniques qu'il a

pu proposer durant mon projet.

Enfin, j'ai la conviction que toute synergie positive – en particulier dans le cadre d'un projet de recherche – réside dans l'entente, le soutien, l'émulation et la satisfaction partagée avec ses collaborateurs. En cela, je souhaite remercier Florent Bassignot, Bruno François, Meddy Vanotti, Clément Guyot, Ludovic Gauthier-Manuel, Émilie Courjon, Loïc Braun, Marc Lamotte, Alexandre Clairet, David Rabus, Lyes Djoumi, Minerva Gonzalez, Nesrine Belkadi ainsi que tous ceux que j'ai côtoyé durant ce projet, pour avoir largement contribué à la génération d'une atmosphère propice au bon déroulement de ces trois années passées à leurs côtés.

Sommaire

Introduction **1**

1 Structures à hauts facteurs de forme sur matériaux monocristallins **3**

1.1 Introduction . . . 3

1.2 Technologies planaires pour la réalisation de couches monocristallines . . . 4

1.2.1 Intérêt des couches monocristallines et technologies associées . . . 4

1.2.2 Couches de niobate de lithium . . . 6

1.2.2.1 Le matériau . . . 6

1.2.2.2 Amincissement de substrats massifs . . . 7

1.2.2.3 Croissance et dépôt de couches . . . 8

1.2.3 Conclusion sur les couches de $LiNbO_3$ . . . 9

1.3 Introduction à la structuration hors plan . . . 9

1.4 Structuration hors plan par découpe à la scie diamantée . . . 11

1.5 Composants innovants à hauts facteurs de forme sur niobate de lithium . . . 12

1.5.1 Composants acousto-électriques . . . 13

1.5.1.1 Introduction à la piézoélectricité . . . 13

1.5.1.2 Les résonateurs à ondes de surface . . . 15

1.5.1.3 Les résonateurs à ondes de volume . . . 17

1.5.1.4 Résonateurs verticaux à hauts facteurs de forme . . . 19

1.5.2 Composants optiques . . . 20

1.5.2.1 Guides d'ondes plans et de type «canal» . . . 20

1.5.2.2 Guides d'ondes structurés à saut d'indice . . . 23

1.5.2.3 Réalisation de guides par découpe à la scie de précision . . . 25

1.5.3 Composants hybrides . . . 26

1.5.3.1 Introduction à la ferroélectricité . . . 26

1.5.3.2 Inversion périodique de polarisation . . . 27

1.5.3.3 Dispositifs à domaines alternés pour l'optique non linéaire . . . 31

1.5.3.4 Dispositifs acousto-électriques à domaines alternés . . . 32

1.5.3.5 Interaction électro-acousto-optique . . . 33

1.6 Conclusion 36

2 Fabrication et technologies de structures à hauts facteurs de forme 37

2.1 Introduction 37

2.2 Découpe et polissage à la scie diamantée 38

2.2.1 Présentation de la machine de découpe 39

2.2.2 Matériaux découpés et polis par sciage 40

2.2.3 Caractérisation des tranchées de découpe sur niobate de lithium 40

2.2.4 Réalisation de guides simples à forts confinements sur $LiNbO_3$ 42

2.2.4.1 Guides rubans simples à hauts facteurs de forme 42

2.2.4.2 Guides rubans libres 43

2.2.5 Découpe de structures ruban avec deux lames simultanées 44

2.2.5.1 Entretoises en nickel électroformé 44

2.2.5.2 Entretoises en aluminium déposé par pulvérisation cathodique . 45

2.3 Structures complexes en niobate de lithium et développements technologiques associés 47

2.3.1 Structures en pont : le *B-ridge* 47

2.3.1.1 Calibrage de la profondeur de coupe 47

2.3.1.2 Structures en ponts réalisées – *B-ridge* 48

2.3.2 Structures reportées sur silicium 51

2.3.2.1 Méthodes de report 51

2.3.2.2 Découpe de structures sur $LiNbO_3$/Si 52

2.3.3 Amincissement local du matériau 54

2.3.4 Structures *B-ridge* sur couches minces 57

2.3.5 Structures amincies 58

2.4 Récapitulatif des limites dimensionnelles des structures sur $LiNbO_3$ 58

2.5 Structures sur d'autres matériaux piézoélectriques 59

2.6 Métallisation des structures 61

2.7 Conclusion 62

3 Applications acoustiques : éléments d'impédance pour filtrage large bande 65

3.1 Introduction 65

3.2 Recherche de géométries pertinentes pour les structures à hauts facteurs de forme 66

3.2.1 Présentation et intérêt des simulations numériques 66

3.2.2 Outils de modélisation 67

3.2.2.1 Logiciels utilisés 67
3.2.2.2 Description de problèmes 2D 68
3.2.3 Modes de vibration de structures monodomaines 70
3.2.4 Modes de vibration des structures polarisées périodiquement 71
3.2.4.1 Transducteurs polarisés périodiquement sur niobate de lithium 72
3.2.4.2 Étude du mode longitudinal 74
3.2.4.3 Étude du mode de cisaillement 74
3.2.4.4 Transducteur polarisé périodiquement sur tantalate de lithium . 76
3.2.4.5 Variations de température 77
3.2.5 Définition des dimensions de travail 79
3.2.6 Traitement de la nature tridimensionnelle des dispositifs 80
3.2.6.1 Intérêt d'une approche en trois dimensions 80
3.2.6.2 Transducteur simple : comparaison avec un modèle 2D 80
3.2.6.3 Géométries de transducteurs complexes 81
3.2.7 Conclusion sur les simulations acoustiques 86
3.3 Dispositifs réalisés pour des applications acoustiques 87
3.3.1 Procédé de fabrication de structures polarisées périodiquement à hauts facteurs de forme 87
3.3.2 Conditionnement et méthode de caractérisation des structures 89
3.3.3 Caractérisation de structures de type ruban à ondes de volume 91
3.3.3.1 Structures ruban simples sur $LiNbO_3$ (YX*l*)128° 91
3.3.3.2 Structures ruban sur $LiTaO_3$ (YXl)42° 91
3.3.4 Caractérisation des résonateurs à hauts rapports de forme polarisés périodiquement 93
3.3.4.1 Structures de type ruban libre sur $LiNbO_3$ 93
3.3.4.2 Structures de type ruban sur $LiNbO_3$ 97
3.3.4.3 Structures de type *B-ridge* sur $LiNbO_3$ 99
3.3.4.4 Conclusion sur les caractérisations de dispositifs réalisés sur $LiNbO_3$ 101
3.3.4.5 Structures de type *B-ridge* sur $LiTaO_3$ 102
3.3.5 Filtrage radio-fréquence à l'aide de résonateurs polarisés périodiquement 104
3.3.5.1 Filtres à basse fréquence à base de résonateurs de type ruban libre 105
3.3.5.2 Filtres à fréquences intermédiaires (250 MHz) à base de résonateurs *B-ridges* sur $LiNbO_3$ 108
3.3.5.3 Filtre à 110 MHz à base de résonateurs *B-ridges* sur $LiTaO_3$ . . 110
3.4 Conclusion 112

4 Applications optiques : guides d'ondes à faibles pertes 115
4.1 Introduction . . . 115
4.2 Guides d'ondes à saut d'indice . . . 116
4.2.1 Intérêt, conception et fabrication . . . 116
4.2.2 Résultats de caractérisation . . . 118
4.3 Coupleurs de modes optiques verticaux réalisés à la scie . . . 121
4.3.1 Intérêt et présentation des coupleurs de modes optiques . . . 121
4.3.2 État de l'art . . . 123
4.3.2.1 Coupleurs de modes à géométrie latérale . . . 123
4.3.2.2 Coupleurs de modes à géométrie verticale . . . 124
4.3.3 Coupleurs de modes réalisés à la scie de précision . . . 125
4.3.4 Conclusion sur les coupleurs de mode réalisés à la scie . . . 129
4.4 Guides à forts confinements par amincissement local . . . 130
4.4.1 Membranes suspendues . . . 130
4.4.2 *B-ridges* amincis . . . 132
4.4.3 Rubans simples localement amincis . . . 136
4.4.4 *B-ridges* localement amincis en face arrière . . . 138
4.4.5 Synthèse sur le développement de structures amincies . . . 140
4.5 Conclusion sur le chapitre . . . 140

5 Structures complexes pour composants hybrides 143
5.1 Introduction . . . 143
5.2 Génération de second harmonique dans un guide optique . . . 143
5.2.1 État de l'art . . . 144
5.2.2 Intérêt des guides fortement confinés . . . 146
5.2.3 Réalisation et caractérisation des structures . . . 147
5.2.3.1 Présentation du banc de caractérisation expérimental . . . 147
5.2.3.2 Structures rubans sur plaques intégralement amincies . . . 148
5.2.3.3 Structures rubans amincies par sciage . . . 153
5.3 Perspectives : dispositifs acousto-optiques . . . 155
5.4 Conclusion . . . 158

Conclusion 159

Annexe A Caractéristiques dimensionnelles liées à la découpe 165

Annexe B Protocole de mesure des pertes de propagation d'un guide optique droit 171

Table des acronymes

AlN	nitrure d'aluminium 4
ANR	Agence Nationale pour la Recherche 1
APE	Annealed Proton Exchange 22
BAW	Bulk Acoustic Waves 13
BCB	benzocyclobutène 7
CHARADES	Composants à hauts facteurs de forme pour les résonateurs acousto-électriques et les dispositifs électro-optiques sur substrats mono-cristallins 1
CIS	Crystal Ion Slicing 7
CMP	Chemical and Mechanical Planarization 8
CTF	Coefficient de Température de la Fréquence 70
CVD	Chemical Vapor Deposition 5
DRIE	Deep Reactive Ion Etching 9
EGT	Epitaxial Gap Tuning 10
FBAR	Film Bulk Acoustic Resonators 18
FIB	Focused Ion Beam 8
FWHM	Full Width at Half Maximum 131
GSH	Génération de Second Harmonique 31
HBAR	High-overtone Bulk Acoustic Resonator 18
HF	acide fluorhydrique 8
HT	Haute Tension 30
IBEE	Ion Beam Enhanced Etching 8
ICP	Inductively Coupled Plasma 123
IDT	Inter-Digitated Transducer 16
ISL	Intervalle Spectral Libre 119
ISM	Industrielle, Scientifique, Médicale 13
LGS	langasite 12
LiCl	Chlorure de Lithium 28
LIGA	Röntgen**li**thographie, **G**alvanoformung, **A**bformung 3
LLSAW	Longitudinal Leaky SAW 17
$LiNbO_3$	niobate de lithium 1
LPE	Liquid Phase Epitaxy 5
$LiTaO_3$	tantalate de lithium 41
MBE	Molecular Beam Epitaxy 5
MEB	Microscope Électronique à Balayage 52
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Deposition 8
OPO	Oscillateur Paramétrique Optique 144
PCB	Printed Circuit Board 107

PLC Planar Lightwave Circuit 124
PLD Pulsed Laser Deposition 8
PPLN Periodically Poled Lithium Niobate 31
PSTD Pseudospectral Time Domain 126
PZT Titano-Zirconate de Plomb 14
QPM Quasi Phase Matching 31
RF Radio-Fréquence 1
RIE Reactive Ion Etching 10
RMS Root Mean Square 7
SAW Surface Acoustic Waves 13
SMR Solidly Mounted Resonators 18
TE Transverse Électrique 118
TM Transverse Magnétique 22
TPP Transducteur Polarisé Périodiquement 32
TTV Total Thickness Variation 7
UHF Ultra High Frequency 17
UV Ultra Violet 17
VHF Very High Frequency 17
VPE Vapor Phase Epitaxy 5
ZnO oxyde de zinc 4

INTRODUCTION

Depuis l'essor des télécommunications modernes telles que la téléphonie mobile et les réseaux sans fils ou la démocratisation des ordinateurs personnels, la miniaturisation est un objectif majeur de tous les fabricants de composants Radio-Fréquence (RF). Les techniques de fabrication associées à l'ensemble de ces dispositifs sont sans cesse améliorées, repoussant les limites des fonctionnalités de ces derniers. Le silicium, matériau de prédilection de la microélectronique, permet de couvrir une partie des besoins en composants actifs. Pour les composants passifs, notamment ceux fondés sur l'exploitation d'ondes élastiques, le niobate de lithium ($LiNbO_3$) et le quartz, matériaux industriellement matures sont capables de fonctionnalités inaccessibles par le silicium et viennent couvrir des domaines utilisant la communication RF. Les composants passifs en électronique et en optique ou ceux utilisés en électro-optique pour la détections de phénomènes physiques ou le filtrage sont fondés sur le guidage d'ondes élastiques ou électromagnétiques. L'amélioration du guidage de ces ondes permet une réduction de la consommation en énergie des dispositifs, améliorant ainsi leur efficacité, mais nécessite la réalisation d'une structure guidante souvent tridimensionnelle. L'usinage de matériaux tels que le quartz ou le $LiNbO_3$, généralement à partir de plaques monocristallines de plusieurs centimètres de diamètre, souffre de défauts fonctionnels liés à la capacité de mise en forme tridimensionnelle des structures. Le projet (nommé *Composants à hauts facteurs de forme pour les résonateurs acousto-électriques et les dispositifs électro-optiques sur substrats mono-cristallins (CHARADES)*) dans lequel s'inscrivent les travaux présentés dans ce manuscrit vise à réaliser des structures aux capacités exaltées de guidage et de confinement d'ondes élastiques et optiques. Le projet a pour but d'explorer de nouveaux moyens de mise en forme tridimensionnelle de matériaux monocristallins afin de réaliser des structures présentant de hauts facteurs de forme (élancement, rapport entre la hauteur et la largeur). L'obtention de ces structures innovantes passe par l'utilisation d'une scie circulaire de précision micronique, matériel de haute technologie dont s'est doté l'institut FEMTO-ST. Le projet CHARADES, soutenu par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) réunit un organisme de recherche académique et des entreprises du domaine privé (Photline, Kapteos, SENSeOR). L'objectif final du projet vise à transférer des technologies de réalisation de dispositifs vers une utilisation industrielle.

Le premier chapitre pose les fondements nécessaires à la compréhension des fonctionnalités recherchées et présente l'intérêt de structures à hauts facteurs de forme. Il présente l'utilisation de ces structures dans le domaine de l'acousto-électricité et de l'optique. En acousto-électricité, l'intérêt de découper des couches verticales de matériau dont on a préalablement modifié les propriétés physiques, puis de les exciter électriquement est démontré. De telles structures permettent d'exploiter des coupes cristallines jusqu'alors inaccessibles dans de telles dimensions et présentent des intérêts indéniables en termes de couplage électromécanique et de vitesse équivalente de phase. Dans les domaines de l'optique guidée linéaire et non linéaire, l'amélioration du confinement du faisceau optique permet de travailler plus efficacement sur son traitement, conduisant à la réduction des tensions de commandes électro-optiques et des longueurs utiles des dispositifs. Ces derniers étant propices à la propagation d'ondes élastiques et optiques, nous étudierons également les fondements des effets croisés entre elles.

Le deuxième chapitre se consacre à la réalisation des structures par sciage. Cette étape technologique essentielle à la réalisation de structures à hauts facteurs de forme permet d'accéder à des géométries innovantes. Les caractéristiques de la machine sont présentées, ainsi que les différentes géométries de structures à hauts facteurs de forme réalisées. Nous montrons ainsi le champ des possibles ouvert par cette méthode, avec des géométries encore inexploitées pour des monocristaux. Par exemple, l'utilisation de la scie pour amincir localement un matériau est présentée et donne lieu à des structures aux géométries complexes, permettant des confinements d'ondes améliorés par rapport à des guides classiques. Les développements technologiques autour de la découpe à la scie représentent le cœur du projet, les troisième, quatrième et cinquième chapitres présentent l'utilisation de structures réalisées par cette méthode pour différents domaines d'application.

Le chapitre trois présente les applications acousto-électriques des structures à hauts facteurs de forme fabriquées par sciage de précision. La conception des dispositifs est présentée au travers de simulations numériques qui ont permis de dimensionner les structures. Les points de fonctionnement présentant un intérêt sont visés lors de la réalisation des dispositifs. Ces derniers utilisent une méthode de génération d'ondes élastiques originale fondée sur l'inversion périodique de polarisation d'un matériau ferroélectrique. Les transducteurs réalisés sont caractérisés en termes de couplage électromécanique, de vitesse équivalente de phase et de coefficient de qualité. Ces structures peuvent être reliées entre elles pour réaliser des filtres à éléments d'impédance, qui font alors l'objet de la dernière partie de ce chapitre, principale application visée pour ces transducteurs.

Le quatrième chapitre est consacré à l'utilisation de structures à fort confinement optique sur monocristaux. Le confinement important de faisceaux optiques génère des pertes par diffusion liées à la rugosité des flancs de la structures. Dans le cas de notre étude, des structures à faibles pertes et fortement confinées sont réalisés grâce à l'utilisation d'une lame de scie diamantée permettant le polissage et la découpe des flancs en une seule étape. Des structures intégrant des adaptateurs de modes optiques sont présentés, leur réalisation est détaillée et les résultats obtenus présentés, montrant ainsi leur fonctionnalité. Des méthodes de découpe particulièrement complexes sont nécessaires pour réaliser des guides de type ruban présentant un amincissement local d'épaisseur micrométrique. L'intérêt de ce type de structures en termes de confinement et de pertes est présenté. Les dispositifs réalisés pour des applications d'optique guidée font l'objet de deux demandes de brevets.

Le cinquième chapitre présente des structures utilisant simultanément l'inversion de domaines ferroélectriques, le confinement optique, voire la génération d'ondes élastiques. Ces structures sont d'abord réalisées pour des applications d'optique non linéaire nécessitant un fort confinement. Dans ces configurations, des fils de matériaux monocristallins dont la polarisation est périodiquement inversée sont réalisés sur plusieurs millimètres de long pour des dimensions transverses de moins de 5 µm. Ces structures permettent l'exaltation des effets non linéaires à l'origine de la génération de second harmonique. Les perspectives de réalisation consistent en des structures à forts confinements utilisant simultanément des ondes élastiques générées par une inversion périodique de polarisation et la propagation d'un faisceau optique afin de moduler ce dernier. Les interactions entre l'onde élastique et l'onde optique permettent en effet d'accéder à des fonctions telles que la modulation ou le filtrage optique.

Nous établirons enfin une conclusion portant sur les travaux réalisés durant ce projet et les perspectives qui en émanent.

1

Structures à hauts facteurs de forme sur matériaux monocristallins

1.1/ Introduction

L'évolution des caractéristiques fonctionnelles des dispositifs micro-électroniques fabriqués en environnement propre dépend directement des technologies de fabrication. Depuis l'obtention des premiers cristaux synthétiques de silicium par Henri Sainte-Claire Deville en 1854, la microélectronique n'a cessé de réduire la taille des éléments de base des transistors intégrés (jonctions), suivant ainsi la loi de Moore qui prévoit le doublement de la capacité des circuits électroniques tous les deux ans [1] depuis 1975 et pour les dix années suivantes. Cette loi s'applique toujours [2] et une estimation prévoit que celle-ci s'essouffle dans les trois prochaines décennies [3] car comme le reconnaît Moore [4], «*aucune quantité physique ne peut croître [décroître] exponentiellement pour toujours*». Portée par la microélectronique, la miniaturisation s'est alors généralisée aux systèmes multiphysiques avec par exemple le premier micro-capteur de pression en 1972 vendu par National Semiconductor, la première tête à jet d'encre pour imprimante par IBM-HP en 1977 ou encore les procédés de micromoulage par lithographie, électroformage, moulage – Röntgen**li**thographie, **G**alvanoformung, **A**bformung (LIGA) – en 1978. Toutes ces évolutions technologiques dédiées à la miniaturisation permettent aujourd'hui de réaliser des objets du quotidien tels que des tablettes tactiles embarquant un nombre impressionnant de fonctionnalités – positionnement terrestre, appareil photo de plusieurs millions de pixels, puissance de calcul comparable à celle d'un ordinateur personnel –, des microaccéléromètres en silicium pour le déclenchement d'airbag ou encore des microplateformes de positionnement pour l'instrumentation de haute précision. Parmi ces domaines d'application de la microtechnologie, celui de la télécommunication compte comme l'un des plus actifs et les systèmes acousto-électriques et optiques qu'elle utilise se vendent en millions d'exemplaires chaque année. Un certain nombre de ces dispositifs, notamment en acousto-électricité, se caractérise par le fait qu'ils dérivent des technologies planaires utilisées pour la microélectronique. En effet, ces dernières, développées initialement sur silicium, présentent l'avantage d'être collectives et ainsi de permettre la réalisation d'une grande quantité de dispositifs en un nombre d'étapes maîtrisé, diminuant alors le prix unitaire des composants finaux.

Pour améliorer les dispositifs acousto-électriques, une solution envisageable consiste à utiliser une couche d'un matériau aux propriétés spécifiques sur un substrat (souvent du silicium) moins

coûteux, fonctionnel et inerte pour l'application visée. Il existe pour cela des couches polycristallines de type nitrure d'aluminium (AlN) ou oxyde de zinc (ZnO) utilisées dans le domaine de l'acoustique. Ce manuscrit s'intéressera cependant uniquement aux couches monocristallines. Ces dernières sont utilisées dans des dispositifs optiques pour profiter de matériaux possédant un indice de réfraction avantageux ou ayant des propriétés non linéaires ou électro-optiques intéressantes. Les couches piézoélectriques de matériaux monocristallins sont utilisées pour conférer de l'activité électromécanique à des matériaux inertes dont les propriétés s'avèrent avantageuses. Ces couches monocristallines font l'objet d'un grand nombre d'études et leur qualité ne cesse de croître, comme nous le montrerons dans la section suivante en présentant leurs méthodes d'élaboration, mais elles restent cependant encore à l'état de recherche. Ces technologies permettent de profiter des propriétés physiques des matériaux utilisés, tout en offrant un confinement effectif des ondes dans des faibles volumes. Cependant, l'utilisation de matériaux en couche et la nature planaire des structures classiquement réalisées limite le champ des possibilités. L'extension à une structuration 3D des matériaux monocristallins répond à des objectifs d'amélioration du confinement, des propriétés physiques des composants et d'augmentation de leur densité fonctionnelle. La structuration hors plan de dispositifs peut être réalisée de plusieurs manières, détaillées dans les sections suivantes. Notre objectif est de réaliser des structures à hauts facteurs de forme (rapport entre la largeur et la profondeur de la structure) pour obtenir des couches verticales de matériau dont la géométrie permet une réduction du volume fonctionnel. Pour réaliser de telles structures, une technologie originale sera présentée, applicable pour différentes finalités , avec une structuration hors plan permettant d'obtenir des structures inédites dans les domaines de l'acoustique, de l'optique et de leur croisement.

1.2/ Technologies planaires pour la réalisation de couches monocristallines

1.2.1/ Intérêt des couches monocristallines et technologies associées

Les couches électro-actives reportées sur substrat «neutre» forment la partie sensible des dispositifs au sein desquels elles s'intègrent et de ce fait, leur qualité doit être la meilleure possible en termes d'homogénéité, de planéité et de rugosité. Les couches métalliques sont les plus simples à réaliser, puisque la plupart du temps elles peuvent être déposées par des techniques telles que la pulvérisation cathodique ou l'évaporation assistée par canon à électrons. Ces couches peuvent servir à conduire du courant en réduisant drastiquement les quantités de matière utilisées, permettant notamment l'essor de la microélectronique. L'homogénéité, la planéité et la rugosité de ces couches étant maîtrisées et les procédés technologiquement matures, ce manuscrit portera tout particulièrement sur les couches monocristallines, notamment celles de matériaux piézoélectriques. Les premières couches submicroniques de cette nature réalisées à partir de plaques de plus grande épaisseur ont été fabriquées sur du silicium dans les années 90 [5]. La technique dite de «SmartCut™» [6] présentée figure 1.1 est à ce jour suffisamment stable pour permettre les premières commercialisations de plaques composites pour la recherche. Les techniques dont le principe consiste à amincir une plaque de plusieurs centaines de micromètres jusqu'à quelques microns voire quelques centaines de nanomètres seront distinguées des techniques qui consistent à faire pousser le matériau directement sur le substrat. Cette dernière méthode repose sur une croissance dite épitaxiale d'un matériau sur une épaisseur maximale de quelques centaines de

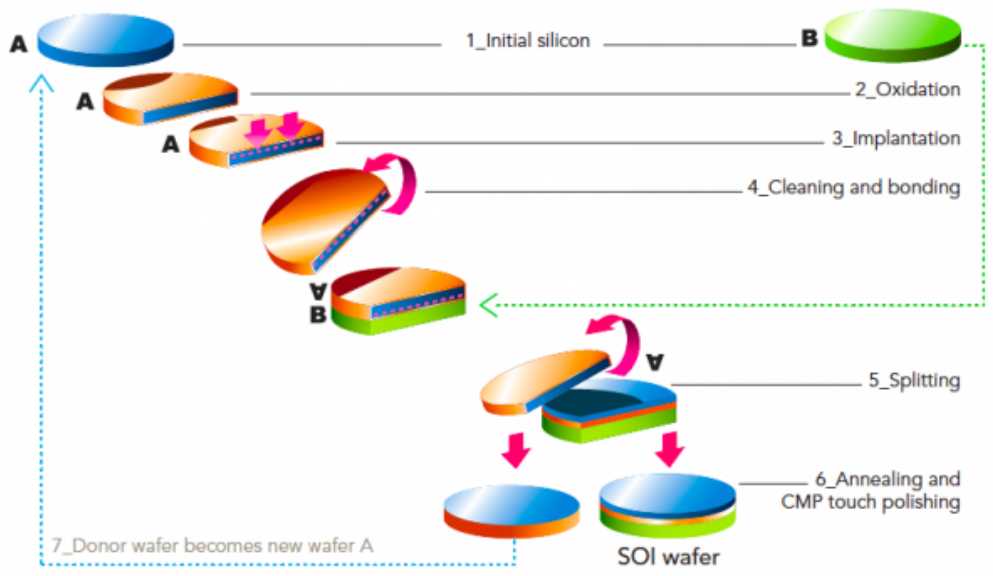


FIGURE 1.1 – Présentation du procédé SmartCut™ [6]

nanomètres sur un substrat massif jouant le rôle de support de la couche. Il existe trois types de croissances par épitaxie permettant d'obtenir des couches généralement submicroniques :

- L'épitaxie par jet moléculaire – Molecular Beam Epitaxy (MBE) – qui consiste à placer le substrat et le matériau à déposer dans une enceinte sous vide poussé (1×10^{-12} bar) puis à évaporer par chauffage le matériau à déposer, en créant un jet de molécules en direction du substrat. Cette méthode implique cependant une croissance lente, de l'ordre de $0{,}1\ \mu m \cdot h^{-1}$, et les conditions dans lesquelles elle a lieu imposent l'utilisation de certains substrats et des préparations de surfaces qui limitent le champ applicatif et rend son prix élevé [7].
- L'épitaxie en phase liquide – Liquid Phase Epitaxy (LPE) – consiste à faire croître le cristal par la mise en contact du substrat avec une source liquide. Le substrat est mis en contact avec un bain liquide de composition adéquate à une température légèrement inférieure à celle de l'équilibre liquide-solide. Cette technique présente l'avantage d'être rapide mais s'avère moins précise que les épitaxies en phase vapeur.
- L'épitaxie en phase vapeur – Vapor Phase Epitaxy (VPE) ou Chemical Vapor Deposition (CVD) – consiste à faire croître le cristal à partir de sources de gaz contenant les éléments constitutifs de la future couche [8]. Placés dans un réacteur, les gaz se dissocient pour fournir par exemple le silicium qui se dépose à la surface du substrat, lui même chauffé. Cette méthode permet de déposer avec précision des couches fines (notamment de silicium) sur une grande surface.

Ces technologies, surtout développées pour le silicium, ont permis la réalisation de couches de différents matériaux dont le niobate de lithium [9] (voir section 1.2.2.3). Les couches minces de ce dernier permettent d'obtenir un confinement des ondes élastiques et optiques pouvant descendre jusqu'à quelques micromètres cubes dans certaines conditions géométriques que nous étudierons dans les différents chapitres de ce manuscrit.

1.2.2/ Couches de niobate de lithium

1.2.2.1/ Le matériau

Le niobate de lithium ($LiNbO_3$), matériau de synthèse composé de lithium, de niobium et d'oxygène a été développé à partir des années 1960 et possède une structure cristalline trigonale. Il est obtenu par le procédé dit de «tirage de Czochralski» qui consiste à faire croître un matériau orienté à partir d'un germe de celui-ci, plongé dans un liquide-mère en fusion, permettant d'obtenir des monocristaux de grande dimension (100 mm de diamètre) pour ensuite les découper à façon. Largement utilisé dans le domaine de l'optique pour ses propriétés non-linéaires, sa transparence sur des longueurs d'ondes allant de 320 nm à 5000 nm, le niobate de lithium possède un couplage électromécanique pouvant atteindre plus de 40 % avec des vitesses d'ondes se propageant en son sein dépassant $6000\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ le rendant également très attractif pour les applications acoustiques. La figure 1.2 montre la maille cristalline du niobate de lithium, cristal piézoélectrique (voir section 1.5.1.1) et ferroélectrique (voir section 1.5.3.1) dont le point de Curie est situé aux alentours de 1200°C. Ses propriétés cristallines ouvrent de nombreuses possibilités en acoustique et en font un

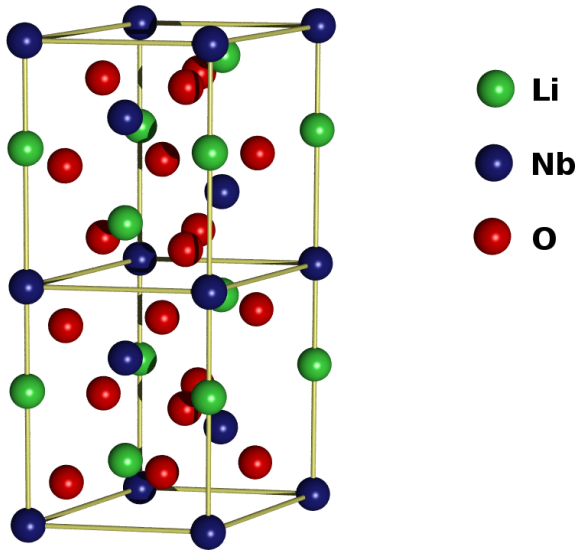


Figure 1.2 – Représentation schématique d'une maille de $LiNbO_3$

matériau très largement utilisé pour la réalisation de résonateurs et de filtres utilisant son couplage électromécanique et les caractéristiques de propagation d'ondes élastiques associées. Le niobate de lithium est aussi pyroélectrique ; le matériau se charge électriquement lorsqu'il est soumis à une variation de température. Cet effet peut être utilisé en optique pour l'auto-focalisation de faisceaux, permettant ainsi la réalisation de capteurs [10] mais il constitue généralement un frein lors de la réalisation de composants à ondes élastiques de surface, rendant délicates les opérations technologique nécessitant une augmentation de la température. Le développement de matériau compensé de ces effets (par réduction chimique [11]) permet aujourd'hui de simplifier considérablement les réalisations de filtres SAW d'un point de vue technologique, sans dégradation notable des propriétés piézoélectriques du matériau. L'accroissement de conductivité et la dégradation de la transparence associés à l'opération de réduction rendent toutefois le $LiNbO_3$ dit «noir» (black lithium niobate) impropre aux applications optiques

Une autre particularité du niobate de lithium repose sur ses coefficients de non linéarité d_{33} et

électro-optique r_{33} très élevés par rapport aux autres matériaux présentant de telles propriétés : respectivement $31{,}5\,\mathrm{pm}\cdot\mathrm{V}^{-1}$ et $30{,}8\,\mathrm{pm}\cdot\mathrm{V}^{-1}$ à une longueur d'onde optique de 633 nm. Ces propriétés lui permettent ainsi de voir modifié son indice de réfraction lorsqu'il est soumis à un champ électrique externe. Cette particularité trouve des applications en optique pour la modulation d'ondes lumineuses. Le niobate de lithium est un matériau biréfringent qui possède donc un indice ordinaire n_o et un indice extraordinaire n_e valant respectivement 2,212 et 2,139 à une longueur d'onde de 1500 nm.

Matériau industriellement mature, il est disponible sous forme de plaquettes appelées *wafers* communément vendues à des épaisseurs de 0,25 mm ou 1 mm, des diamètres de 2 à 6 pouces, et ce pour plusieurs coupes cristallines. Ces wafers constituent la base de nos travaux pour la structuration tridimensionnelle des dispositifs acoustiques et optiques.

1.2.2.2/ Amincissement de substrats massifs

Comme pour le silicium, des techniques d'amincissement ont été développées pour réaliser des couches planaires de niobate de lithium reportées sur divers substrats. Le point de départ consiste en un wafer de matériau monocristallin de quelques centaines de micromètres d'épaisseur (typiquement 500 µm). L'intérêt de choisir un matériau massif pour ensuite l'amincir réside dans la qualité cristalline de la couche obtenue. Les procédés d'amincissement permettent d'obtenir des couches dont les propriétés physiques sont similaires au matériau massif duquel elles sont issues. L'enjeu de l'amincissement à partir de substrats massifs vise la réalisation de couches de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres d'épaisseur sur des surfaces de plusieurs centimètres carrés, présentant une rugosité moyenne inférieure à 10 nm et des propriétés physico-chimiques identiques au matériau massif. Nous distinguons trois méthodes pour obtenir des couches de $LiNbO_3$ décrites ci-après.

La première technique ressemble à la technique de Smart-Cut™ développée pour le silicium. Elle est appelée ici Crystal Ion Slicing (CIS). Le principe consiste à implanter des ions He^+ à une profondeur comprise entre quelques centaines de nanomètres et quelques micromètres (inférieur à 10 µm) [12, 13]. Le côté du wafer portant les ions implantés est ensuite reporté sur un substrat massif, généralement à l'aide de couches intermédiaires (métal, benzocyclobutène (BCB), silice). L'implantation ionique a pour vocation de créer une fragilisation du matériau à une profondeur conditionnée par l'énergie d'implantation. Une fois les deux wafers collés l'un à l'autre, l'ensemble est chauffé à quelques centaines de degrés Celsius, avec pour effet la séparation du wafer de niobate de lithium à la profondeur où les ions He^+ sont implantés. Après avoir subi cet arrachement, la couche de niobate de lithium restée sur le substrat présente une rugosité moyenne quadratique R_q de plusieurs dizaines de nanomètres, aussi appelé rugosité «Root Mean Square (RMS)». Pour remédier à cela, la couche résultante est mécaniquement polie avec des abrasifs très doux pour finalement obtenir des rugosités RMS de l'ordre du nanomètre. Cette technique permet de s'affranchir de la variation d'épaisseur moyenne – Total Thickness Variation (TTV) – des plaques initiales, la couche obtenue bénéficiant de l'homogénéité en épaisseur liée à l'implantation sur plusieurs centimètres carrés. Cependant, celle-ci tend à désorganiser la maille cristalline qui doit alors être reconstituée par un recuit sans oxygène (et permet de rétablir également la stœchiométrie en surface). En dehors d'une fabrication de masse, ce procédé reste cependant difficilement accessible et peu adapté aux volumes atteints dans le domaine de la recherche.

La deuxième méthode repose sur l'amincissement par rodage et polissage mécano-chimique

– Chemical and Mechanical Planarization (CMP) – [14], plus conventionnelle et moins onéreuse que la précédente mais qui concerne des couches de niobate de lithium dont l'épaisseur descend rarement sous les 10 µm [15]. Les premières machines de CMP datent des années 1960 mais le procédé de polissage mécanique est beaucoup plus ancien, notamment pour le polissage de surfaces de miroirs. La méthode consiste à faire tourner un wafer de niobate de lithium en appuyant celui-ci sur une surface abrasive. Dans un premier temps, la matière est retirée rapidement avec un abrasif de gros grains (quelques micromètres, rodage/rectification), puis la surface est polie à l'aide de grains abrasifs très fins (<100 nm) sur des supports doux pour obtenir des rugosités de l'ordre de 1 nm RMS. Cette méthode permet d'obtenir des couches de qualité suffisante pour les applications visées en terme de rugosité et la maille cristalline n'est que très peu modifiée (seul un écrouissage de surface peut affecter les propriétés du substrat). Cependant, les épaisseurs de couches minces obtenues dépendent fortement du TTV des wafers de niobate de lithium initiaux et du substrat, ce qui implique une possible inhomogénéité de l'épaisseur et donc l'impossibilité d'obtenir des couches minces uniformes de l'ordre du micromètre sur de grande surfaces.

La troisième méthode rejoint la première en s'appuyant également sur une implantation d'ions pour créer une couche sacrificielle. La méthode dite de Ion Beam Enhanced Etching (IBEE), de manière similaire au CIS, nécessite des ions (He^+) implantés sous la surface du niobate de lithium pour favoriser sa gravure par voie humide (solution d'acide fluorhydrique (HF)). Des trous sont ensuite réalisés par faisceaux d'ions focalisés – Focused Ion Beam (FIB) – pour accéder à la couche à sacrifier [16]. La gravure humide permet ensuite de libérer la couche mince de niobate de lithium par une différence de vitesse de gravure entre la couche ayant reçu l'implantation et le matériau massif. Le procédé est complexe et difficile à maîtriser puisqu'il nécessite de maîtriser l'implantation ionique et la gravure humide.

Ces trois techniques ont l'avantage d'utiliser des plaques de niobate de lithium, facilement accessibles et de bonne qualité permettant d'obtenir des couches avec des propriétés physico-chimiques très proches du monocristal d'origine.

1.2.2.3/ Croissance et dépôt de couches

Une autre approche pour obtenir des couches de niobate de lithium (ou d'autres matériaux monocristallins) consiste à faire croître celui-ci directement sur la surface utile, évitant alors toute étape d'amincissement. La couche de niobate de lithium peut être obtenue par pulvérisation cathodique [17], par dépôt stimulé par impulsions Laser – Pulsed Laser Deposition (PLD) –, par croissance en phase liquide [18, 19], par épitaxie par jet moléculaire [20], par dépôt en phase vapeur métalo-organique – Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) – [9, 21] ou encore par CVD [22]. Du fait du nombre important de méthodes, nous ne les présenterons pas dans ce manuscrit ; néanmoins, elles ont en commun un certain nombre de points que nous allons mettre en avant.

Ces techniques de dépôt permettent l'élaboration de multi-couches de niobate de lithium, avec si besoin l'ajout de dopants localisés au sein des couches minces pendant leur élaboration rendant ces méthodes attractives pour un certain nombre d'applications, notamment en optique [23]. La principale limitation des techniques de croissance concerne la qualité du niobate de lithium obtenu. En effet, il s'avère compliqué de réaliser une couche ayant les mêmes propriétés physicochimiques que les monocristaux obtenus par le procédé de Czochralski et présentant une homogénéité de l'épaisseur de matériau compatibles avec les applications visées. Les épaisseurs atteignables sont

comprises entre quelques centaines de nanomètres et quelques dizaines de micromètres [24] selon les procédés. Du fait de l'inconstance des paramètres physicochimiques des couches de matériau obtenues, il n'est aujourd'hui pas envisageable d'utiliser ce type de couches pour des applications industrielles dans les domaines de l'optique et de l'acoustique.

1.2.3/ Conclusion sur les couches de $LiNbO_3$

Obtenir une couche mince d'épaisseur comprise entre 1 µm et 10 µm avec une qualité de matériau compatible avec les applications optiques et acoustiques s'avère difficile ; seule la technique de CIS permet d'obtenir ce type de couches mais nécessite l'utilisation d'un implanteur ionique. Dans le cadre de recherches sur l'utilisation de couches minces de niobate de lithium, une solution innovante a été proposée pour en fabriquer de manière simple et efficace : la réalisation de structures hors plan de type ruban à hauts facteurs de forme [25] défini comme le rapport entre la largeur et la profondeur de la structure. Ces structures forment une couche de niobate de lithium, tournée de 90° par rapport au substrat comme le montre la figure 1.3. Notre projet de recherche a donc été orienté selon cette voie. Les prochains chapitres porterons particulièrement sur la réalisation de ce type de structures, en rupture avec les technologies actuelles et permettant d'utiliser des propriétés du matériau jusqu'alors inexplorées.

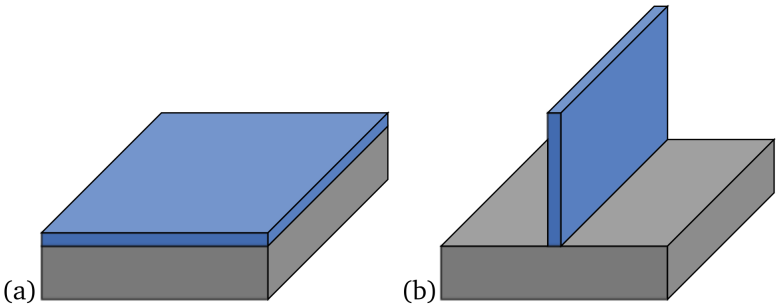


Figure 1.3 – Comparaison entre (a) une couche mince dans le plan et (b) une couche mince structurée hors plan

1.3/ Introduction à la structuration hors plan

Dans cette section, nous appellerons une structuration hors plan toutes les méthodes qui ont recours à la fonctionnalisation et à l'utilisation de surfaces perpendiculaires aux plans d'origine, c'est-à-dire les méthodes qui permettent de graver un matériau sur une profondeur suffisamment importante pour pouvoir utiliser les flancs des structures ainsi créées pour y déposer par exemple des électrodes et ainsi susciter des effets inédits.

La structuration hors plan est le plus souvent employée pour la fabrication de microstructures sur silicium. À ce titre, ces techniques s'avèrent les mieux maîtrisées à l'heure actuelle en comparaison à celles dédiées à la fabrication de barreaux sur monocristaux piézoélectriques. Parmi ces méthodes figure l'usinage réactif ionique profond – Deep Reactive Ion Etching (DRIE) – qui consiste à usiner un substrat placé dans une chambre sous vide dans laquelle est introduit un gaz

ionisé (ou plasma) tel que l'argon. Un champ électrique est appliqué pour accélérer les ions vers la surface du substrat, la frappant ainsi avec une énergie suffisante pour provoquer un arrachement de matière lors de l'impact. Pour améliorer la gravure, un effet chimique est ajouté à l'aide de gaz réactifs. Pour le silicium, il s'agit le plus souvent de gaz fluorés comme l'hexafluorure de soufre (SF_6). Dans ce cas, la gravure peut atteindre plus de 500 µm de profondeur, notamment en utilisant le procédé Bosch [26], comme l'illustre la figure 1.4. Le procédé de gravure cryogénique [27] est

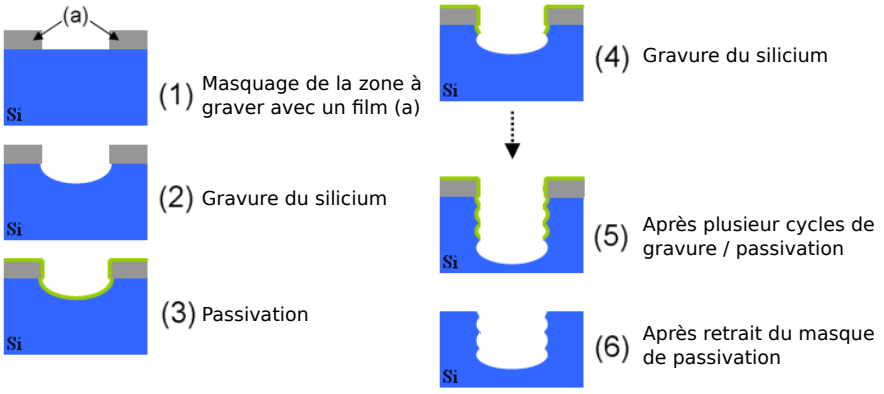


FIGURE 1.4 – Schéma du procédé Bosch pour la gravure profonde du silicium

similaire au procédé Bosch à ceci près que la passivation est continue au cours du procédé et que la gravure s'effectue aux alentours de -100°C. Cette méthode permet une gravure deux fois plus rapide qu'avec le procédé Bosch, et permet d'atteindre des rapports de forme plus importants ainsi que des motifs aux flancs plus lisses. Elle nécessite en revanche une maîtrise de la température de la surface du wafer de silicium au degré près. Ces méthodes permettent d'obtenir des facteurs de forme d'environ 100 [28].

Une autre méthode utilise l'ajustement de gravure par épitaxie – Epitaxial Gap Tuning (EGT) – après avoir réalisé une DRIE dans le silicium pour augmenter le facteur de forme des structures. Cette méthode consiste à déposer uniformément du silicium sur les flancs de la gravure et à en diminuer ainsi sa largeur, sans réduire sa profondeur. Ng et. al de l'université de Stanford ont récemment montré (2013) des structures en silicium avec un facteur de forme de 500 pour des motifs de moins de 100 nm [29] en recourant à cette technique. La structuration hors plan du silicium est donc bien connue et maitrisée, certains utilisent déjà ces méthodes pour fabriquer des couches minces de silicium tournées de 90° par rapport au substrat [30].

Pour des matériaux monocristallins comme le niobate de lithium, la tâche s'avère néanmoins plus difficile et les facteurs de forme accessibles pour ce matériau sont bien moins importants lors de l'utilisation des techniques classiques d'usinage. En effet, la gravure ionique réactive Reactive Ion Etching (RIE) sur le niobate de lithium permet d'accéder à des profondeurs de quelques micromètres avec des facteurs de forme de 1,5 et des flancs dont la surface n'est pas polie [31–37]. Il faut alors effectuer un recuit à haute température (typiquement autour de 1000 °C) pour lisser les flancs des structures. Cette méthode permet de réaliser une structuration hors plan avec des motifs variés mais ne convient pas pour la réalisation de structures à très hauts facteurs de forme (>100), comme le montre la figure 1.5 représentant une structure de ruban gravée par RIE. Une des méthodes les plus employées pour réaliser une structuration tridimensionnelle sur le niobate de lithium est l'utilisation de la gravure par FIB qui permet d'obtenir des facteurs de forme de 50 [38, 39] mais toujours avec une conicité résiduelle d'environ 4° [40]. Les flancs de struc-

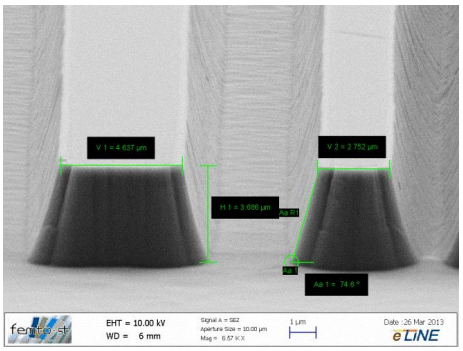


FIGURE 1.5 – Structures de rubans gravées par RIE. Hauteur des rubans : 3,8 µm, largeurs : 4,6 µm et 2,7 µm

tures réalisées par FIB ont une meilleure rugosité que celle des flancs des structures réalisées par RIE [32]. Un inconvénient majeur de la gravure par FIB tient à sa nature non collective. Il est en effet difficile de réaliser des tranches fines de niobate de lithium sur des longueurs millimétriques. Une dernière méthode pour graver profondément le niobate de lithium exploite la gravure humide, le plus souvent à l'aide de solutions à base de HF. Cette méthode de gravure ne permet pas d'obtenir des rapports de forme très importants (de l'ordre de 10) mais elle présente l'avantage de pouvoir graver le matériau sur plusieurs dizaines de micromètres de profondeur [41, 42]. Il est possible de modifier localement les propriétés du niobate de lithium pour le rendre plus sensible aux produits de gravure, ainsi le masquage physique (le plus souvent par une couche de nickel) n'est plus nécessaire. La réalisation d'un échange protonique sur les surfaces à graver permet par exemple de modifier localement la vitesse de gravure notamment pour des solutions d'acide fluorhydrique (HF, HF/HNO_3) [43], de même que la diffusion de nickel [44]. Ces modifications locales sont aussi utilisées pour les gravures de type RIE, comme le montrent Jun *et al.* [45]. De plus, dans le cas particulier du niobate de lithium, il existe une différence de vitesse de gravure entre les côtés Z+ et Z- du cristal, c'est pourquoi il est intéressant d'inverser localement la polarité du matériau ferroélectrique (voir section 1.5.3.1) pour créer diverses formes de gravure [46, 47]. Cependant, les flancs de gravure ne sont pas verticaux et ne sont pas polis, interdisant la réalisation de structures fines et hautes.

Toutes ces méthodes présentent des avantages et des inconvénients, mais aucune ne permet à l'heure actuelle la réalisation de structures à très haut rapport de forme (>100) pouvant se substituer à des couches monocristallines dans le plan. Pour obtenir des couches minces verticales à très haut rapport de forme, une autre voie a été investiguée, permettant d'obtenir des rapports de forme supérieurs à 300, avec une épaisseur de niobate minimale de l'ordre du micron et un poli optique des flancs. Cette méthode de fabrication fait appel à une scie diamantée de précision. Pour notre étude, il s'agit d'une scie DISCO DAD 3350. Ce mémoire décrit l'ensemble des structures réalisées durant le projet avec cette méthode de fabrication.

1.4/ STRUCTURATION HORS PLAN PAR DÉCOUPE À LA SCIE DIAMANTÉE

La découpe à la scie diamantée est un procédé bien connu lorsqu'il s'agit de séparation de puces, notamment en microélectronique. Ces scies circulaires sont conçues pour réaliser des tranchées dans un grand nombre de matériaux avec une précision micrométrique et une excellente reproduc-

tibilité. Ces machines utilisent des lames à âmes métalliques ou résinoïdes imprégnées de grains de diamant en nombre et en taille plus ou moins élevés. Cela permet de découper des matériaux utilisés en microtechniques, comme par exemple le silicium, le quartz, la langasite (LGS), le niobate de lithium, le tantalate de lithium ou encore le verre. Les qualités de découpe dépendent de la dureté et de la fragilité d'un matériau, paramètres variant selon la direction de coupe pour les matériaux anisotropes, ainsi que les paramètres de découpes (vitesses d'avance et de coupe de la lame). Pour les besoins en optique, les fabricants de scies diamantées ont développé des lames permettant de polir les flancs lors de la découpe, ce qui permet entre autres d'injecter un faisceau lumineux dans le matériau en minimisant les pertes de propagation [48–52]. Après un développement technologique ayant permis d'obtenir des rugosités de surface de 4 nm RMS sur le niobate de lithium et le tantalate de lithium [50, 53], il s'est avéré possible de fabriquer des structures ayant des propriétés de guidage et de confinement d'ondes acoustiques et optiques en réalisant un barreau de matière formé par deux traits de scie espacés de la largeur de celui-ci. Ces machines de sciage peuvent découper les matériaux mentionnés plus haut sur des épaisseurs allant de quelques micromètres à quelques millimètres, avec une précision sur les déplacements de la lame dans les trois directions de l'ordre du micromètre. Ces capacités de découpe permettent la réalisation de structures à hauts facteurs de forme de quelques micromètres de largeur sur des profondeurs importantes (typiquement de l'ordre de l'épaisseur des wafers utilisés – 0,5 mm ou 1 mm –) et de réaliser ainsi des couches fines (de quelques micromètres d'épaisseur) de matériau monocristallin de qualité équivalente à celle du matériau massif tournées de 90° par rapport au wafer. Le chapitre deux de ce manuscrit est entièrement consacré à cette méthode de fabrication.

1.5/ Composants innovants à hauts facteurs de forme sur niobate de lithium

Comme décrit dans les sections précédentes, la vocation de ces technologies consiste à créer des structures de type barreau ou plus génériquement à hauts facteurs de forme naturellement adaptées aux confinements et aux guidages d'ondes nécessaires pour transcender les caractéristiques opérationnelles des résonateurs acousto-électriques, des guides d'ondes optiques et des structures électro-optiques actuels. Ces technologies pourraient s'appliquer aux domaines de la télécommunication ou de l'aérospatial avec notamment une amélioration des composants passifs pour le traitement du signal (oscillateurs, filtres, modulateurs, etc.) et les capteurs optiques ou à ondes élastiques, avec des structures inédites (par exemple des cristaux photoniques 3D, des micro-rubans ou micro-résonateurs, des guides photo-inscrits) capables de supporter des conditions opératoires extrêmes et très sensibles aux paramètres environnementaux (capteurs). Ces micro-rubans réalisés dans du niobate de lithium ouvrent la voie au développement de capteurs innovants (capteurs de champs électriques, capteurs physico-chimiques, ou spectromètres intégrés) très compacts, permettant l'analyse en temps réel de gaz ou de liquides. Après l'investigation des structures dans leurs domaines respectifs, il faut ajouter la possibilité de coupler les détections optiques et acoustiques pour une analyse plus complète des environnements à caractériser.

1.5.1/ Composants acousto-électriques

Les composants acousto-électriques font appel aux ondes élastiques se propageant à la surface – Surface Acoustic Waves (SAW) – ou dans le volume du matériau – Bulk Acoustic Waves (BAW) – pour la réalisation de résonateurs, structures privilégiées pour transmettre l'information utile par liaison radio-fréquence car le phénomène de résonance favorise les fonctions simultanées de mesure et de transmission. Des filtres acoustiques sont réalisés sur niobate et tantalate de lithium pour atteindre des fréquences de travail de la centaine de MHz à plus de 2 GHz, avec un coefficient de couplage compris entre 5 et 20 %, couvrant en grande partie la demande actuelle. Nombre de ces composants utilisent des transducteurs à peignes interdigités pour la génération d'ondes de surface (voir section 1.5.1.2) mais cette technologie s'avère mal adaptée à des applications haute température. En effet, des phénomènes de coalescence, d'électro-migration ou encore de délaminage sont observés, ce qui entraîne des effets désastreux sur l'intégrité du transducteur [54]. Ce phénomène est moindre pour les dispositifs à ondes de volume qui utilisent des électrodes homogènes, déposées en surface du matériau (voir section 1.5.1.3) siège de la propagation élastique [55, 56]. Ces résonateurs robustes, capables de travailler à des fréquences élevées dans des environnements sévères héritent en contrepartie d'une difficulté intrinsèque à leur fonctionnement : la maîtrise de l'épaisseur du matériau. Ces dispositifs sont très sensibles à l'homogénéité de l'épaisseur de matière et il apparaît compliqué de maîtriser des épaisseurs inférieures à la dizaine de micromètres par rodage/polissage et donc de réaliser des dispositifs travaillant à plus de 100 MHz. Les procédés de fabrication de couches minces énoncés à la section 1.2 ont permis la réalisation de résonateurs à hautes fréquences (supérieures au GHz), mais ne permettent pas de couvrir les bandes dites «Industrielle, Scientifique, Médicale (ISM)» utiles à la télé-interrogation de capteurs passifs (434 MHz, 866 MHz, 915 MHz). Des applications à hautes fréquences sont également développées à base de films minces polycristallins (ou partiellement épitaxiés) [57] et exploitent là aussi des modes de volume. Si les fréquences de travail sont ici assez élevées (typiquement de 1 à 10 GHz), le choix dans les propriétés des modes est limité par les capacités technologiques de dépôt des films [22]. Un nouveau type de réalisation doit être également mentionné ici, fondé sur des structures micro-usinées sur silicium. Des résonateurs à excitation électrostatique commencent effectivement à être produits industriellement permettant de réaliser des sources de fréquence de qualité intermédiaire mais à fort potentiel d'amélioration [58, 59]. Pour les filtres, ce type de développement reste néanmoins marginal. Pour les capteurs, les résonateurs à ondes de surface et à ondes de volume occupent les principaux créneaux commerciaux. En outre, la nature passive des composants piézoélectriques les rend avantageux du fait qu'il peuvent être interrogés à distance sans fils ni batteries embarqués. Ces derniers nous intéressent particulièrement ici car les capacités de découpe de la scie diamantée permettent d'ouvrir de nouvelles perspectives pour les capteurs à ondes de volume aux fréquences intermédiaires situées dans les bandes ISM et nécessitant des couches minces entre 1 µm et 10 µm.

1.5.1.1/ Introduction à la piézoélectricité

Historique et principes généraux de la piézoélectricité

La découverte de la piézoélectricité remonte à 1880, par les frères Pierre et Jacques Curie, avec la démonstration de l'existence de l'effet piézoélectrique direct. Ce phénomène de polarisation électrique survient lorsque une contrainte est appliquée sur un matériau possédant cette propriété, à la différence de l'effet piézoélectrique inverse, qui consiste à déformer un matériau en lui ap-

pliquant un champ électrique. Ce second effet a été annoncé par Gabriel Lippmann, un an après la découverte des frère Curie, par l'intermédiaire d'un calcul thermodynamique. Les frères Curie vérifient alors l'existence de ce phénomène et montrent le caractère piézoélectrique du Quartz, de la Tourmaline, du Topaze. Le terme de piézoélectricité sera proposé par Wilhelm Hankel en 1881, avec pour racine le Grec «piezin» qui signifie «presser». La piézoélectricité ne trouvera aucune réelle application jusque dans les années 1910, après la publication par Woldemar Voigt des 20 classes cristallines piézoélectriques et de la définition rigoureuse des constantes piézoélectriques dans le formalisme de l'analyse tensorielle. Les équations constitutives de la piézoélectricité définissent le comportement des matériaux piézoélectriques, avec T_{ij} les contraintes mécaniques, E_k le champ électrique, S_{ij} la déformation électrique relative, D_k le déplacement électrique, S^E_{ijkl} la souplesse élastique évaluée à champ électrique constant, d_{ijk} le coefficient piézoélectrique traduisant la relation charge/contrainte et ε^T_{ij} la permittivité électrique évaluée à contraintes mécaniques constantes.

$$S_{ij} = s^E_{ijkl} T_{kl} + d_{kij} E_k \tag{1.1}$$

$$D_i = d_{ikl} T_{kl} + \varepsilon^T_{ik} E_k \tag{1.2}$$

Durant la première guerre mondiale et suite au naufrage du TITANIC, Paul Langevin utilisa les propriétés piézoélectriques du quartz pour réaliser le premier sonar composé de lames de quartz collées entre deux plaques d'acier [60] afin de détecter les obstacles sous-marins. Ce montage permettait de calculer la distance à laquelle un objet se trouvait, en mesurant le temps écoulé entre l'émission d'une onde acoustique et la réception de son écho. Cette invention marqua le départ de l'utilisation de la piézoélectricité hors des laboratoires.

Utilisation de l'effet piézoélectrique dans les systèmes résonants à ondes élastiques

Les matériaux piézoélectriques peuvent se classer en deux grandes catégories :

- Les matériaux naturels : le plus connu étant le quartz, mais aussi le topaze et la tourmaline.
- Les matériaux synthétiques : très nombreux et très fréquemment utilisés de nos jours, avec des céramiques de type Titano-Zirconate de Plomb (PZT), des monocristaux synthétiques tels que le niobate de lithium $LiNbO_3$, le tantalate de lithium $LiTaO_3$ ou encore la langasite $La_3Ga_5SiO_{14}$. Historiquement, le sel de Rochelle ou de Seignette, du nom de son inventeur, fut le premier cristal piézoélectrique synthétisé dans les années 1675, il était fortement piézoélectrique mais sa tendance à se désagréger dans les atmosphères humides lui fait préférer d'autres types de cristaux pour les applications acoustiques.

Dans les années 1920, Walter Cady mit au point le premier oscillateur à quartz, ouvrant ainsi la voie à la synthèse de fréquence utilisant des résonateurs à ondes élastiques. Pour ce type de dispositif, une onde est piégée dans une cavité acoustique lui conférant un régime stationnaire. Le phénomène de résonance se produit lorsque l'onde élastique est réfléchie en phase par les parois de la cavité, générant ainsi des interférences constructives. La mesure de l'admittance d'un résonateur permet de visualiser les fréquences pour lesquelles il y a résonance, notée f_r. Se produit alors une augmentation rapide de la valeur de sa conductance, comme le montre la figure 1.6. L'anti-résonance est la fréquence pour laquelle la résistance est maximale – notée f_a –, ainsi, le couplage électromécanique sera donné par l'écart entre les fréquences de résonance et d'anti-résonance,

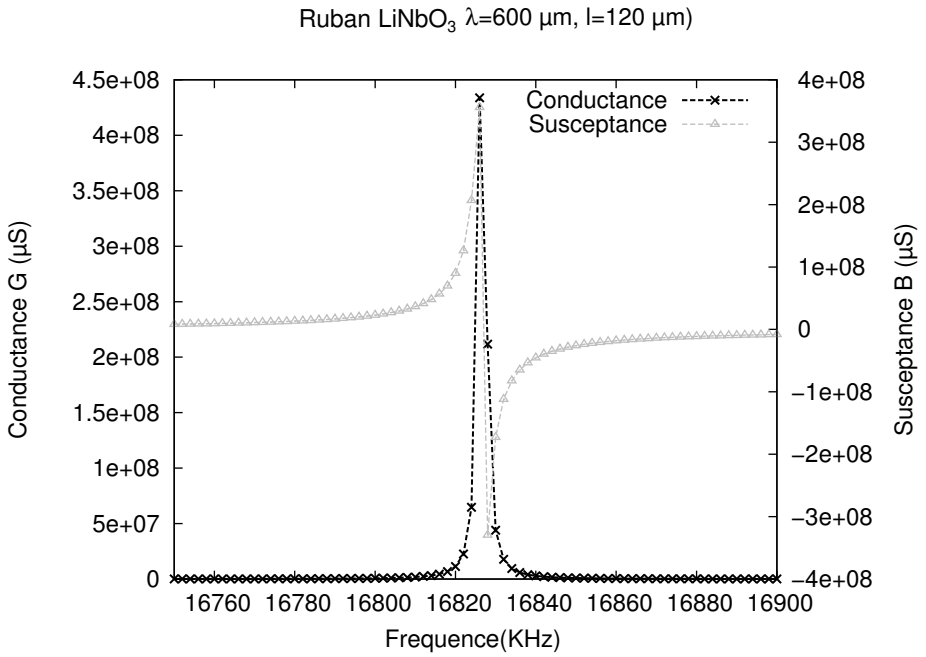


FIGURE 1.6 – Exemple de variation de conductance et de résistance au voisinage de la fréquence de résonance

comme approché par dans l'équation (1.3) dans le cas de modes isolés spectralement.

$$k^2 \approx 1 - \left(\frac{f_r}{f_a}\right)^2 \tag{1.3}$$

D'un point de vue physique, le couplage électromécanique k^2 définit la capacité du matériau piézoélectrique à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique et inversement. Plus ce rapport se rapproche de 1, meilleure est la conversion d'énergie. D'un point de vue électrique, un résonateur à onde élastique correspond à un montage tel que le montre la figure 1.7, comprenant une capacité statique C_0 due aux phénomènes purement électrostatiques induits par le principe d'excitation (des électrodes en regard au travers d'un milieu diélectrique), et les paramètres dits motionnels R_m, L_m et C_m correspondant aux caractéristiques de la résonance, à savoir son amplitude, la largeur du pic de conductance, l'écart entre la résonance et l'antirésonance et la ligne de base aux alentours de la fréquence de résonance.
Ainsi, les propriétés piézoélectriques de certains matériaux seront utilisées pour générer des ondes via des électrodes déposées sur leur surface puis excitées par un champ électrique. Dans ce cas de figure, on parle de résonateurs à ondes de volume ou à ondes de surface, selon la manière dont se propage l'onde au sein du matériau.

1.5.1.2/ LES RÉSONATEURS À ONDES DE SURFACE

Les résonateurs à ondes élastiques de surface sont des dispositifs à la surface desquels se propage une onde dont l'amplitude décroît avec la profondeur. Ce type d'onde a été mis à jour par John William Strutt Rayleigh en 1885 et sera nommé onde de Rayleigh. Cette onde possède une composante longitudinale et une composante transversale en quadrature de phase ce qui

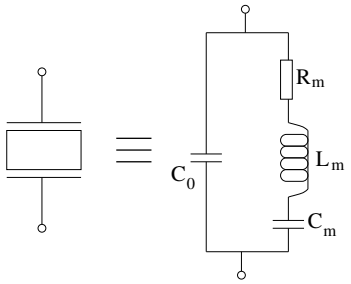


FIGURE 1.7 – Schéma électrique équivalent d'un résonateur à ondes élastique, dit de Butterworth-Van Dyke

lui confère sa structure elliptique. L'onde de Love, découverte quant à elle par Augustus Edward Hough Love et démontrée mathématiquement en 1911 présente une polarisation horizontale de cisaillement. Ces deux types d'ondes sont présentés sur la figure 1.8. Les dispositifs utilisant des

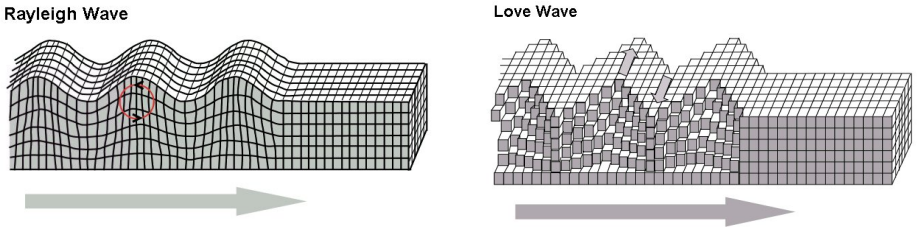


FIGURE 1.8 – Schéma des déformations engendrées par les ondes de Rayleigh (a) et par les ondes de Love (b)

ondes élastiques de surface sont apparus en 1965 avec White et Voltmer, avec un type d'excitation qui fait depuis le succès de ce type de dispositif : les transducteurs à peignes interdigités – Inter-Digitated Transducer (IDT). Leur fabrication consiste à déposer à la surface d'un substrat piézoélectrique des électrodes possédant des doigts interdigités arrangés périodiquement, comme le montre la figure 1.9, puis à les exciter via un signal alternatif à la fréquence de synchronisme fixée par la vitesse de phase de l'onde divisée par la période électrique du transducteur. Les pre-

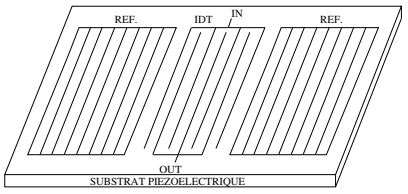


FIGURE 1.9 – Principe d'un résonateur SAW simple

miers dispositifs utilisant cette technologie ont été réalisés sur quartz mais aujourd'hui, des substrats tels que la langasite, le niobate de lithium, le tantalate de lithium sont également exploités. Il existe aussi des dispositifs réalisés sur substrats multi-couches, tels que l'oxyde de zinc sur silicium [61], le nitrure d'aluminium sur diamant [62]. Les substrats multi-couches permettent notamment de confiner l'énergie des ondes en surface, mais aussi de modifier leur vitesse et leur sensibilité à la température [63]. La nature dispersive de ce type de dispositifs les rend cependant plus délicat à mettre en œuvre que ceux sur monocristaux homogènes.

La fréquence de travail d'un dispositif utilisant les ondes de surface dépend de la période des peignes interdigités et des propriétés du substrat sur lequel il est réalisé. De nombreux efforts ont donc été fournis pour réduire ces motifs lors de l'étape de photolithographie. Aujourd'hui, ce type de dispositif permet d'atteindre des fréquences autour de 3 GHz, ce qui le rend très populaire dans le domaine des télécommunications (couverture des bandes Very High Frequency (VHF) et Ultra High Frequency (UHF) dans leur totalité). Pour obtenir de telles fréquences, la période des doigts des peignes interdigités est fixée aux alentours du micron, qui s'avère une étape technologique délicate. En effet, pour réaliser ce type de structure, deux méthodes sont possibles.

Dans la première, il faut tout d'abord insoler une résine photosensible préalablement déposée sur le substrat, puis révéler les motifs dans un bain révélateur. Ensuite, du métal est déposé sur l'intégralité du substrat, recouvrant ainsi les motifs en résine. Pour finir, la résine est dissoute dans un solvant, emportant avec elle le métal qui la revêtait ; cette étape est appelée «lift-off». Il ne subsiste alors du métal que sur les parties du substrat non recouvertes de résine.

La deuxième méthode consiste à déposer puis insoler de la résine après avoir recouvert le substrat d'une couche métallique. Le substrat est ensuite plongé dans un bain qui attaque le métal déposé à la surface non protégé par la résine. Il ne reste alors que le métal protégé par la résine. Cette méthode est dite de «gravure directe».

Les méthodes de gravure directe et de lift-off utilisent une insolation aux Ultra Violet (UV) de la résine. Pour des motifs au voisinage de la longueur d'onde de rayonnement UV exploité (par exemple 365 nm pour les photorépéteurs utilisés aujourd'hui dans le domaine des SAW), les phénomènes de diffraction peuvent induire des difficultés pour la réalisation des transducteurs. En pratique, ce genre d'appareil s'avère limité à des résolutions au voisinage de 300 nm.

Les dispositifs utilisant les ondes élastiques de surface pour le filtrage des bandes de fréquence ISM sont très répandus et fabriqués en grand nombre, notamment par les sociétés EPCOS, Fujitsu ou encore Murata. À titre d'exemple, les caractéristiques de ces dispositifs sont garanties entre -45°C et +125°C pour des résonateurs à 433,29 MHz de la société EPCOS montés en boitier céramique [64]. Des dispositifs sont proposés dans une gamme de fréquence allant de 72 MHz à 2655 MHz, utilisables en filtres dont la bande passante peut atteindre 11 % pour un niveau de pertes d'insertion de −2,5 dB et un niveau de réjection hors bande de 25 dB. Ces caractéristiques représentent la faisabilité industrielle des dispositifs à ondes de surface et du fait de leur fabrication en très grande série, un grand nombre de ces dispositifs se vend à quelques dizaines de centimes d'euros l'unité. Dans le cas spécifique du niobate de lithium, des dispositifs à ondes de surface – Longitudinal Leaky SAW (LLSAW) – présentent des vitesses de phase de $6100\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$, ce qui permet d'obtenir des filtres entre 2 GHz et 5 GHz avec une bande passante de 5 % et des pertes d'insertion de 3 dB [65, 66].

1.5.1.3/ Les résonateurs à ondes de volume

Les résonateurs à ondes de volume sont fondés sur l'excitation d'ondes se propageant à l'intérieur du matériau et non à sa surface, avec une fréquence dépendant directement de la nature du cristal piézoélectrique et de son épaisseur. Par nature, un cristal piézoélectrique va se déformer sous l'effet d'un champ électrique et ainsi générer une onde élastique réfléchie par les surfaces bordant le matériau. Le phénomène de résonance apparaît dans ce type de structure lorsque les ondes réfléchies aux interfaces se superposent avec les ondes incidentes et que l'épaisseur du matériau notée e est égale à un multiple entier d'une demi longueur d'onde. En pratique, la fréquence

de résonance d'un résonateur à ondes de volume se définit par la formule (1.4), où ν représente la fréquence de l'onde élastique de volume, c sa célérité et e l'épaisseur du matériau. Cette formule s'obtient en prenant une épaisseur de matériau $e = \lambda/2$, sachant que $\lambda = c/\nu$

$$\nu = \frac{c}{2e} \tag{1.4}$$

Cette équation montre que plus l'épaisseur de matériau est fine, plus la fréquence de résonance est élevée. La vitesse de phase de l'onde dépend quant à elle de la nature du matériau ; ainsi, une onde se propageant dans du quartz ne possède pas la même vitesse qu'une onde se propageant dans du niobate de lithium, à épaisseur égale.

Exemple simple : le résonateur à quartz

Les dispositifs à quartz se sont développés au début du XX$^{\text{ème}}$ siècle pour répondre à la demande de la téléphonie filaire. En ce sens, le professeur Walter Cady proposa en 1922 le résonateur à quartz comme élément de filtrage, ce qui marqua un tournant dans l'essor de cette technologie. Le schéma 1.10 montre le principe du résonateur à quartz, avec une lame de quartz montée entre deux électrodes métalliques. Une tension alternative est appliquée au dispositif, qui a pour effet de faire vibrer la lame à la même fréquence que celle du signal appliqué. Le but consiste à faire entrer en résonance le dispositif, pour obtenir une forte variation d'impédance, tant au niveau de sa phase que de son module. La vibration du cristal dépend des conditions aux limites présentes sur les faces de celui-ci, imposant entre autres qu'il soit libre de toute contrainte mécanique.

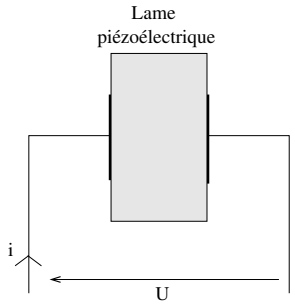


FIGURE 1.10 – Schéma de principe d'un résonateur à ondes de volume

État de l'art

Différentes configurations de résonateurs BAW existent et dépendent de la technologie de fabrication de la couche piézoélectrique. Il faut alors distinguer les résonateurs à films minces – Film Bulk Acoustic Resonators (FBAR) –, les résonateurs à modes harmoniques élevés – High-overtone Bulk Acoustic Resonator (HBAR) – ou encore les résonateurs à miroirs de Bragg – Solidly Mounted Resonators (SMR). Nous ne détaillerons pas leur modes de fonctionnement ici par souci de clarté mais nous donnerons les caractéristiques opérationnelles de quelques exemples.

Les résonateurs FBAR sont étudiés depuis les années 1980 et sont particulièrement adaptés aux fréquences de travail supérieures à 1 GHz. Le tableau 1.1 [67] montre les principales caractéristiques (couplage électromécanique, coefficient de qualité, vitesse de phase) de résonateurs FBAR sur AlN et ZnO. Les dispositifs fondés sur des films AlN possèdent une vitesse de phase

Matériau du résonateur	Couplage électromécanique (k^2)	Coefficient de qualité (Q)	Vitesse de phase ($m \cdot s^{-1}$)
AlN	6,5	2490	11000
ZnO	9	1770	6100

Tableau 1.1 – Récapitulatif des principales caractéristiques de résonateurs FBAR sur AlN et ZnO [67]

de $11\,000\,m \cdot s^{-1}$, tandis que ceux réalisés sur ZnO possèdent de couplage électromécanique de près de 10 %. Les FBAR commerciaux servent à réaliser des filtres acoustiques jusqu'à 2600 MHz possédant une bande passante atteignant 190 MHz [68]. Les résonateurs SMR permettent d'obtenir des résonances à plus hautes fréquences (aux alentours de la dizaine de GHz). Les coefficients de couplage atteignent les 5,5 % pour de tels dispositifs (à 7,4 GHz) [69]. Les résonateurs HBAR ont aussi permis d'atteindre des fréquences plus élevées et de maximiser le coefficient de qualité (défini comme la largeur du pic à mi-hauteur divisé par la fréquence du mode de vibration considéré) de la résonance jusqu'à obtenir des produits Qf de l'ordre de 10^{14} [70], tout en gardant un dispositif robuste. Ainsi depuis la réalisation au début des années 1980 d'un résonateur ZnO sur saphir avec un facteur de qualité de 7000 à plus de 7,6 GHz [71], un réel intérêt est porté à ces structures qui s'avèrent des solutions de résonateurs efficaces pour une gamme de fréquence de 1,5 GHz à 8 GHz.

Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients mais leur combinaison permet de couvrir une large gamme de fréquences, de couplages électromécaniques et de facteurs de qualité.

1.5.1.4/ Résonateurs verticaux à hauts facteurs de forme

Comme introduit dans les sections précédentes, le but des structures à hauts facteurs de forme est de réaliser une couche de quelques microns d'épaisseur, tournée de 90° par rapport au plan du substrat, permettant ainsi la réalisation d'un résonateur à ondes de volume sur plaque monocristalline. Les limites opérationnelles propres aux technologies planaires peuvent être ainsi contournées en amincissant le matériau selon ses dimensions latérales pour réaliser un résonateur sous forme d'un ruban attaché au substrat comme présenté figure 1.11. Selon ce principe, toutes

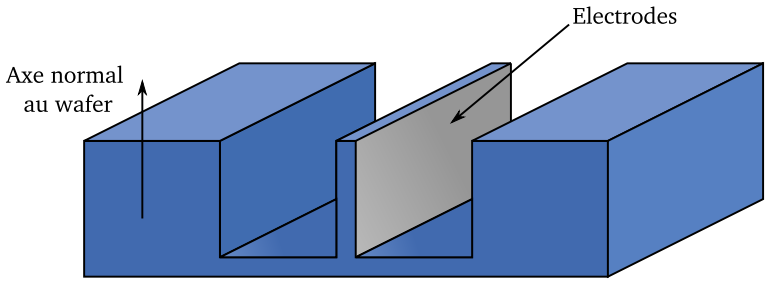


Figure 1.11 – Schéma d'un résonateur vertical

les coupes cristallines de matériaux piézoélectriques utilisables pour les applications d'ondes de volume peuvent être exploitées en tenant compte du fait que le barreau sera au final tourné de 90° par rapport à l'orientation angulaire retenue. Par exemple, l'exploitation de la coupe AT du quartz

(notée selon le standard IEEE Std-176 Révision 1949 [72] telle que (YXl)/36°) sera effectuée à partir d'une lame de quartz (YXl)/126 (ou encore (YXl)/-54 – coupe BT –). Le fait que la partie résonante soit attachée au substrat de façon rigide laisse penser qu'une partie importante de l'énergie élastique puisse être perdue par rayonnement. Des simulations par éléments finis/éléments de frontière [73] montrent que des structures à fort élancement (rapport d'aspect épaisseur sur largeur supérieur à 20) ne sont pas handicapées par un tel phénomène. Des travaux récemment menés sur des transducteurs ferroélectriques à domaines alternés (voir section 1.5.3.4) ont montré [74] que l'excitation latérale d'un tel transducteur permettait d'atteindre des couplages et surtout des vitesses effectives de propagation nettement supérieures (couplage > 20%, vitesse > 10 000 $m \cdot s^{-1}$) aux figures de mérite en vigueur.

1.5.2/ Composants optiques

Si l'intérêt des structures à hauts facteurs de forme décrites à la section précédente est manifeste pour les applications acoustiques, il en va de même dans le domaine de l'optique pour la réalisation entre autre de guides d'ondes. Les techniques de réalisation de couches minces en optique sont présentées en section 1.2 et présentent les mêmes difficultés en terme de qualité des états de surfaces et de maîtrise des épaisseurs et de leur homogénéité. Nous présenterons le guidage planaire d'ondes puis les avantages qu'offre la structuration de guides hors plan avec des géométries de rubans. Nous nous focaliserons particulièrement sur l'étude de guides d'ondes sur niobate de lithium.

1.5.2.1/ Guides d'ondes plans et de type «canal»

Confiner la lumière dans des volumes de matière codimensionnels à la longueur d'onde optique permet de travailler efficacement avec celle-ci, notamment pour des applications de capteurs, de modulateurs optique ou de filtrage de longueurs d'ondes utilisant des cristaux photoniques et des interactions électro-optiques. Un des moyens les plus accessibles pour confiner la lumière est le guide plan, pouvant être à gradient ou à saut d'indice – on entend ici l'indice de réfraction d'un matériau, grandeur sans unité qui détermine le comportement de la lumière dans celui-ci – comme représenté figure 1.12.

La réalisation d'un guide à saut d'indice consiste à obtenir une zone d'indice n_1 (cœur) déposée sur une zone d'indice n_2 appelée substrat. La zone située au dessus du milieu n_1 est appelé superstrat, elle est caractérisé par son indice n_3. Les conditions $n_1 > n_2$ et $n_1 > n_3$ doivent être vérifiées pour que la lumière reste confinée dans le cœur (voir figure 1.12) [75]. Les guides d'ondes

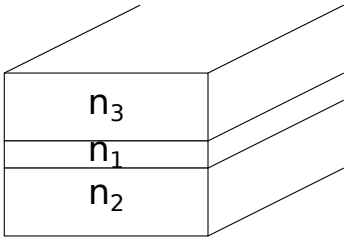


Figure 1.12 – Schéma d'un guide d'ondes optique plan à saut d'indice

à saut d'indice correspondent à un changement brusque de l'indice de réfraction, contrairement

aux guides à gradient d'indice qui, comme leur nom l'indique, consistent à faire varier l'indice de réfraction graduellement et continûment. Il existe deux manières courantes pour réaliser des guides plans :

- la modification de l'indice de réfraction à la surface d'un substrat en modifiant localement les propriétés du matériau, produisant des guides à gradient d'indice. Les méthodes les plus courantes pour réaliser ces guides sont la diffusion de titane, l'échange protonique, l'implantation ionique, l'inscription par laser et l'inscription par auto-focalisation [76]. Ces deux dernières méthodes peuvent – à la différence des autres – inscrire des guides optiques à des distances maîtrisées de la surface du matériau.
- le dépôt d'un matériau d'indice plus fort que le substrat par des méthodes telles que la croissance épitaxiale, le dépôt en phase vapeur ou encore par procédé sol-gel, qui permettent l'obtention des guides à saut d'indice [76].

La réalisation de guides de type canaux est similaire à celle des guides plans mais rajoute un guidage transversal afin de confiner le mode dans les deux directions. Les paragraphes suivants détaillent les méthodes d'obtention de guides d'ondes à gradient d'indice. Les guides d'ondes à saut d'indice sont quant à eux réalisés avec des couches dont la fabrication a été détaillée section 1.2.

La diffusion de titane

La méthode de diffusion de titane consiste à diffuser des atomes de titane dans les mailles cristallines proches de la surface afin d'augmenter localement l'indice de réfraction. La fabrication débute par le dépôt localisé du titane à diffuser par photolithographie et lift-off (ou gravure directe). Une fois la couche de titane déposée en surface du wafer, le métal est diffusé dans le cristal en soumettant celui-ci à des températures avoisinant les 1100°C. Il se produit alors une augmentation locale de l'indice de réfraction de l'ordre de 10^{-2} [77] suivant un gradient dont le profil est fonction de l'épaisseur de la couche de titane déposée, de la température et de la durée de diffusion [78]. Cette méthode de fabrication, illustrée en figure 1.13, permet d'obtenir des guides ayant des pertes de propagation inférieures à 0,03 dB · cm^{-1} à 1550 nm [79].

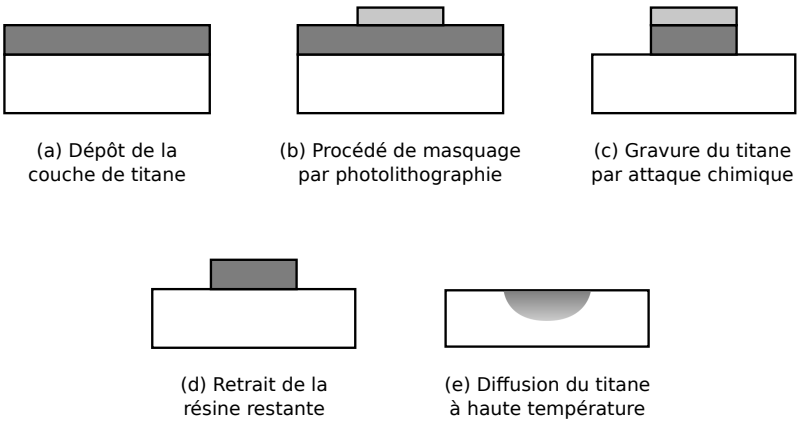


FIGURE 1.13 – Schéma de fabrication d'un guide canal en titane diffusé

L'échange protonique

L'échange protonique est une technique couramment utilisée pour réaliser des guides optiques dans le niobate de lithium [77]. Connu sous le nom d'Annealed Proton Exchange (APE), le procédé consiste à substituer les ions lithiums Li^+ en surface du wafer par des protons H^+ contenus dans un bain d'acide. La première étape de fabrication consiste à définir les motifs géométriques complémentaires des guides pour réaliser un masquage en silice par photolithographie et lift-off. Une fois les motifs réalisés sur le wafer, celui-ci est immergé dans un bain d'acide chauffé pendant une durée déterminée. La température et la durée de l'échange sont déterminantes dans l'obtention du profil d'indice du guide. Un recuit final permet de diffuser les protons concentrés en surface afin d'obtenir un profil de guide stable et de réorganiser la maille cristalline. De même que pour la diffusion de titane, le matériau subit une augmentation de l'indice de réfraction de l'ordre de 0,01 pour l'indice extraordinaire (mais une diminution de celui-ci de 0,04 pour l'indice ordinaire) selon un gradient défini par l'ensemble des paramètres utilisés [77]. Les pertes de propagation dans ce type de guide s'élèvent à $0{,}5\,\mathrm{dB}\cdot\mathrm{cm}^{-1}$ [80].

Implantation ionique

Cette technique consiste à créer, à une profondeur bien déterminée par rapport à la surface du substrat (de quelques micromètres), une couche de défauts diminuant l'indice optique permettant le guidage entre la surface et la couche implantée. L'implantation de divers ions tels que Si^+, He^+ et Ne^+ a montré qu'il est possible d'obtenir une différence d'indice supérieure à 0,1 [81]. Cette technique présente l'avantage de permettre la réalisation rapide de guides sur une grande variété de substrats mais les dommages créés par les rayonnements ionisants traversant la couche guidante diminuent considérablement sa qualité. En terme de pertes de propagation, cette méthode s'avère moins attrayante puisque celles-ci s'élèvent à $0{,}64\,\mathrm{dB}\cdot\mathrm{cm}^{-1}$ pour une implantation d'ion Si^+ [82].

Inscription par laser

Une approche moins conventionnelle pour la réalisation de guides consiste à modifier localement les propriétés du matériau en focalisant un faisceau laser à l'intérieur de celui-ci. Deux types d'inscriptions sont alors possibles et dépendent entre autres de la durée et de l'énergie des impulsions laser :

- L'inscription dite de type 1 apparaît en présence de durées d'impulsions ou d'énergies faibles (par exemple $0{,}2\,\mu\mathrm{J}$ et 220 fs [83]) et fait augmenter l'indice de réfraction. Le guide d'ondes optiques est donc créé au même endroit que la tâche focale du laser. Ce type d'écriture produit des guides d'ondes optiques de qualité conforme aux spécifications mais ne guide qu'une seule polarisation – Transverse Magnétique (TM) – et se détériore rapidement à des températures supérieures à 150°C [84].
- L'inscription de type 2 apparaît en présence de durées d'impulsions ou d'énergies faibles (par exemple $0{,}2\,\mu\mathrm{J}$ et 1,1 ps [83]) et crée au contraire une diminution de l'indice. Pour réaliser un guide, il faut alors faire plusieurs inscriptions les unes à côté des autres, la partie guidante étant alors située entre les inscriptions. Ce type de guide présente l'avantage de fonctionner pour les deux polarisations. [84]

Les mécanismes régissant l'augmentation ou la diminution de l'indice de réfraction sont encore discutés aujourd'hui [83–85]. Ainsi, des phénomènes photovoltaïques agissant sur les impuretés du $LiNbO_3$ [83], un changement local de la composition chimique du $LiNbO_3$ [83] ou encore un passage rapide de l'état cristallin à amorphe [84] seraient à l'origine de la modification de

l'indice du matériau. La modification d'indice ayant lieu lors de l'inscription de guides par cette méthode est de l'ordre de 3×10^{-3} [86]. Ces guides ont pour avantage de pouvoir être réalisés en trois dimensions contrairement aux guides canaux de surface précédemment décrits (par diffusion notamment) et permettent d'envisager d'autres géométries de dispositifs. Ils restent toutefois inférieurs ou équivalents à ceux-ci en terme de pertes de propagation avec des valeurs effectives de $0{,}6\,\mathrm{dB} \cdot \mathrm{cm}^{-1}$ [84, 86]. Un récapitulatif des caractéristiques des guides inscrits par laser dans le $LiNbO_3$ est donné par Lapointe [84] qui compare les pertes de propagation, les temps et énergies d'impulsions, les vitesses de déplacement de la tête d'écriture, les durées de vie des guides et leur résistance à l'augmentation de température.

Guides par auto-focalisation

Les guides auto-focalisés sont réalisés grâce à l'effet photoréfractif, qui consiste en une modification locale de l'indice de réfraction au passage de la lumière en raison d'une distribution non uniforme de charges électriques. Le faisceau lumineux modifie alors lui-même ses conditions de propagation. Cet effet peut être produit lorsque l'on injecte de la lumière dans un matériau dans lequel est établi un champ électrique homogène. La technique consiste alors à déposer des électrodes sur chaque face du niobate de lithium, puis à les alimenter avec une tension continue pour former un guide [87, 88]. Plus récemment, il a été montré que cette auto-focalisation pouvait être réalisée en utilisant l'effet pyroélectrique du niobate de lithium [89]. Cette dernière méthode utilise un module Peltier pour chauffer l'échantillon de niobate de lithium dans lequel le guide va être inscrit. L'effet pyroélectrique induit alors un champ électrique entre les deux faces du matériau et un guide peut ainsi être inscrit, après seulement quelques minutes, comme le montre la figure 1.14 [10]. Ce type de guide, relativement simple à réaliser, a une durée de vie limitée à quelques mois, après quoi il doit être réinscrit dans le matériau [10].

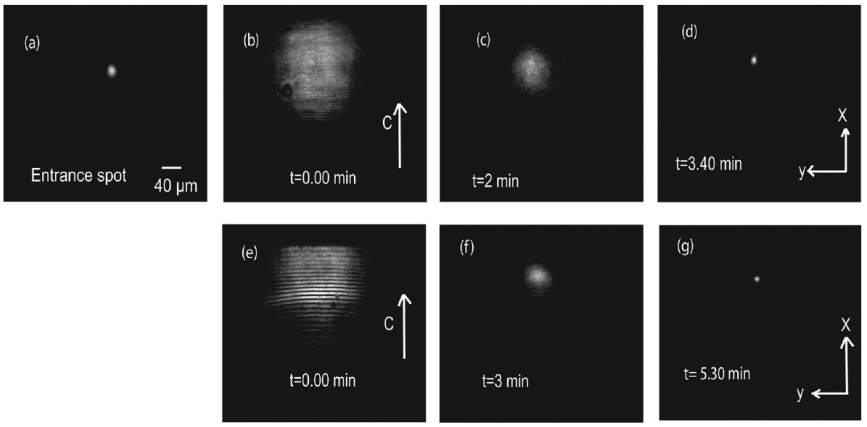


FIGURE 1.14 – Cinétique d'auto-inscription d'un guide optique utilisant l'effet pyroélectrique [10]

1.5.2.2/ GUIDES D'ONDES STRUCTURÉS À SAUT D'INDICE

Les guides d'ondes bidimensionnels à saut d'indice nécessitent de structurer le matériau pour en obtenir un ruban et créer ainsi une discontinuité d'indice optique, contrairement aux guides précédemment décrits. Ce type de structures permet d'obtenir un meilleur confinement de la lumière

que les guides à gradient d'indice grâce à la différence d'indice de réfraction entre deux milieux de nature différente (souvent matière/air), supérieure à celle engendrée par une modification locale d'un matériau unique (le contraste d'indice $LiNbO_3$/air est de 1,1 alors que les guides inscrits par les méthodes présentées à la section 1.5.2.1 présentent un contraste d'indice maximum de l'ordre de 0,1).

Gravure sur plaques

La méthode de réalisation de guides structuré en crête, appelés guides *ridge* en anglais, (voir figure 1.15) la plus courante consiste à graver une plaque de niobate de lithium sur une certaine profondeur (<10 µm) pour obtenir un ruban de matière, alors entouré d'air. Il existe plusieurs manières de graver le niobate de lithium mais pour chacune, le procédé est similaire et décrit figure 1.15. Il s'agit dans un premier temps de définir les zones à graver, soit en masquant les

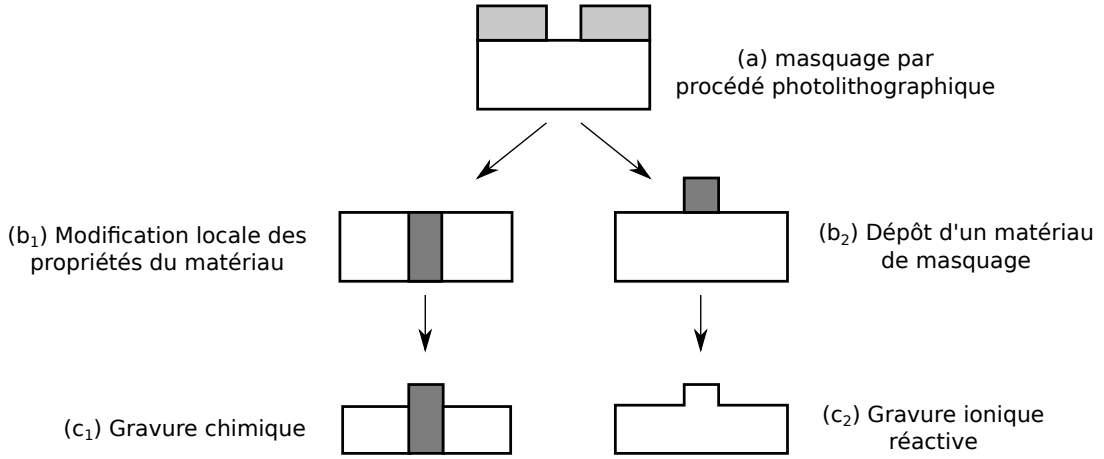


FIGURE 1.15 – Schéma de fabrication d'un ruban par gravure

zones à protéger, soit en modifiant localement le matériau pour le rendre plus ou moins sensible à la gravure [90]. Ainsi, un échange protonique peut être réalisé pour accélérer la gravure [45], la polarisation du niobate en coupe Z peut être modifiée localement (les directions Z^+ et Z^- ne se gravent pas à la même vitesse) [91], les zones à protéger lors d'une gravure humide ou par plasma réactif peuvent être masquées avec du nickel (voir section 1.3) ou avec une résine photosensible [42,92]. Ces méthodes permettent d'obtenir des formes de guides intéressantes mais sont en général très limitées en terme de profondeur de gravure (quelques micromètres). La rugosité des flancs est en général assez élevée ($R_q > 10$ nm), les structures nécessitent donc des traitements (en général thermiques) pour améliorer celle-ci et ainsi diminuer les pertes de propagation [36]. Dans cette configuration, le guidage dans la profondeur doit être assuré par une diffusion d'ions ou de titane (*cf.* paragraphes précédents) en surface. Le guidage est donc réalisé par saut d'indice dans le plan du substrat et par gradient d'indice dans la profondeur.

Réalisation de barreaux

Une méthode pour réaliser un guidage par saut d'indice dans les deux dimensions du mode optique consiste à réaliser un barreau de niobate de lithium sur un substrat d'indice inférieur. À

la différence du guide en crête, le guide barreau possède un saut d'indice sur toutes ses faces. Dans cette configuration, le mode optique est piégé dans la section du barreau, ce qui permet un confinement renforcé de la lumière. Les techniques pour réaliser ce type de structures sont limitées à cause des faibles épaisseurs de niobate de lithium requises pour obtenir un guide optique confiné (section du barreau inférieure à $10{\times}10\,\mu m^2$. La première méthode consiste à réaliser une couche de niobate de lithium par CIS (voir section 1.2.2.2) puis à la graver par des méthodes conventionnelles pour obtenir des guides à très forts confinements (jusqu'à $0{,}4\,\mu m^2$ [92]). L'utilisation de cette méthode donne lieu à des rugosités élevées ($R_q > 10\,nm$) qu'il faut réduire par la suite. Pour réaliser de tels rubans, une autre méthode consiste à déposer localement du niobate de lithium à la surface d'un substrat. Pour cela, les différentes méthodes de croissance citées à la section 1.2.2.3 peuvent être utilisées. En pratique il existe peu de réalisations efficaces fondées sur cette approche [21, 93, 94].

1.5.2.3/ Réalisation de guides par découpe à la scie de précision

Une dernière méthode pour réaliser des guides d'ondes optiques consiste (comme présentée en section 1.4) à réaliser des tranches de matériaux verticales. Cette approche permet alors de guider la lumière latéralement, elle est utilisée depuis le début des années 2000 pour la réalisation de guides optiques non linéaires pour la génération de seconde harmonique [95, 96]. L'utilisation de ces structures en optique linéaire nécessite la diffusion de titane pour guider la lumière verticalement, permettant l'obtention d'un guide d'ondes optiques confiné dans les deux directions. Ces tranches sont polies lors de la découpe, aucun traitement postérieur n'est donc à envisager pour améliorer l'état de surface des structures après leur réalisation. Les travaux récemment menés au sein de l'institut FEMTO-ST [50] ont montré qu'il est possible de réaliser des guides de section $6{\times}5{,}6\,\mu m^2$ dans des rubans de $6\,\mu m$ de largeur (pour une profondeur pouvant atteindre plus de $500\,\mu m$), avec des pertes de propagation de $0{,}5\,dB \cdot cm^{-1}$ [50]. Récemment, Ruter *et al.* a réalisé des structures à la scie de précision présentant des pertes de propagation de $0{,}1\,dB \cdot cm^{-1}$ [48]. Cette méthode ne nécessite pas de photolithographie et permet de fabriquer des dispositifs rapidement conduisant à sa démocratisation pour le guidage d'ondes optiques [97]. Ces structures sont néanmoins limitées par leur géométrie longiligne, par le caractère non collectif de la méthode de fabrication et par les dimensions latérales atteignables (1 µm pour les structures les plus fines). La figure 1.16 montre des ruban à hauts facteurs de forme fabriqués par cette méthode.

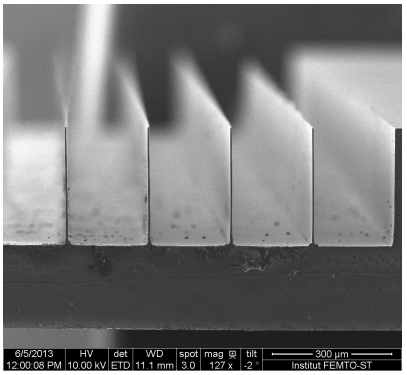


Figure 1.16 – Exemple de réalisation de guides rubans à hauts facteurs de formes [50]

1.5.3/ Composants hybrides

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, une structure découpée à la scie (combiné à des méthodes classique de confinement vertical pour l'optique) sur niobate de lithium permet d'obtenir un confinement des ondes optiques et élastiques similaire voir supérieur à celui des structures planes usuellement mises en œuvre. Ainsi, nous pensons que leur développement doit permettre une évolution des systèmes tirant parti de composants fondés sur ce type d'architecture. La conception de dispositifs hybrides (mettant en jeu plusieurs domaines de la physique) peut être envisagée en combinant les effets ferroélectriques, piézoélectriques et la capacité de guidage d'ondes des structures à hauts facteurs de forme. Les dispositifs utilisant des domaines ferroélectriques alternés sont bien connus des opticiens pour effectuer par exemple des opérations de doublage de fréquence [95, 96, 98]. De même, des travaux ont été menés [99, 100] autour de la génération d'ondes élastiques par excitation de domaines ferroélectriques alternés. Ces utilisations s'étendant sur plusieurs domaines de la physique seront décrites dans cette section, avec pour objectif de réunir dans un seul et même dispositif des interactions entre acoustique et optique.

1.5.3.1/ Introduction à la ferroélectricité

Présentation de l'effet ferroélectrique

Un matériau ferroélectrique se caractérise par la présence d'une polarisation spontanée sans application de champ électrique extérieur. Englobant le ferromagnétisme, la ferroélectricité et la ferroélasticité, le ferroïsme définit l'ensemble des matériaux qui possèdent deux états stables distincts et pouvant passer de l'un à l'autre via un cycle d'hystérésis. Chaque type de matériau ferroïque réagit à une grandeur physique différente ; l'aimantation d'un matériau ferromagnétique dépend donc du champ magnétique appliqué et la déformation mécanique d'un matériau ferroélastique suit un cycle d'hystérésis quand il est soumis à une variation de contrainte mécanique. Ainsi, la polarisation d'un matériau ferroélectrique suivra une courbe d'hystérésis dès lors qu'il sera soumis à un champ électrique. Pour la suite, nous appellerons p la polarisation spontanée d'un matériau, grandeur macroscopique représentative (et mesurable) d'un matériau ferroélectrique. D'un point de vue microscopique, la polarisation spontanée est donnée par l'ensemble des moments dipolaires présents dans le matériau du fait de la non centro-symétrie de ses mailles atomiques [101]. En effet, pour qu'un matériau soit ferroélectrique, les mailles cristallines qui le constituent doivent présenter une délocalisation de leur barycentre, comme le montre l'exemple du $BaTiO_3$ en figure 1.17 [102] de la famille des pérovskites. Les ions Ti^{4+} ne sont pas dans le plan des atomes d'oxygène, les charges ne sont donc pas équilibrées et engendrent ainsi un moment dipolaire permanent.

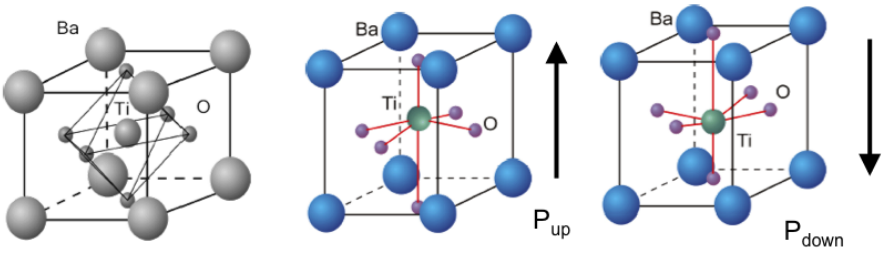


Figure 1.17 – Schéma de la maille de titanate de baryum $BaTiO_3$ [102]

Historique

À ses débuts, la ferroélectricité n'a remporté que peu de succès puisque elle a d'abord été découverte en 1921 via le sel de Seignette, un matériau complexe et peu commode à utiliser (voir section 1.5.1.1). Aucune application de la ferroélectricité n'a été mise au point à cette époque, le phénomène étant alors considéré comme *exotique* par la communauté scientifique. En 1935 la ferroélectricité retrouve un second souffle par la synthèse de toute la famille fondée sur les dihydrogènes de phosphates et d'arsenates dont le dihydrogèno phosphate de potassium, KH_2PO_4 (KDP). La structure de ces corps étant plus simple que celle du sel de Seignette, les tous premiers modèles microscopiques purent être développés. Le modèle de Slater, fondé sur la présence de liaisons «hydrogène» à l'origine de la ferroélectricité est ainsi proposé dès 1941. Ce modèle est très rapidement abandonné après la synthèse du titanate de baryum ($BaTiO_3$) par Wul et Goldman [103] qui montrent ainsi que la liaison hydrogène n'est pas une condition nécessaire à l'apparition de la ferroélectricité. La synthèse du $BaTiO_3$ est particulièrement importante car il s'agit du premier composé de la famille des pérovskites ferroélectriques à être mis au point. Cette famille de matériau très vaste comporte un très grand nombre de matériaux qui continuent à être exploités actuellement pour diverses fins (acoustique, optique, électronique). Le $LiNbO_3$ a quand à lui été synthétisé en 1966 et étudié dans les laboratoires Bell, il appartient à la classe cristalline trigonale (classe 3m) [104].

1.5.3.2/ Inversion périodique de polarisation

L'inversion périodique de polarisation consiste à inverser, au sein d'un cristal ferroélectrique, la direction de la polarisation spontanée du matériau, orienté initialement dans un seul et même sens. Par exemple, pour inverser la polarisation d'un cristal tel que le niobate de lithium ($LiNbO_3$), il faut arriver à faire migrer les atomes de lithium d'un côté à l'autre du plan formé par les atomes d'oxygène. Pour y parvenir, plusieurs méthodes ont été développées [99] mais peu d'entre elles sont utilisables pour la réalisation de domaines (volume d'un cristal ferroélectrique qui possède une orientation donnée de la polarisation) périodiquement polarisés. Cette partie ne s'intéressera qu'aux niobate et tantalate de lithium, matériaux particulièrement adaptés aux applications visés par l'intérêt de leur propriétés physiques (piézoélectricité, électro-optique, ferroélectricité, pertes intrinsèques minimales).

Les différentes méthodes d'inversion

La polarisation du niobate de lithium peut être inversée dès sa fabrication, lors du procédé de tirage «Czochralski», en faisant croître le cristal avec un dopant. En effet, Feisst et Koidl [105] montrèrent qu'en soumettant un cristal de niobate de lithium dopé au chrome à un champ électrique durant sa croissance, il était possible d'obtenir une inversion des domaines ferroélectriques. Les techniques d'inversion les plus courantes s'appliquent à des wafers de cristal dont l'orientation est uniforme (un seul domaine) et orientés selon l'axe Z (axe perpendiculaire au wafer).

La méthode d'inversion de domaine par exodiffusion de Li_2O sur la face Z^+ consiste à réaliser un masque de SiO_2 puis à recuire l'échantillon à plus de 900°C. Survient alors une perte de molécules Li_2O en surface qui engendre un retournement local des domaines ferroélectriques, la profondeur d'exodiffusion étant conditionnée par le temps de recuit. Deux inconvénients handicapent cette méthode : la nécessité d'un recuit à haute température (900°C) et la couche de silice utilisée pour

le masquage. Celle-ci doit être retirée par polissage mécanique une fois la polarisation effectuée car elle réagit avec le cristal à haute température ce qui la rend impossible à retirer par attaque chimique [106, 107].

Une autre méthode consiste à réaliser un bombardement électronique de la surface Z^-, ce qui crée un champ électrique dans le matériau. Le champ électrique induit un déplacement des ions Li^- et Nb^{5+} dans la direction Z^-, à travers les plans d'atomes d'oxygène [108, 109]. Si le champ électrique généré par le bombardement électronique est supérieur au champ coercitif du matériau alors la polarisation de celui-ci s'inverse localement. L'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas de masquage. De plus, la résolution des domaines peut atteindre 5 nm [110]. Cependant, cette technique ne permet d'inverser les domaines que sur quelques centaines de micromètres de long, ce qui la rend inadaptée pour réaliser des réseaux de domaines inversés de plusieurs millimètres (voire centimètres) sur une plaque de plusieurs centimètres de diamètre (100 à 150 mm).

Une dernière méthode consiste à appliquer un champ électrique dirigé selon Z– à température ambiante aux bornes du matériau à inverser [106]. Cette méthode engendre des domaines d'une précision moindre qu'avec le bombardement électronique mais permet d'inverser des surfaces de plusieurs centimètres carrés sur toute l'épaisseur du matériau en un temps très court (voir section 1.5.3.2). De plus, le fait que cette méthode soit applicable à température ambiante représente un réel avantage car le matériau ne risque pas de voir ses propriétés physiques altérées au voisinage de sa température de Curie (1200°C pour le $LiNbO_3$, 600°C pour le $LiTaO_3$). Pour réaliser une inversion de domaine selon cette méthode, il faut d'abord réaliser un masque *in situ* (en surface du substrat à polariser) avec une résine photosensible isolante, puis appliquer uniformément une différence de potentiel entre les faces Z^+ et Z^- du wafer. Les zones protégées par la résine ne seront pas inversées tandis que les autres le seront si la tension appliquée est supérieure au champ coercitif du matériau (21 $kV \cdot mm^{-1}$ pour les niobate et tantalate de lithium). Dans la plupart des cas présentés dans ce manuscrit, l'épaisseur du matériau fixée à 500 µm induit une tension d'inversion de 10,5 kV. Cette méthode sera utilisée pour réaliser l'ensemble des dispositifs présentés par la suite. Le montage expérimental donné en figure 1.18 consiste à maintenir un wafer de nio-

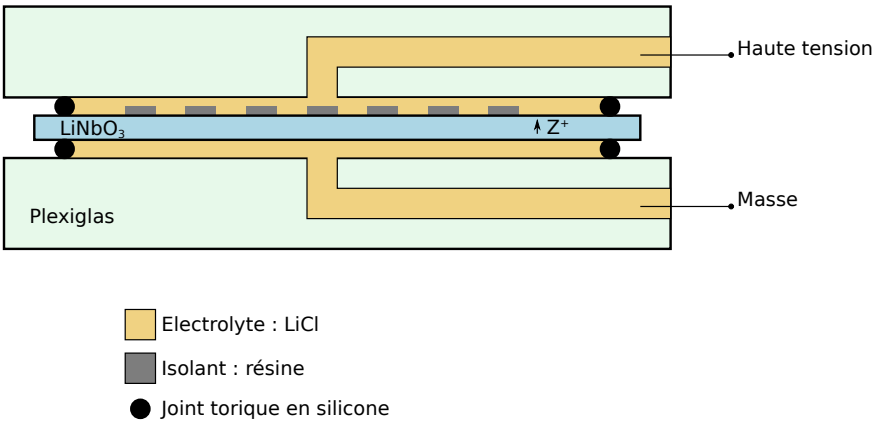


FIGURE 1.18 – Schéma du montage expérimental pour l'inversion de domaines ferroélectriques par application d'un champ électrique uniforme

bate de lithium (ou autre matériau ferroélectrique) entre deux plaques de plexiglas avec des joints toriques garantissant l'étanchéité. La cavité ainsi formée est remplie d'une solution de Chlorure de Lithium (LiCl) saturée servant d'électrolyte liquide. Le potentiel est ensuite appliqué entre les

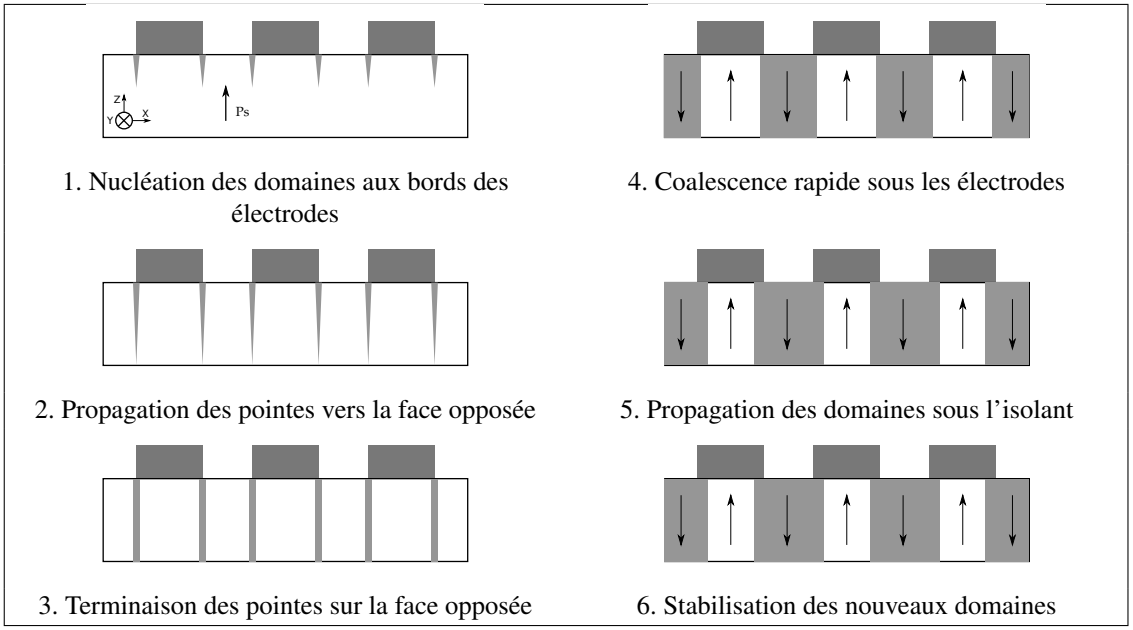


FIGURE 1.19 – Les six étapes de la cinétique d'inversion de domaines ferroélectriques

deux chambres contenant le chlorure de lithium, inversant ainsi les parties non protégées du wafer. Les zones sous l'isolant ne subiront aucune modification de leurs propriétés physiques. Le détail de la cinétique d'inversion est donné dans la partie suivante (1.5.3.2).

Cinétique d'inversion de domaines par application d'un champ électrique

Une étude de Miller *et al.* [111] montre que l'inversion de domaines ferroélectriques se déroule en six étapes successives, illustrées en figure 1.19.

- Après avoir placé le wafer à inverser entre les deux plaques de plexiglas et y avoir appliqué un potentiel, l'inversion de domaine débute par une nucléation aux bords des électrodes (1) lieu où le gradient de champ électrique est le plus intense. Dans une structure périodique à base de résine photosensible, le bord de l'électrode liquide se trouve à chaque interface résine–$LiNbO_3$–LiCl. Dans le niobate de lithium, un nucleus [106, 111] peut être représenté par une pyramide à base hexagonale avec sa pointe (ou sommet) située en-dessous du site de nucléation.
- Se produit alors une propagation des pointes (2) jusqu'à la surface opposée du matériau. Le rapport entre la vitesse de propagation de la pointe et la vitesse de croissance latérale d'un domaine est de l'ordre de 100 à 1000 [106] ; la croissance dans la direction Z est donc quasi-instantanée comparée à la croissance latérale.
- Ce n'est qu'une fois que les pointes arrivent à la surface opposée que les limites des domaines (appelées murs) deviennent verticales (3) et que commence véritablement la croissance latérale de l'inversion.
- A force de croître latéralement sous l'électrode, les domaines se rejoignent pour n'en former qu'un seul par phénomène de coalescence (4), de la largeur des électrodes.
- Une fois les domaines formés, ceux-ci continuent à croître latéralement et se propagent sous l'isolant (5), ce qui engendre des modifications du rapport cyclique entre zones inversées et non-inversées initialement fixé par le masque de résine. Cette étape délicate est impor-

tante pour la qualité des domaines inversés. Sa maîtrise est difficile du fait de la rapidité du phénomène [111] et des tensions importantes (>10 kV) mises en jeu. Cependant, il existe un phénomène d'auto-arrêt (*self-termination* en anglais) détaillé en réf. [111] qui stoppe naturellement la croissance des domaines sous l'isolant à champ électrique constant. Ce phénomène apparaissant après la croissance des domaines, il devient un gage de qualité de l'uniformité de l'inversion des domaines dans leurs dimensions verticales et horizontales.

– Une fois la croissance latérale des domaines achevée, une étape de stabilisation (6) est nécessaire pour éviter le rebond de polarisation (*backswitching* en anglais) [112]. Si une coupure de tension intervient sans latence, le rebond de polarisation se produit. Une étude de la cinétique de polarisation [111, 113] a montré toutefois que le maintien d'une tension de polarisation à une valeur égale au nouveau champ coercitif (17,5 $kV \cdot mm^{-1}$ pour $LiNbO_3$ et $LiTaO_3$) pendant un temps de latence donné (28 ms pour une plaque de 500 µm [99]) permettrait d'éliminer tout rebond de polarisation. Enfin, le transfert de charges entre les deux faces du matériau, signature de la polarisation, donne lieu à un passage de courant (mesuré en pratique lors de l'inversion) représentatif du succès de l'opération.

Cette étude de la cinétique d'inversion de domaine a permis de déterminer le profil de tension à appliquer au matériau pour réaliser l'inversion (*cf.* figure 1.20) [99] périodique des domaines ferroélectriques. La courbe présentée sur la figure 1.20 sera utilisée comme référence, avec comme paramètres modifiables les durées de la rampe et de la stabilisation, suivant la surface des domaines à inverser.

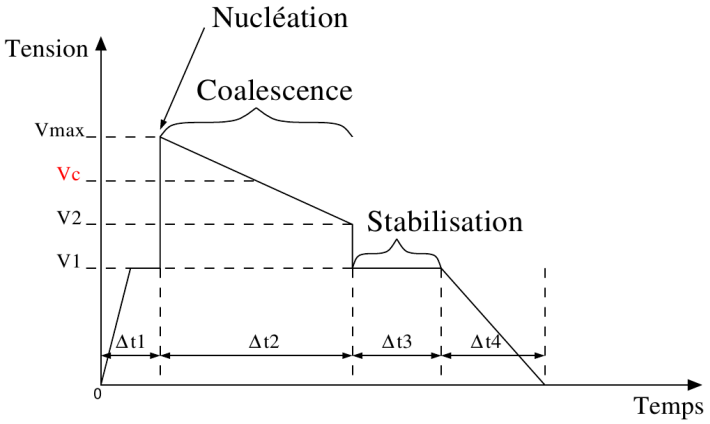
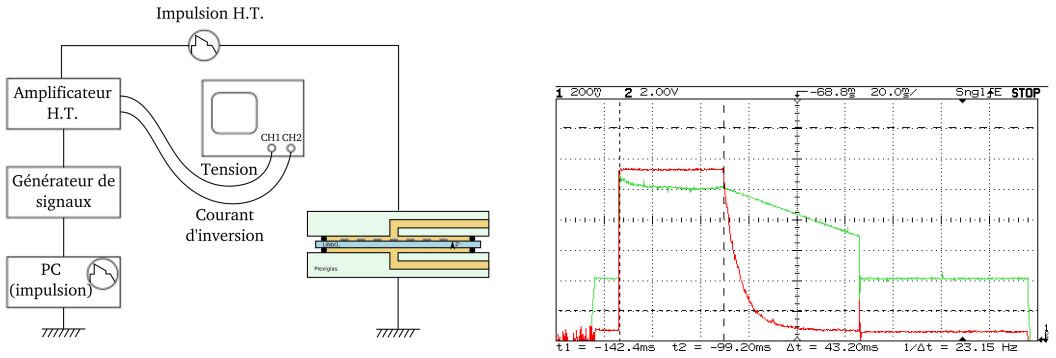


FIGURE 1.20 – Impulsion électrique type utilisée pour l'inversion de domaines ferroélectriques dans le niobate de lithium

Banc expérimental d'inversion de polarisation

Le banc mis en œuvre ici est inspiré de celui développé dans le cadre de la thèse de A. Martinez [106]. L'inversion de domaines ferroélectriques requiert des champs électriques élevés, un support spécifique pour les wafers, ainsi que la possibilité de générer puis d'appliquer des signaux arbitraires au matériau. Pour cela, nous utiliserons un amplificateur Haute Tension (HT) qui multiplie la tension de commande par 2000. Celle-ci est générée par un générateur de signaux (voir figure 1.21 (a)) piloté depuis un ordinateur pour obtenir la courbe d'inversion définie en figure 1.20. L'amplificateur haute-tension est directement relié au montage (voir figures 1.18 et 1.21 (a))



(a) (b)

FIGURE 1.21 – (a) Schéma de principe du banc de polarisation et (b) tension (en vert) et courant (en rouge) lors d'une inversion complète de domaines ferroélectriques

comprenant le matériau à inverser. Le générateur haute-tension délivre une image basse tension de l'impulsion reçue par l'échantillon (tension et courant), ce qui permet de contrôler l'état de l'inversion de domaine en la visualisant sur un oscilloscope. Un calcul des charges transférées lors de l'inversion est réalisé pour vérifier que l'inversion de domaine soit complète. L'image 1.21 (b) donne un exemple de tension et courant délivré lors d'une inversion de domaine (il s'agit d'un zoom sur la partie haute de la courbe de la figure 1.20).

1.5.3.3/ DISPOSITIFS À DOMAINES ALTERNÉS POUR L'OPTIQUE NON LINÉAIRE

L'utilisation la plus immédiate de l'inversion de domaines ferroélectriques sur niobate de lithium vise à la Génération de Second Harmonique (GSH) en optique non linéaire, aussi appelée doublage de fréquence [114]. Ce phénomène à été observé pour la première fois par Franken *et al.* en 1961 [115] et utilisait le principe d'accord de phase par biréfringence. Une seconde méthode consiste à utiliser du niobate de lithium polarisé périodiquement – Periodically Poled Lithium Niobate (PPLN) – pour modifier la longueur d'onde d'un faisceau optique lorsqu'il se propage à travers le cristal [116]. Cette dernière est appelée Quasi Accord de Phase – Quasi Phase Matching (QPM). Pour générer ce type d'interaction, la période d'inversion de domaines doit être réalisée en fonction de la fréquence à doubler selon l'équation (1.5) [117] où Λ est la période d'inversion de domaines, λ la longueur d'onde du signal optique d'entrée et n_e l'indice de réfraction du niobate de lithium aux longueurs d'ondes considérées.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2(n_{e(\frac{\lambda}{2})} - n_{e(\lambda)})} = 2l_c \tag{1.5}$$

Le terme l_c correspond à la longueur de cohérence optique, illustrée figure 1.22. L'utilisation de densités de puissances optiques importante (typiquement supérieures à $1 \times 10^5\,\mathrm{W \cdot cm^{-2}}$ [118]) dans des matériaux possédant un coefficient non linéaire du second ordre induit l'apparition d'une onde optique possédant une longueur d'onde deux fois supérieure à celle du faisceau incident [98] (second harmonique). La génération du second harmonique peut être optimisée en utilisant le quasi-accord de phase. Ce phénomène apparaît lorsque la longueur de retournement spatial des domaines est égale à la longueur de cohérence de l'onde optique [119]. Dans ce cas le transfert

d'énergie qui normalement change de sens à chaque longueur de cohérence est unidirectionnel (du signal pompe vers le second harmonique), comme le montre la figure 1.22 et l'intensité du second harmonique se trouve ainsi amplifiée. La théorie du doublage de fréquence n'est pas développée dans ce manuscrit, pour plus de détails, le lecteur pourra se référer à l'ouvrage de Martin M. Frejer [98].

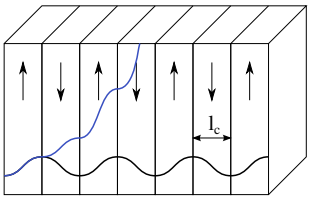


FIGURE 1.22 – Quasi accord de phase dans un PPLN

L'efficacité de conversion dépend du coefficient non-linéaire du second ordre du matériau [120]. À ce titre, le niobate de lithium est très utilisé pour cette application car son coefficient d_{33} est égal à $25\,\mathrm{pm}\cdot\mathrm{V}^{-1}$ [121] (en comparaison, le $LiTaO_3$ présente un coefficient de linéarité du second ordre d_{33} égal à $-21\,\mathrm{pm}\cdot\mathrm{V}^{-1}$ et celui du $KTiOPO_4$4 vaut $18{,}5\,\mathrm{pm}\cdot\mathrm{V}^{-1}$ [122]). Cette non linéarité du second ordre permet aussi d'effectuer la somme et la différence de fréquences [123–125]. En confinant les ondes optiques, il est possible d'augmenter l'efficacité de conversion (*cf* chapitre 5). Des rubans découpées à la scie de précision seront à ce titre étudiés dans le chapitre 5, pour des applications de doublage de fréquences.

1.5.3.4/ DISPOSITIFS ACOUSTO-ÉLECTRIQUES À DOMAINES ALTERNÉS

L'inversion de domaines ferroélectriques, largement utilisée en optique non linéaire, peut aussi servir à la réalisation de dispositifs à ondes élastiques. En effet, une fois la polarisation du matériau périodiquement inversée, il est possible d'exciter celui-ci à l'aide d'électrodes en regard. Se produit alors un phénomène d'interférences constructives pour certaines fréquences d'excitation, permettant ainsi de créer une onde stationnaire dans le matériau [126]. On peut alors faire l'analogie avec les dispositifs à ondes de surface excités par des peignes interdigités (voir section 1.5.1.2) comme le montre la figure 1.23. Un des avantages du Transducteur Polarisé Périodiquement (TPP)

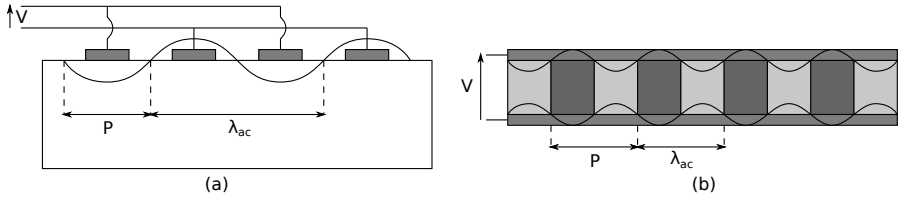


FIGURE 1.23 – Schéma de principe d'un transducteur (a) à peignes interdigités, (b) polarisé périodiquement

consiste à opérer – par nature – à une fréquence deux fois plus élevée que celle des transducteurs à peigne interdigités pour une même période d'excitation, du fait qu'il n'est pas nécessaire d'avoir de gap entre chaque domaine alterné. Le transfert de la périodicité du transducteur vers le cœur du matériau permet de résoudre partiellement le problème de fabrication de transducteurs interdigités submicroniques puisque le recourt à des électrodes pleines élimine en partie les sources de

court-circuit. Les transducteurs polarisés périodiquement possèdent des électrodes séparées par un diélectrique massif (le niobate de lithium), le risque de courts circuits lors de l'application d'une tension donnant lieu à des champs inférieurs au champ coercitif est donc fortement réduit – voire éliminé.

En terme de propriétés acoustiques, les TPPs sont là encore comparables aux dispositifs à ondes de surface, notamment en ce qui concerne les vitesses de phase et le couplage électromécanique. [100]. Les premières utilisations de TPP ont permis d'exciter des ondes à une vitesse de $6500\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ avec un couplage de 0.1 %, ce qui peut se comparer avantageusement aux ondes se propageant sur Quartz. Suite à la réalisation de premiers TPP sur des structures de type rubans à hauts facteurs de forme (voir figure 1.24), des analyses théoriques ont montré que ces structures peuvent atteindre des couplages supérieurs à 20 % pour des vitesses d'ondes de plus de $10\,000\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ [74]. Le chapitre 3 de ce manuscrit sera consacré au développement de ce type de structures, avec pour objectif la réalisation de filtres à large bande et plus généralement la réalisation de transducteurs polarisés périodiquement robustes à fort couplage, à vitesse équivalente de phase élevée, et pouvant fonctionner à 434 MHz, fréquence de la bande ISM.

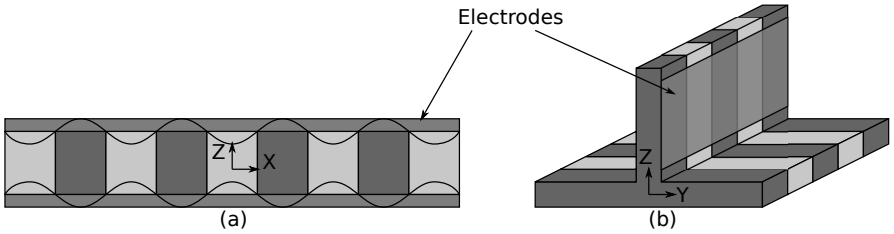


FIGURE 1.24 – Schéma d'un TPP planaire (a) et d'un TPP en crête (b)

1.5.3.5/ INTERACTION ÉLECTRO-ACOUSTO-OPTIQUE

L'objectif final des structures à très hauts facteurs de forme vise à la mise en évidence d'effets croisés entre acoustique et optique, engendrés par des effets électriques et ferroélectriques. Pour cela, il sera nécessaire de disposer d'un guide à hauts facteurs de forme intégrant des domaines ferroélectriques alternés, un guide d'onde optique et des électrodes pour exciter le dispositif. L'effet acousto-optique est connu et étudié depuis 1922 grâce à Léon Brillouin, qui a mis en évidence l'effet d'une onde élastique sur la propagation des ondes électromagnétiques (lumière et rayons X) [127]. L'effet alors utilisé est un cas particulier de la photoélasticité où un changement de la permittivité s'opère à cause d'une contrainte mécanique engendrée par l'onde élastique induisant ainsi une modification périodique de l'indice optique n. Cette modification se comporte alors comme un réseau vis-à-vis du faisceau lumineux qui peut alors diffracter la lumière sous certaines conditions [128]. Les interactions entre le faisceau lumineux et l'onde élastique dépendent (entre autres) de leur colinéarité.

Si l'onde électromagnétique est colinéaire à l'onde élastique, une diffraction liée à la biréfringence du matériau aura lieu pour la longueur d'onde λ telle que [129] :

$$\lambda = \frac{c\Delta n}{\nu} \tag{1.6}$$

avec c la vitesse de l'onde élastique, $\Delta n = |n_e - n_o|$ la biréfringence du matériau et ν la fréquence

de l'onde élastique. Ce type d'interaction entre l'onde élastique et optique donne lieux à une diffraction du faisceau optique pour des longueur d'ondes proches de celle déterminée par l'équation 1.6. Le signal optique diffracté possède alors une polarisation orthogonale au faisceau incident et son amplitude est maximale lorsque l'équation 1.6 est satisfaite [129]. Une variation de fréquence induit une variation de la longueur d'onde diffractée, il est alors possible de réaliser un filtre accordable moyennant la séparation des faisceaux optiques incident et diffracté via un séparateur de faisceaux polarisé.

Dans le cas où les ondes élastiques et optiques ne sont pas colinéaires, deux types de diffractions se distinguent selon les conditions de propagation du faisceau optique et d'excitation électrique du matériau. La diffraction de Bragg est le premier type de diffraction (*cf.* figure 1.25), que l'on rencontre généralement pour des fréquences d'excitation acoustique moyennes (supérieures à 25 MHz) et des longueurs d'interaction supérieures à 10 mm. La diffraction de Bragg ne se produit que pour un angle particulier noté θ_B, on définit alors l'angle de déviation du faisceaux lumineux θ_{dev} par la formule (1.7) où λ est la longueur d'onde du faisceau optique, ν la fréquence d'excitation de l'onde élastique, n l'indice optique du matériau à la longueur d'onde λ et c la vitesse de phase de l'onde élastique dans le milieu.

$$\theta_{dev} = 2\theta_B \simeq \frac{\lambda \nu}{nc} \tag{1.7}$$

La diffraction de Raman et Nath (*cf.* figure 1.26) constitue le second type d'interaction, ce type

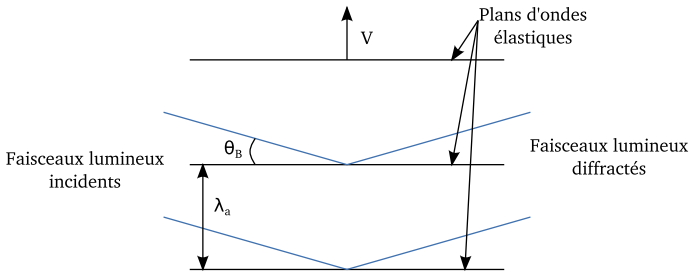


FIGURE 1.25 – Interaction de Bragg entre un faisceau lumineux incident et une onde élastique (inspiré de [128])

de diffraction apparaît pour des fréquences et des longueurs d'interaction faibles (typiquement L <10 mm et ν <10 MHz [128]). Contrairement au régime de Bragg, le faisceau incident est ici diffracté dans plusieurs directions qu'on appelle ordre de diffraction [128]. Pour déterminer le

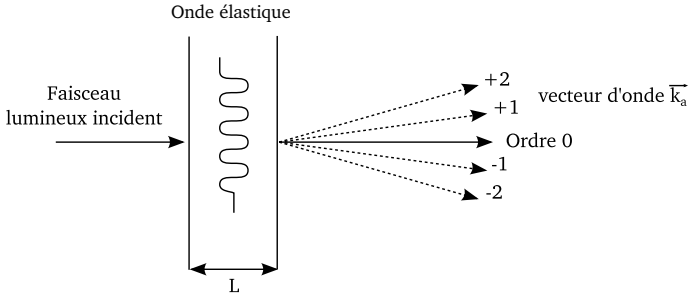


FIGURE 1.26 – Interaction de Raman et Nath entre un faisceau lumineux incident et une onde élastique (inspiré de [128])

régime de diffraction, on définit le paramètre de Klein-Cook Q par l'équation (1.8) où L est la longueur d'interaction acousto-optique :

$$Q = \frac{2\pi\lambda L\nu^2}{nc^2} \tag{1.8}$$

Si Q est inférieur à 1, alors on se trouve dans le régime de Raman et Nath, et si Q est supérieur à 7, on se trouve dans le régime de Bragg [129].

Dans le cas de structures à hauts facteur de forme polarisées périodiquement sur niobate de lithium, il est possible de tirer parti des deux configurations (colinéaire et non-colinéaire) en modifiant la direction d'injection de la lumière. Celles-ci sont représenté sur la figure 1.27.

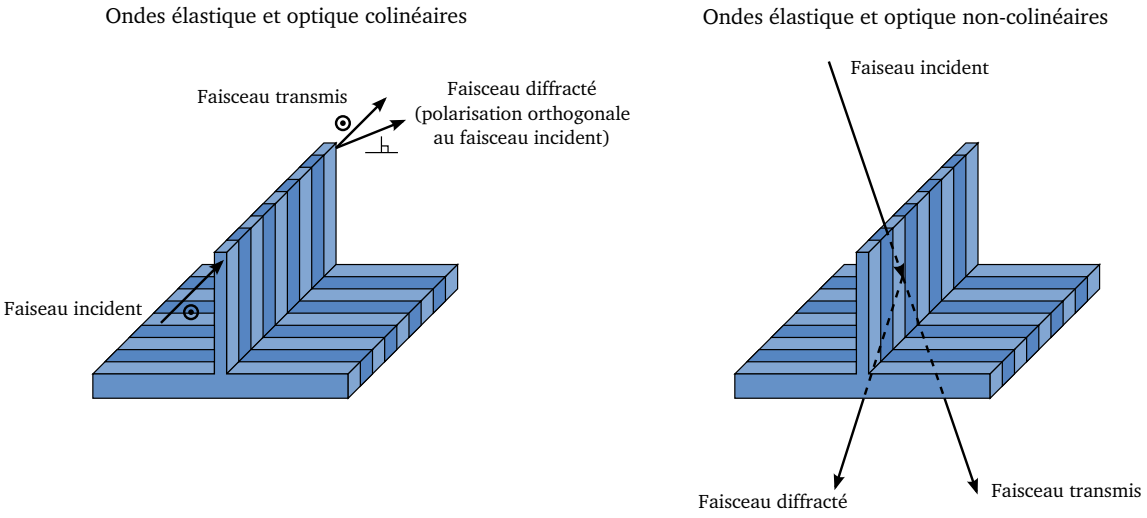


FIGURE 1.27 – Schéma représentant les deux configurations possible pour l'injection de la lumière dans une structure à hauts facteurs de forme polarisée périodiquement sur niobate de lithium

Dans le deux cas, nous bénéficierons d'un couplage électromécanique particulièrement élevé (>20 %, voir chapitre 3) ce qui signifie que la tension nécessaire à la génération d'une onde élastique sera plus faible que dans de nombreux matériaux biréfringents utilisés pour les interactions acousto-optiques. Ainsi, les dispositifs réalisés donnerons lieux à une réduction de la consommation électrique des filtres acousto-optiques. De plus, ce type de structure combinant couplage électromécanique élevé et couche polarisée périodiquement peut être réalisée uniquement via la méthode de découpe à la scie de précision et révèle ainsi le caractère innovant de celles-ci. Les dispositifs actuellement commercialisés comme les modulateurs acousto-optiques, les déflecteurs acousto-optiques, ou les filtres acousto-optiques [130] utilisent généralement des transducteurs piézoélectriques externes pour former une onde élastique à laquelle est superposée une onde optique [131]. Des dispositifs de génération de seconds harmoniques accordables utilisant des ondes élastiques générées via l'excitation de domaines ferroélectriques inversés ont aussi été étudiés [132]. En pratique il n'existe que peu de démonstrations de systèmes utilisant du niobate de lithium périodiquement polarisé pour générer une onde acoustique interagissant avec l'onde optique [133, 134] et aucunes d'entre elles ne met en jeu des guides d'ondes élastiques tels que ceux que nous réalisons par découpe à la scie diamantée.

1.6/ Conclusion

Les méthodes planaires permettent la réalisation de nombreux dispositifs en optique ou en acoustique, notamment avec les couches de niobate de lithium monocristallin. Ces couches sont utilisées pour réaliser des dispositifs à ondes élastiques de volume ou de surface ainsi que des guides d'ondes optiques, permettant ainsi la réalisation de filtres ou de capteurs, utilisables dans un grand nombre d'environnements et de domaines. Cependant, obtenir des couches minces de quelques micromètres avec une régularité et un état de surface compatibles avec les applications visées et à bas prix s'avère techniquement compliqué. Nous nous intéressons donc à la structuration hors plan, permettant de réaliser des couches de quelques micromètres de largeur, tournées de 90° par rapport au substrat initial. De nombreuses méthodes sont disponibles pour structurer le niobate de lithium mais aucune ne permet d'obtenir des rapports de forme équivalents à ceux réalisés par découpe à la scie diamantée. Cette technique de fabrication permet de réaliser des structures fines et régulières, avec des flancs polis permettant le confinement des ondes optiques et élastiques pour des facteurs de formes atteignables de plus de 300. Ces structures ont ouvert la voie à la réalisation de dispositifs optiques et acousto-électriques en rupture avec l'état de l'art. Ainsi, celles-ci peuvent améliorer le guidage optique et la réponse de transducteurs polarisés périodiquement. Le guidage optique via des canaux réalisés par diffusion de titane ou d'ions est le plus utilisé mais concurrencé par les guides structurés, qui peuvent être réalisés par la même méthode de découpe à la scie diamantée et ainsi améliorer le confinement en conservant des pertes optiques minimales (inférieures au décibel par mètre). Il en résulte alors une interaction améliorée entre l'onde optique et les différentes structures qui peuvent y être inscrites, tels que des cristaux photoniques ou des réseaux de Bragg [40], alors réalisées sur ces structures à haut facteurs de forme. De même, l'étude de guides d'ondes structurés pour la réalisation de transducteurs polarisés périodiquement a mis en évidence la possibilité d'exciter des ondes élastiques présentant des couplages électromécaniques de plus de 20 %, avec des vitesses équivalentes de phase de plus de $10\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. L'intérêt d'une structuration hors plan ayant été définie, nous allons rentrer plus en détail dans la conception et la fabrication de ces dispositifs qui seront alors utilisés en optique et en acoustique. Le chapitre suivant présente les différentes géométries de structures développées pour améliorer le confinement des dispositifs de guidage d'ondes élastique ou optiques, les propriétés de ces structures étant décrites dans les chapitres suivants.

2

Fabrication et technologies de structures à hauts facteurs de forme

2.1/ Introduction

L'amélioration du confinement d'ondes élastiques ou optiques passe par le développement de structures aux géométries adaptées et particulièrement la structuration tridimensionnelle des dispositifs. Néanmoins, cette étape est technologiquement délicate à réaliser, particulièrement sur niobate de lithium. Les méthodes collectives habituellement utilisées en environnement propre ne permettent pas d'obtenir les caractéristiques physiques désirées pour réaliser un guidage d'onde efficace, notamment en termes de verticalité et de facteur de forme. Les guides d'ondes présentés dans ce manuscrit sont par conséquent réalisés par une technique de découpe à la scie diamantée de précision, essentiellement utilisée pour la séparation de puces sur plaques. Cette méthode permet de réaliser des géométries de structures inédites et de qualité suffisante pour rendre possible leur utilisation au sein de systèmes optiques ou acoustiques. Les caractéristiques dimensionnelles des structures déterminent leur capacité à guider les ondes élastiques et optiques avec plus ou moins d'efficacité. Leur fabrication à la scie diamantée de précision conditionne donc au premier chef leurs qualités fonctionnelles. Ce chapitre est consacré à la réalisation de structures découpées selon cette approche. Nous montrons les potentialités de la méthode à travers des réalisations techniques novatrices et fonctionnelles. Les bases de la découpe à la scie seront abordées pour présenter le fonctionnement de la machine et la technique de découpe-polissage pour plusieurs matériaux. Les tranchées réalisées lors du passage de la lame rotative sont caractérisées afin de contrôler leurs géométrie et rugosité, dont le rôle sera déterminant dans la réponse expérimentale des dispositifs acoustiques et optiques. Les premières structures présentant des rapports de forme jusque là inaccessibles (>300) sur $LiNbO_3$ sont caractérisées et leur fabrication détaillée, mettant en relief les atouts de cette méthode de fabrication. Afin d'améliorer les structures et de profiter au mieux des capacités de la machine de découpe, des géométries plus complexes ont été imaginées, telles que des structures en «pont» ou des amincissements locaux de matériaux. Après avoir réalisé lesdites structures avec la scie diamantée de précision, celles-ci doivent être fonctionnalisées en particulier pour les applications acoustiques par un dépôt métallique sur leurs flancs. Cette dernière étape avant la caractérisation acoustique et optique des dispositifs sera détaillée dans la dernière partie de ce chapitre.

2.2/ Découpe et polissage à la scie diamantée

Comme expliqué dans le chapitre précédent, la structuration à la scie de précision est une méthode originale et prometteuse, qui permet déjà d'obtenir un grand nombre de structures hors d'atteinte des méthodes plus classiques de microfabrication. Lors de la découpe, la lame polit les flancs et le fond de tranchée, permettant de réaliser des structures avec un état de surface de rugosité inférieure à 10 nm RMS, ne nécessitant alors aucun traitement supplémentaire pour l'améliorer. Cette caractéristique est primordiale pour la réalisation des dispositifs car elle donne un réel avantage à la méthode de découpe à la scie par rapports aux méthodes concurrentes. En effet, comme explicité dans le chapitre précédent, la structuration hors plan du niobate de lithium est difficile, surtout quand on souhaite atteindre des qualités optiques imposant une rugosité maîtrisée, des profondeurs de gravure supérieures à 10 µm ou encore des verticalité supérieures à 88°. Cette possibilité de découpe/polissage à la scie est rendue possible par une combinaison de facteurs liés à la découpe et à la machine :

- La qualité de la lame, dont la dureté et la granularité doivent être optimisées pour chaque matériau. Une lame est un disque composé d'une âme, (au cœur de la lame) qui peut être métallique ou résineuse et d'un liant incrusté de grains de diamants dont le nombre et la taille varient en fonction de l'utilisation. Pour effectuer les découpes/polissages, l'âme ne doit pas être métallique car sa dureté écaillerait le matériau à découper, lui même généralement très dur (monocristaux). On lui préfèrera une lame avec une âme en résine, plus souple et donnant lieu à un minimum d'écailles. La finesse des grains de diamants dépend de l'offre du fournisseur [135] mais elle joue un rôle primordial pour minimiser la rugosité des structures.
- La combinaison vitesse d'avance/vitesse de rotation, qui doit permettre au matériau de ne pas subir des contraintes mécaniques supérieures à sa limite élastique (dépendante de la direction de coupe [136]) lors de la découpe. En effet, les efforts de coupes sont déterminés par la vitesse d'avance qui engendre des contraintes dans la direction et selon le sens d'avance et la vitesse de rotation qui produit des efforts tangents à la lame. Pour minimiser la rugosité résultante, la découpe est faite en «avalant» (ou en concordance) (voir figure 2.1). Une vitesse de rotation faible doit être compensée par une vitesse d'avance en commune mesure pour minimiser les efforts de coupe. Une vitesse de rotation ou d'avance trop importante engendrera des écailles sur tout matériau dur, y compris le niobate de lithium. Il faut donc trouver un compromis entre temps et qualité de découpe.
- La stabilité de la lame en rotation. Ce paramètre dépend intégralement de la machine utilisée. Une machine de découpe très précise a donc été acquise par le laboratoire en début de projet. Il s'agit d'une scie DISCO DAD 3350 qui possède des précisions de déplacement submicrométriques selon les trois directions d'espace, nous permettant ainsi d'envisager la réalisation de structures visées de manière répétable. La broche de la machine est placée sur coussin d'air pour améliorer la stabilité de la découpe. La figure 2.1 donne un aperçu de la machine ayant servi à réaliser toutes les structures présentées dans les chapitres suivants. La section suivante en présente les détails techniques utiles pour la réalisation des dispositifs.
- Le refroidissement de la lame lors de la découpe. Ce paramètre est important car un échauffement de la lame provoque un allongement par dilatation de celle-ci qui peut se déformer à son extrémité et ainsi dégrader la qualité des flancs. La température au voisinage de l'échantillon est maintenue à 23°C par trois jets d'eau pointant sur la zone d'usinage la plus exposée aux efforts de coupe. La température de l'eau utilisée lors de la découpe est régulée à 23°C par un thermostat externe.

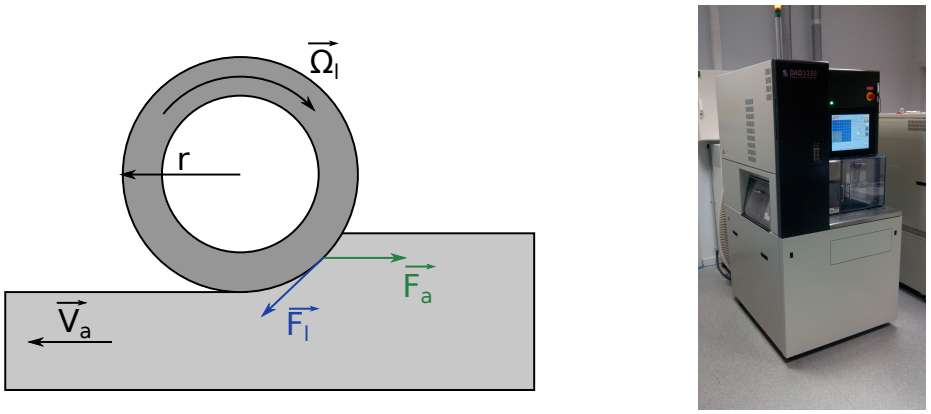


FIGURE 2.1 – Efforts de coupe présents lors d'un usinage en «avalant» (à gauche) et photo de la machine de découpe de précision (à droite)

2.2.1/ PRÉSENTATION DE LA MACHINE DE DÉCOUPE

La machine de découpe est une scie DISCO DAD 3350 ; une vue d'ensemble de la machine est présentée en figure 2.1. Cette machine possède trois emplacements importants : la zone de chargement, la zone d'usinage et la zone de programmation.

- La zone de chargement permet de charger et décharger les échantillons de la machine. Elle est composée d'une chambre fermée dans laquelle se trouve un plateau poreux et un microscope à deux objectifs. Ce plateau possède trois degrés de liberté : deux translations dans le plan (X et Y) et une rotation autour de l'axe vertical Z. La précision sur les axes X et Y est inférieure au micromètre et inférieure à la seconde d'angle sur l'axe Z. L'échantillon est placé sur un film adhésif que l'on pose sur le plateau poreux de la machine. Le film est alors solidarisé au plateau via un flux d'air aspirant. Ainsi les débattements de l'échantillon sont minimisés durant la découpe et en particulier quand la surface de l'échantillon en contact avec le film est grande (on utilise typiquement des plaques de 3 ou 4 pouces de diamètre).
- La zone d'usinage comprend une broche sur laquelle vient se fixer la lame, des bras d'eau pour le refroidissement et un système de contrôle du diamètre de la lame. Cette dernière consiste en un disque alésé au centre, formant ainsi une couronne qui se monte sur l'arbre de la broche tout en étant fixée par deux flasques de serrage. La broche possède trois degrés de liberté : une rotation autour de l'axe Y et deux translations en Y et Z. La précision de la translation en Z et Y est submicrométrique. La mobilité sur l'axe Y est bloquée durant la découpe. Trois bras servent à délivrer l'eau sur la zone de coupe. Le premier est situé en face de la lame qui doit couper le jet de manière symétrique, les deux autres sont situés de part et d'autre de la lame et sont eux-mêmes symétriques. Le débit d'eau peut être réglé sur une plage de 0,4 à 1 $\mathrm{L \cdot min^{-1}}$. Un défaut de réglage de la position des bras ou de débit d'eau peut engendrer des vibrations de la lame et donc une détérioration des structures. Un système de contrôle du diamètre de la lame, située en retrait de la zone de découpe, permet de situer le point de coupe de la lame dans l'espace (et donc l'usure sur le diamètre) avec une précision de $\pm 1\,\mu\mathrm{m}$
- La zone de programmation assure l'interfaçage avec l'utilisateur pour le réglage des paramètres de coupe. Elle permet de visualiser l'échantillon sur l'écran via le microscope présent dans la chambre de chargement. Tous les programmes de découpe sont réalisés à partir de cette interface. Tous les renseignements sur l'échantillon (sa taille, sa forme, son épaisseur),

l'épaisseur du film adhésif maintenant l'échantillon, le mode de découpe et le nombre de traits à réaliser y sont enregistrés, ainsi que tous les paramètres de coupe.

Ces trois emplacements permettent d'effectuer toutes les manipulations pour réaliser les découpes dans des conditions aux recommandations du fournisseur. Le film adhésif utilisé lors de la découpe est photosensible ; il perd toute adhérence après avoir été insolé, ce qui permet de récupérer l'échantillon sans l'endommager. La machine a été conçue pour des découpes industrielles. Le plateau peut ainsi accueillir des substrats dont le diamètre peut atteindre 300 mm, standard actuel des substrats de silicium utilisés en microélectronique constituant la première cible-marché visée par le fournisseur de cet équipement.

2.2.2/ Matériaux découpés et polis par sciage

La découpe/polissage s'applique tout particulièrement au niobate de lithium, matériau particulièrement intéressant en acoustique et en optique. Pour sa découpe, les vitesses de rotations et d'avance sont faibles, – respectivement inférieures à 10 000 tours/ min et 1 mm $\cdot$ s^{-1} – privilégiant ainsi la qualité des découpes sur leur rapidité. Plusieurs minutes sont nécessaires pour réaliser un seul sillon de quelques centimètres de longueur. Le niobate de lithium est un matériau anisotrope, toutes les orientations cristallines ne se découpent donc pas de la même façon. En effet, l'incidence de la lame sur les plans cristallins joue un rôle non négligeable dans la découpe, ne serait-ce qu'en fonction de l'élasticité équivalente vue par l'outil de découpe. Des essais de coupe ont été réalisés lors du projet, permettant d'identifier les contraintes de coupe en fonction des orientations cristallines les plus courantes. Ainsi, une plaque de coupe Z donnera des structures de meilleure qualité qu'une plaque de coupe X, qui présentera plus d'écailles sur les arêtes vives (en conservant toutefois une qualité de polissage optique des flancs de découpe). Les coupes de niobate de lithium YXl/(128°) (Std 176 IEEE) ont montré des flancs aussi peu écaillés que ceux obtenus sur coupe Z. Le tantalate de lithium – en coupe Z et YXl/(42°) – est assez proche du niobate de lithium (matériau isomorphe), produisant des qualités similaires pour les mêmes paramètres de coupe. Le silicium constitue le matériau standard de la microélectronique, sa découpe avec polissage est donc étudiée depuis longtemps. Les vitesses de rotation et d'avance sont plus élevées pour ce matériau (supérieures au millimètre par seconde) que pour le niobate ou le tantalate de lithium. Pour les besoins de l'acoustique, des développements technologiques ont été initiés pour pouvoir découper et polir de la langasite et du quartz. Ces deux matériaux durs (respectivement 6,6 et 7 sur l'échelle de Mohs – voir annexe A –, le $LiNbO_3$ s'y trouve à 5) ne permettent pas – à l'heure actuelle – de fabriquer des structures à hauts rapports de forme avec des flancs polis de manière reproductible. En effet, les tranchées réalisées à la scie sont d'une qualité insuffisante (écailles, fissures) pour envisager l'excitation acoustique des structures.

Les travaux réalisés durant le projet se concentrent donc principalement sur le $LiNbO_3$, matériau présentant le plus d'intérêts communs à l'acoustique et l'optique. Nous commencerons par étudier la qualité de la découpe sur $LiNbO_3$ en caractérisant la tranchée réalisée lors du passage de la lame.

2.2.3/ Caractérisation des tranchées de découpe sur niobate de lithium

Une tranchée réalisée à la scie se caractérise par différents points :

- La largeur de la tranchée est au minimum égale à celle de la lame et dans notre cas, les lames utilisées pour la découpe présentent une épaisseur de 200 µm ou 400 µm. Cette largeur peut ensuite être augmentée en réalisant des traits de scie côte-à-côte. Qualitativement, une lame de 400 µm produit de meilleurs résultats qu'une lame de 200 µm (au sens du parallélisme des flancs et d'ondulation sur les flancs), à diamètre extérieur égal, du fait de sa stabilité plus importante durant la découpe.
- Les écailles sur l'arête vive située entre le flanc vertical de la tranchée et le plan horizontal de la plaque à découper. Leurs quantités et leurs tailles varient en fonction des vitesses d'avance et de rotation. Elles sont représentatives de la qualité de découpe. En effet, des vitesses d'avance ou de rotation trop élevées pour un matériau donné feront apparaître des écailles de tailles importante (jusqu'à plusieurs dizaines de micromètres) qui seront gênantes pour certains dispositifs optiques et acoustiques. Ces défauts concernent d'autres matériaux durs tels que la langasite, le quartz ou le tantalate de lithium ($LiTaO_3$).
- La verticalité des flancs. Paramètre primordial, elle conditionne en grande partie l'homogénéité en épaisseur des futures structures à hauts facteurs de forme. Dans le plan, on pourrait faire correspondre ce paramètre avec le défaut de parallélisme d'une plaque, qui se révèle être un facteur limitant lors de la réalisation de couches par amincissement mécanique. Ce point est un des atouts majeurs de la découpe à la scie, puisque la verticalité des flancs mesurée est meilleure que 88° sur niobate de lithium, et ce quelle que soit la profondeur de découpe.
- La rugosité des flancs. Les flancs de découpe sont polis par frottement du flanc de la lame sur le matériau usiné et subissent un très grand nombre de passage de lame (plusieurs centaines), qui confère sa qualité au polissage. La rugosité dépend en grande partie du type de lame utilisé (voir section 2.2) et des paramètres de coupe (vitesses d'avance et de rotation). Pour toutes nos applications, la rugosité des flancs doit être la plus faible possible (au moins inférieure à 10 nm RMS) car elle conditionne directement les pertes en acoustique et en optique (pertes de propagation). La rugosité des flancs atteint 4 nm RMS pour le niobate de lithium, correspondant à un poli optique et permettant la réalisation de structures compétitives en terme de pertes de propagation en limitant notablement les pertes par diffusion.
- La profondeur de la tranchée. Elle est donnée par l'altitude de la lame, programmée dans la machine par l'utilisateur. Elle varie après chaque trait de découpe puisque la lame s'use en réalisant la tranchée. Sur niobate de lithium, la lame s'use très peu (moins de 50 nm pour un trait de 1 cm de long) ce qui permet d'obtenir une répétabilité sur la profondeur du même ordre de grandeur. Pour des besoins que nous aborderons en section 2.3.3, une technique de calibrage à été mise au point, permettant de maîtriser la profondeur de tranchée au micromètre près, en la mesurant directement sur la machine avec une précision atteignant la centaine de nanomètres.
- La rugosité du fond de tranchée. Comme pour la rugosité des flancs, ce paramètre dépend essentiellement de la lame et des paramètres de coupe utilisés. Cependant, à la différence des flancs, le fond de tranchée ne subit qu'un seul passage de lame, qui imprime alors sa propre rugosité au matériau. On peut alors discerner des traces de grains de diamants, contrairement aux flancs. Ces traces de grains de diamants modifient légèrement la rugosité finale obtenue qui est de 6 nmRMS, qui reste une qualité de polissage acceptable dans la mesure où cette surface ne joue pas de rôle majeur dans la plupart des fonctions recherchées.
- La planéité du fond de tranchée. Ce paramètre est défini par la forme de la section de la lame, reproduite à l'identique sur le matériau. Celle-ci doit être la plus plane possible pour conserver la planéité initiale de la plaque. Pour cela, on réalise une étape dite de *dressage* de la lame qui consiste à usiner un matériau très dur avec cette dernière pour l'user de manière

régulière. Ainsi, la réalisation d'une tranchée dans une plaque de carbure de silicium plan use la lame jusqu'à ce que cette dernière affleure la surface de la plaque. La section de la lame alors obtenue possède une planéité de 400 nm pour une lame de 400 µm. Cependant, les arêtes vives de la lame s'usent très vite durant la découpe. Un congé d'angle de dépouille apparaît alors dans l'angle de la tranchée, comme le montre l'image 2.2. Ce congé ne mesure que quelques dizaines de micromètres une fois la lame dressée mais s'étend au fil des découpes, nécessitant ainsi un nouveau dressage de lame.

Les définitions de mesure des caractéristiques usuelles présentées dans cette section sont détaillées dans l'annexe A. La qualité de ces tranchées permet d'envisager la réalisation de structures à hauts rapports de forme utilisant les flancs de découpe comme élément fonctionnel. Pour cela, il est nécessaire de réaliser deux traits de découpe parfaitement parallèles à des positions bien définies pour réaliser des structures plus ou moins fines et profondes.

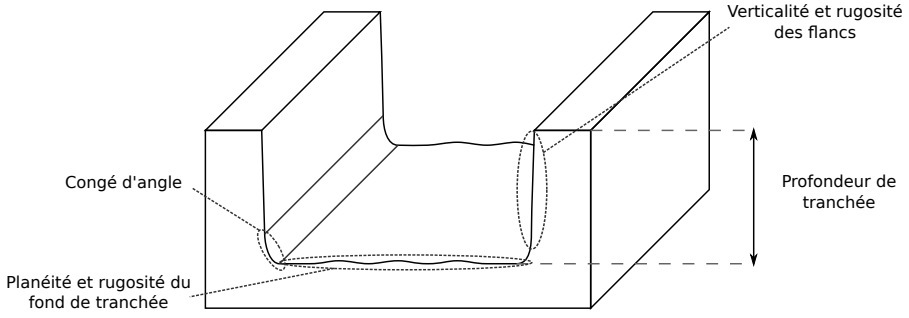


FIGURE 2.2 – Schéma des principales caractéristiques d'une tranchée réalisée à la scie

2.2.4/ RÉALISATION DE GUIDES SIMPLES À FORTS CONFINEMENTS SUR $LiNbO_3$

2.2.4.1/ GUIDES RUBANS SIMPLES À HAUTS FACTEURS DE FORME

Pour réaliser une structure de type ruban à haut facteur de forme, deux tranchées côtes à côtes doivent être réalisées de façon rigoureusement parallèle, espacées de la largeur de la structure, comme le montre les images 2.3 (a) et (b). L'outil est programmé pour une descente de lame en amont du matériau à structurer puis une avance jusqu'à en ressortir, réalisant une tranchée de la longueur de l'échantillon. Un nouveau paramètre apparaît alors : la régularité linéique de la structure. Ce paramètre dépend de la capacité de la lame à rester droite durant la découpe et du parallélisme entre les deux sillons. Il est important de bien maîtriser cet élément, car comme la verticalité, il participe au TTV de la structure finale qui – de la même manière que pour les couches mince planaires – est un paramètre fondamental pour le confinement d'ondes élastiques ou optiques dans le guide. La variation de l'épaisseur (largeur notée l sur l'image 2.3 (b)) le long de la structure dépend de sa longueur et des paramètres de coupe mais ne dépasse pas le micromètre. La définition de la variation totale d'épaisseur pour une structure de type ruban est donnée en annexe A. Pour les applications acoustiques, il est nécessaire de disposer d'un facteur de forme important (>20). Nous avons donc développé les structures présentées par la suite en tenant compte de ce paramètre critique. Pour ce type de structure, la largeur minimale reproductible atteignable est de 2 µm, pour un facteur de forme de plus de 300, résultat inédit dans le domaine

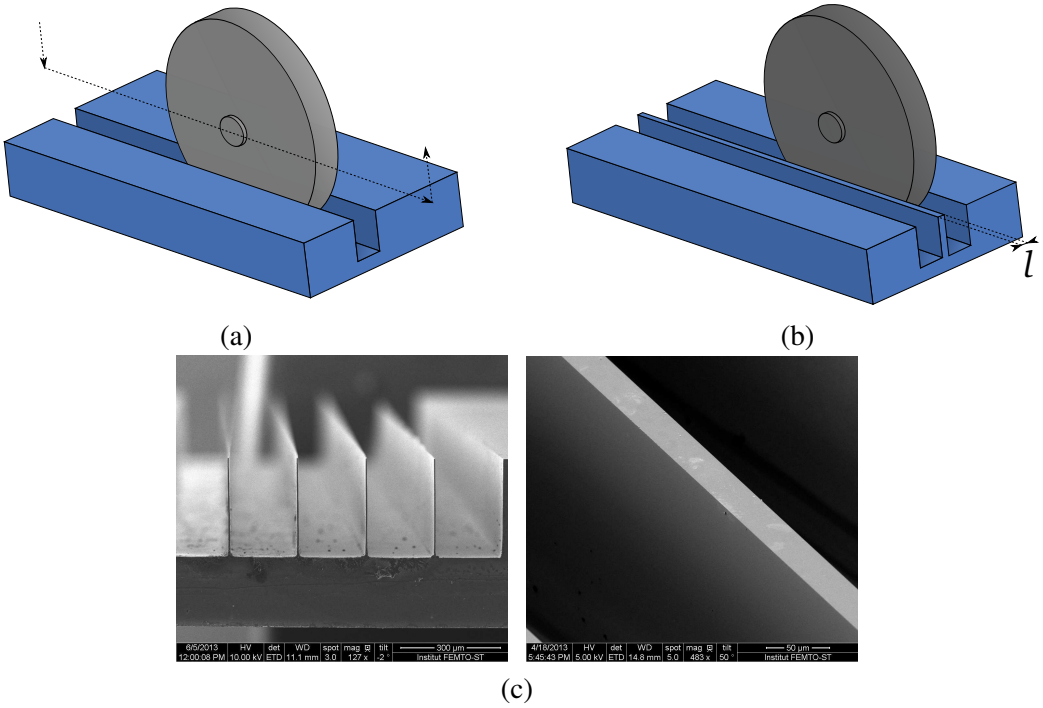


FIGURE 2.3 – Étapes de réalisation d'un guide ridge simple (a),(b) et images des structures réalisées (c)

de la structuration hors plan [50]. Ce profil de structure représente le guide-type de ce manuscrit, auquel on fera référence en sous l'appellation «guide ruban simple» dans les sections suivantes. Cette structure qui fait l'objet d'un brevet pour des applications acoustiques [25] est couramment utilisée en optique au sein du département d'optique du laboratoire. La figure 2.3 (c) montre un exemple de réalisation de guides rubans simple à hauts facteurs de forme. Les guides rubans simples offrent les meilleures conditions de maintien de l'échantillon pour obtenir des verticalités maximums (proches de 90°), ainsi que des rugosités et uniformités à l'état de l'art, bénéficiant de la nature monolithique de la structure. Cependant, pour les besoins en acoustique notamment, il est nécessaire de s'affranchir de l'évasement en fond de tranchée lié aux congés d'angle (schématisé en figure 2.2). Les structures de type ruban présentées section suivante ont été développées en tenant compte là encore de cette spécification.

2.2.4.2/ GUIDES RUBANS LIBRES

Le guide ruban libre est un guide ruban simple dont on a supprimé la liaison avec l'embase pour limiter les pertes par rayonnement dans le matériau massif. Sans embase, le congé d'angle de dépouille qui apparaissait sur les guides rubans précédents n'existe plus. L'homogénéité de la structure s'en trouve alors améliorée. Pour réaliser de tels dispositifs, la méthode est la même que celle des guides rubans simples, à ceci près que la profondeur de passe est programmée pour être supérieure à l'épaisseur de la plaque, comme le montre la figure 2.4. Ainsi, le congé d'angle est reporté à l'extérieur du dispositif, dans le film adhésif. Le facteur de forme de ces structures ne peut être aussi élevé que pour les guides rubans simples, du fait de l'adhérence entre le dispositif et le film adhésif. En effet, durant la découpe d'un ruban simple, la surface de contact entre le

film adhésif et l'échantillon ne varie pas alors que la surface entre un guide ruban libre et le film adhésif diminue très rapidement lors de la réalisation du second sillon. De ce fait, un ruban trop fin se détache du film, limitant les réalisations à des largeurs de ruban de 100 µm. Pour une épaisseur de niobate de lithium de 500 µm, on obtient donc un facteur de forme de 5. La réalisation de ces structures présente des avantages exposés dans le chapitre 3 mais il subsiste un défaut structurel dû à la surface d'accroche entre le film et le dispositif. En effet, si le ruban ne se désolidarise pas de l'adhésif, sa mise en forme progressive lui confère petit à petit des modes vibratoires de plus en plus nombreux et augmente sa capacité de déformation statique. La rigidité du film adhésif étant négligeable devant celle du matériau usiné, il ne peut donc limiter que très modérément les débattement induits par le passage de la lame et les jets de liquide de refroidissement. Ce phénomène engendre un écaillage régulier donnant lieu à des défauts pouvant atteindre plusieurs dizaines de micromètres sur les arêtes et les flancs du ruban. Ces écailles produisent une variation d'épaisseur locale et dégradent donc le TTV (et d'une manière générale la qualité) des structures. Elles n'apparaissent que lors du deuxième trait de découpe, lorsque la surface d'accroche tend à se réduire. Pour symétriser la découpe, nous proposons de réaliser la structure avec deux lames simultanées, séparées par une entretoise.

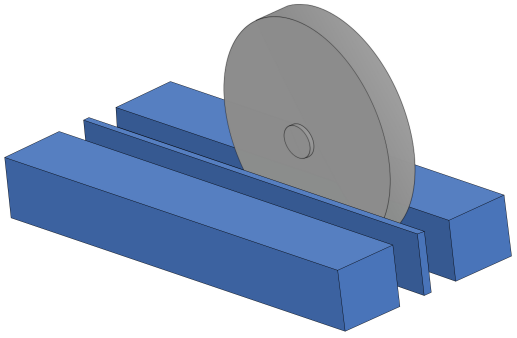


FIGURE 2.4 – Fabrication d'une structure de type ruban

2.2.5/ DÉCOUPE DE STRUCTURES RUBAN AVEC DEUX LAMES SIMULTANÉES

La répétabilité de la largeur du ruban et le parallélisme de ses flancs sont deux éléments cruciaux qui peuvent être optimisés en utilisant deux lames simultanément. Celles-ci sont montées sur la même broche et séparées par une entretoise (voir figures 2.5 et 2.6) qui peut être réalisée de plusieurs manières. La première consiste à fabriquer une couronne de nickel amovible de quelques microns de largeur, de même diamètre intérieur que celui de la broche, et de diamètre extérieur inférieur à celui des lames. La seconde consiste à réaliser un dépôt d'aluminium sur une première lame et de structurer l'entretoise par la suite directement sur le métal déposé pour respecter les contraintes dimensionnelles énoncées ci-dessous. Ces deux méthodes possèdent des avantages et inconvénients présentés dans les sections suivantes.

2.2.5.1/ ENTRETOISES EN NICKEL ÉLECTROFORMÉ

La réalisation d'entretoises en nickel électroformé débute par la conception d'un masque de photolithographie représentant une couronne contenant des ouvertures régulières dont la présence

est expliquée plus loin. Une photolithographie est ensuite réalisée sur une plaque de verre recouverte d'un film de cuivre servant de conducteur pour définir la structure globale de l'entretoise. L'électroformage de cette dernière est ensuite réalisé pour faire croître du nickel sur toute la couronne. Lors de cette étape, les ouverture régulières dans le masque servent à uniformiser les lignes de champ électromagnétique dans le bain électrolytique pour obtenir une épaisseur de nickel régulière. Une fois la croissance terminée, la résine et le cuivre sont retirés pour obtenir l'entretoise finale en nickel, dont l'épaisseur peut atteindre la dizaine de micromètres. Dans notre cas, l'entretoise la plus fine ainsi obtenue a permis de réaliser des structures de 8 µm de largeur. L'avantage de ce type d'entretoise repose sur son indépendance vis-à-vis des découpe. Elle peut donc être adaptée à tout type de lame, de tout diamètre et de toute largeur. De plus, elle ne s'use que très peu dans le temps et permet donc de réaliser des structures relativement fines avec une excellente reproductibilité. Toutefois elle ne permet pas d'obtenir des structures d'une largeur de l'ordre du micromètre. En effet, lorsque l'entretoise est trop fine, les deux lames se collent l'une à l'autre (cf. figure 2.5 (b)) empêchant la structure de réaliser sa fonction première. Ce phénomène est en partie dû à la longueur de lame libre notée L_{ll} comprise entre 1 mm et 3 mm. En effet, si la longueur de lame libre L_{ll} dépasse l'épaisseur de la lame (en général 200 µm ou 400 µm), celle-ci se comporte comme une poutre encastrée-libre capable de notoirement se déformer lorsque soumise à des contraintes, ici liées à la découpe. Pour réduire la longueur de lame libre L_{ll}, des entretoises en aluminium ont été développées avec comme objectif de repousser la limite de largeur des structures au micromètre.

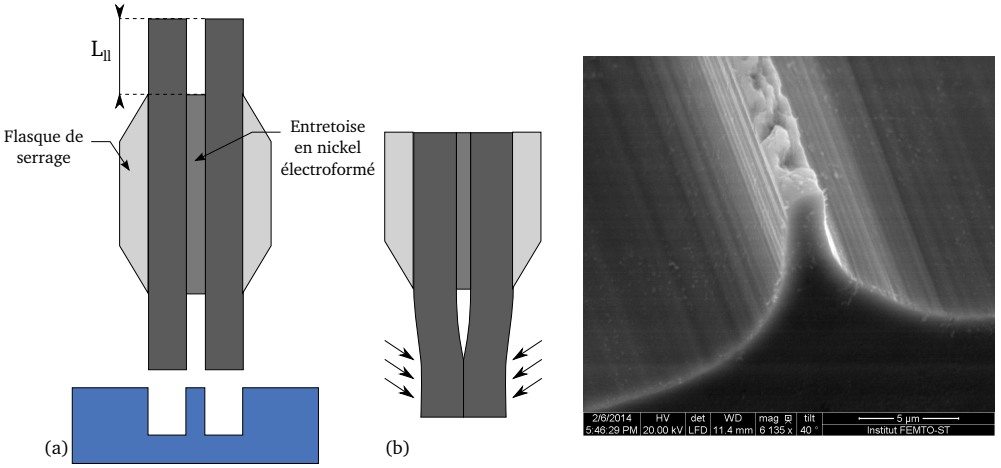


FIGURE 2.5 – (a) Utilisation d'une double lame avec entretoise en nickel électroformé et (b) phénomène de rapprochement (collage) des lames en leurs extrémités

2.2.5.2/ ENTRETOISES EN ALUMINIUM DÉPOSÉ PAR PULVÉRISATION CATHODIQUE

Les entretoises réalisées en aluminium déposées par pulvérisation cathodique ont été conçues pour répondre à la problématique de la réalisation de structures fines (de l'ordre du micromètre) et répétables. La méthode consiste à placer une lame dans l'enceinte de pulvérisation et à recouvrir la surface exposée avec une couche d'aluminium uniforme. L'épaisseur d'aluminium déposé détermine la largeur de l'entretoise et donc la structure ruban finale. Par conséquent, il est important de la maîtriser précisément lors du dépôt. L'entretoise est structurée en réalisant un premier

passage de lame dans du niobate de lithium, à la profondeur des structures à réaliser. L'aluminium est abrasé par frottement entre la lame et le $LiNbO_3$ sur toute la profondeur de passe, permettant ainsi d'obtenir la structure d'entretoise désirée, avec une longueur de lame libre intérieure de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres. De ce fait, le comportement comme poutre encastrée-libre est limité si la longueur de lame libre reste inférieure ou égale à l'épaisseur de ladite lame. Cette méthode permet d'obtenir des structures de 5 µm d'épaisseur minimale avec toutefois une répétabilité médiocre (variation d'épaisseur de plusieurs micromètres mesurée sur 10 mm de découpe). Cependant, cette méthode de découpe s'avère trop instable pour de faibles largeurs de structures (<10 µm) pour en envisager une utilisation courante pour la réalisation de ruban à hauts facteurs de forme. En effet, lors de la découpe avec des entretoises d'épaisseur inférieure à 10 µm, les lames s'écartent et se rapprochent, indépendamment de la largeur de l'entretoise. Ce phénomène, déjà observé avec les entretoises en nickel électroformé est directement lié à la longueur de lame libre extérieure (non maintenue par les flasques de serrage). La lame peut entrer en vibration durant la découpe si celle-ci n'est pas adaptée à minimiser le phénomène. L'amplitude de ce dernier est influencé par de nombreux paramètres, comme le débit d'eau de découpe, la vitesse d'avance, la vitesse de rotation de la lame, la méthode d'approche de l'échantillon (par le côté ou depuis le haut), la profondeur de passe, le diamètre et la géométrie des lames. L'étude des caractéristiques vibratoires des lames ne sera cependant pas présentée dans ce manuscrit. La variation de largeur des rubans résultante pouvant atteindre une dizaine de micromètres, à pu être diminuée mais elle empêche néanmoins la réalisation de guides submicroniques à l'aide d'entretoises. Ces dernières s'avèrent inefficaces pour la réalisation de rubans libres selon nos exigences, pour des largeurs comprises entre 10 µm et 80 µm – largeur maximale expérimentée. Lors de la découpe avec entretoises, la structure est soumise à d'importants efforts de coupe et à une réduction rapide de la surface d'accroche entre le film adhésif et le matériau engendrant son décollement total du film.

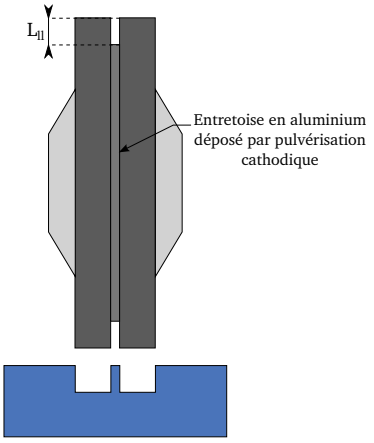


FIGURE 2.6 – Schéma d'une entretoise en aluminium déposé et structuré directement sur la lame de scie, permettant une réduction de la longueur de lame libre intérieure.

Ces structures simples de guides rubans montrent les possibilités de la scie à réaliser des couches tournées de 90° avec une précision micrométrique. On peut alors envisager la réalisation de dispositifs utilisant de telles couches en acoustique et en optique. Cependant, ces structures ne répondent pas à toutes les attentes en termes de profil puisqu'elles engendrent toutes les deux des défauts soit d'évasement, soit d'écaillage et se révèlent limitées en termes d'épaisseur de ruban atteignable par principe. Pour s'affranchir de ces contraintes techniques, des structures plus com-

plexes ont été réalisées et ont permis d'améliorer les résultats obtenus, en particulier pour l'optique.

2.3/ Structures complexes en niobate de lithium et développements technologiques associés

La réalisation de structures simples a permis de montrer les capacités de la scie pour l'usinage de barreaux à facteurs de formes supérieurs à 100, en faisant varier la longueur des rubans, leur profondeur et leur largeur, mais d'autres structures pourraient apporter un certain nombre d'avantages en acoustique et en optique. Nous avons ainsi développé des structures «en ponts» pour s'affranchir de l'évasement en fond de tranchée. Nous avons également proposé une méthode efficace d'amincissement des structures pour confiner les ondes dans un volume encore plus faible que ce qui a été démontré avec les rubans simples. Enfin, en reportant le niobate de lithium sur un autre matériau, nous avons imaginé et testé des configurations de matériaux plus complexes qu'un barreau monocristallin pour améliorer autant que faire ce peut les guidages et confinements des ondes. Nous présenterons ces différentes approches dans les sections suivantes.

2.3.1/ Structures en pont : le *B-ridge*

Un mode particulier de la scie permet d'amener la lame au dessus de l'échantillon, puis de descendre directement en un point choisi. Cela permet de ne pas découper l'échantillon sur toute sa longueur et de tester des mises en forme tridimensionnelles originales. Ce type de découpe à aussi permis d'améliorer le contrôle et la maîtrise de la profondeur des tranchées ainsi effectuées via un calibrage local précis.

2.3.1.1/ Calibrage de la profondeur de coupe

Le mode de découpe classique ne permet pas de réaliser des tranchées de profondeur donnée avec une précision garantie. En effet, la variation d'épaisseur du matériau n'est pas parfaitement connue sur toute sa surface et le film adhésif s'amincit sous l'effet des efforts de coupe. Les profondeurs de découpe sont alors réalisées avec une incertitude de $\pm 20\,\mu m$. Pour certaines structures en optique ou en acoustique, il est nécessaire de pouvoir réaliser des tranchées de profondeur maîtrisée. Pour cela, il faut réaliser un calibrage *in situ*, toute mesure précédant l'usinage (mesure locale des épaisseurs du wafer et du film adhésif au palpeur) ne permettant pas de prévoir à moins d'un micromètre la profondeur de découpe. Nous avons développé la méthode de calibrage en question spécifiquement pour ces structures. Elle consiste à réaliser l'empreinte de la lame dans le matériau, puis à la mesurer. Pour cela, la lame descend à une altitude connue (par rapport au plateau poreux, utilisé comme référence par la machine) et répétable, réalisant une empreinte dans le matériau (voir figure 2.7). La longueur de l'empreinte qui correspond à $2x$ dans la formule 2.1 est ensuite mesurée. La précision de cette mesure est – dans les meilleures conditions – de l'ordre du micromètre, et permet en outre d'obtenir une topographie du profil de la lame. Le diamètre de cette dernière peut être mesuré à $\pm 2\,\mu m$ près, mais dans la plupart des cas, il n'est pas nécessaire de connaître sont diamètre à mieux que $100\,\mu m$ près (incertitude maximale sur le diamètre de la

lame donnée par le fournisseur). La profondeur de gravure est alors donnée par la formule suivante, avec p la profondeur, x la demi-empreinte de la lame dans le matériau et r le rayon de la lame.

$$p = r - \sqrt{r^2 - x^2} \tag{2.1}$$

Si l'on prend un exemple d'un calibrage aux alentours de 20 µm de profondeur, une erreur sur le rayon de la lame de 100 µm (soit deux fois plus que la marge donnée par le constructeur) induit une erreur sur le calibrage de seulement 75 nm. De même, une erreur dans la mesure de x de 5 µm (soit 10 µm sur la longueur totale de l'empreinte) induit une erreur sur le calibrage de seulement 200 nm.

Dans les conditions classiques de réalisation d'une structure ruban (sur une plaque de niobate de lithium de 500 µm d'épaisseur, calibrage en surface suivant le protocole présenté ci-avant) l'empreinte à la surface du niobate de lithium est mesurée avec une précision de 2 µm qui conduit à une erreur totale (en prenant en compte une erreur sur le rayon de la lame de 50 µm) de 75 nm. Une fois la profondeur calculée, il suffit de programmer la machine en conséquence pour abaisser ou augmenter la profondeur de passe, sachant qu'après chaque trait d'un centimètre de long, la lame s'use de 40 nm à 50 nm en moyenne, pour une opération de découpe/polissage.

Nous disposons dès lors d'un moyen rapide de contrôle d'épaisseur qui fonctionne pour tout type de matériau ou couches minces (de plusieurs micromètres au minimum). Il s'applique *in situ*, durant la découpe, ce qui en fait une méthode très intéressante. Dans notre cas, elle nous permet de garantir une profondeur de coupe au micromètre près pour les structures de type ruban, mais aussi de réaliser des amincissements locaux du matériau. Ce mode de découpe appelé couperet (*chopper* en anglais) permet aussi de faire avancer la lame pour réaliser des tranchées incomplètes ainsi que des structures en pont comme le montre la section suivante.

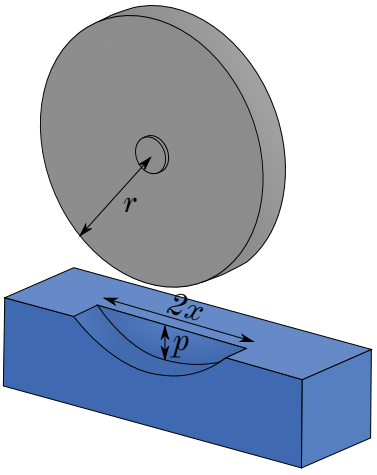


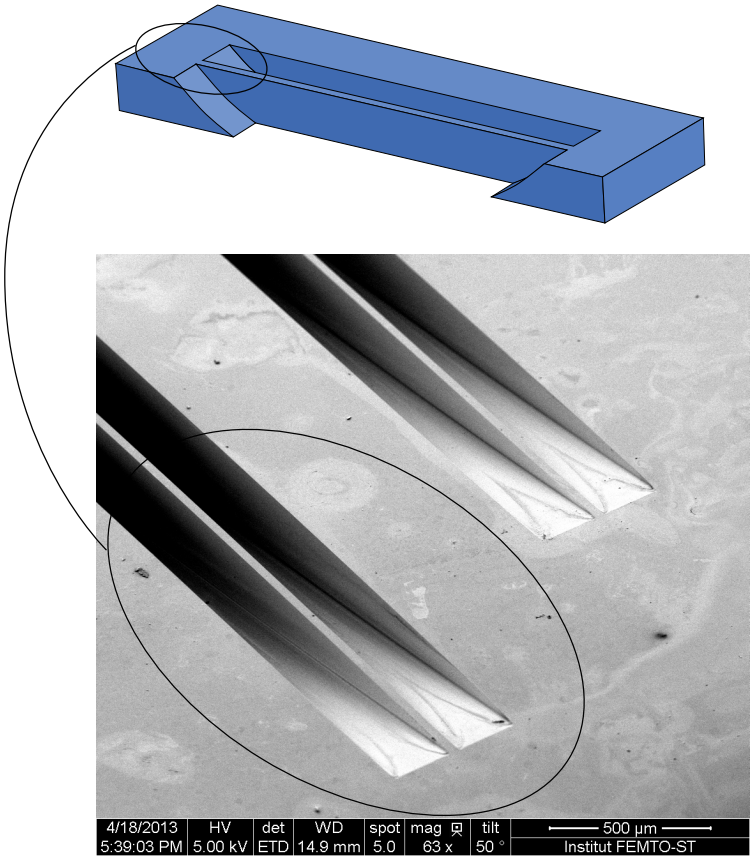
FIGURE 2.7 – Empreinte de calibrage

2.3.1.2/ STRUCTURES EN PONTS RÉALISÉES – *B-ridge*

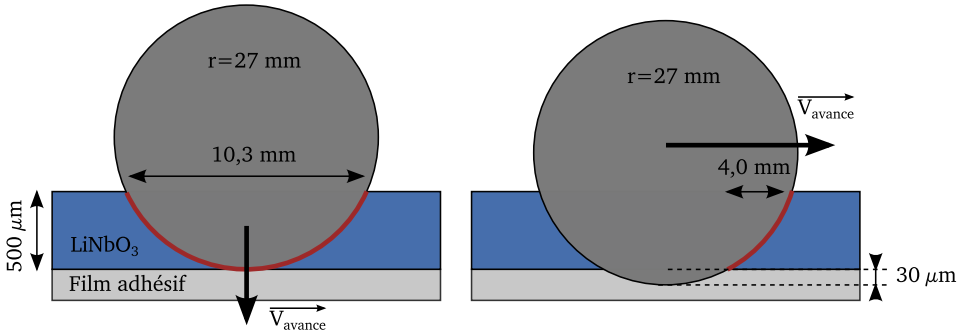
Nous avons engagé la conception des structures en pont que l'on appellera ici *B-ridge* pour éviter l'écaillage des arêtes et les flancs des rubans. En effet, en découpant un barreau sur toute l'épaisseur du substrat, on obtient une structure dont les flancs et les arêtes sont écaillés à cause

de sa mobilité pendant la découpe (cf. section 2.2.4.2). Nous avons donc mis au point le concept des *B-ridges* qui consiste à réaliser un ruban – suspendu (débouchant) ou non –, tenu durant la découpe par ses deux extrémités, comme le montre la figure 2.1. Pour cela, la lame descend en mode couperet dans le matériau, puis avance dans celui-ci à profondeur constante d'une longueur prédéfinie et arrête la découpe avant d'en ressortir verticalement (sens inverse du couperet). Du fait qu'ils soient tenus lors de la découpe, ces *B-ridges* présentent moins d'écailles que les rubans libres classiques pour des longueurs de structures de l'ordre du centimètre. Pour des longueurs supérieures à 2 cm, l'élasticité du niobate de lithium est suffisante pour conférer à la structure suffisamment de degrés de liberté pour donner lieu au même phénomène d'écaillage qu'observé avec les rubans libres classiques. Cependant, cette méthode permet de diviser par deux la largeur minimale atteignable pour ce type de structures, la portant ainsi à 50 µm. Pour obtenir un tel résultat, la vitesse de descente de la lame à été divisée par 20 (0,01 mm · s^{-1} au lieu de 0,2 mm · s^{-1}, vitesse utilisée lors de l'avance de la lame). En effet, lorsque la lame entame la découpe du matériau, les efforts de coupe augmentent rapidement et sont fonction de la méthode de découpe (avance de la lame à l'horizontal ou à la verticale). Dans le cas d'une avance de la lame à l'horizontal, d'une vitesse d'avance de 0,2 mm · s^{-1} et d'une profondeur de passe de 530 µm – la lame est positionnée à une altitude de −30 µm par rapport à la surface inférieure du matériau à découper (cf. figure 2.1), pour avoir la certitude de ne pas laisser non découpée une partie de ce dernier –, la longueur de l'arc de contact lame/matière est de 204 µm après la première seconde de découpe. Dans le cas d'une avance de la lame à la verticale (mode couperet) et d'une vitesse de descente de 0,2 mm · s^{-1}, la longueur de l'arc de contact lame/matière atteint 3288 µm, soit 16 fois plus qu'après la première seconde de découpe à l'horizontal. Cette différence de vitesse de croissance de la longueur de contact lame/matière est à l'origine de la différence d'efforts de coupes et donc de notre choix de réduire la vitesse de descente à 0,01 mm · s^{-1}. De plus, la longueur maximale de l'arc de contact lame/matière est plus de deux fois supérieure dans le cas d'une descente en mode couperet, comme l'illustre la figure 2.1 d'où la nécessité de réduire la vitesse de descente à une valeur si faible.

Ces structures peuvent aussi être réalisées en n'appliquant pas la découpe sur toute la profondeur du substrat, afin d'obtenir un ruban maintenu par ses extrémités et non un ruban simple. Dans cette configuration, les extrémités des *B-ridges* ne servent plus à tenir la structure durant la découpe mais ont d'autres utilités en acoustique comme en optique. En acoustique, des électrodes sont placées sur les flancs des ruban simples et au fond des tranchées ; dans le cas des *B-ridges*, les électrodes sont aussi placées sur les flancs et le fond de tranchée. Comme celui-ci remonte vers la surface aux extrémités de la structure, on obtient alors un report des électrodes en surface, ce qui permet une connectique du dispositif simplifiée par rapport aux rubans simples. Les avantages et inconvénients des *B-ridges* en acoustique seront développés au sein du chapitre 3 en se fondant sur leurs caractérisations. En optique, une structure de type *B-ridge* sert de guide d'onde fortement confiné avec adaptateur (ou coupleur) de mode. Aussi appelé *taper* en anglais, l'adaptateur de mode optique sert à optimiser la liaison fibre optique–guide confiné. Dans le cas de coupleurs de modes verticaux réalisés à la scie, la pente obtenue par l'empreinte de la lame engendre une transition adiabatique de l'indice effectif du mode guidé permettant une adaptation de celui-ci de la fibre vers le guide et inversement. Cette transition d'indice se caractérise par une transformation géométrique du mode optique qui permet d'adapter la taille du mode issu de la fibre (spot de diamètre 10 µm) aux dimensions caractéristiques du guide (section inférieure à 7×6 µm^2). Le rayon de courbure de la lame étant grand devant les dimensions des structures, son empreinte permet une transition suffisamment lente et continue pour ne pas produire de désaccord d'indice brutal



(a)



(b)

Tableau 2.1 – (a) Vue en coupe d'une structure de ruban suspendu et image au microscope à balayage électronique de celle-ci et (b) différence de contact lame/matériau en descendant et en avançant

qui engendrerai des pertes par réflexion. Les adaptateurs de modes optiques sont bien maitrisés en deux dimensions dans le plan du guide, mais il existe peu de coupleurs de mode verticaux comme ceux réalisé ici (cf. chapitre 4 section 4.3). Cette structure inédite à donné lieu à un brevet [137]. Nous nous intéresserons plus en détail aux adaptateurs de modes optique au chapitre 4 section 4.3

Les structures de type *B-ridge* permettent de s'affranchir des difficultés rencontrées lors de la fabrication de structures de ruban simples. Elles permettent de nouvelles fonctionnalités en optique et en acoustique qui seront détaillées dans les chapitres 3 et 4. Cependant, elles ne permettent pas de s'affranchir des écailles lors de découpes sur toute la profondeur du substrat (ruban suspendus). La principale cause de ces écailles trouve son origine dans les défauts d'adhérence entre le film de support et le substrat. Pour tenter d'y remédier, une solution de report de plaque est proposée en section suivante, permettant ainsi de s'affranchir de la liaison film adhésif–structures rubans. Cette approche permet également la mise au point de structures originales, améliorant le guidage des ondes en offrant des fonctionnalités physiques innovantes. Elle permet enfin de résoudre partiellement le problème de l'encapsulation des rubans et des *B-ridges*

2.3.2/ Structures reportées sur silicium

Le report sur silicium est aujourd'hui une opération relativement banale en microélectronique [138], mais la qualité des collages dépend fortement des procédés utilisés. Selon les utilisations, les couches intermédiaires peuvent varier de couches métalliques à des colles polymères en passant par des résines photosensibles. Dans notre cas, nous avons exploité le collage dit «or/or» [99, 139] et le collage par *Vitralit* [140] adapté à nos structures comme décrit dans les paragraphes suivants. Les méthodes de report sont décrites dans la section suivante, après quoi les structures réalisées sur ce type d'empilement seront présentées.

2.3.2.1/ Méthodes de report

Pour associer deux matériaux de nature différente, la méthode la plus courante passe par le recours à une couche intermédiaire déposée sur les deux surfaces à coller. Une autre solution bien connue repose sur le collage anodique que nous ne développerons pas ici. La réalisation d'un tel collage (sans couche intermédiaire) nécessite des budgets thermiques notable (>100 °C). Toutefois, le niobate de lithium et le silicium présentent des coefficients de dilatation thermique très différents (d'un ordre de grandeur). De plus, le niobate de lithium possède des propriétés pyroélectriques particulièrement marquées pour certaines des orientations cristallines utilisées (coupes Z et X). Cette méthode de report n'a donc pas été retenue durant notre projet. Nous nous intéresserons ici à deux techniques de report à budget thermique limité (au voisinage de la température ambiante), le collage or/or et le collage *Vitralit*.

– Le collage dit *or/or* permet de coller un grand nombre de matériaux par compression, quelles que soient leurs propriétés. Ce collage s'effectue à température ambiante, la principale contrainte étant le recours à des wafers présentant des variation d'épaisseur globales – TTV – inférieures à 10 µm. Pour réaliser ce collage, une couche de chrome de quelques dizaines de nanomètres est déposée en surface des deux wafers, recouverte ensuite par une couche d'or de 200 à 300 nm d'épaisseur. La couche de chrome sert à assurer l'adhérence de la couche d'or sur le wafer. L'or est un matériau ductile, propice aux effets de diffusion lorsque soumis à des pressions idoines (de l'ordre de 50 bar dans le cas de plaques de 100 mm de diamètre.

Les deux plaques sont ensuite placées dans une enceinte sous vide dans laquelle les surfaces recouvertes d'or de chaque wafer sont mises en contact, soumises alors à un poids de 4000 N pour amorcer la diffusion des couches d'or en regard. Ainsi, les couches d'or s'amalgament localement pour former un continuum, avec un minimum de lacunes entre les deux plaques, la mise sous vide permettant de minimiser la présence de gaz interstitiel. Pour renforcer le collage, le substrat multicouche est enfin placé dans une presse hydraulique pour y subir un poids de 40 000 N permettant d'éliminer les lacunes résiduelles et de finaliser la diffusion. Cette méthode permet d'obtenir un collage robuste qui permettra de découper des structures dans le niobate de lithium avec précision sans désolidarisation des plaques. Une photo au Microscope Électronique à Balayage (MEB) de l'interface d'or entre une plaque de $LiNbO_3$ et une plaque de Si est présenté figure 2.8

– La *Vitralit* 6128 est une colle de type résine qui polymérise avec le rayonnement UV. Elle est souvent utilisée en optique, compte tenu de son indice de réfraction de 1,51 à 589 nm [141], proche du SiO_2 (n_{SiO_2}=1,46) et de sa fluidité avant insolation, permettant son dépôt par centrifugation. Le procédé de collage de deux plaques exploitant cette colle est en principe similaire au procédé de collage or/or. Il se fait sous vide, dans une presse qui met en contact les deux plaques recouvertes d'une couche de résine *Vitralit* (d'épaisseur 2 à 4 µm). La couche polymère résultante sert alors d'interface entre les deux matériau ainsi associés. L'insolation se fait ensuite via une lampe UV, ce qui nécessite qu'au moins l'une des deux plaques soit transparente aux UV pour engendrer la réticulation du polymère. Cette méthode permet d'isoler le mode optique – contrairement au collage or/or qui absorbe le mode optique – mais induit des pertes pour les ondes acoustiques.

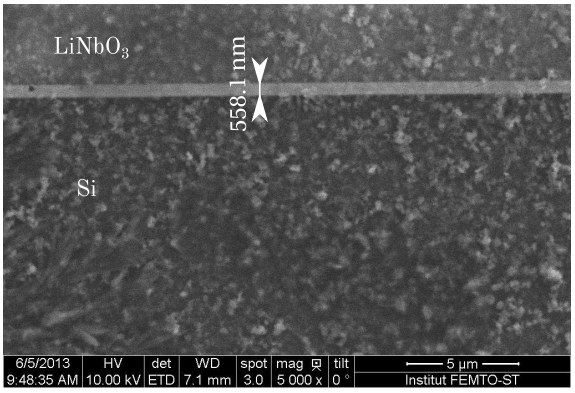


FIGURE 2.8 – Vue en coupe d'un collage *or/or* de niobate de lithium sur silicium. L'interface d'or mesure 558 nm d'épaisseur après les différentes étapes de compression

2.3.2.2/ DÉCOUPE DE STRUCTURES SUR $LiNbO_3$/SI

Le report de plaques de $LiNbO_3$ sur Si permet la réalisation de structures complexes intéressantes pour plusieurs raisons :

– le silicium constitue le matériau-clé des micro-composants et systèmes électromécaniques (MEMS pour Micro-Electro-Mechanical System en anglais) et offre à ce titre une palette technologique variée pour sa mise en forme.

– les propriétés physiques du silicium, qui favorisent le guidage d'ondes élastiques grâce au rapport élasticité/masse notablement élevé ici (comparer le rapport c_{33}/ρ du silicium et du

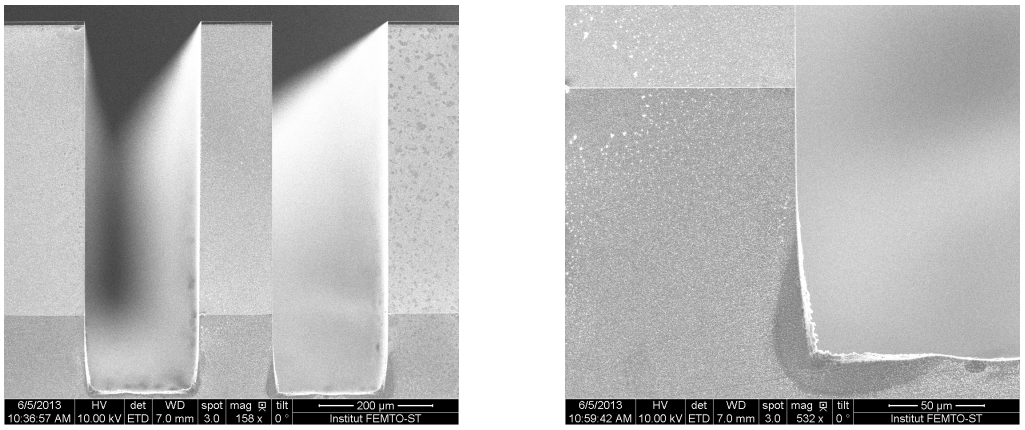


FIGURE 2.9 – Structures rubans sur $LiNbO_3$/Si (a) et zoom sur l'évasement de fond de tranchée (b)

$LiNbO_3$ montre un facteur 1,4 à l'avantage du Si)

– le gain en rigidité global des structures de rubans simples pouvant alors être usinés sur toute l'épaisseur en minimisant les risques de décollements et d'écaillage lors de l'usinage dus à des vibration du barreau, limité en grande partie par le silicium sous-jacent.

Cette méthode permet la réalisation de *B-ridges* sur toute l'épaisseur de niobate avec une qualité de flancs identique à celle obtenue lors de la fabrication de rubans simples (pas d'écaillage, état de surface poli, verticalité supérieure à 88°). L'évasement en fond de tranchée est reporté dans le silicium, ce qui permet d'obtenir des flancs homogènes pour le niobate de lithium comme le montre les figures 2.9 (a) et 2.9 (b). Cependant, la couche d'or située à l'interface niobate/silicium est conductrice et peut entraîner des courts-circuits pour les utilisations acoustiques de ces dispositifs dans la mesure où les surfaces en regard doivent être métallisées. De plus, l'or absorbe le faisceau optique faisant perdre sa capacité de guidage au dispositif. Il devient alors nécessaire de retirer l'or située entre la structure de niobate de lithium et le silicium qui la soutient, une fois les opérations d'usinage achevées. En effet, la liaison rigide $LiNbO_3$/Si est essentielle pour garantir l'intégrité des structures durant les opérations mettant en jeu des efforts mécaniques susceptibles de dégrader les barreaux (cf. section 2.2.4.2). La solution retenue consiste à retirer la couche d'or par attaque chimique après la réalisation des *B-ridges*. L'ensemble est plongé dans un bain acide gravant l'or pour éliminer la couche située sous la structure ruban par sous-gravure, puis dans un bain qui grave le chrome. Nous obtenons ainsi une structure de ruban suspendue par ses extrémités, dont les flancs sont polis et sans écailles. La figure 2.10 schématise la structure obtenue et la figure 2.11 montre la sous-gravure de l'or et du chrome sur un dispositif réalisé, vue de dessus. Le

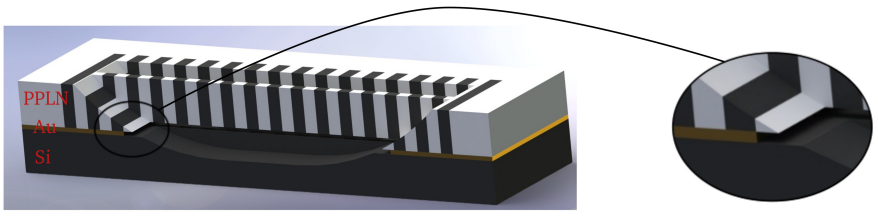


FIGURE 2.10 – Schéma de la structure obtenue après sous-gravure de la couche d'accroche

collage de $LiNbO_3$ sur Si avec une couche d'or intermédiaire permet donc d'améliorer la réalisa-

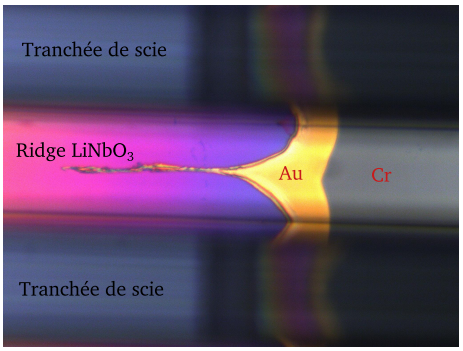


FIGURE 2.11 – Vue du dessus de l'interface d'un *B-ridges* suspendu, à son extrémité au travers du $LiNbO_3$, mettant en évidence l'élimination de la métallisation (couche d'adhérence) par sous-gravure (usinage isotrope)

tion de structures de qualité structurelle démontrée puis leur libération pour profiter intégralement des propriétés du niobate de lithium. Nous pouvons ainsi mettre en œuvre structures suspendues avec un gap d'air voire également retirer toute une zone de silicium pour avoir accès à la face arrière du dispositif, comme décrit dans la section 2.3.3.

Le collage de $LiNbO_3$ sur Si avec la résine *Vitralit* permet quant à lui d'obtenir une couche intermédiaire qui soit compatible avec les applications optiques et notamment le guidage d'ondes. Il n'est donc pas nécessaire de retirer la couche interstitielle, celle-ci jouant un rôle effectif dans le mécanisme opératoire du guide. Ce collage sera largement utilisé pour les structures à utilisation optiques présentées dans le chapitre 4. La nature de la *Vitralit* ne permet pas de la graver facilement (par attaque chimique en voie humide par exemple) une fois insolée. Il n'est donc pas envisageable de réaliser des structures suspendues avec cette méthode de collage. Les structures présentent alors l'avantage d'être maintenues efficacement lors de la découpe, permettant ainsi des géométries de guides plus complexes pour l'optique que les rubans simples, mettant par exemple en jeu des amincissements locaux.

2.3.3/ AMINCISSEMENT LOCAL DU MATÉRIAU

La précision micrométrique de la scie, sa répétabilité inférieure à 100 nm et la méthode de mesure de la profondeur développée (cf. section 2.3.1.1) permettent une maîtrise de l'altitude la lame (selon l'axe Z soit la profondeur de passe) qui autorise la réalisation de couches minces locales (de quelques centaines de nanomètre d'épaisseur minimum), comme le montre la figure 2.12. Ces couches minces servent principalement en optique, où l'on recherche un confinement maximal du mode optique se propageant dans le niobate de lithium. La réalisation de guides d'ondes de Lamb pourrait également présenter un intérêt en acoustique, pour peu que l'on puisse exciter et détecter ces modes efficacement. Cette section se consacrera uniquement aux amincissements locaux sur plaques de niobate de lithium.

Nous avons imaginé trois configurations différentes pour l'amincissement local à la scie diamantée :

– L'amincissement sur plaque de niobate de lithium non reportée. Il est réalisé directement sur la plaque de niobate de lithium placée sur le plateau poreux de la machine, maintenu via le film adhésif. L'avantage de cette configuration tient à ce qu'elle ne nécessite aucun traitement

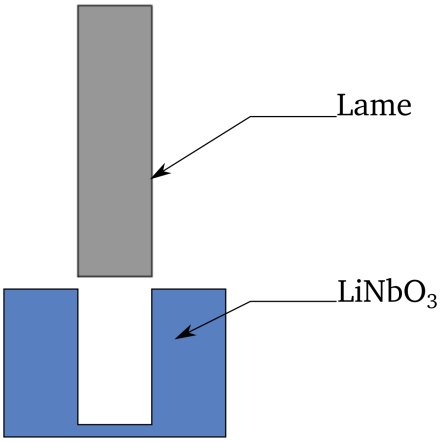


FIGURE 2.12 – Vue de face d'une découpe de couche à la scie diamantée

autre que la découpe pour obtenir une couche de niobate de lithium seule, la couche obtenue se trouve alors directement utilisable (une photo prise au MEB de niobate de lithium aminci par cette méthode est présenté figure 2.13). On peut citer comme exemple d'utilisation la gravure de la couche de $LiNbO_3$ par FIB pour la réalisation de cristaux photoniques, comme présenté dans le chapitre 4. L'inconvénient majeur de cette approche concerne l'épaisseur des couches limitée à 4 µm environ (dans le meilleur des cas). En effet, la déformation structurelle du film adhésif soutenant le matériau à amincir est telle que la force radiale engendrée par la scie (le long de l'axe vertical) se trouve suffisante pour mener ce dernier à la rupture – lorsque son épaisseur atteint 4 µm. Un autre inconvénient de cette méthode réside dans la difficulté de calibrage de l'altitude de passe. En effet, lorsque la lame usine le matériau – en mode couperet – jusqu'à pénétrer dans le film adhésif, elle y laisse une empreinte dont le profil est écaillé du fait de la déformation structurelle importante du film adhésif. La taille de ces écailles pouvant atteindre plusieurs dizaines de micromètres, le calcul de la profondeur par la formule (2.1) permet d'effectuer un calibrage d'une précision maximale de l'ordre du micromètre, alors insuffisante pour réaliser des couches de matériau du même ordre de grandeur.

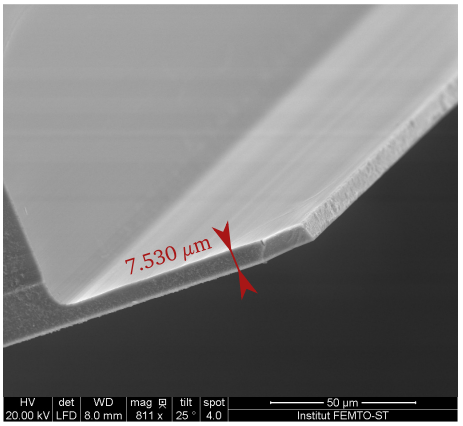


FIGURE 2.13 – Vue en coupe longitudinale et transversale d'une membrane de niobate de lithium seule

– L'amincissement sur plaque de niobate de lithium reportée avec collage par résine *Vitralit*.

Le niobate de lithium est aminci localement sur son support, généralement une plaque de silicium ou de niobate de lithium. Le report sur plaque permet d'éloigner le niobate de lithium du film adhésif et ainsi profiter de la dureté de la *Vitralit* et du substrat sur lequel est reporté le niobate de lithium. Cette approche permet la réalisation de couches de l'ordre du micromètre, mais celles-ci sont définitivement liées à leurs substrats par la *Vitralit*.

– L'amincissement sur plaque de niobate de lithium reportée avec collage *or/or*. Cette méthode permet la réalisation de couches d'épaisseur inférieure au micromètre, avec la possibilité de retirer l'or par sous gravure, comme le montre les images 2.14 et 2.15. Cependant, l'amincissement est dépendant de la variation d'épaisseur des matériaux utilisés, interdisant par principe la réalisation de tels amincissements sur des surfaces de plus d'un centimètre carré. Les amincissements les plus fins concernent donc uniquement une descente de scie, sans avance de lame (longueur de trait nulle). Pour libérer la membrane du silicium, deux tranchées sont réalisées de part et d'autre de celle-ci, dans le silicium, comme le montre la figure 2.15 (a) puis l'or est sous-gravé pour libérer niobate de lithium de son support. Il en résulte une membrane de niobate de lithium libre, soutenue par du silicium d'une part et du niobate de lithium épais d'autre part 2.15 (b). Avant le retrait du silicium, l'épaisseur minimale de couche de $LiNbO_3$ atteinte est de 300 nm et pour une couche de $LiNbO_3$ suspendue, l'épaisseur minimale s'avère égale à 1,2 µm.

Ces trois méthodes permettent la réalisation de plusieurs types de membranes, avec leurs avantages et inconvénients. Chacune d'entre elles sera utilisable pour la réalisation de structures optiques réalisées sur ces couches minces, comme le présente la section suivante.

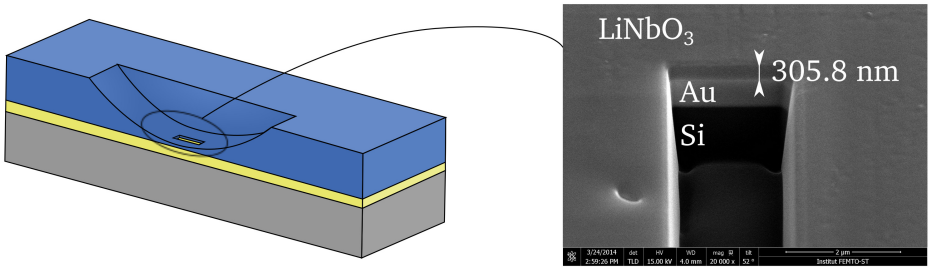


FIGURE 2.14 – Ouverture réalisée au FIB dans une membrane de $LiNbO_3$ réalisée à la scie

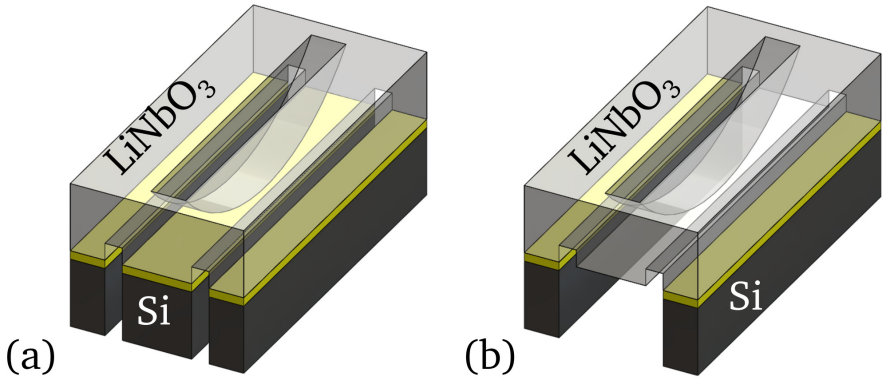


FIGURE 2.15 – Procédé de libération d'une membrane de niobate de lithium reportée sur silicium par collage *or/or*. (a) film solidaire du silicium, (b) membrane suspendue libérée de son support par retrait de la couche d'or intermédiaire

2.3.4/ STRUCTURES *B-ridge* SUR COUCHES MINCES

Les membranes que nous avons évoquées dans la section précédente permettent d'envisager un confinement d'ondes optiques particulièrement efficace dans les direction horizontales et verticale du guide. En effet, jusqu'à présent le confinement vertical du mode optique était assuré par une diffusion titane et donc un gradient d'indice. L'objectif consiste à réaliser un saut d'indice vertical et horizontal. Pour cela, nous réalisons une membrane plane (la lame descend, puis avance) de quelques millimètres de longueur, après quoi une structure de type *B-ridge* y est découpée. Nous obtenons alors un fil de niobate de lithium de section carrée, de largeur et épaisseur inférieures à 10 µm, maintenu à ses extrémités par quatre bras de niobate de lithium, comme le montre l'image de la figure 2.16. Ces bras de maintien permettent aussi de réaliser des adaptateurs de modes optiques. Cette structure est maintenue par une couche de *Vitralit* ou d'or selon la technique de report employée mais il est impossible de la réaliser sur niobate de lithium seul. Le fil de niobate de lithium se trouve posé sur de la *Vitralit* ou de l'or. En optique, l'or doit être retiré pour les raisons évoquées plus haut (absorption du mode). Il en résulte ainsi un fil suspendu, tenu par quatre bras à ses extrémités. Ce type de dispositif est bien entendu fragile et difficile à réaliser, même s'il est maintenu durant la découpe. Pour des largeurs et épaisseurs d'environ 5 µm, l'adhérence entre la *Vitralit* ou l'or et le niobate de lithium devient insuffisante pour garantir l'intégrité de la structure et le fil se décroche durant la découpe. Ce phénomène est dû en grande partie à la largeur du *B-ridge* puisque ce paramètre détermine directement la surface d'accroche. Plus celle-ci sera grande, meilleure sera l'adhérence. Les largeurs minimales caractéristiques avant rupture sont de 5 µm pour des structures reportées avec un collage par *Vitralit*, et de 2 µm pour celles reportées par couche d'or intermédiaire. Ces valeurs sont données pour des épaisseur de $LiNbO_3$ de l'ordre de la dizaine de micromètres. Les développements technologiques associés à ces méthodes ont montré une dépendance de la largeur minimale des structure utilisant ce procédé à l'épaisseur de la membrane de $LiNbO_3$. Ainsi, Pour des épaisseurs de membranes de l'ordre de 2 µm, les largeurs atteignable sont d'une vingtaine de micromètres pour les structures utilisant le collage par résine *Vitralit* et plus de 5 µm pour celles utilisant le collage *or/or*. Pour limiter cette dépendance à l'épaisseur de $LiNbO_3$, il est nécessaire de combler l'empreinte laissée par la lame lors de l'amincissement par l'apport d'un matériau qui augmente la résistance mécanique des structures. Pour cela, un procédé de fabrication à été imaginé, il est présenté en section suivante.

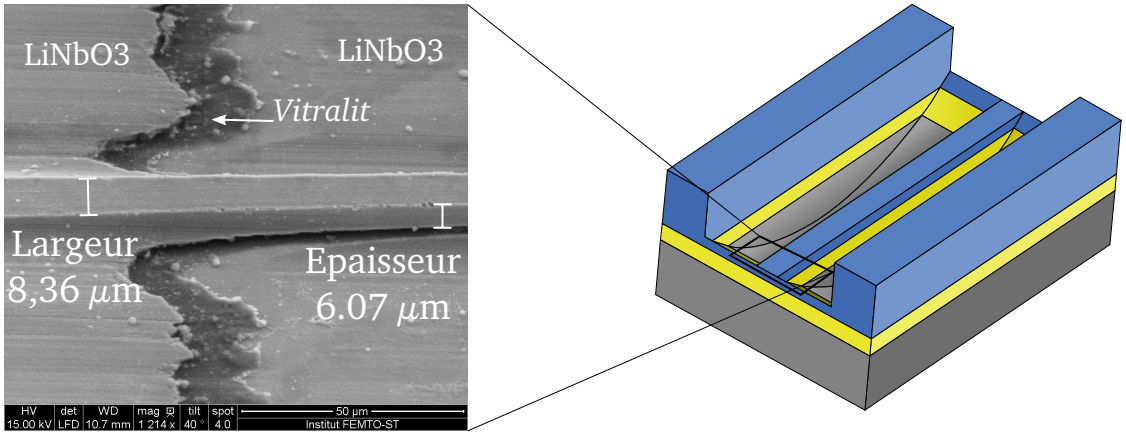


FIGURE 2.16 – Vue schématique d'un *B-ridge* usiné sur une membrane de $LiNbO_3$ réalisée à la scie (à droite) et image au MEB d'un zoom sur l'extrémité d'une telle structure (à gauche)

2.3.5/ Structures amincies

La problématique du maintien de la structure durant la découpe devient cruciale lors de découpes de structures de dimensions micrométriques. La découpe à la scie, bien que précise, reste mécanique et engendre donc un certain nombre d'efforts sur les structures qui deviennent de plus en plus fragiles au cour de leur usinage. Pour qu'elles puissent résister mécaniquement aux efforts de coupe, il est nécessaire de les renforcer. Le report de plaques de niobate de lithium avec de la *Vitralit* ou de l'or est une première étape mais ne suffit pas pour des structures de sections proches du micromètre carré. Les structures doivent alors être entourées de matière permettant de les maintenir lors de la découpe. Cette matière doit être dotée d'une certaine souplesse pour diffuser les contraintes liées à la découpe et d'une rigidité permettant de limiter le risque de rupture et d'assurer le maintien de la structure durant la découpe. Par conséquent, nous avons mis au point le procédé suivant pour répondre à de telles contraintes de fabrication.

Tout d'abord, une structure de type ruban ou *B-ridge* est réalisée à la surface d'une plaque de niobate de lithium (figure 2.17 (a)) sur une profondeur comprise entre 30 µm et 50 µm. Cette configuration permet d'obtenir des structures de 2 µm de largeur sur 1 cm de longueur. Nous réunissons ainsi les meilleures conditions pour réaliser une structure très précise au niveau de la largeur et de la profondeur car les mesures de calibrage sont simples à réaliser et précises (erreur inférieure à 100 nm). Une fois la structure réalisée, de la *Vitralit* est déposée sur la structure et dans les tranchées de sciage. Une plaque est ensuite posée sur la *Vitralit* pour aplanir cette dernière et permettre sa réticulation par insolation aux UV (figure 2.17(b)). Du fait de la quantité de *Vitralit* présente dans les sillons de la scie, l'insolation nécessite une durée d'environ 15 minutes. L'ensemble est alors retourné dans la machine de découpe, puis les structures sont amincies par la face arrière (figures 2.17(c) et (d)). Cet amincissement peut atteindre 1 µm lorsque la lame effectue uniquement une descente sans avancer (figure 2.17(c)). Lorsque la lame avance, il est possible d'obtenir un fil de niobate de lithium de section carrée, noyé dans la *Vitralit* (figure 2.17(d)). Dans ces conditions de fabrication, il est possible d'obtenir un fil de niobate de lithium de section 4,5×4,5 μm^2 sur une longueur de 3 mm. L'homogénéité en épaisseur du fil est limitée par la variation d'épaisseur de la *Vitralit* et par les variation d'épaisseur des deux plaques collées l'une sur l'autre.

2.4/ Récapitulatif des limites dimensionnelles des structures sur $LiNbO_3$

Le $LiNbO_3$ est un matériau intéressant pour toutes ses propriétés acoustiques et optiques, mais aussi pour sa tenue à la découpe–polissage. L'étape de structuration par découpe est réalisée avec une scie diamantée dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 2.2. Des découpes de cette précision ont permis de réaliser un certain nombre de structures à hauts facteurs de forme de conception variées et innovantes, présentées dans ce chapitre. Chacune de ces configuration possède des avantages et des inconvénients que nous résumerons dans le tableau 2.3, en donnant leurs principales caractéristiques. Pour les besoins de l'optique, certaines de ces structures ont été amincies localement. La qualité et la finesse de l'amincissement dépend de la technologie employée pour maintenir l'échantillon lors de la découpe. Les différents résultats d'amincissement sont résumés dans le tableau 2.4.

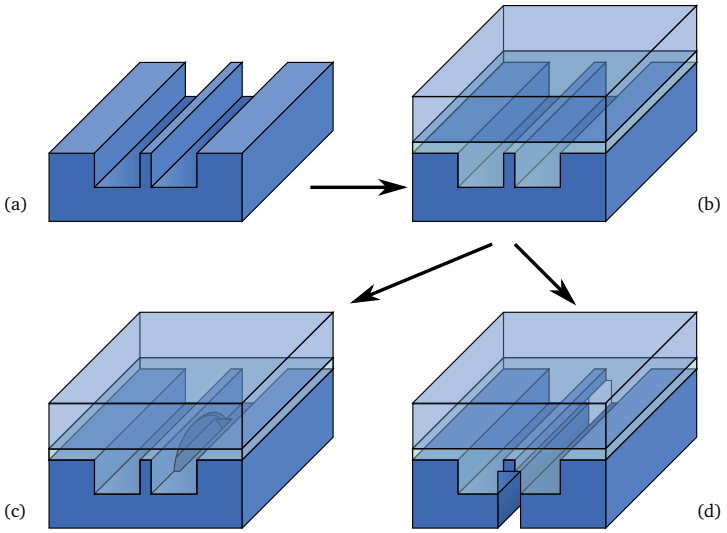


FIGURE 2.17 – Procédé de réalisation d'amincissement des structures à la scie

	Axe X	Axe Y	Axe Z
Précision de positionnement	5 µm	2 µm	1 µm
Répétabilité de positionnement	< 1 µm	< 1 µm	< 100 nm
Précision de mesure sur la machine	±0,5 µm	±0,5 µm	±75 nm

Tableau 2.2 – Tableau présentant les principales caractéristiques «machine» de la scie de précision DAD 3350

2.5/ STRUCTURES SUR D'AUTRES MATÉRIAUX PIÉZOÉLECTRIQUES

Les sections précédentes ont montré les possibilités de découpe sur le niobate de lithium, la qualité des structures réalisées et la variété de configuration accessibles. Cependant, pour des utilisations surtout acoustiques, il est intéressant de réaliser des structures à partir d'autres matériaux qui peuvent présenter différents avantages en termes de sensibilité environnementale ou de tenue à la température en ce qui concerne les capteurs plus particulièrement. Le tantalate de lithium ($LiTaO_3$) est un matériau isomorphe au $LiNbO_3$ dans sa structure en son comportement. Il est aussi ferroélectrique et peut être utilisé à ce titre pour les mêmes applications que le niobate de lithium. Il est moins sensible à la température que le $LiNbO_3$ mais ses propriétés de couplage (piézoélectrique, électro-optique, acousto-optique) lui sont généralement inférieures. Sa structure étant proche de celle du niobate de lithium, il se découpe de la même manière. Les coupes de tantalate de lithium ayant été usinées sont la coupe Z et la coupe YXl/(42), qualitativement elles présentent toutes les deux un poli optique, des rugosités inférieures à 10 nm et très peu d'écailles. Aucun développement technologique supplémentaire n'a été réalisé pour découper ce matériau. On peut alors obtenir les mêmes structures que sur $LiNbO_3$.

La langasite est un matériau piézoélectrique développé initialement en URSS pour remplacer le quartz. De même famille que le quartz, ce matériau est dénué de température de Curie et présente

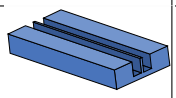
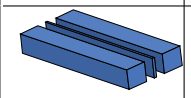
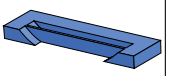
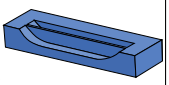
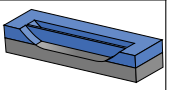
	Ruban	Ruban libre	Ruban suspendu	B-ridge	Ruban suspendu reporté sur Si
					
Rugosité des flancs	4 nm RMS	4 nm RMS	4 nm RMS	4 nm RMS	4 nm RMS
Rugosité du fond de sciage	6 nm RMS	N.A.	N.A.	6 nm RMS	non mesurée
Écailles et fissures en bord de coupe	Aucune écaille ou fissure	Fissures régulières le long de la structure	Fissures et écailles occasionnelles	Aucune écaille ou fissure	Rarement d'écailles
Largeur minimale reproductible	2 µm	100 µm	50 µm	2 µm	20 µm
Largeur minimale atteinte	1 µm	80 µm	20 µm	1 µm	6 µm
Facteur de forme reproductible	300	5	10	300	25
Facteur de forme atteint	500	6,25	25	500	83

Tableau 2.3 – Caractéristiques principales des structures à hauts facteurs de forme

	Amincissement local non reporté	Amincissement local avec report sur substrat massif	Structures B-ridge amincie	Structures insérées dans la résine *Vitralit*
Précision de calibrage	1 µm	0,1 µm	0,1 µm	0,2 µm
Épaisseur minimale de $LiNbO_3$ atteinte	4 µm	300 nm	5 µm	1,5 µm
Longueur maximale atteinte	1 cm	2 cm	5 mm	3 mm
Épaisseur de la couche de $LiNbO_3$ pour la longueur maximale atteinte	7 µm	3 µm	6 µm	4,5 µm

Tableau 2.4 – Caractéristiques principales des différentes structures amincies

une température de fusion de l'ordre de 1450 °C. Ses propriétés piézoélectriques sont avérées jusqu'à 900 °C qui en font un matériau plus attractif pour les développements de capteurs de température au-delà de 500 °C. Les ondes élastiques au sein de ce matériau présentent un couplage électromécanique trois fois supérieur à celui du quartz, atout supplémentaire ne palliant toutefois

que partiellement son manque de maturité vis-à-vis du quartz. La réalisation de ruban d'épaisseur 20 µm et de facteur de forme supérieur à 20 sur ce matériau permet de réaliser des dispositifs acoustiques inédits fonctionnant aux températures mentionnées précédemment. Plusieurs orientations cristallines ont été testées, soulignant une fois encore la dépendance des paramètres de découpe selon la coupe du matériau sans pour autant permettre de conclusion définitives. On peut en effet retenir deux phénomènes principaux régissant le comportement de ce matériau face à la découpe. Le premier est sa dureté évaluée à 6,6 sur l'échelle de Mohs – comparativement, le $LiNbO_3$ est à 5 –, qui la rend difficile à usiner à la scie et induit des fissures qui apparaissent de manière aléatoire durant la découpe. Aucun lien n'a pu être établi entre les paramètres de coupe et l'apparition de fissures sur ce matériau. Le second est sa capacité à être poli car bien que le matériau se fissure par endroit, les flancs étant restés intacts sont polis et verticaux. Cependant, les fissures sur ce matériau empêchent la réalisation de dispositifs fondés sur l'utilisation de structures de type ruban.

Le quartz est un matériau bien connu et largement utilisé dans le domaine des télécommunications, des capteurs et de la métrologie temps-fréquence. Sa découpe est maitrisée quand il s'agit de séparation de puces, mais très peu lorsque les flancs de découpe doivent être polis. Nos développements ont montré une facilité du quartz à se fissurer lors de la découpe mais il est toutefois possible de réaliser des structures sans fissure sur plusieurs centimètres. Cependant, le principal problème rencontré lors de la découpe de quartz est l'usure de la lame. En effet, après seulement quelques millimètres de découpe, la lame s'use de plusieurs dizaines de micromètres de manière non uniforme, donnant à la lame un profil totalement irrégulier. Ce profil est alors reporté sur les structures qui présentent ainsi une variation d'épaisseur importante. Les dispositifs qui en résultent ne sont pas utilisables en acoustique avec cette méthode de fabrication.

2.6/ Métallisation des structures

La métallisation de structures de type ruban intervient pour les applications d'acoustique, d'électro-optique et d'acousto-optique. Pour exciter une onde élastique à l'intérieur de la structure, la métallisation est réalisée sur les flancs de celle-ci. Une technique bien connue pour réaliser un dépôt de métal s'appuie sur la pulvérisation cathodique, méthode choisie pour ses dépôts multidirectionnels permettant en autres de métalliser les parties verticales d'une structure (voir figure 2.18). Les électrodes ainsi déposées consistent en une couche d'aluminium ou une couche d'or, cette dernière étant maintenue sur le substrat grâce à une couche d'accroche en chrome. L'épaisseur des couches métalliques varie selon la profondeur des structures par phénomène d'ombrage, comme l'illustre la figure 2.19. Pour améliorer l'homogénéité de la métallisation, il est nécessaire de minimiser ce phénomène, et donc de maximiser la largeur des tranchées. La plupart des dispositifs nécessitant une métallisation a donc été réalisés avec des tranchés de 800 µm de largeur. Pour remédier partiellement au phénomène d'ombrage, le dispositif peut aussi être pivoté de quelques degrés de part et d'autre de sa ligne médiane pour orienter les flancs en direction de la cible. Cela permet d'obtenir des couches métalliques sur toute la profondeur de la structure, par lesquelles la structure peut être excitée électriquement de manière efficace. Ce type de métallisation est suffisante pour réaliser des dispositifs opérationnels mais ne permet pas d'en envisager une production industrialisée, but final du développement de ces structures en acoustique. Pour cela nous avons réalisé la conception d'un outil d'homogénéisation des électrodes, présenté en figure 2.20. Il est constitué d'une plaque pivotante interchangeable permettant d'accueillir des puces d'un centi-

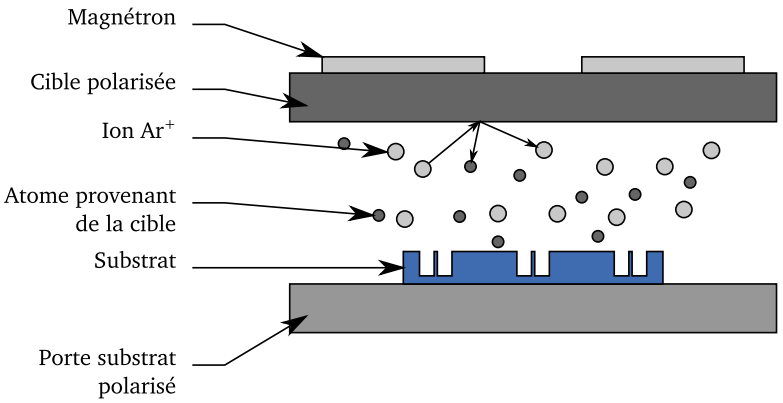


FIGURE 2.18 – Principe de la pulvérisation cathodique

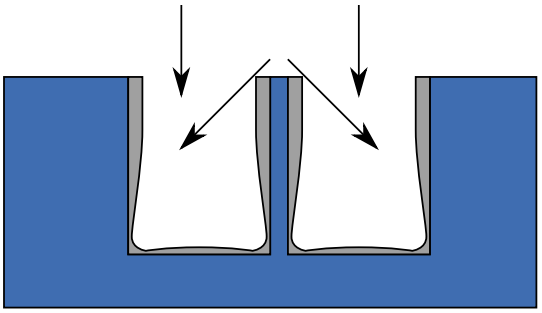


FIGURE 2.19 – Ombrage dû aux rapports de formes élevé des structures

mètre carré à des plaques de quatre pouces. Un micromoteur engendre la rotation, dimensionné pour disposer d'un couple supérieur au couple résistant de l'outil, dans les conditions les plus défavorables (plaque de diamètre 100 mm avec son support). Ce micromoteur entraîne en rotation un système bielle-manivelle, permettant de transformer la rotation continue du moteur en rotation partielle alternative du plateau. L'angle de débattement du système peut être réglé par des crans situés sur le système bielle-manivelle, comme le montre la figure 2.20. Ce système de pivotement pour l'amélioration de l'homogénéité des électrodes à été dimensionné mais n'a pas pu être réalisé dans le cadre de nos travaux.

2.7/ CONCLUSION

La découpe à la scie circulaire de précision de structures de type guide d'ondes dans des matériaux piézoélectriques et particulièrement le $LiNbO_3$ permet d'accéder à des configurations de dispositifs jusque là inaccessibles. Des structures à hauts facteurs de forme (>300) ont pu être réalisées, arborant des qualités physiques permettant d'envisager le guidage d'ondes lumineuses et acoustiques en leurs seins. Ainsi ces structures présentent des qualités de surfaces polies (R_q <6 nm), des verticalités supérieures à 88° et des largeurs pouvant atteindre 1 µm. Des structures en ponts dites «B-ridge» permettent de reporter les électrodes en surface mais aussi d'améliorer la qualité des structures en termes d'écaillage. Ces structures sont à l'origine d'un dépôt de brevet dans le domaine de l'optique pour l'injection adaptée de modes guidés. En acoustique,

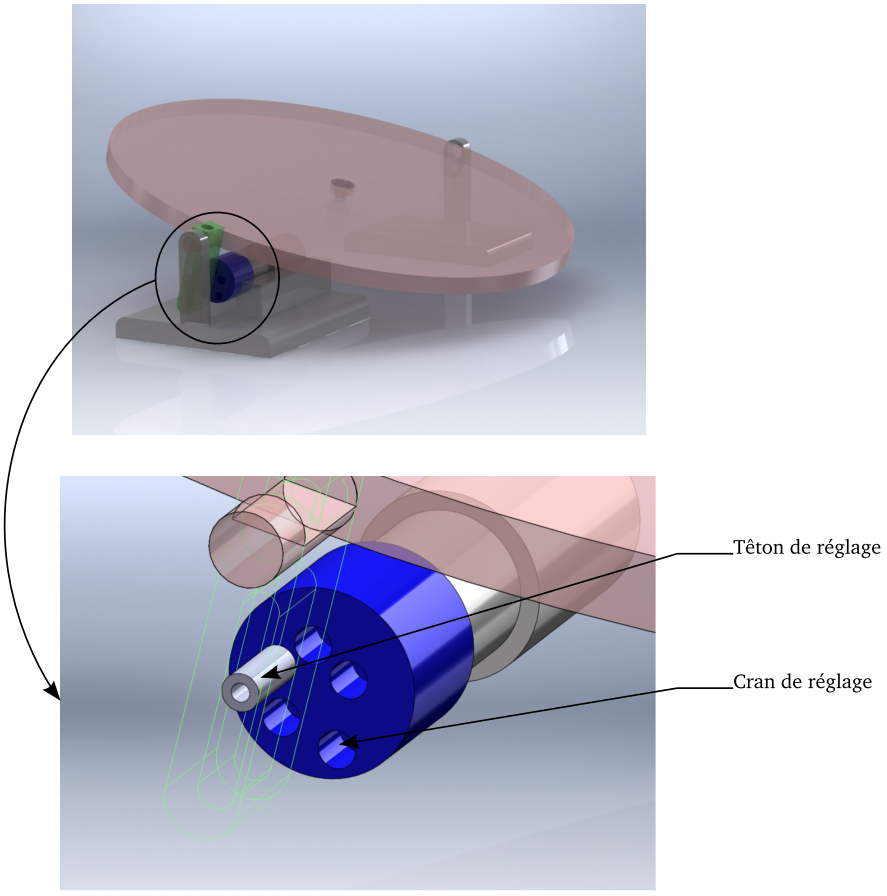


FIGURE 2.20 – Outil de pivotement pour la métallisation de structures à hauts facteurs de forme

ces guides permettent d'accéder à des couches de matériau au sein desquelles les ondes élastiques présentent des propriétés intéressantes en termes de vitesse d'onde et de couplage électromécanique. Comme le montre le chapitre 3, cette méthode permet de travailler sur une coupe cristalline de niobate de lithium adaptée à l'inversion de domaines ferroélectriques, tout en exploitant une configuration originale de transducteur, orthogonale au plan de référence de la plaque dont il est issu. L'amincissement local à la scie de précision permet d'obtenir des structures inédites permettant d'améliorer le confinement d'ondes optiques au sein de guides à saut d'indice. Les structures décrites dans ce chapitre sont caractérisées en optique ou en acoustique dans les chapitres suivants, dans lesquels les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles sont explicités.

3

Applications acoustiques : éléments d'impédance pour filtrage large bande

3.1/ Introduction

L'utilisation d'une scie diamantée de précision permet d'accéder à des géométries de résonateurs acousto-électriques inédites et notamment à des couches de matériaux verticales sur des plaques monocristallines de $LiNbO_3$ et $LiTaO_3$ de différentes orientations. Ces couches verticales présentent un fort élancement, leur largeur pouvant atteindre 1 µm pour une hauteur de plus de 300 µm. La structure ainsi obtenue rend possible l'exploitation de coupes cristallines tournées à 90° par rapport à la plaque originale, ce qui autorise l'obtention de couplages électromécaniques supérieurs à 10 % en utilisant les plaques verticales comme résonateurs à ondes de volumes. En combinant cette technologie de fabrication avec l'inversion périodique de domaines ferroélectriques, il devient possible de réaliser des transducteurs utilisant une onde stationnaire [99, 100] dont les propriétés varient en fonction de la largeur de la structure et de la période d'inversion des domaines. Ces structures permettent d'atteindre des vitesses de phase équivalentes supérieures à $20\,000\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ ainsi que des couplages électromécaniques de plus de 20 % (selon la géométrie du dispositif). Les configurations permettant d'obtenir ces propriétés dépendent du rapport entre la largeur du dispositif et sa période d'inversion de domaines ferroélectrique [100]. Ainsi, il faut compter un rapport 10 entre largeur du ruban et période du réseau pour obtenir une vitesse équivalente de phase de plus de $20\,000\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$, ou encore une largeur 5 fois plus petite que la période pour obtenir un couplage électromécanique de plus de 20 %. De telles caractéristiques opérationnelles sont obtenues pour un mode de vibration particulier du $LiNbO_3$ et permettent d'envisager l'utilisation de ces structures au sein de dispositifs nécessitant des résonateurs fortement couplés, comme pour le filtrage large bande. Ainsi, une architecture inédite de filtre a été réalisée et celle-ci ouvre la voie à des exploitations soutenues de ce type de dispositifs, notamment avec l'utilisation de deux matériaux tels que le $LiNbO_3$ et le $LiTaO_3$. Les caractéristiques de ces matériaux permettent de privilégier différents paramètres – selon l'application visée – comme la sensibilité à la température, la vitesse de phase, le couplage électromécanique ou la pureté spectrale.

Ce chapitre s'articule selon deux parties distinctes : la première fait apparaître une modélisation numérique du problème permettant de dimensionner les structures et la seconde présente l'ensemble des structures réalisées. L'objectif de la première partie consiste à montrer le potentiel de ce type de structures via la simulation numérique fondée sur le couplage entre méthodes

d'éléments finis et de frontière, apte à simuler tout type de géométrie. Ainsi, les investigations se concentreront autour de dispositifs à hauts facteurs de forme sur des matériaux polarisés périodiquement ou non et permettront de définir des largeurs, hauteurs et périodes d'inversion des domaines pour atteindre les caractéristiques opérationnelles désirées. La seconde partie présente la caractérisation des différentes structures réalisées, en rappelant les différents procédés de fabrication mis en œuvre ici. Les résonateurs caractérisés permettent de montrer l'intérêt de nos structures en les comparant avec les résultats théoriques ; la concordance entre simulation et mesure permettant un développement rapide de cette technologie pour le but recherché. Les structures réalisées sont alors utilisées dans la réalisation de filtres électriques à large bande (de 2 % à 15 % de la fréquence centrale), aboutissement du développement de ces dernières. Ce chapitre a donc pour vocation de montrer la faisabilité et l'intérêt des dispositifs à hauts facteurs de forme pour des applications acousto-électriques, au travers de la réalisation de démonstrateurs utilisant différentes architectures et s'appuyant sur l'utilisation de la scie diamantée pour leur structuration.

3.2/ Recherche de géométries pertinentes pour les structures à hauts facteurs de forme

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 1, la réalisation de couches minces tournées de 90° doit améliorer notablement la réponse des résonateurs de type BAW et PPLN. Cependant, pour obtenir l'amélioration souhaitée, il est nécessaire d'optimiser la conception des structures. Pour cela, les caractéristiques dimensionnelles de ces dernières, comme la largeur du ruban, sa hauteur et la période d'inversion de domaines (pour les transducteurs polarisés périodiquement), devront être fixées. La détermination de ces paramètres nécessite des outils de simulation numérique, comme le montre cette section.

3.2.1/ Présentation et intérêt des simulations numériques

Depuis l'apparition des machines de calcul, la science n'a de cesse de recourir à la simulation numérique pour résoudre des problèmes physiques toujours plus complexes. Après avoir débuté avec le projet Manhattan durant la seconde guerre mondiale pour modéliser le processus de détonation nucléaire, le recours aux simulations numériques s'est généralisé à nombreux domaines scientifiques. L'apparition de la simulation par éléments finis dans les années 50 [142] permet de résoudre des problèmes complexes mais nécessite une capacité de calcul proportionnelle à la complexité du problème à résoudre. Cette méthode de résolution de problèmes physiques se fonde sur l'approximation du résultat exact par une méthode d'interpolation polynomiale en discrétisant le modèle en un nombre d'éléments reliés entre eux par des lois physiques, cette discrétisation s'appuyant sur un maillage géométrique. Cette méthode peut s'appliquer à des problèmes de natures très différentes et mettant en jeu de nombreux phénomènes physiques tels que la mécanique des milieux continus, la mécanique des fluides, la magnétostatique, l'aérodynamique, ou encore l'électrostatique [143]. La précision du résultat dépend du nombre d'éléments de la discrétisation. Avec l'augmentation des capacités des machines de calcul, le nombre d'éléments utilisés pour les simulations numériques croît continuellement. Pour les besoins de l'industrie des microtechniques, des logiciels ont été conçus pour simuler des dispositifs miniaturisés régis par des lois physiques propres aux domaines d'application. Les logiciels de modélisation de ces dispo-

sitifs permettent par exemple de prévoir la propagation d'ondes élastiques au sein de différents matériaux [143], dont les constantes sont définies dans le logiciel. Il est possible de simuler la génération d'ondes élastiques via un matériau piézoélectrique excité par des électrodes à différentes fréquences et de déterminer ainsi les fréquences propres de vibration de la structure. Dans notre cas, nous nous intéresserons à la capacité du dispositif à transmettre et à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique (et inversement) en fonction de la fréquence appliquée à ses bornes. Cependant, il existe peu de logiciel grand public permettant de réaliser ce type de simulation. Un logiciel spécifique a ainsi été développé au sein du laboratoire [144]. La simulation de structures à l'aide de ce logiciel se décompose en deux parties ; la première permet de définir la géométrie du maillage en deux ou trois dimensions, la seconde permet de fixer les conditions physiques qui régissent le problème, comme la périodicité, la nature du matériau et son orientation cristalline, la plage fréquentielle de simulation ou encore le potentiel à appliquer au système, puis de simuler le comportement du dispositif soumis à ces conditions. Le détail du fonctionnement de cet outil de simulation est donné dans la section suivante.

3.2.2/ Outils de modélisation

3.2.2.1/ Logiciels utilisés

Les logiciels MAJAX et EMMIX2 fonctionnent de paire pour réaliser la simulation numérique de transducteurs à ondes élastiques. MAJAX est un outil de dessin utilisant des objets géométriques simples tels que les rectangles, les cercles ou les lignes polygonales. Il permet de construire un modèle de la géométrie étudiée aussi proche que possible du dispositif réel. Pour prendre en compte tout type ou presque de géométrie et donc couvrir autant que possible les différentes formes de nos dispositifs, il est possible de réaliser l'extrusion du dessin en deux dimensions pour obtenir une structure 3D. Une fois la structure tridimensionnelle obtenue, l'utilisateur définit des domaines correspondant aux différentes parties du système à simuler. Ces domaines sont alors discrétisés en éléments qui forment le maillage de la structure. La finesse du maillage (le nombre total d'éléments) détermine la durée de la simulation et conditionne la précision des résultats. Plus le maillage est dense, plus le résultat obtenu sera proche de la solution analytique du problème. Une fois le maillage et sa géométrie complètement définis, le fichier généré par MAJAX est utilisé par EMMIX2, la deuxième partie de l'outil de simulation. Ce logiciel permet de décrire les lois physiques régissant le problème et de les appliquer à la structure définie dans MAJAX. La description physique du problème commence par la définition des matériaux de la structure via une base de donnée qui contient les constantes des principaux matériaux utilisés en acousto-électricité. Dans notre étude, nous utiliserons principalement le $LiNbO_3$ et le $LiTaO_3$ selon différentes orientations cristallines. Chaque domaine défini dans MAJAX est lié à un matériau, qui peut être différent d'un domaine à l'autre.

Le logiciel EMMIX2 combine des éléments finis et des éléments de frontières qui permettent respectivement de conférer une périodicité au système et de prendre en considération le rayonnement d'ondes aux frontières de la structure au sein du substrat sur lequel elle est réalisée. Ces fonctionnalités s'avèrent particulièrement utiles lorsqu'il s'agit de simuler des peignes interdigités avec un grand nombre de doigts, par exemple. L'étude d'un système périodique peut se ramener à celle d'une de ses périodes, permettant de gérer le temps de calcul et taille des modèles de façon optimale. Par ailleurs, les éléments de frontière constituent une approche efficace de connexion entre structure d'excitation locale d'encombrement parfaitement défini et milieu ouvert au sein

duquel l'énergie peut se dissiper, sans obliger à l'utilisation de maillages démesurés. Dans notre cas, elles seront utilisées pour simuler la périodicité d'inversion de domaines ferroélectriques reportés sur substrats massifs (supposés semi-infinis). Les conditions de périodicité sont décrites dans le logiciel et permettent bien de s'affranchir du maillage intégral de la structure. La plage de fréquence sur laquelle la simulation est effectuée et le pas de calcul associé sont définis de même par l'utilisateur. Le logiciel calcule alors le résultat de la simulation en se fondant sur l'ensemble des données physiques et géométriques ainsi programmées. La charge électrique et le déplacement constituent deux données critiques renvoyées (entre autres) par le logiciel après calcul pour chaque fréquence de la plage souhaitée.

3.2.2.2/ Description de problèmes 2D

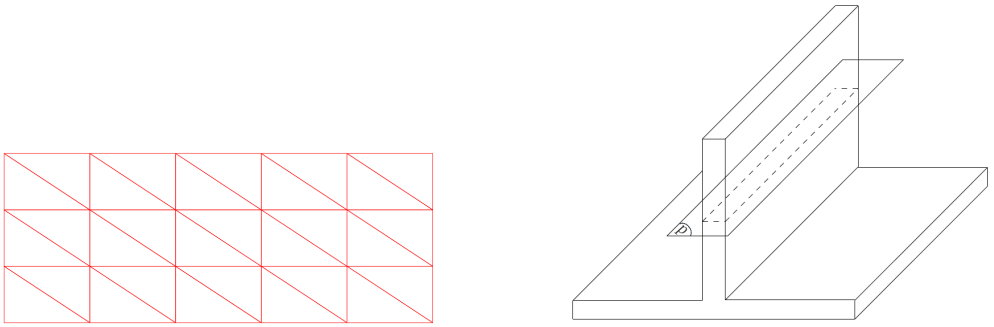
La simulation de structures via les logiciels MAJAX et EMMIX2 permet la description en deux ou en trois dimensions de problèmes physiques. Cette section est consacrée à la description bidimensionnelle de structures de type ruban à haut facteurs de forme. Ce type de simulation ne tient pas compte de la géométrie réelle du transducteur, la simplification s'appuyant sur l'hypothèse de déformation plane induite ici par l'élancement du ruban. Ramener de la sorte un problème 3D à un problème 2D permet de gagner un temps de simulation important du fait de la différence de nombre d'élément, sans toutefois dégrader de façon déraisonnable la pertinence des résultats. Dans le cas de rubans élancés, nous supposerons dans un premier temps des déformation planes selon la hauteur de la structure, notablement supérieure à sa période de polarisation et sa largeur, grandeurs respectivement portées par les deux axes du modèle dimensionnel. Ce type de simulation est illustré eu sein des paragraphes suivants.

Structure de type ruban simple

La simulation la moins complexe à réaliser consiste à définir une couche de matériau piézoélectrique excitée par une tension de fréquence variable grâce à un système d'électrodes planes disposées sur ses surfaces. On réalise ainsi la simulation d'une plaque siège de la propagation d'ondes de volumes, dans notre cas, une couche verticale. Le maillage (par des éléments triangulaires) d'une telle structure est donnée en figure 3.1 (a). La couleur uniforme montre qu'il s'agit d'un seul domaine, c'est à dire un seul matériau, les électrodes étant supposées ici infiniment fines et leur contribution élastique négligée par principe. Nous utiliserons ce type de simulation pour prévoir le comportement de rubans à hauts facteurs de forme à base de $LiNbO_3$ (YXl)/128° et de $LiTaO_3$ (YX*l*)/42° (voir section 3.2.3).

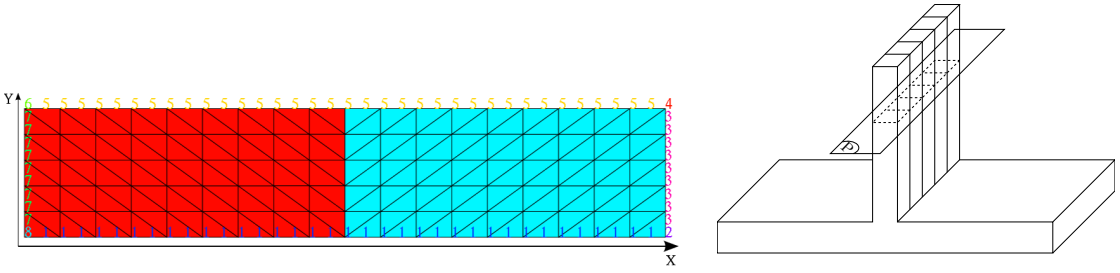
Structure de type ruban polarisé périodiquement

L'inversion périodique de domaines ferroélectriques permet de polariser le matériau, qui se comporte alors exactement comme s'il était constitué de deux matériaux de même propriété élastique et diélectrique mais dont la piézoélectricité serait soumise à une rotation de 180°. Ce phénomène est décrit dans les simulations par l'utilisation de deux orientations cristallines de $LiNbO_3$ de coupe ZX accolées l'une à l'autre et tournées de 180° l'une par rapport à l'autre. Comme expliqué en début de chapitre, la hauteur de la structure n'est pas prise en compte (déformations planes). La nature périodique du transducteur nous pousse à ne simuler qu'une période du réseau en lui appliquant les conditions aux limites idoines [100]. Les côtés droits et gauches de cette



(a) (b)

FIGURE 3.1 – Géométrie et maillage d'une structure 2D monodomaine simple



(a) (b)

FIGURE 3.2 – Géométrie et maillage d'un transducteur polarisé périodiquement à haut facteur de forme ramenés à une étude 2D

géométrie (longueur suivant X, cf. figure 3.2 (a)) sont utilisés à cette fin, en supposant ainsi un réseau périodique infini. La hauteur de la structure (selon Y) correspond à la largeur de la structure. La différence de potentiel est appliquée sur les flancs du dispositif. Pour simuler cette couche verticale, il suffit de définir le matériau tourné de 90° par rapport au substrat initial. Un des deux domaines de la figure 3.2 (a) est défini comme du $LiNbO_3$ en coupe $(YXl)/180°$ (soit une coupe Z tournée de 90° par rapport à X) et l'autre comme une coupe (YX), correspondant à un ruban polarisé périodiquement réalisé sur un substrat en coupe Z (axe Z perpendiculaire au wafer).

Avant de donner les résultats de ces simulations, nous réalisons une étude préliminaire pour déterminer le nombre d'éléments nécessaire et suffisant pour garantir la convergence. Des simulations de rubans polarisés périodiquement sont réalisées en faisant croître le nombre d'éléments à chaque itération, le nombre de points de calcul étant choisi égal à 1900 pour chacune d'entre elles. La figure 3.3 donne l'évolution de la réponse acoustique (suivi d'un mode de vibration principal) et du temps de calcul en fonction du nombre d'éléments utilisé pour le maillage de la structure, mettant en évidence la vitesse de convergence de la simulation. Le critère de convergence est ici établi au sens de l'écart entre les fréquences de résonances de chaque itération. Cet écart diminuant à chaque itération, le calcul est considéré convergent. En pratique la limite de convergence est donnée par la précision avec laquelle les constantes matériaux sont connues.

Il nous sera nécessaire de réaliser plusieurs centaines de simulation les une à la suite des autres pour étudier l'évolution de la réponse acoustique, c'est pourquoi le nombre d'élément est choisi autour de 1000. Dans certains cas nécessitant une plus grande précision des résultats, le nombre

d'éléments sera élevé à 2000.

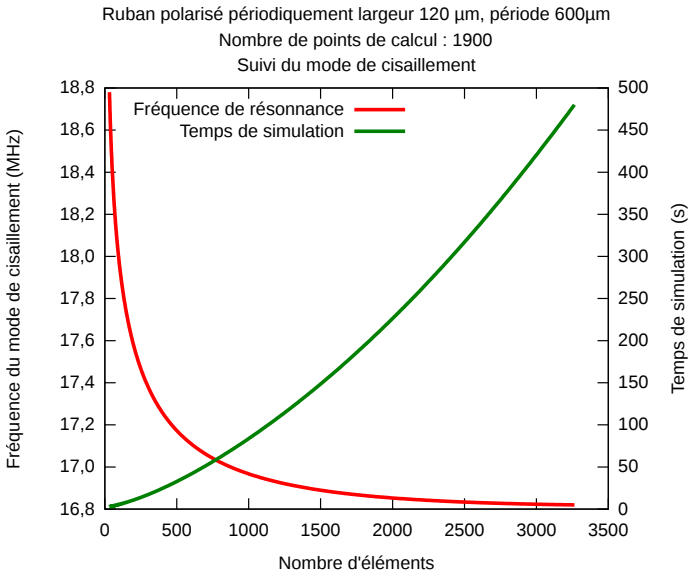


FIGURE 3.3 – Évolution de la réponse acoustique et du temps de simulation en fonction du nombre d'éléments utilisés dans le maillage de la structure

3.2.3/ MODES DE VIBRATION DE STRUCTURES MONODOMAINES

La géométrie du problème est décrite en 2D via son maillage réalisé à l'aide de MAJAX et la description matérielle et électrique du problème est programmée via EMMIX2. La simulation de nombreux dispositifs acoustiques périodiques est ainsi accessible, de même que celle de dispositifs monodomaines, comme le montre cette section. En effet, le maillage présenté en figure 3.1 permet de simuler une tranche de matériau infinie selon sa hauteur (déformations planes) avec une seule orientation cristalline. Ainsi cette section s'intéressera à deux matériaux pour des utilisations distinctes. La première simulation concerne le $LiNbO_3$ (YX*l*)128°, l'objectif étant de générer une résonance du mode de volume longitudinal aux alentours de 434 MHz pour une interrogation à distance du dispositif utilisé alors comme capteur. La seconde simulation concerne le $LiTaO_3$ (YX*l*)42° que l'on cherchera à utiliser pour son Coefficient de Température de la Fréquence (CTF) relativement faible en comparaison du $LiNbO_3$. La réalisation de rubans simples sur $LiTaO_3$ (YX*l*)42° permet en outre de caractériser le mode de cisaillement électriquement excité en fonction du traitement appliqué au matériau dans le but d'optimiser les composants de la société EPCOS, dans le cadre du projet de thèse de Minerva Gonzalez.

Rubans à base de $LiNbO_3$ (YX*l*)128°

Une fois la géométrie et les propriétés physiques de la structure décrites dans les différents logiciels, la simulation est effectuée et le résultat présenté en figure 3.4. Cette simulation montre une fréquence de résonance du mode longitudinal à 435 MHz, pour une largeur de ruban de 7,5 µm. Le couplage électromécanique évalué grâce à cette simulation est de plus de 21 %. Un tel couplage permet d'envisager une interrogation à distance du dispositif puisque représentatif de sa capacité à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement [145]. De plus, la simu-

lation ne fait apparaître qu'une seule autre contribution située à 270 MHz d'amplitude plus faible (facteur 10000 entre les deux contributions) due au mode de cisaillement lent nettement moins couplé que l'onde longitudinale pour cette orientation, ce qui permet d'envisager une ligne de base sans modes parasites perturbant les mesures.

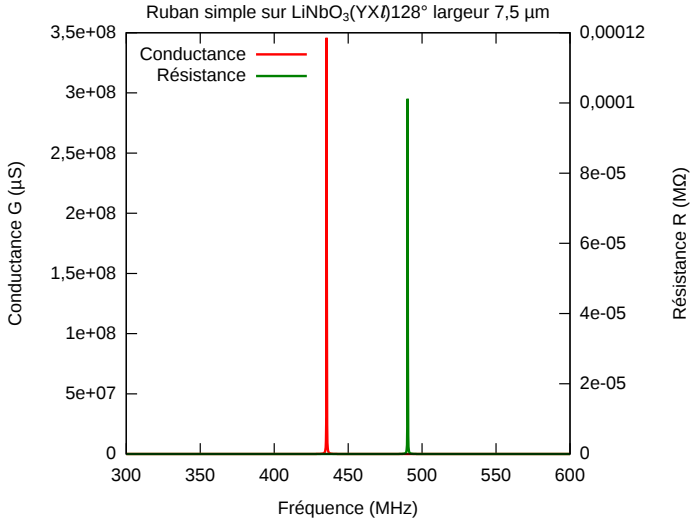


FIGURE 3.4 – Résultat de la simulation d'une structure de type ruban simple sur $LiNbO_3$ (YX*l*)128°, pour une largeur de 7,5 µm. Mise en évidence des fréquences de résonance et d'anti-résonance permettant d'estimer le couplage électromécanique du mode au voisinage de 21 %.

Ruban à base de $LiTaO_3$ (YX*l*)42°

La structure simulée est la même que pour le $LiNbO_3$ (YX*l*)128° à la largeur près, puisque cette dernière est maintenant fixée à 19 µm, valeur pour laquelle une résonance de 100 MHz est obtenue. Le résultat de la simulation est donné en figure 3.5. Cette simulation montre un mode de résonance à 101 MHz et une contribution à 345 MHz (probablement l'harmonique trois du premier mode), dont les couplages électromécaniques sont respectivement égaux à 18,3 % et 2,1 %. La simulation d'une variation de température dans la gamme 20-80 °C montre que le CTF du premier mode est de -15 ppm/K.

Ces simulations montrent que l'excitation d'ondes de volume au sein de couches verticales de matériau selon les coupes usuelles présente des intérêts en termes de couplage électromécanique ou de CTF. De plus, l'accès à de telles structure est simplifié grâce à l'utilisation de la scie de précision et la réalisation de ce type de dispositif n'a pas nécessité de développement technologique particulier. Les structures sur $LiNbO_3$ (YX*l*)128° et $LiTaO_3$ (YX*l*)42° ont été réalisées et sont respectivement caractérisées dans les sections 3.3.3.1 et 3.3.3.2.

3.2.4/ MODES DE VIBRATION DES STRUCTURES POLARISÉES PÉRIODIQUEMENT

Une fois le maillage 2D de la structure polarisée périodiquement réalisée avec MAJAX et le calcul effectué par EMMIX2, nous pouvons analyser les résultats en nous intéressant plus particulièrement aux admittance et impédance des structures pour déduire les caractéristiques électriques équivalentes des modes ainsi excités.

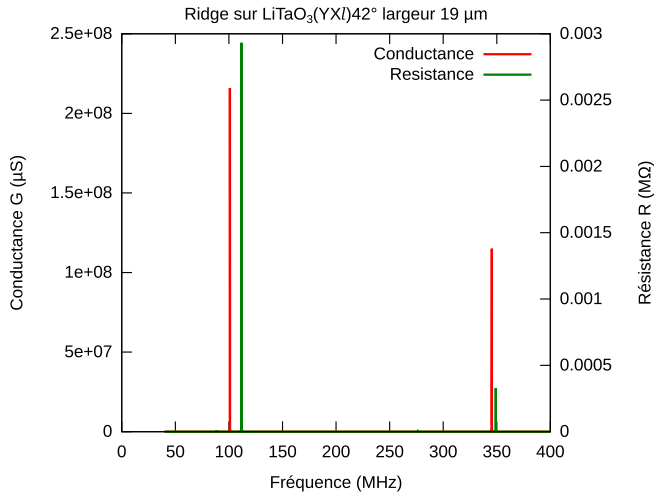


FIGURE 3.5 – Résultat de la simulation d'une structure ruban réalisé dans une plaque de $LiTaO_3$ (YXl)42°, pour une largeur de 19 µm. Le mode correspondant est polarisé transversalement (cisaillement pur), la contribution à 350 MHz étant associée à l'harmonique trois du mode fondamental à 100 MHz.

3.2.4.1/ TRANSDUCTEURS POLARISÉS PÉRIODIQUEMENT SUR NIOBATE DE LITHIUM

Les simulations en deux dimensions offrent la possibilité de modifier deux paramètres géométriques du dispositif, sa période – notée p – et sa largeur – notée l – dont les influences sur les propriétés d'excitation, de détection et de guidage des modes seront étudiées dans cette partie. Ces paramètres géométriques ont d'abord été modifiés de sorte que le rapport l/p soit toujours le même, quel que soit la période du dispositif simulé. Nous constatons ainsi (voir figure 3.6) qu'il existe une loi de proportionnalité entre la fréquence et le rapport l/p. En effet, à un facteur multiplicatif près, les réponses des dispositifs sont équivalentes. Ainsi, la fréquence de résonance d'un dispositif de 20 µm de largeur et de 100 µm de période sera dix fois moins élevée que la fréquence de résonance d'un dispositif de largeur 2 µm et de période 10 µm pour les deux modes de vibrations excités au sein de la structure que nous nous attacherons à caractériser par la suite. Il existe donc une relation de proportionnalité entre les simulations de deux structures ayant un rapport l/p égal qui permet (pour les deux modes principaux) de transposer les résultats de l'une à l'autre. L'étude des simulations en deux dimensions devra donc montrer l'évolution de la réponse acoustique en fonction du rapport largeur sur période, à période ou largeur constantes. Comme la période d'inversion de domaine est technologiquement fixée par celle des masque utilisés, il a été choisi de se placer à période constante et de faire varier uniquement la largeur des dispositifs.

Du fait de la linéarité de la variation de fréquence des modes en fonction du rapport l/p, la période de travail est dans un premier temps fixée à 600 µm, ce qui correspond à la période des premières structures réalisées. Les résultats obtenus seront ainsi transposables à d'autres périodes de travail. La figure 3.7 présente le résultat d'une simulation faisant apparaître les deux modes principaux : le mode basse fréquence, polarisé longitudinalement selon la direction X vibrant ici à 10,2 MHz et un mode de cisaillement à plus haute fréquence vibrant ici à 16,8 MHz. Ces deux modes au comportement bien distinct serons étudiés dans les sections suivantes, après en avoir défini les caractéristiques principales. Cette étude concerne essentiellement deux paramètres jugés

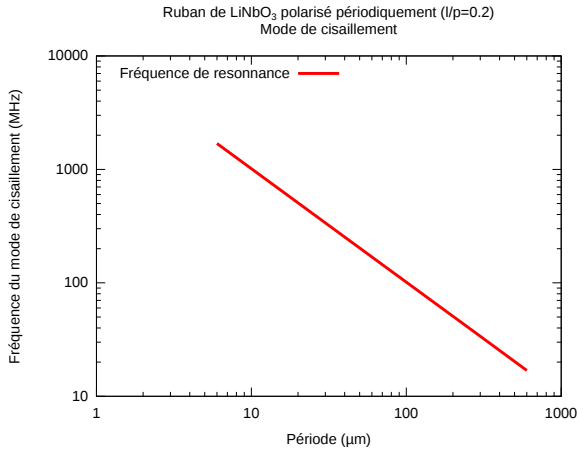


FIGURE 3.6 – Évolution de la fréquence de résonance d'un mode de vibration à rapport l/p constant

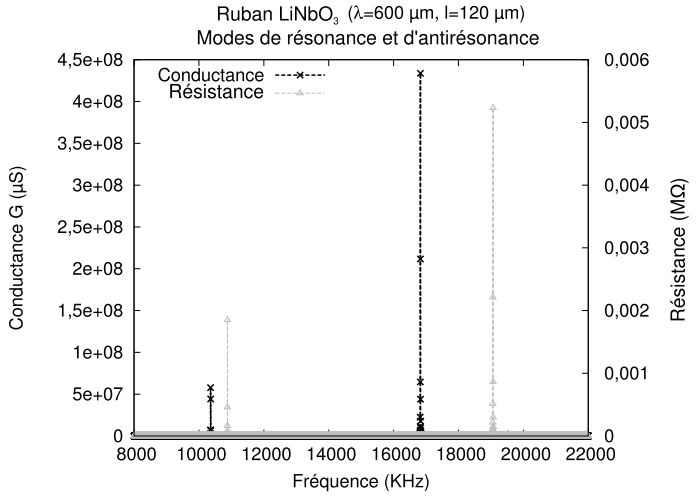


FIGURE 3.7 – Résultat d'une simulation montrant l'évolution de la conductance et de la résistance en fonction de la fréquence

les plus importants pour nos applications futures : le couplage électromécanique et la vitesse équivalente de phase. Ces paramètres sont déterminés à partir du résultat des simulations et peuvent se déduire de la figure 3.7. La vitesse équivalente de phase est donnée par l'équation 3.1 où V est la vitesse de l'onde élastique, λ est la période d'inversion des domaines et f_r la fréquence de résonance :

$$V = \lambda f_r \tag{3.1}$$

En prenant les fréquences de résonance des deux modes mis en évidence en figure 3.7 (la résonance étant prise au maximum de conductance), on obtient une vitesse de $10\,095\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ pour le mode de cisaillement et $6120\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ pour le mode longitudinal. Le couplage peut lui aussi être déterminé depuis la figure 3.7 via la formule donnée au chapitre 1 et rappelée ici par l'équation 3.2 dans laquelle k^2 est le couplage électromécanique, f_r est la fréquence de résonance et f_a la fréquence d'antirésonance (fréquence à la valeur maximale de résistance) :

$$k^2 = 1 - \left(\frac{f_r}{f_a}\right)^2 \tag{3.2}$$

L'utilisation d'un rapport l/p égal à 0,2 donnant lieu aux résultats de la figure 3.7 montre un couplage électromécanique de 22 %, notablement plus élevé que les couplages électromécaniques de dispositifs SAW sur coupes standard ((YXl)/128° de $LiNbO_3$ ou (YXl)/42° de $LiTaO_3$). Une routine de calcul a ensuite été mise en place pour suivre les deux modes de vibration indépendamment et en caractériser les propriétés fidèlement.

3.2.4.2/ Étude du mode longitudinal

Le mode de vibration à plus basse fréquence est un mode à polarisation longitudinale. Les déformations géométriques qu'il engendre dans la structure sont données par la figure 3.8. L'amplitude de cette déformation est maximale à la fréquence de résonance, qui dépend comme expliqué plus haut de la largeur et de la période de la structure. Ce mode est suivi grâce à une routine de cal-

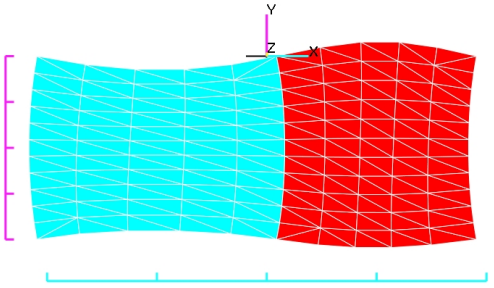


Figure 3.8 – Déformation de la structure engendrée par la vibration du mode longitudinal

cul qui fait varier la largeur de la structure à période constante et se recentre sur le maximum de conductance à chaque itération. Cette routine calcule aussi le couplage électromécanique à chaque itération, permettant de tracer la courbe de dispersion reportée en figure 3.9. On peut alors constater l'évolution non linéaire de la fréquence de résonance et du couplage en fonction de la largeur du dispositif. Dans la plupart des applications visées (particulièrement en matière de filtrage), un couplage électromécanique élevé est préférable, c'est pourquoi l'on repère le point de fonctionnement où le rapport l/p vaut 0,4. En ce point, le couplage électromécanique vaut 11,8 % et la vitesse équivalente de phase est de $5900\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. En terme de vitesse équivalent de phase, ce mode est comparable aux ondes de surface se propageant sur $LiNbO_3$ [65]. L'étude de ce mode est complétée en section 3.2.4.5 par le suivi de la fréquence lors d'une variation de température.

3.2.4.3/ Étude du mode de cisaillement

Le mode de cisaillement est le second mode auquel nous nous intéresserons. Les déformations géométriques qu'il engendre dans la structure sont données par la figure 3.10. Pour ce mode comme pour le mode longitudinal, la déformation maximale (hors plan sagittal) se trouve à la fréquence de résonance et varie avec le rapport l/p. Le suivi de la vitesse équivalente de phase et du couplage électromécanique de ce mode est illustré en figure 3.11. Ce mode présente deux caractéristiques pour un rapport $l/p = 0,2$ qui le rendent particulièrement intéressant pour la réalisation de filtres à larges bandes aux hautes fréquences. Son couplage électromécanique atteint en effet 22 % et la vitesse équivalente de phase s'élève alors à $10\,095\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ en ce point de fonctionnement. Si l'on choisit de travailler à fréquence plus élevée (avoisinant le gigahertz),

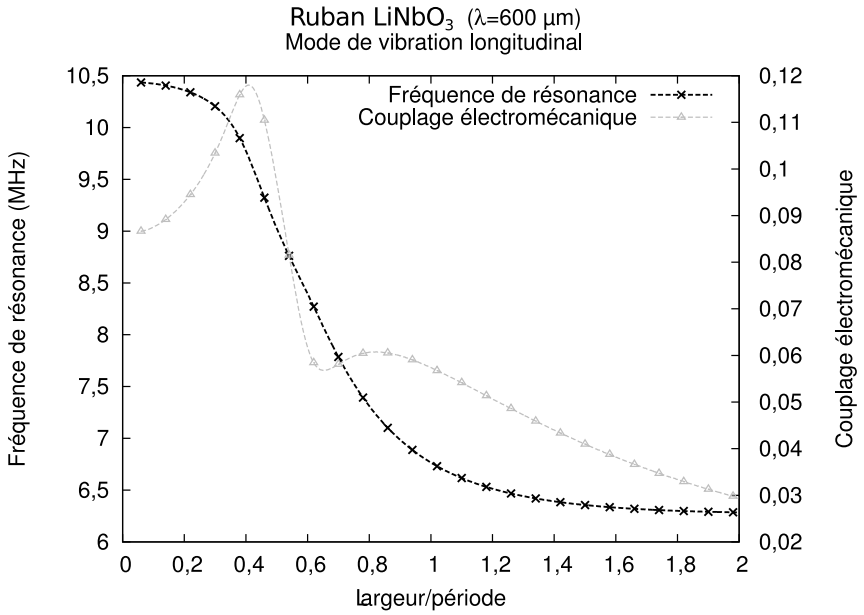


FIGURE 3.9 – Évolution du coefficient de couplage et de la fréquence du mode longitudinal en fonction du rapport l/p à période constante

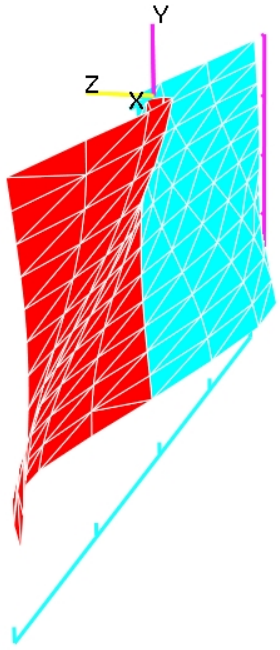


FIGURE 3.10 – Déformation de la structure engendrée par la vibration du mode de cisaillement

le rapport $l/p = 0,1$ permet par ailleurs d'obtenir des vitesses équivalentes de phase de près de $20\,000\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Cela permet d'atteindre une fréquence de travail de 1 GHz avec une période d'inversion de domaine de seulement 20 µm alors que dans le cas de SAW, il faudrait une période de peignes interdigités de 4 µm pour une vitesse de phase de $4000\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$, soit une largeur de trait de 1 µm. Ce mode présente cependant des variations rapides de fréquences aux alentours des points de fonctionnement intéressants. Cela signifie que toute erreur sur la largeur de la structure

engendre une erreur significative sur la fréquence de travail à hauteur de $85\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ par pourcent de variation de la largeur (à un rapport l/p proche de 0,2). Pour démontrer l'existence des couplages électromécaniques annoncés théoriquement pour ce type de structure, nous avons choisi de travailler à des périodes d'inversion de domaines de 600 µm, particulièrement adaptées pour atteindre les rapports l/p visés. Avec cette période, il s'avère en effet assez simple de réaliser lesdites structures, qui devront alors présenter une largeur de 120 µm. Les résultats expérimentaux en rapport avec ces simulations sont reportés en section 3.3.4.1.

Les deux modes étudiés sont excités dans des structures de type ruban à hauts facteurs de forme sur $LiNbO_3$, mais l'on s'intéressera aussi aux structures sur $LiTaO_3$, un matériaux ferroélectrique aux propriétés similaire à celles du $LiNbO_3$.

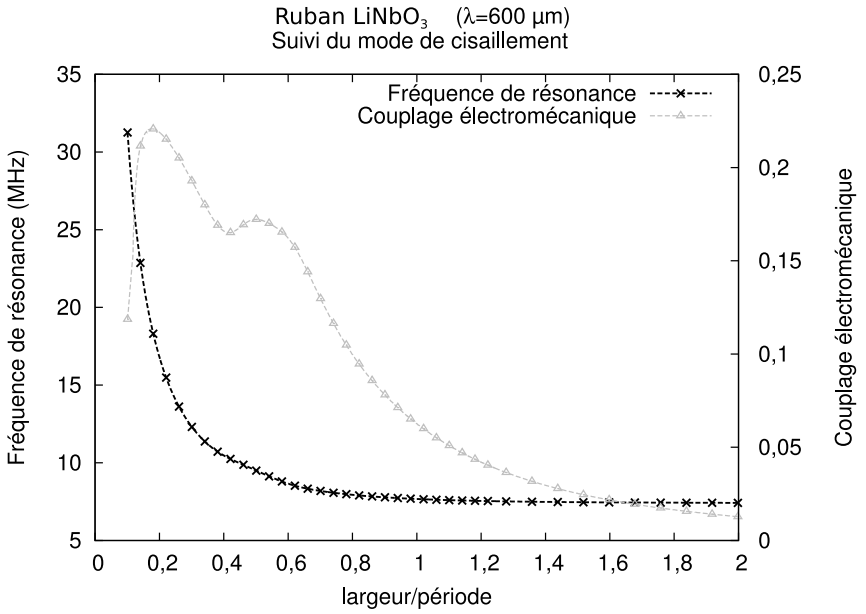


FIGURE 3.11 – Évolution du coefficient de couplage et de la fréquence du mode de cisaillement en fonction du rapport l/p à période constante

3.2.4.4/ TRANSDUCTEUR POLARISÉ PÉRIODIQUEMENT SUR TANTALATE DE LITHIUM

Le tantalate de lithium est un matériaux aux propriétés comparables à celles du $LiNbO_3$ puisqu'il est ferroélectrique, sa polarisation pouvant être inversée de la même manière que le niobate de lithium (champ coercitif de $21\,\mathrm{kV}\cdot\mathrm{mm}^{-1}$). Le couplage électromécanique de ce matériau est moins élevé que celui du $LiNbO_3$ mais sa dérive thermique est pratiquement deux fois moindre pour certains modes. La simulation de structures de type ruban à hauts facteurs de forme sur ce matériau permet – comme sur $LiNbO_3$ – de définir les valeurs des paramètres géométriques les mieux adaptées à la réalisation de résonateurs pour des applications de filtrage. Comme pour le $LiNbO_3$, la fréquence de résonance des structures en $LiTaO_3$ varient en fonction du rapport l/p. On retrouve là encore un mode longitudinal et le mode de cisaillement, mais leurs couplages électromécaniques ne varient pas de la même façon que dans le cas du $LiNbO_3$. Les courbes de dispersion des deux modes sont données sur la figure 3.12 qui fait apparaître leurs vitesse de phase et couplage électromécanique en fonction du rapport l/p. Les résultats de simulation montrent que les variations de fréquence ainsi calculées présentent des formes similaires à celles obtenues pour

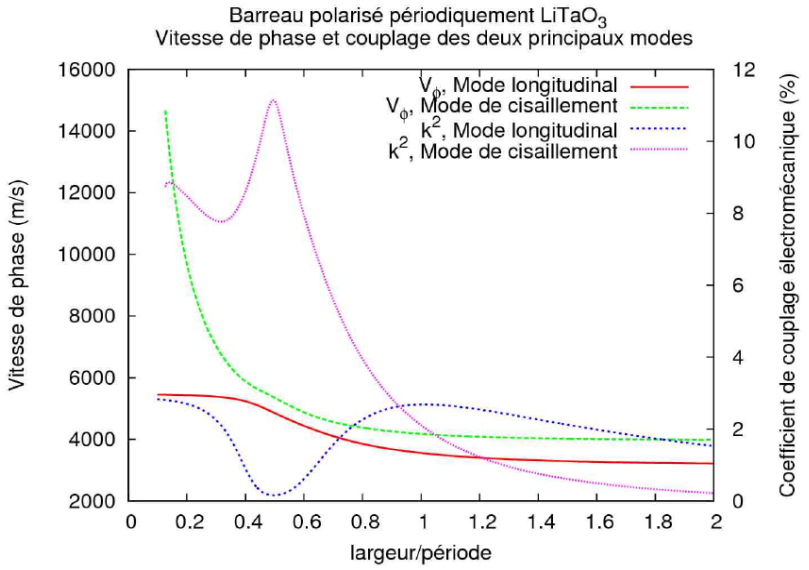


FIGURE 3.12 – Évolution du coefficient de couplage et de la fréquence des deux modes principaux sur $LiTaO_3$ en fonction du rapport l/p à période constante

le $LiNbO_3$ mais à des vitesses de phase moins élevées (maximum de 15 000 $m \cdot s^{-1}$ pour un rapport $l/p = 0,1$) pour le mode longitudinal. Le mode de cisaillement présente un couplage maximal de 11 % pour un rapport $l/p = 0,5$ Cependant, dans cette région, la variation de couplage est très rapide en fonction de l/p et les fréquences des deux modes sont très proches. Néanmoins, on montre que le couplage du mode longitudinal s'effondre pour le maximum de couplage du mode de cisaillement. Le point le plus intéressant pour le mode longitudinal se situe à un rapport $l/p = 1$. Son couplage électromécanique atteint la valeur de 3 %, mais sa valeur reste stable aux alentours de ce point de fonctionnement, de même que la fréquence de résonance du mode (la dispersion y est moins marquée que pour les rapports l/p inférieurs à 0,8.

Ces premières simulations en 2D permettent de comprendre le fonctionnement des structures soumises à une excitation électrique, afin de déterminer les paramètres importants et de prévoir le comportement des dispositifs. Pour compléter cette étude, la dérive thermique de ces structures sur $LiNbO_3$ et $LiTaO_3$ est étudiée dans la section suivante.

3.2.4.5/ VARIATIONS DE TEMPÉRATURE

Une variation de température modifie la fréquence de résonance de tout dispositif, ce qui peut être considéré comme un avantage ou un inconvénient selon l'application. Par exemple, pour un capteur de température, il est nécessaire de tirer parti d'une maîtrise effective des variations de fréquence induite par la variation température. Par contre, pour une fréquence servant de référence à un système, il est souvent nécessaire que celle-ci varie le moins possible avec la température. Dans tous les cas, il est nécessaire de bien connaitre le comportement d'un mode face à une variation de température. Pour cela, on définit un Coefficient de Température de la Fréquence

(CTF) par l'équation suivante [146] :

$$C_{tf}^{(i)} = \frac{1}{i! f_0} \left. \frac{\partial^i f(T)}{\partial T^i} \right)_{T=T_0} \tag{3.3}$$

La dérive thermique s'obtient ensuite avec l'équation suivante :

$$\frac{\Delta f}{f} = C_{tf}^{(1)}(T - T_0) + C_{tf}^{(2)}(T - T_0)^2 + C_{tf}^{(3)}(T - T_0)^3 \tag{3.4}$$

Dans le cas des niobate et tantalate de lithium, nous nous arrêterons au degré deux mais pour des matériaux tels que le quartz, les paramètres de degré trois peuvent jouer un rôle significatif. Pour le $LiNbO_3$ la variation du CTF suivant le rapport l/p est donné figure 3.13 : ces

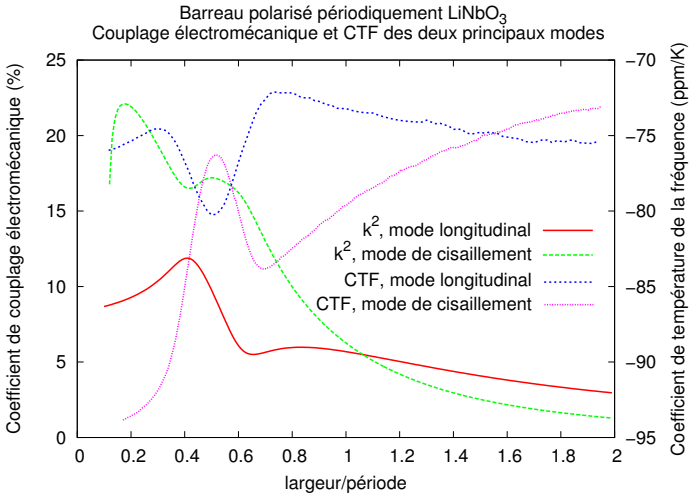


FIGURE 3.13 – Évolution du CTF en fonction du rapport l/p pour un ruban de Niobate de Lithium polarisé périodiquement (YXl/±90)

courbes montrent que les modes sont sensibles à la température, et notamment aux alentours des points intéressant ($l/p = 0,2$ et $0,4$) où le CTF est le plus défavorable pour les deux modes ($CTF_{longitudinal,l/p=0,4} = -78 ppm/K$ et $CTF_{cisaillement,l/p=0,2} = -93 ppm/K$). Ce résultat pourrait s'avérer gênant lors de la réalisation de filtres ou de capteurs, puisque la fréquence varie très rapidement à chaque changement de température. Pour le $LiTaO_3$, les courbes obtenues pour la variation du CTF en fonction du rapport l/p sont données figure 3.14. Les modes sur $LiTaO_3$ sont moins sensibles à la température que sur $LiNbO_3$ et le point de fort couplage pour le mode de cisaillement ($l/p = 0,5$) présente l'intérêt d'avoir un CTF relativement faible puisqu'il se trouve aux alentours de -30 ppm/K (néanmoins le CTF varie vite autour de ce point de fonctionnement, de plusieurs dizaines de ppm/K par $0,1 \times l/p$.

Cette simulation montrant l'effet de la température sur les modes de vibration des structures permet d'anticiper la dérive thermique et vient compléter l'étude 2D qui permet de définir les caractéristiques dimensionnelles des structures. On voit qu'en l'état, les structures de type ruban polarisés périodiquement présentent des sensibilités aux effets de température évoluant selon les caractéristiques dimensionnelles et de surcroît toujours négative (entre -20 et -95 ppm/K selon les modes et leur point de fonctionnement). Si cet aspect ne gène pas la conception de capteurs en température, il pose un problème pour les applications Temps-fréquence demandeuses de stabilité

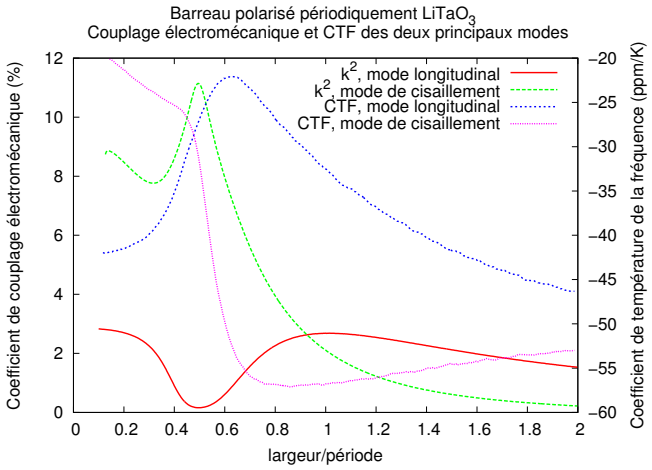


FIGURE 3.14 – Évolution du CTF en fonction du rapport l/p pour un ruban de Tantalate de Lithium polarisé périodiquement (YXl/±90)

thermique des fréquences de travail.

3.2.5/ DÉFINITION DES DIMENSIONS DE TRAVAIL

L'ensemble des simulations rapportant le problème à deux dimensions a permis une analyse complète de l'évolution des propriétés des modes suivant la géométrie générale du dispositif. Les structures à hauts facteurs de forme ont été ici considérées comme des plaques infinies dans deux directions (hauteur et direction de propagation), avec un paramètre d'épaisseur variable. Les simulations ont été effectuées avec une période d'inversion de domaine de 600 µm mais sont transposables par homothétie. Il résulte de ces simulations plusieurs points d'intérêt permettant de fixer certaines dimensions de travail, comme la largeur de la structure et la période d'inversion de domaine. Le $LiNbO_3$ sera utilisé pour réaliser des structure à hautes fréquences et couplage supérieur à 10 %, tandis que le $LiTaO_3$ sera utilisé pour des applications à sensibilité en température réduite comparée à celle du $LiNbO_3$ (2 à 3 fois moindre). Le $LiNbO_3$ présente deux points de fonctionnement intéressants qui nécessitent cependant une précision de fabrication des dispositifs garantissant l'obtention du rapport visé à mieux que 10 %. On retiendra un rapport $l/p = 0,2$ pour le mode de cisaillement, qui permet d'obtenir un couplage de 22 % pour une vitesse équivalente de phase de $10\,\mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Le rapport $l/p = 0,4$ pour le mode longitudinal du $LiNbO_3$ permet d'avoir un couplage de près de 12 % avec une variation de fréquence moins rapide autour de ce point que pour le mode de cisaillement. Sur $LiTaO_3$, le mode de cisaillement permet d'obtenir un point de fonctionnement intéressant pour un rapport $l/p = 0,5$ qui correspond au maximum de couplage, soit 11 %. Le mode longitudinal du $LiTaO_3$ possède une plage de fonctionnement intéressante qui s'étant d'un rapport l/p compris entre 0,7 et 1 où le couplage est supérieur à 2 % et la dérive thermique relativement faible (entre $-25\,\mathrm{ppm/K}$ et $-32\,\mathrm{ppm/K}$).

Ces simulations permettent de fixer la largeur et la période des structures et suffisent à la conception au premier ordre des dispositifs sans néanmoins fixer tous les aspects géométriques des structures. Pour réaliser une étude complète de leur comportement, la nature tridimensionnelle doit être considérée, comme développée dans la section suivante.

3.2.6/ Traitement de la nature tridimensionnelle des dispositifs

3.2.6.1/ Intérêt d'une approche en trois dimensions

La simplification d'un problème 3D vers un problème 2D nécessite des simplifications du modèle, souvent par des plans de symétrie ou des considérations géométriques permettant certaines hypothèses simplificatrices (contraintes ou déformations planes par exemple). Dans le cas d'une structure de type ruban à hauts facteurs de forme, nous avons simplifié le problème en ne tenant pas compte de l'embase de la structure, du fait de son élancement. Cela correspond, comme on l'a vu dans la section précédente, à une plaque aux dimensions latérales infinies. Or, si la longueur de la structure est très grande devant sa largeur (4 ordres de grandeurs) et peut être considérée comme infinie, sa hauteur ne se place pas dans un même rapport et peut jouer un rôle important dans l'établissement du mode excité, jouant un rôle équivalent à l'ouverture acoustique d'un dispositif SAW. Pour cette raison, des simulations en 3D on été réalisées pour analyser plus avant nos dispositifs. De plus, l'avantage de la simulation 3D de pouvoir modéliser une plus grande variété de géométrie va nous ouvrir de nouvelles perspectives d'optimisation. Nous pourrons ainsi prendre en compte les différentes contraintes géométriques liées à la fabrication. Comme on a pu le voir dans le chapitre 2, la verticalité des structures n'est pas égale à 90° et un évasement apparaît systématiquement en fond de tranché. Ces deux imperfections géométriques liées à la découpe peuvent être modélisées grâce à la prise en compte de la nature tridimensionnelle des dispositifs dans les simulations. Cependant, l'inconvénient majeur de ce type de simulation reste le temps de calcul. En effet, par rapport à un cas 2D, ce temps est multiplié par un facteur compris en 100 et 1000. L'étude et le suivi des modes sur $LiNbO_3$ et $LiTaO_3$ n'ont donc pas pu être effectué en 3D. Nous nous sommes attachés cependant à la vérifier la concordance des résultats entre les simulations 2D et 3D pour les points de fonctionnement remarquables issu de l'analyse 2D, puis nous avons étudié l'effet de la profondeur sur le système. Nous avons finalement modélisé les imperfections géométriques liées aux difficultés technologiques pour tenter d'identifier les paramètres critiques de mise en œvre de ces transducteurs.

3.2.6.2/ Transducteur simple : comparaison avec un modèle 2D

Pour effectuer un maillage en trois dimensions, une vue plane de la structure est réalisée à l'aide du logiciel MAJAX, puis la structure est extrudée de la valeur souhaitée, en la décomposant en un nombre d'éléments choisi. Ce premier maillage en trois dimensions sert principalement à effectuer une vérification de la concordance des résultats 3D avec les simulations en 2D. Pour cela, nous concevrons une géométrie avec les mêmes conditions aux limites que le cas 2D, comme présenté en figure 3.15. Dans ce cas de figure, une répétition de la géométrie sera effectuée selon les axes cristallins X et Z, correspondant à une structure infiniment longue et profonde, comme dans le cas des simulations en 2D. Une telle géométrie n'apporte donc aucun aspect supplémentaire à la simulation, mais elle est nécessaire pour montrer la cohérence des deux simulations. De plus, la densité de maillage doit être suffisante pour se rapprocher au maximum de la solution simulée en 2D. Une fois la simulation réalisée, une comparaison entre les résultats obtenus en 2D et en 3D est effectuée. Ainsi, la figure 3.16 montre les résultats obtenus pour les modes de cisaillement et longitudinal en 2D et en 3D. Cette simulation à été réalisée pour plusieurs rapport l/p mais le balayage complet de la variation de fréquence en fonction du rapport l/p n'a pas été effectué à cause du temps pris par une seule simulation en 3D. On considèrera cependant que la cohérence

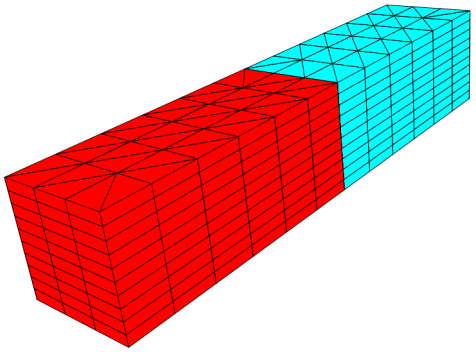


FIGURE 3.15 – Maillage d'une structure 3D simple

entre le cas 2D et 3D est généralisable à tous les ratio l/p. La différence entre les deux simulations vient principalement du fait que nous n'utilisons pas la même densité de maillage, par soucis de rapidité. La cohérence des résultats montre la fiabilité de la simulation 3D et nous permet donc

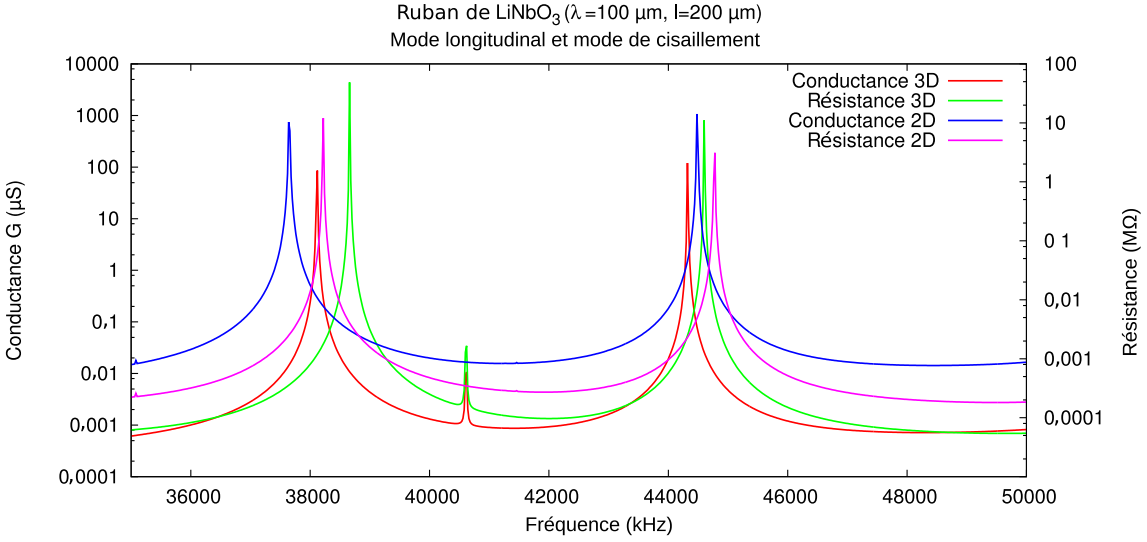


FIGURE 3.16 – Comparaison des résultats 2D et 3D

d'envisager la modélisation de structures plus complexes, intégrant par exemple leur évasement à l'ancrage et les imperfections liées à la découpe, abordés à la section suivante.

3.2.6.3/ GÉOMÉTRIES DE TRANSDUCTEURS COMPLEXES

La simulation tridimensionnelle permet de prendre en compte une géométrie plus proche de la réalité qu'en deux dimensions, avec en particulier l'ancrage de la structure sur l'embase, ainsi que des hauteurs et largeurs finies. La figure 3.17 montre la géométrie de la modélisation tridimensionnelle d'une structure de type ruban. Ainsi, les paramètres pouvant varier sont la hauteur de la structure, sa verticalité et le rayon du congé d'angle de dépouille.

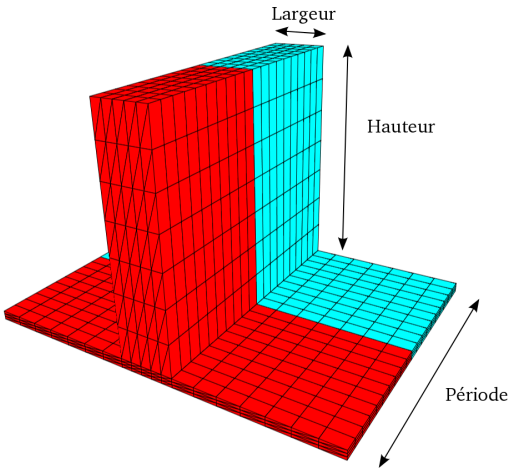


FIGURE 3.17 – Maillage 3D avec embase d'une structure de type ruban

Variation de la hauteur de la structure

La hauteur de la structure correspond à une ouverture acoustique équivalente, une variation de celle-ci engendrant nécessairement une modification de la réponse acoustique du système. Pour réaliser l'inversion de domaines ferroélectriques, nous travaillons essentiellement avec des tranches de matériau d'une épaisseur de 500 µm (standard industriel). La hauteur maximale des structures simulées sera donc limitée à cette valeur. La figure 3.18 présente la variation de réponse d'un transducteur polarisé périodiquement pour différentes hauteurs de celui-ci. En pratique, la

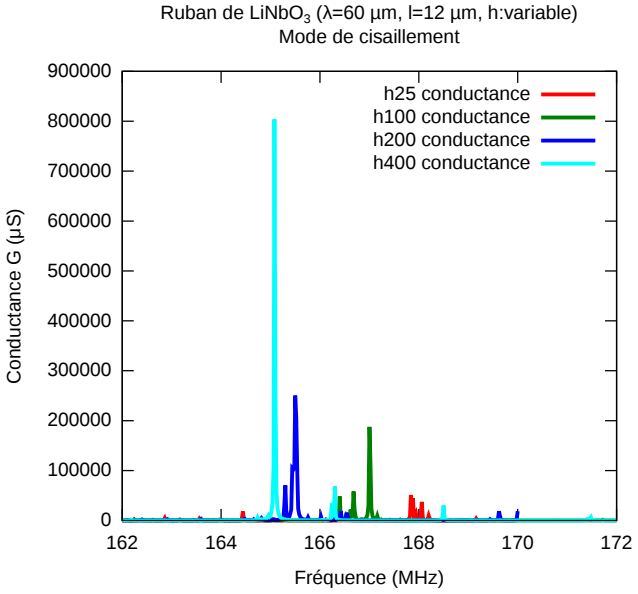


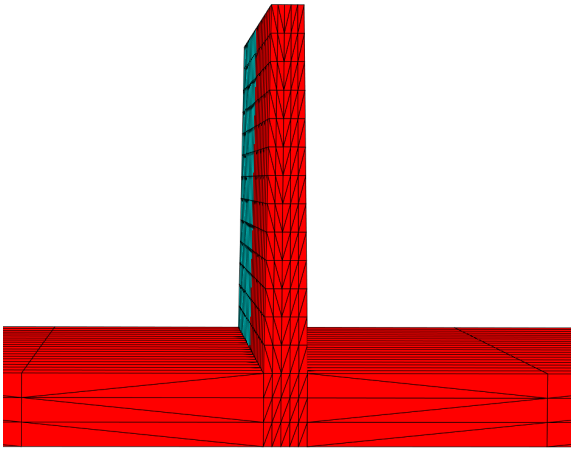
FIGURE 3.18 – Simulation de la réponse d'un transducteur polarisé périodiquement pour différentes hauteur de découpe

hauteur du dispositif est donnée lors de la découpe à la scie circulaire. Cette simulation montre que la hauteur du dispositif induit des variations d'amplitude de sa conductance à la fréquence de résonance. Ce résultat était attendu puisqu'au préalables la conductance était calculée en siemens par mètre en deux dimensions. Comme pour les dispositifs SAW, une augmentation de l'ouverture acoustique engendre donc une augmentation de la valeur crête du pic de conductance à la fré-

quence résonance. La variation de hauteur correspond aussi à variation de fréquence, mais celle-ci est inférieure à 2 % sur toute la plage de hauteurs utilisée (25 µm à 400 µm). De plus, comme pour les simulations en deux dimensions, la fréquence dépend de la densité de maillage ; il existe donc nécessairement un écart – plus ou moins significatif – entre les fréquences de résonance obtenues par simulations et celles mesurées sur les dispositifs fabriqués à ce stade. L'écart de 2 % sur les fréquences calculées ne sera pas pris en compte pour définir les structures test, jugé de fait non représentatif.

Cette simulation montre que pour de faibles hauteurs (25 µm), l'amplitude du pic de résonance ne lui permet pas de se détacher clairement des modes parasites environnant alors que pour des hauteurs proches de 400 µm la résonance est nettement définie, sans mode parasite aux alentours de la fréquence centrale.on souligne ainsi l'intérêt de structures hautes de plusieurs centaines de micromètres pour une longueur d'onde inférieure à 100 µm. Par la suite, la profondeur des dispositifs fabriqués sera choisie la plus grande possible (la plus proche de 500 µm), sachant que la période type des transducteurs se situera entre 600 µm et 15 µm.

(a)



(b)

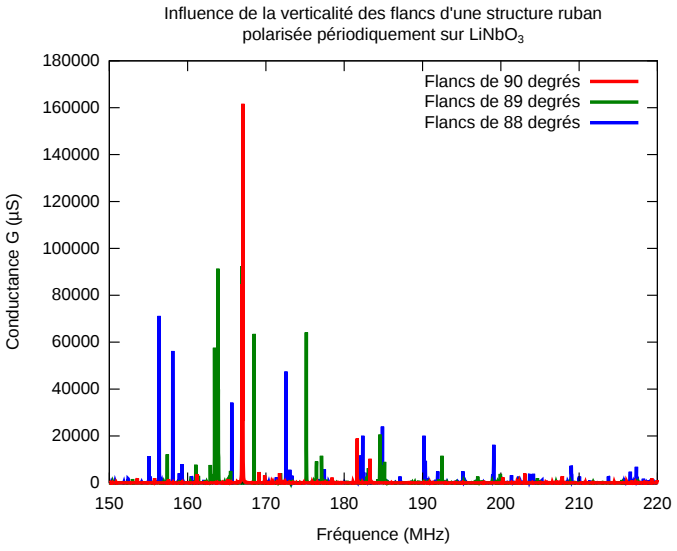


FIGURE 3.19 – Structure ruban polarisée périodiquement sur $LiNbO_3$ de période 60 µm, dont la verticalité est de 88° (a) et sa réponse électrique simulée (zoom sur le mode de cisaillement) (b)

Variation de verticalité

La verticalité des structures (voir figure 3.19 (a)) est donnée lors de la découpe à la scie circulaire, et comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, ce paramètre ne peut être maîtrisé simplement. La simulation dont le résultat est présenté figure 3.19 (b) montre l'influence de la verticalité sur la réponse acoustique du dispositif. Le défaut de verticalité engendre une augmentation du nombre de pics de conductance, leur intensité étant relié à la l'importance de ce défaut angulaire. Si pour un angle de 1 degré il est encore possible de distinguer le mode fondamental, il devient difficile de retrouver les résultats obtenus en 2D pour un angle de 2°. L'apparition de modes parasites aux alentours de la fréquence centrale s'explique par le fait qu'une variation de verticalité engendre une variation de largeur sur toute la hauteur de la structure. Toutes les fréquences correspondant aux largeurs comprises entre le haut et le fond de la structure sont donc excitées. Dans la simulation, des pics apparaissent du fait de la discrétisation géométrique en un nombre fini d'élément, or dans un cas réel, il s'agirait d'une infinité de largeurs différentes et donc d'une variation continue et lente de la conductance, au lieu d'obtenir une variation rapide pour une fréquence bien définie. Dans ce cas, le coefficient de qualité – défini comme le rapport de la fréquence de résonance (ou d'antirésonance) sur la largeur du pic à mi hauteur – du pic de résonance en est évidemment affecté. Ce résultat montre l'importance d'une verticalité meilleure que 88°, obtenue effectivement la plupart du temps avec le mode de découpe à la scie diamantée. Il est toutefois certain que les modes excités ne seront pas purs à cause d'un défaut de verticalité non nul.

Variation du rayon du congé d'angle de dépouille

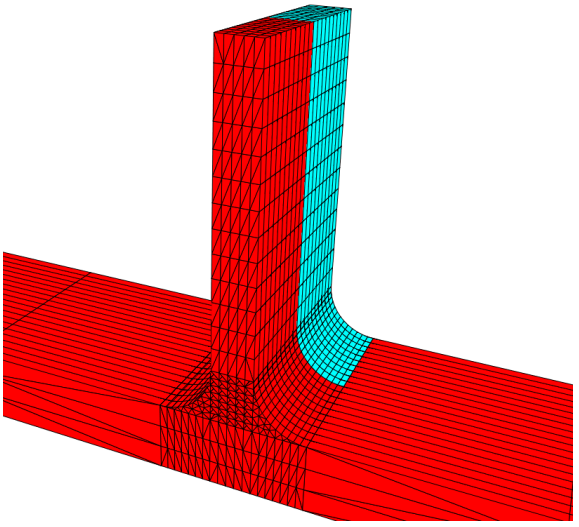
Comme vu au chapitre 2, le profil de la lame est rectangulaire mais comporte toujours un congé d'angle de plusieurs micromètres, comme schématisé et maillé en figure 3.20 (a). Ce congé d'angle pose un problème de concept, au sens où l'impédance acoustique des modes guidés dans le ruban s'avère très différente de celle des modes de volume, le changement abrupt d'un milieu à l'autre donnant lieu à une réflexion quasi totale du mode guidé à l'interface ruban-substrat. la présence d'un congé continu induit un effet d'adaptation d'impédance entre les deux milieux, générant des pertes par rayonnement pour le mode d'intérêt. Les simulations effectuées et présentées figure 3.20 (b) montrent l'impact de la taille du congé d'angle sur la réponse acoustique. Un congé d'angle d'un rayon de 15 µm ou moins engendrera un étalement de la fréquence de résonance autour de la fréquence centrale, en particulier pour le mode de cisaillement situé à 170 MHz mais il subsiste une marque de résonance. Le mode longitudinal est beaucoup plus affecté et disparaît presque entièrement même pour un congé de 15 µm. En augmentant encore le rayon du congé d'angle à 30 µm, on ne distingue plus de forme de résonance bien définie, même pour le mode de cisaillement. La simulation présente dans ce cas une multitude de pics aux alentours de la fréquence centrale. Le congé d'angle s'avère donc bien néfaste pour cette structure. Il est alors nécessaire de le minimiser en pratique, où sa taille peut être réduite à une dizaine de micromètre au minimum mais ne peut pas être annulée. Cette difficulté technologique peut être contournée en réalisant des rubans ou des géométries plus complexes de transducteurs (*B-ridges*), ou notamment en reportant les structures sur silicium, comme présenté ci-après.

Structures reportées sur silicium

Le report sur un substrat de silicium à déjà été envisagé pour la réalisation de résonateurs à base de $LiNbO_3$ polarisé périodiquement [100]. Les résultats ont montré que le silicium influe sur le comportement du dispositif face à la température de manière bénéfique en limitant l'influence de

la dilatation thermique. Dans notre cas, le silicium est utilisé pour reporter le congé d'angle de dépouille hors de la structure en $LiNbO_3$ (cf. figure 3.21 (a)).

(a)



(b)

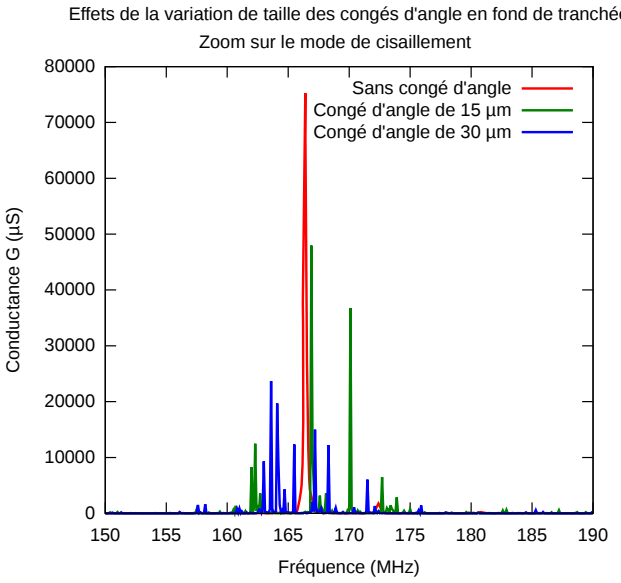
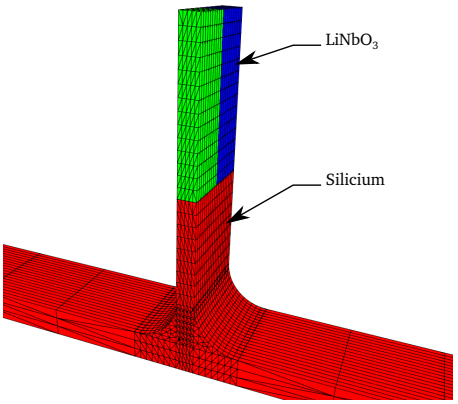


FIGURE 3.20 – Structure présentant un congé d'angle entre l'embase et la partie utile verticale (a) et résultat de la simulation numérique pour plusieurs rayon du congé d'angle (b)

En effet, comme le montre le paragraphe précédent, l'empreinte arrondie laissée par la lame au fond de la tranchée de découpe induit un effet néfaste sur le mode excité, qui peut aller jusqu'à disparaître dans le cas de congé d'angles trop importants (30 µm). La figure 3.21 (b) compare une même structure de ruban présentant un congé d'angle de 30 µm reportée sur silicium et non reportée. Dans le cas de la structure non reportée, la résonance n'est presque plus visible car étalée sur une bande de fréquence autour de la fréquence centrale. À l'inverse, la même structure dont on a reporté l'évasement du fond de tranchée dans le silicium présente une fréquence de résonance unique et bien définie n'arborant que peu de parasites. Cette simulation montre tout l'intérêt de reporter les dispositifs sur silicium pour s'affranchir des défaut géométriques liés au mode de

(a)



(b)

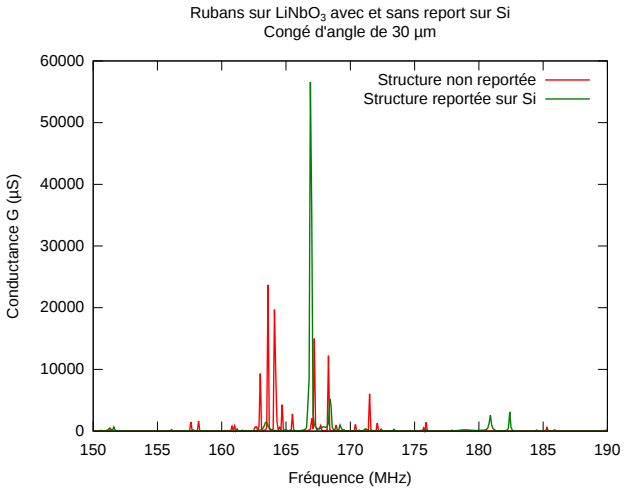


FIGURE 3.21 – Structure présentant un congé d'angle entre l'embase et la partie utile verticale (a) et résultat de la simulation numérique pour une structure présentant un congé d'angle dans le $LiNbO_3$ et reporté dans le silicium (b)

fabrication des structures. En pratique, ces structures ont été réalisées à l'aide d'une technique de diffusion de couche d'or (cf. chapitre 2) mais l'interface alors conductrice cause des courts-circuits qui interdisent la caractérisation des transducteurs. Cette solution de report est néanmoins considérée comme la plus prometteuse pour améliorer les résultats présentés dans la section 3.3, pour peu que la couche d'or puisse être remplacée par une couche solide diélectrique.

3.2.7/ CONCLUSION SUR LES SIMULATIONS ACOUSTIQUES

La simulation par élément finis et de frontières permet de prévoir le comportement de structures complexes, et notamment celui des transducteurs polarisés périodiquement. La configuration des structures élancées permet d'atteindre des propriétés jusque là inaccessibles ; ainsi l'on retiendra l'existence d'un mode de cisaillement sur $LiNbO_3$ capable d'atteindre des vitesses de phase de plus de $10\,000\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ pour un couplage électromécanique de 22 %. Les différents défauts géométriques induits par la découpe à la scie circulaire ont été pris en compte par la simulation, les meilleurs résultats étant obtenus par minimisation du congé d'angle de dépouille et maximisation de la profondeur des structures. De plus, les simulations confirment qu'une verticalité des flancs inférieure à 88° engendre une dégradation immédiate de la réponse acousto-électrique du système.

La méthode de réalisation des ces structures par découpe à la scie diamantée est donc la plus adaptée à la situation, aucune autre méthode ne permettant à l'heure actuelle d'obtenir des flancs aussi verticaux, polis et profonds que ceux obtenus par sciage. Enfin, la réalisation de ces simulations a permis de dimensionner les structures à réaliser et d'envisager leur fabrication avec des objectifs dimensionnels précis.

3.3/ Dispositifs réalisés pour des applications acoustiques

Les simulations ont permis de déterminer les caractéristiques dimensionnelles des résonateurs à fabriquer et d'anticiper les problèmes de géométrie liés à la découpe. Ainsi, la fabrication de couches minces verticales à la scie de précision est à l'heure actuelle le seul moyen de parvenir à des résultats conformes aux hypothèses de calcul, avec les meilleures propriétés en terme de verticalité et de facteur de forme. L'ensemble des structures et leur fabrication ayant été détaillé dans le chapitre 2, nous présenterons ici uniquement leur caractérisation acousto-électrique, en décrivant dans un premier temps le procédé complet de réalisation de ces dispositifs. La caractérisation des résonateurs sera donnée pour chaque type de structure réalisée, sur $LiNbO_3$ ou $LiTaO_3$.

3.3.1/ Procédé de fabrication de structures polarisées périodiquement à hauts facteurs de forme

Le procédé de fabrication des structures polarisées périodiquement caractérisées par la suite est donné en figure 3.22. Il débute par l'inversion des domaines ferroélectriques. Les motifs des futurs domaines sont réalisés via une résine photosensible à l'aide d'un procédé de photolithographie classique, avec une épaisseur de résine importante (>2,5 µm) (a) optimisée pour masquer électriquement les zones à polarisation constante. Les motifs sont choisis pour obtenir une périodicité le long de l'axe x. Le matériau à inverser est placé dans un outil d'inversion de domaines comprenant deux plaques de plexiglas permettant de plaquer deux joints toriques sur la plaque (b). Les cavités formées par les joints toriques sur chaque face de la plaque sont remplies de chlorure de lithium (*LiCl*) utilisé comme électrolyte liquide. Une tension supérieure à 10,5 kV est alors appliquée aux bornes de la plaque d'épaisseur 500 µm par l'intermédiaire du *LiCl* de sorte à dépasser le champ coercitif du substrat (21 $kV \cdot mm^{-1}$). L'épaisseur de résine doit être suffisante pour jouer le rôle d'isolant électrique au moment où la tension est appliquée. A ce titre, une comparaison de plusieurs résine à été réalisée dans [100] permettant d'identifier la situation la plus favorable pour notre application. Quand l'inversion est terminée, la forme du masque en résine est transférée dans les différents domaines alors uniformes sur toute l'épaisseur du matériau (c). La résine ayant servi de masque est retirée et la plaque est nettoyée pour enlever toute trace de *LiCl*. Une nouvelle couche de résine est centrifugée sur toute la surface de la plaque pour pouvoir réaliser les électrodes et protéger la surface durant le procédé de découpe par scie diamantée. Des structures de type ruban ou *B-ridge* sont découpées avec une scie circulaire de précision dans le matériau périodiquement polarisé, le long de l'axe cristallographique X. La structure est alors surmontée de résine photosensible sur toute sa longueur (d). Les structures ainsi fabriquées sont métallisées dans une machine de pulvérisation cathodique permettant de déposer du métal sur les parois et le fond des tranchées réalisées à la scie. Dans le cas des rubans libres, ceux-ci sont tournés de 90° pour présenter leurs flancs à l'horizontal, face à la cible de pulvérisation. Une fois l'étape de mé-

tallisation réalisée, la résine est retirée, effectuant un *lift-off* du métal en surface de la plaque et des structures (e),(f). Cette étape de fabrication est critique car un retrait partiel du métal en surface des structures engendre un court circuit entre les deux flancs et l'impossibilité de les caractériser électriquement.

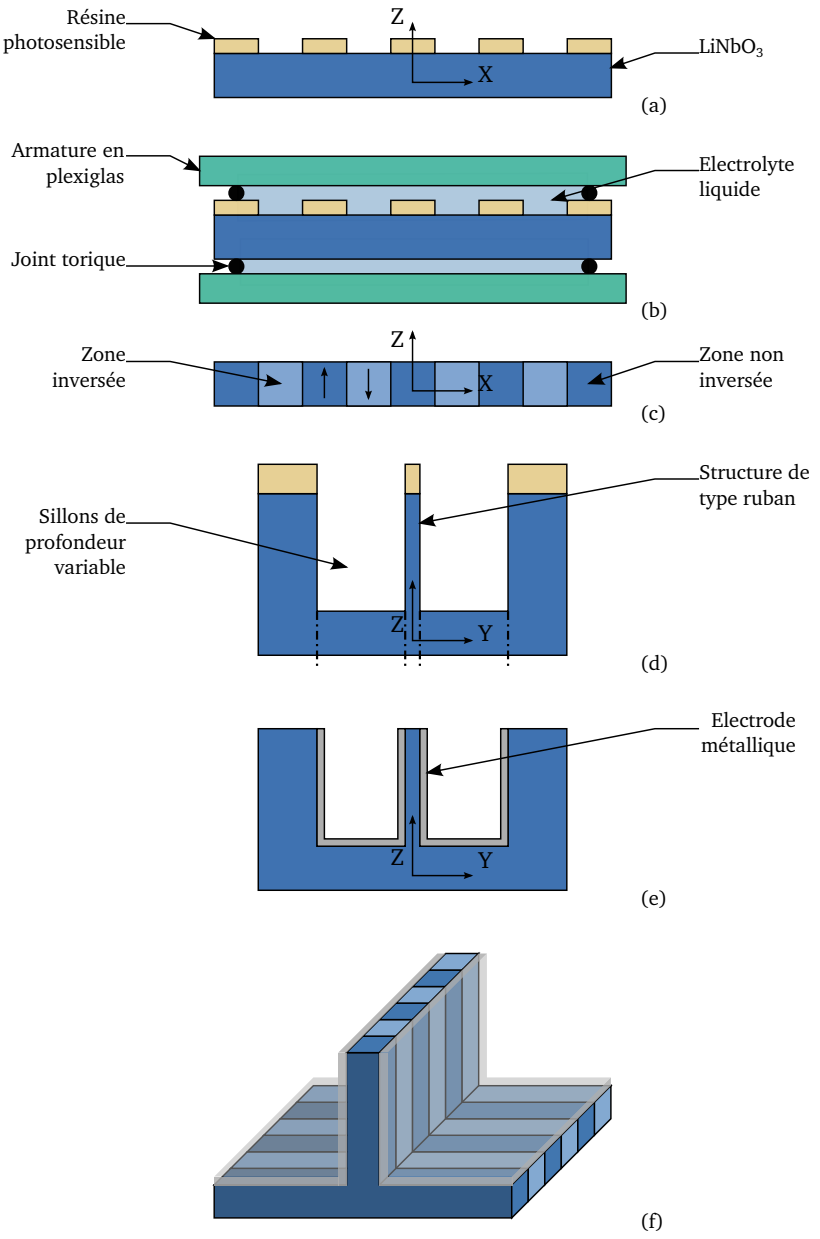


FIGURE 3.22 – Procédé de fabrication d'une structure ruban polarisé périodiquement à haut facteur de forme

L'étape de lift-off conduit nécessairement à immerger les structures dans un bain de solvant soumis à des ultrasons pour tenter d'éliminer au maximum tout résidu de métallisation sur la crête du ruban ou du *B-ridge*. Cependant, l'application d'ultrasons peut détruire les structures dès lors qu'elles s'avèrent plus fines que 25 µm pour une profondeur de plus de 100 µm. Pour contourner

cette difficulté technologique, le métal déposé sur ladite crête est retiré à la scie circulaire de précision, en réalisant une découpe sur une profondeur de 2 à 5 µm et sur toute la longueur de la structure. Ainsi, les risques de court-circuit ou de casse sont minimisés. Cette méthode à permis la structuration d'électrodes sur des dispositifs de 4 µm de largeur sur une profondeur de plus de 150 µm. Elle à cependant le défaut de dégrader légèrement l'état de surface de la crête.

Une fois toutes les étapes de fabrication franchies, les structures sont caractérisées électriquement. Celles-ci doivent donc être conditionnées, notamment pour permettre l'accès des plots de connexion aux pointes métalliques utilisées à cette fin.

3.3.2/ Conditionnement et méthode de caractérisation des structures

La caractérisation des structures peut se faire de deux manières, soit en connectant les structures à un analyseur de réseau par le bais d'un port SMA, soit en passant par un testeur sous pointes, lui même relié à l'analyseur de réseau. Cette dernière approche offre une grande souplesse de caractérisation puisque le laboratoire dispose de plusieurs pointes de largeur et d'espacement différent, fonctionnant pour différentes plages de fréquences.

Les rubans libres polarisés périodiquement

Les rubans libres réalisés dans des matériaux monocristallins sont fragiles du fait qu'ils ne sont pas maintenus sur un substrat et doivent être manipulés à la main. Géométriquement, ce sont des poutres de longueur centimétrique (2 cm<L<6 cm) et de section inférieure au millimètre carré (au minimum 100×500 µm^2). Le ruban est découpé à l'entrée d'une zone polarisée périodiquement,

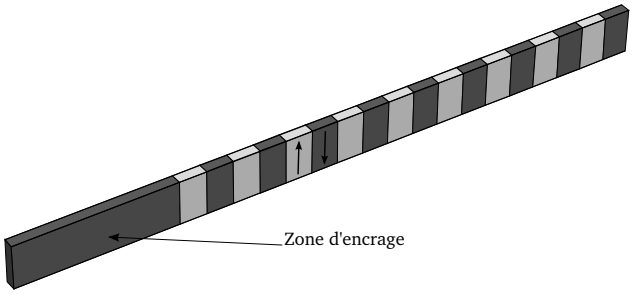


Figure 3.23 – Ruban libre de $LiNbO_3$ polarisé périodiquement

pour bénéficier d'une zone monodomaine importante (au moins 1 cm de longueur) et non métallisée qui servira à maintenir la structure tout en s'assurant de ne pas exciter de modes de volume parasites (cf. figure 3.23). Le dispositif est collé sur une plaque de circuit imprimé à l'aide d'une pâte à l'argent qui durcit lorsque soumise à 60 °C pendant 8 heures. Deux configurations de collage ont été testées pour des applications de résonateur et de filtre. Pour la caractérisation de résonateurs ruban libres, la structure est collée au bord d'une plaque entièrement cuivrée (munie d'un connecteur SMA) pour minimiser les contraintes mécaniques appliquées sur le dispositif, comme le montre la figure 3.24. Dans le cas d'une caractérisation de filtre à éléments d'impédance, il est nécessaire de connecter plusieurs fils entre chaque dispositif. Pour cela, les rubans libres sont collés à une plaque sur laquelle sont soudés des connecteurs SMA et dans laquelle une cavité est réalisée sous les structure, de sorte à encastrer les deux extrémités de la poutre, sa partie centrale restant libre, comme le montre la figure 3.25 (voir section 3.3.5.1).

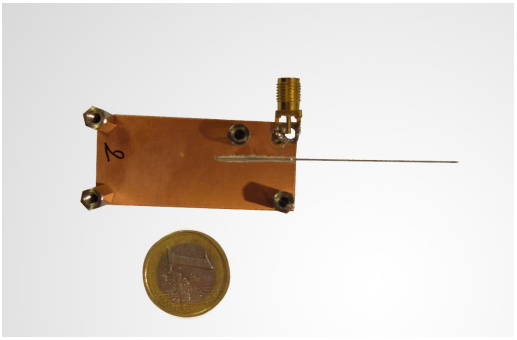


FIGURE 3.24 – Conditionnement d'un ruban polarisé périodiquement pour sa caractérisation

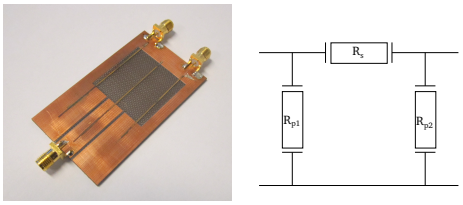


FIGURE 3.25 – Conditionnement de rubans libres pour la caractérisation de filtres à éléments d'impédance

Les structures de type rubans polarisés périodiquement

Les structures de type ruban polarisées périodiquement sont conditionnées sous forme de puces caractérisées directement sous pointes de touche RF. Ces pointes mesurent 500 µm de largeur, permettant de les poser au fond des tranchées de scie. On notera qu'il est délicat de souder des fils sur cette surface compte tenu de la forme des outils de connexion (wire bonding).

Les structures *B-ridges*

Les structures de type *B-ridges* sont réalisées sur une puce reportée sur une plaque de circuit imprimé (à la différence des structures rubans) sur laquelle des connecteurs de type SMA sont soudés. Des fils sont alors soudés de manière à relier ceux-ci aux structures, dont les électrodes sont reportées en surface grâce à la géométrie des *B-ridges* (voir figure 3.36). Il est aussi possible de réaliser les caractérisations sous pointe sans avoir à conditionner la puce. Pour les applications de filtrage, les puces sont collées sur un fond de boîtier RF comme le montre la figure 3.26. La modularité des connexions du boitier permet de tester plusieurs configurations de filtres.

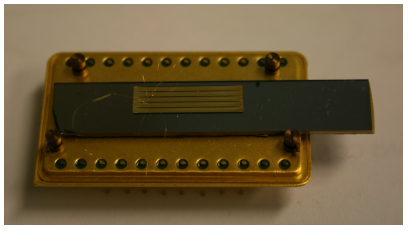


FIGURE 3.26 – Conditionnement de *B-ridges* pour la caractérisation de filtres à éléments d'impédance à configuration électrique variable

Outils de caractérisation

L'ensemble des dispositifs a été caractérisé avec un analyseur de réseau Rohde & Schwarz fonctionnant sur une bande de fréquence allant de 100 kHz à 8 GHz. L'analyseur possède deux ports avec connecteurs SMA ce qui permet de caractériser des dispositifs quadripôles. Un calibrage de la machine est réalisé pour une configuration de test type et pour une gamme de fréquence donnée.

Le testeur sous pointe est un Suss Microtec PM5 muni d'un porte-échantillon chauffant pour effectuer les essais en température. Les pointes radio-fréquences utilisées sont montées sur une platine de déplacement 3 axes avec vis micrométriques, permettant un positionnement précis sur la zone à caractériser.

3.3.3/ Caractérisation de structures de type ruban à ondes de volume

3.3.3.1/ Structures ruban simples sur $LiNbO_3$ (YX*l*)128°

La structure la plus simple pour la réalisation de résonateurs à hauts facteurs de forme consiste en un ruban sur matériau brut (non polarisé périodiquement). Des structures de ce type peuvent servir de résonateurs sans avoir subi d'inversion de domaine, ce qui équivaut à l'excitation d'une structure BAW verticale. Ce type de dispositif peut être employé pour exploiter des ondes de volume excitées de façon perpendiculaire aux axes de coupes proposées par les fournisseurs de cristaux. Par exemple, des plaques de $LiNbO_3$ (YX*l*)128° vendues dans le commerce permettent la réalisation de structures à hauts facteurs de forme pour exciter des ondes de polarisation longitudinale sur la coupe $LiNbO_3$ (YX*l*)38° et toutes les coupes dérivées obtenues par une rotation autour de l'axe normal au wafer. La fabrication d'une structure de ce type est décrite dans le chapitre 2. La structure réalisée ici présente une largeur de 6,1 µm pour une profondeur de 120 µm, donnant lieu à une structure robuste. Sa caractérisation est présentée en figure 3.27 et montre une fréquence de résonance à 433,2 MHz avec un couplage électromécanique de 28,2 %, particulièrement intéressant pour l'interrogation à distance de la structure [145]. Cependant, l'expérience à montré qu'il était impossible de réaliser cette interrogation, probablement à cause du coefficient de qualité de 30 [145]. En effet, le dispositif a été interrogé au travers d'atténuateurs permettant de simuler une interrogation à distance et il s'avère qu'avec une atténuation de 20 dB l'écho du mode n'est plus visible car noyé dans le bruit. Or, pour espérer interroger un tel résonateur en mode «sans fil», il faut au moins valider la récupération du signal au travers d'une atténuation de 30 dB minimum. Pour y parvenir, le coefficient de qualité du mode de résonance doit être amélioré (au minimum d'un ordre de grandeur) ce qui suppose de minimiser le TTV de la structure ainsi que sa verticalité. Cette caractérisation montre cependant la faisabilité de résonateur à ondes de volume verticaux maîtrisés en fréquence et ouvre la voie à la réalisation de structures en couches verticales de quelques micromètres d'épaisseur.

3.3.3.2/ Structures ruban sur $LiTaO_3$ (YXl)42°

La faisabilité d'une structure ruban pour l'excitation d'ondes élastiques de volume à été démontrée sur $LiNbO_3$. Dans cette section, la réalisation d'une telle structure sur $LiTaO_3$ est abordée à son tour puis validée. Une structure de type ruban est fabriquée sur un wafer $LiTaO_3$ (YXl)42°, présentant une largeur de 18,9 µm, puis excitée électriquement via ses flancs et caractérisée avec

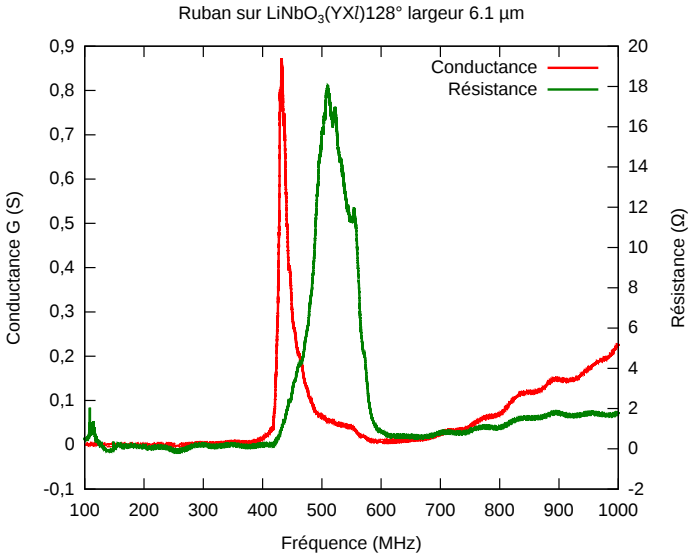


FIGURE 3.27 – Caractérisation d'une structure ruban simple à haut facteur de forme réalisée sur $LiNbO_3$ (YXl)128° et de largeur 6,1 µm. Signature électrique du mode de volume longitudinal ($V_\phi \approx 6500\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$, $k_s \approx 28\,\%$)

un analyseur de réseau. Le résultat de cette caractérisation est présenté figure en 3.28. La structure présente une fréquence de résonance à 98 MHz, et un couplage électromécanique de 12,3 %, inférieur à la simulation (18 % théorique) mais néanmoins d'ordre de grandeur proche. Le CTF mesuré est quant à lui de -31 ppm/K, ne correspondant pas à la simulation prévoyant -15 ppm/K. Cette caractérisation montre néanmoins la possibilité d'exciter des ondes de volume au sein d'une couche mince verticale de $LiTaO_3$ de quelques micromètres d'épaisseur. Dans le cadre du projet de thèse de Minerva Gonzalez, ces données de caractérisation servent à suivre l'évolution des caractéristiques élastiques du matériau en fonction de la température et de sa stœchiométrie.

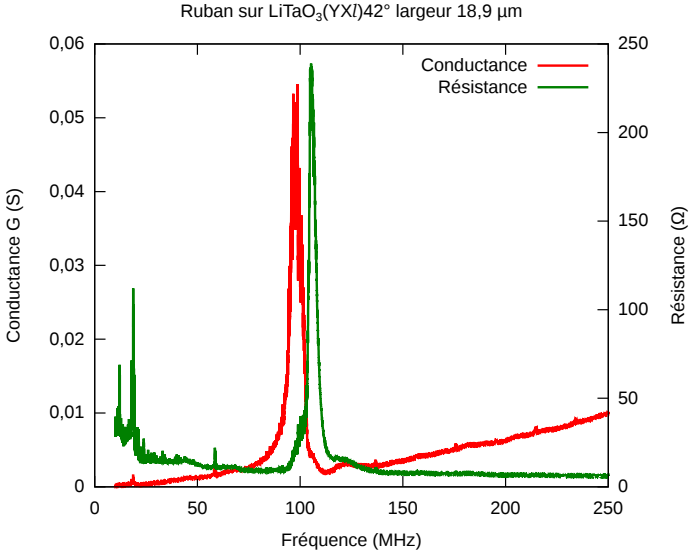


FIGURE 3.28 – Caractérisation d'une structure ruban simple à hauts facteurs de forme réalisée sur $LiTaO_3$ (YXl)42° et de largeur 18,9 µm

Ces caractérisations sur des structures simples et monodomaines permettent de vérifier la faisabilité de la technologie et la concordance des résultats avec la simulation. Il est donc possible d'obtenir des structures de couplage donné avec une précision dans le positionnement fréquentiel de quelques mégahertz par rapport aux simulations. Cependant, une amélioration du coefficient de qualité des structures doit être envisagé pour garantir l'utilisation pratique de ces dispositifs par exemple pour les applications de capteurs sans fils. Cette amélioration du coefficient de qualité passe nécessairement par l'amélioration du TTV des structures et donc par celle de leur verticalité (qui participe fortement à la variation totale d'épaisseur de celle-ci).

3.3.4/ Caractérisation des résonateurs à hauts rapports de forme polarisés périodiquement

Les dispositifs à ondes de volume monodomaines ont montré des résultats encourageants qui poussent à la mise en œvre de structures polarisées à hauts facteurs de forme. Ainsi, cette section présente la réalisation de transducteurs à hauts facteurs de forme polarisés périodiquement sur $LiNbO_3$ et $LiTaO_3$, fabriqués par la méthode de découpe à la scie de précision. De nombreux résonateurs acoustiques ont été caractérisés dans ce cadre, mais par soucis de clarté, seuls les résultats ayant un intérêt significatif seront présentés. Ainsi, chaque géométrie de transducteur (ruban libre ou encastré, *B-ridge*) est caractérisée par un résultat représentatif de l'ensemble des structures réalisées. Le comportement des dispositifs face à une variation de température est aussi étudié pour comparer les résultats expérimentaux avec les simulations théoriques.

3.3.4.1/ Structures de type ruban libre sur $LiNbO_3$

La structure en ruban libre est celle qui se rapproche le plus des géométries simulées en 2D, du fait qu'elle n'est pas contrainte mécaniquement lors de son excitation (voir figure 3.24) et que les ondes ne peuvent pas fuir dans l'embase. Ce premier type de structure permet essentiellement de vérifier de manière expérimentale l'existence des modes prévus par la simulation. Cette structure est particulièrement simple à réaliser car la métallisation de ses flancs ne nécessite aucun lift-off. Cependant elle est réalisable uniquement pour des largeurs supérieures à 100 µm (voir chapitre 2), aussi avons-nous fixé une période de 600 µm pour ce type de dispositif. En effet, comme montré section 3.2.4.3, le rapport l/p le plus intéressant pour montrer les capacités de la structure en termes de couplage électromécanique et de vitesse de phase est de 0,2, soit une largeur de 120 µm, d'où la période imposée plus haut.

Le résultat de la caractérisation est donné en figure 3.29 sous forme de deux courbes montrant la conductance et la résistance de la structure en fonction de la fréquence du signal d'excitation. Ces deux courbes permettent de visualiser respectivement les pics de résonance et d'antirésonance des modes excités, et de calculer le couplage électromécanique de chaque mode. Sur la figure 3.29, les deux modes suivis sont le mode de cisaillement à 16 MHz et le mode longitudinal à 10,3 MHz, leurs couplages valent respectivement 12,5 % et 8,2 %. Le tableau 3.1 permet de résumer les principales caractéristiques du dispositif et de les comparer avec la théorie. Le premier point remarquable concerne la cohérence entre les vitesses de phases (et donc les fréquences de résonances f_r) théoriques et expérimentales. On relève cependant une différence de fréquences de résonance f_r de 0,5 % pour le mode longitudinal et de 5,5 % pour le mode de cisaillement. Cette différence trouve ses origines dans l'imprécision de la largeur du ruban, donnée par la découpe

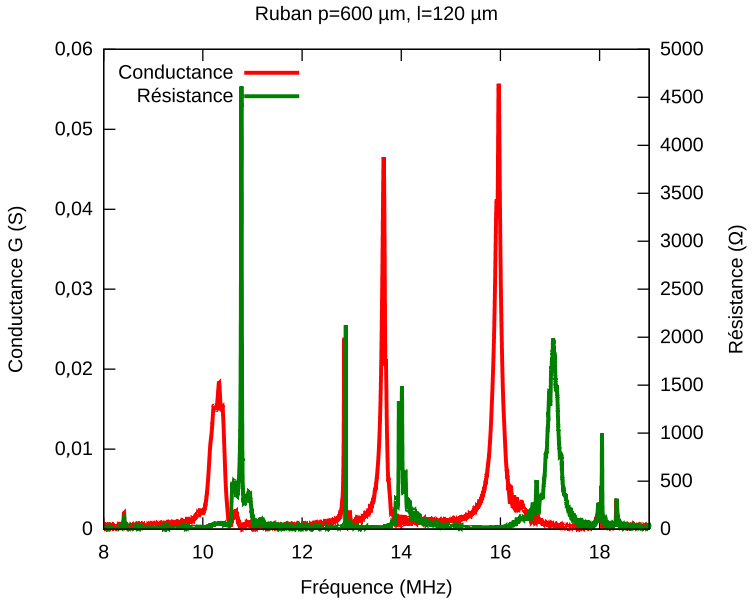


FIGURE 3.29 – Caractérisation d'un ruban libre de $LiNbO_3$ polarisé périodiquement

		Mode longitudinal					Mode de cisaillement				
	l/p	f_r MHz	f_a MHz	k^2 %	Q	V_Φ ms^{-1}	f_r MHz	f_a MHz	k^2 %	Q	V_Φ ms^{-1}
Théorie	0,2	10,38	10,89	9,15	Nc	6228	16,89	19,15	22,22	Nc	10133
Expérience	0,2	10,33	10,78	8,16	34	6196	15,96	17,06	12,47	122	9178

Tableau 3.1 – Tableau de comparaison théorie/expérience

à la scie. En effet, comme le montre la figure 3.11, la fréquence du mode de cisaillement varie très rapidement en fonction de la largeur de la structure. Une variation de largeur de l'ordre du micromètre à un rapport $l/p = 0,2$ engendre une variation de fréquence de l'ordre du mégahertz. De la même façon, la variation de fréquence en fonction de la largeur de la structure est moindre pour le mode longitudinal, comme le montre la figure 3.9, d'où la différence de cohérence théorie/expérience entre le mode longitudinal et le mode de cisaillement. Une comparaison est réalisée entre deux $LiNbO_3$ de provenance différente avec des structures de type ruban en section 3.3.4.2.

Déduit directement de la mesure des fréquences, le couplage électromécanique se trouve naturellement affecté par une variation de largeur de la structure, ce qui explique la différence d'écart théorie/expérience entre le couplage du mode longitudinal et celui du mode de cisaillement.

La deuxième observation concerne le coefficient de qualité des modes en présence, très inférieurs à ceux obtenus avec des résonateurs BAW et SAW [67]. Cette caractérisation de ruban libre montre en effet un coefficient de qualité de 122 pour le mode de cisaillement et de 34 pour le mode longitudinal. Ces valeurs sont dues à une variation totale d'épaisseur de la structure suffisamment importante pour engendrer un étalement de la fréquence résonance, du fait de la dispersion modale autour du point de fonctionnement (120 µm). Le ruban libre caractérisé a été fabriqué dans les meilleures conditions, c'est à dire avec un report sur silicium avant découpe pour obtenir des flancs sans écailles (voir chapitre 2). Une caractérisation de ruban libre non reporté sur silicium est donné en figure 3.30.

Enfin, on observe deux pics de conductance sur la figure 3.29 entre le mode de cisaillement et le mode longitudinal. La provenance de ces modes n'a pas pu être formellement identifiée, mais l'hypothèse la plus probable est une excitation d'une partie non polarisée périodiquement. D'après les simulations effectuées, une telle excitation (indésirable) entraîne l'apparition d'un mode parasite (onde de volume) situé entre les deux modes suivis. Ces deux modes parasites se montrent néfastes pour la réalisation de filtres à éléments d'impédance (voir section 3.3.5) car ils perturbent la bande de réjection du filtre.

La figure 3.30 montre la caractérisation d'un ruban libre dont la découpe à été effectuée sans reporter le $LiNbO_3$ sur silicium. Un zoom est réalisé pour observer la forme des pics de conductance et de résistance. Ce ruban présente un profil crènelé à cause du maintien lors de la découpe (voir chapitre 2), qui se retrouve directement sur le spectre de sa réponse électrique. Cependant, la caractérisation montre une meilleure cohérence entre les vitesses de phases théoriques et expérimentales que pour le ruban libre précédent puisque on obtient ici $V_\Phi = 10\,002\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ au lieu des $10\,133\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ obtenus par simulation, ce qui correspond à un écart de 1,3 %, près de 5 fois plus faible que pour la caractérisation du ruban précédent. Celui-ci présente en outre un couplage électromécanique qui s'élève à 14,95 %, valeur la plus élevée obtenue pour ce type de structure. La

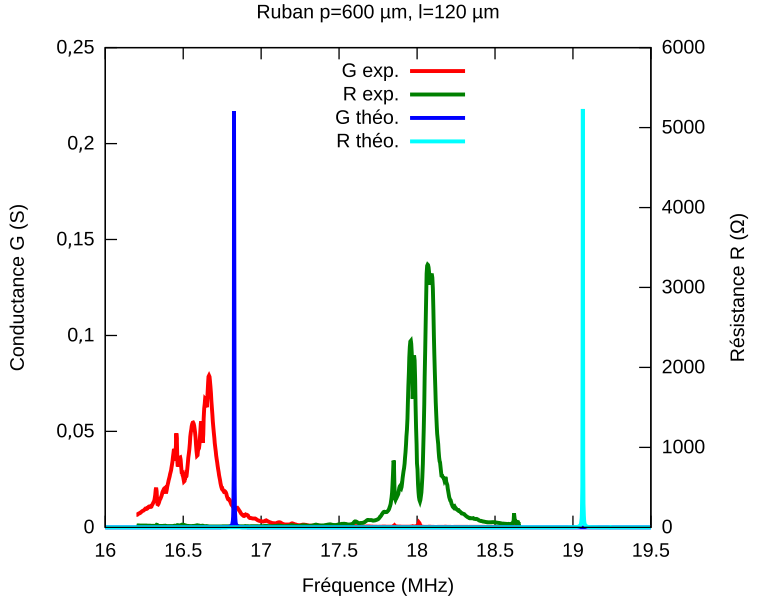


FIGURE 3.30 – Zoom sur le mode de cisaillement d'un ruban non reporté sur silicium

figure 3.31 présente un suivi du couplage électromécanique pour différents rapports l/p, pour les modes de cisaillement et longitudinal. Ce suivi permet de constater l'écart important de couplage entre les valeurs attendues (calculées par simulation) et celles obtenues. Les différentes caractérisations ont montré que pour différents rapports l/p, la fréquence de résonance des deux modes suivait les courbes de dispersions présentées en figures 3.11 et 3.9, comme l'illustre la figure 3.32. La cohérence théorie/expérience montre la précision de l'outil de simulation la faisabilité des dispositifs et permet de démontrer le concept. Ces résultats font par ailleurs l'objet d'une publication scientifique [53].

Le suivi en température des modes à été effectué sur un dispositif pour observer le comportement des modes face à une variation de température. L'expérience s'effectue dans une enceinte

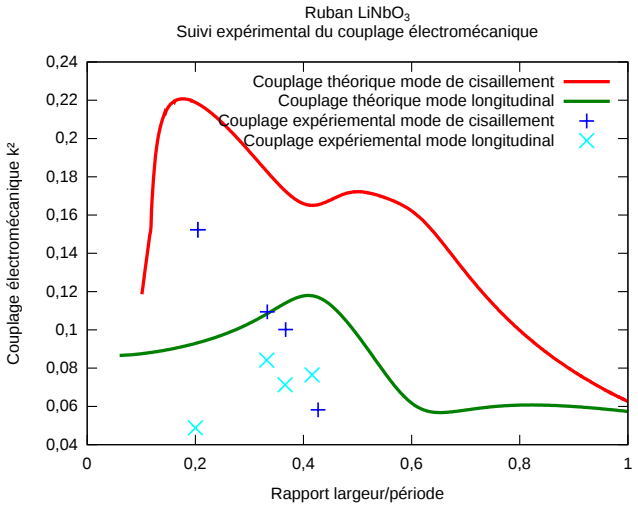


FIGURE 3.31 – Comparaison des couplage électromécaniques mesurés et théoriques pour différents rapport l/p

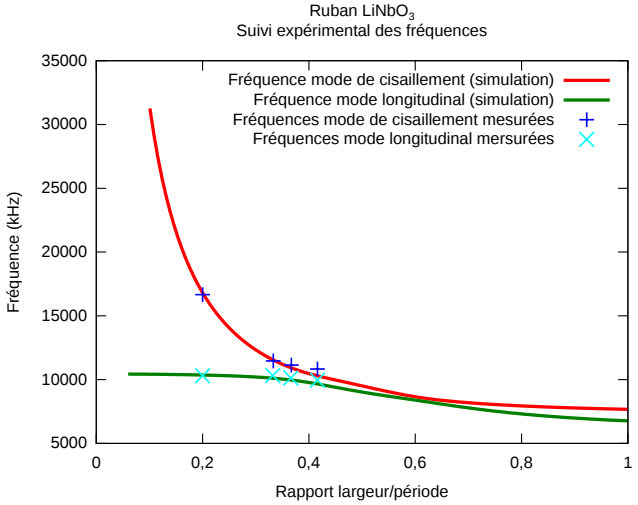


FIGURE 3.32 – Comparaison des fréquences de résonance mesurées et théoriques pour différents rapport l/p

climatique pour des températures allant de -10°C à +70°C. La figure 3.33 montre le résultat de cette expérience. La correspondance théorie/expérience n'est pas concluante car la simulation prévoit un CTF de $-75\,\mathrm{ppm/K}$ pour le mode longitudinal, pour une valeur mesurée à $-113{,}2\,\mathrm{ppm/K}$. De même, le CTF mode de cisaillement est mesurée à $-88{,}4\,\mathrm{ppm/K}$ alors qu'il était attendu à $-94\,\mathrm{ppm/K}$. Les différences entre théorie et expériences pouvant s'expliquer en partie par le fait que la structure est reportée sur une puce dont l'influence n'est pas négligeable. Les possibles saut de mode dans un processus automatisé peuvent aussi se trouver à l'origine de la dispersion mise en évidence sur la courbe de droite de la figure 3.33

Ce type de dispositif est le plus simple à réaliser techniquement et les résultats obtenus permettent de valider le principe. Nous avons montré que des modes avec des couplages de près de 15 % et des vitesses équivalentes de phases de $10\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ pouvaient être excités. Cependant, ce type de dispositif est très fragile et doit être manipulé à la main. De plus, il est difficile de réaliser de telles structures avec des largeurs de l'ordre de $10\,\mu\mathrm{m}$. Il n'est donc pas envisageable de réaliser

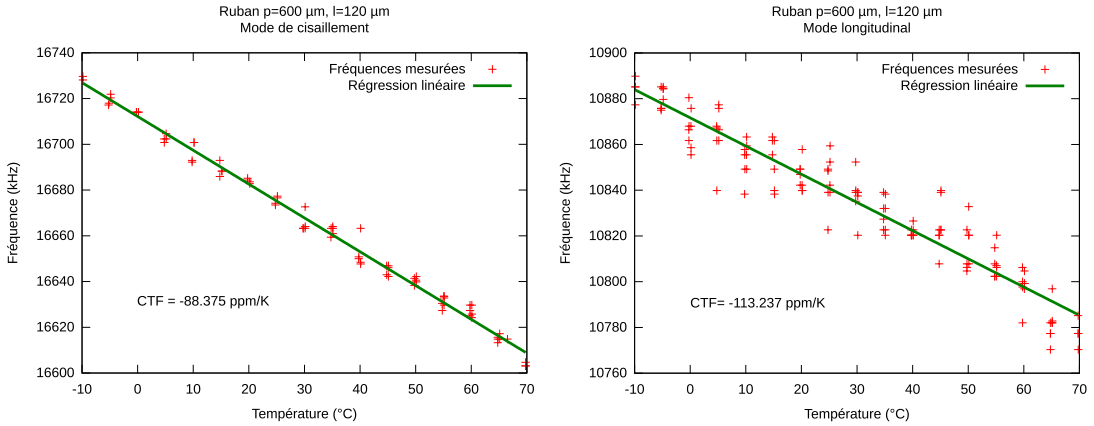


FIGURE 3.33 – Suivi en température du mode de cisaillement (à gauche) et du mode longitudinal (à droite)

ces dispositifs de manière industrielle, ni d'atteindre des fréquences de travail de plusieurs centaines de mégahertz. Pour y parvenir, la solution la plus efficace consiste à réaliser une structure de type ruban, permettant d'accéder à des structures plus fines. Ce type de dispositif est caractérisé au sein de la section suivante.

3.3.4.2/ STRUCTURES DE TYPE RUBAN SUR $LiNbO_3$

Les structures de type ruban sont plus robustes que les rubans libres du fait qu'elles sont reliées à une embase massive, permettant de réaliser des structures des quelques micromètres pour des fréquences de quelques centaines de mégahertz, inatteignable avec des structures de type ruban libre. L'objectif premier est d'atteindre une fréquence de 433 MHz qui correspond à une fréquence de travail dans la bande ISM centrée en cette fréquence. Pour cela, des structures de type ruban présentant une période de 15 µm, une profondeur de 300 µm et une largeur de 7 µm sont fabriquées. Ces structures sont reportées sur du silicium pour rigidifier l'ensemble. Sans un tel report, l'embase résiduelle de 200 µm n'est pas suffisamment solide pour maintenir les structures et tend à se fissurer. La caractérisation de ces structures est présentée en figure 3.34. Cette figure met en évidence la possibilité d'obtenir un couplage électromécanique de 15,8 % à des fréquences de près de 400 MHz. Cependant, les variations d'épaisseur des structures deviennent critiques pour de telles largeurs, puisqu'une variation de 2 µm sur la largeur de la structure engendre une variation de fréquence de 120 MHz. Du fait des variations de largeur le long de la structure, il est impossible d'obtenir des facteurs de qualité supérieurs à ceux obtenu avec des ruban de largeur 120 µm. On obtient un facteur de qualité $Q_r = 7,5$ pour la résonance et $Q_a = 80,2$ pour l'antirésonance dans le cas de la figure 3.34 ce qui ne permet pas d'envisager l'utilisation de ce dispositif pour des applications de filtrage.

En outre, les dispositifs réalisés sur les wafers de $LiNbO_3$ provenant de la société PMOptics ne permettent pas de dépasser un couplage électromécanique de plus de 17 % avec nos structures. Des structures de type ruban ont été réalisées sur un PPLN dont le $LiNbO_3$ provient de la société Roditi. Une caractérisation d'une de ces structures est présentée en figure 3.35. Le dispositif présente une période d'inversion de domaine de 50 µm, une largeur de 11,6 µm et une profondeur de 250 µm. Cette configuration permet d'atteindre des fréquences aux alentours de 150 MHz en conservant une structure robuste et relativement peu sensible à la variation de largeur de la

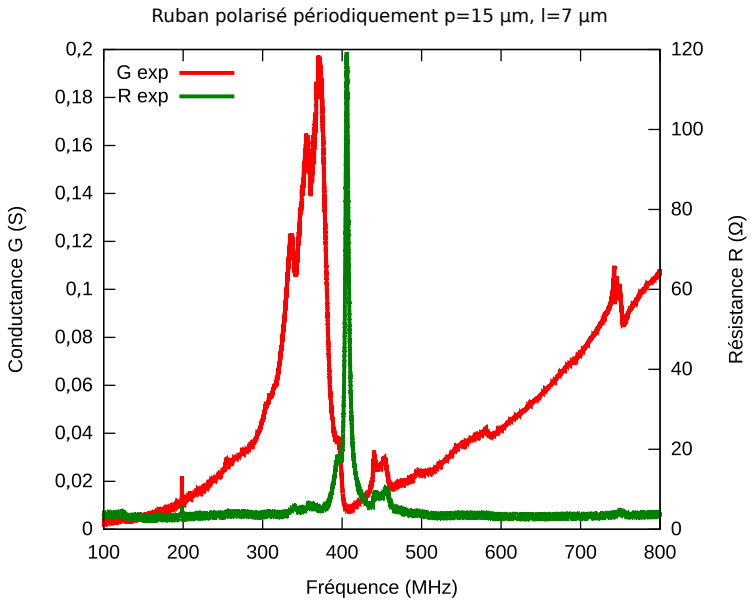


FIGURE 3.34 – Caractérisation d'un ruban de $LiNbO_3$ polarisé périodiquement du fournisseur PMOptics

structure en comparaison avec celle présentée en figure 3.34. Dans ces conditions géométriques, une variation de largeur de 2 µm engendre une variation de fréquence de 12 MHz. La structure caractérisée dont la réponse électrique est présentée en figure 3.35 permet de visualiser le mode longitudinal à une fréquence de 120 MHz et le mode de cisaillement à 160 MHz. On constate une amélioration de la définition des pics par rapport à la figure 3.34, liée aux dimensions caractéristiques de la structure, plus aisée à garantir que la précédente. nous pouvons ainsi caractériser précisément le comportement des modes dans le cas d'une structure réalisé sur un matériau d'une provenance différente de celle précédemment utilisé. Ainsi, dans cette configuration, le couplage électromécanique obtenu est de 19,9 %, correspondant au couplage électromécanique le plus élevé obtenu, tout design confondu. Cette expérience montre qu'il existe une différence de qualité entre les deux structures polarisées. Il a été montré [106] que l'efficacité de polarisation dépendait de l'origine du matériau. En conséquence, nous pouvons supposer des défauts au sein de nos polarisation sur les plaques PMOptics nettement plus importants que ceux potentiellement présents au sein des PPLN fournis par Roditi, dégradant la réponse de nos barreaux.

		Mode longitudinal					Mode de cisaillement				
	l/p	f_r MHz	f_a MHz	k^2 %	Q	V_Φ ms^{-1}	f_r MHz	f_a MHz	k^2 %	Q	V_Φ ms^{-1}
Théorie	0,23	123,8	130,3	9,66	Nc	6192	178,6	201,2	21,23	Nc	8930
Expérience	0,23	121,6	127,0	8,24	110	6082	161,8	180,8	19,9	99	8091

Tableau 3.2 – Tableau de comparaison théorie/expérience

Comme pour la structure en ruban, on retrouve un écart d'environ 10 % entre les vitesses équivalentes de phase théorique et expérimentale du mode de cisaillement, mais on obtient un couplage électromécanique plus élevé qu'avec nos dispositifs provenant d'une plaque PMOptics, pour un facteur de qualité quasiment égal. Le mode longitudinal présente une dispersion modale moins importante que le mode de cisaillement du fait qu'il soit moins sensible aux variation de largeur

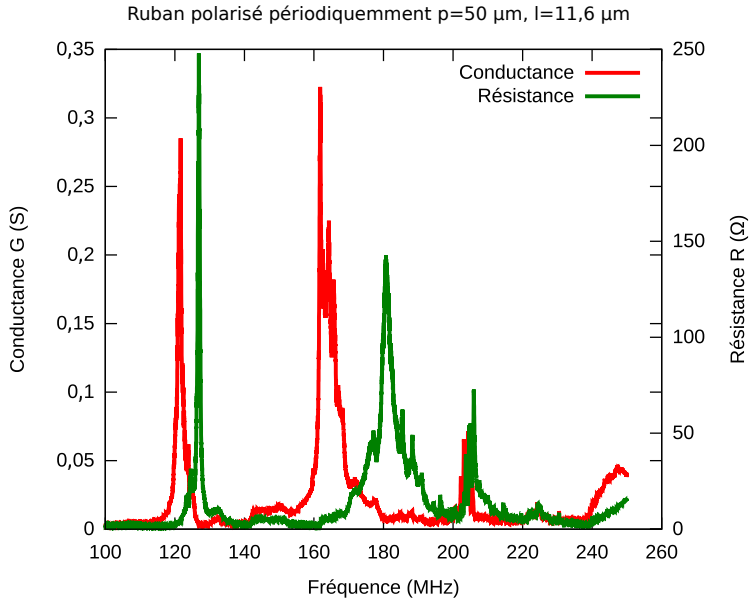


FIGURE 3.35 – Caractérisation d'un ruban de $LiNbO_3$ polarisé périodiquement de fournisseur Roditi

comme le montre la figure 3.9.

Les deux modes parasites présents entre le mode longitudinal et le mode de cisaillement ne sont plus visibles sur les structures ruban, qui ne comportent aucune partie non polarisée périodiquement, ceci renforce l'hypothèse de leur provenance.

Les structures de type ruban permettent d'atteindre des fréquences plus élevées que celles des guides rubans libres et présentent une robustesse améliorée. L'inconvénient de cette géométrie repose sur l'évasement en fond de tranchée décrit en section 3.2.6.3. Il est donc difficile d'obtenir des résultats aussi intéressants qu'avec les rubans libres en terme de coefficient de qualité. Ces structures montrent par ailleurs leurs limites en termes de fréquences, liées aux limites actuelles de la découpe à la scie de précision. L'expérience montre que la variation totale d'épaisseur de la structure (dans sa longueur et sa profondeur) devient non négligeable pour des largeurs de ruban proches de 10 µm. En effet, en considérant les précisions de découpe données au chapitre 2, l'épaisseur de la structure peut varier de 1 à 2 µm, correspondant à plusieurs dizaines, voire centaines de mégahertz en termes de fréquence de travail. L'amélioration des caractéristiques de ce type de dispositifs pour les fréquences visées (100 MHz et plus) passe donc par l'amélioration de la verticalité des flancs des structures, qui devra être meilleure que celles obtenues actuellement (entre 88° et 89,5°). Ces structures sont en outre difficiles à caractériser et à conditionner en boîtier car les plots de connexion pour les électrodes sont situés en fond de tranchée. La structure en *B-ridge* semble alors tout-à-fait adaptée pour répondre à une problématique d'encapsulation de ces dispositifs dans un système électronique, du fait du report naturel des électrodes en surface. Les avantages et les inconvénients de ce type de structure sont présentés dans la section suivante.

3.3.4.3/ STRUCTURES DE TYPE *B-ridge* SUR $LiNbO_3$

La structure de type *B-ridge* est un ruban à double encastrement suivant le profil de la lame. Elle est fabriquée en descendant la lame de scie à la verticale directement à l'intérieur du matériau,

comme décrit dans le chapitre 2. Cette méthode de fabrication a d'abord été développée pour pour limiter les vibrations au sein de rubans libres et la mobilité des structures durant l'usinage pouvant causer des dispersions de largeurs et un écaillage important. Elle a ensuite été utilisée pour réaliser des structures de type *B-ridge* ou ruban suspendu, dont la géométrie est rappelée en figure 3.36. Le

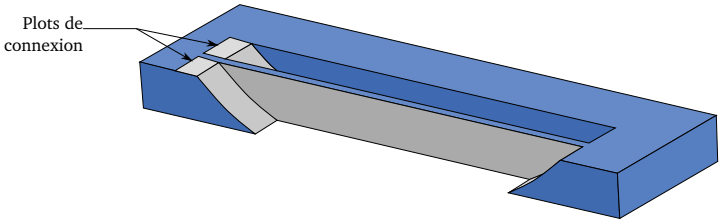
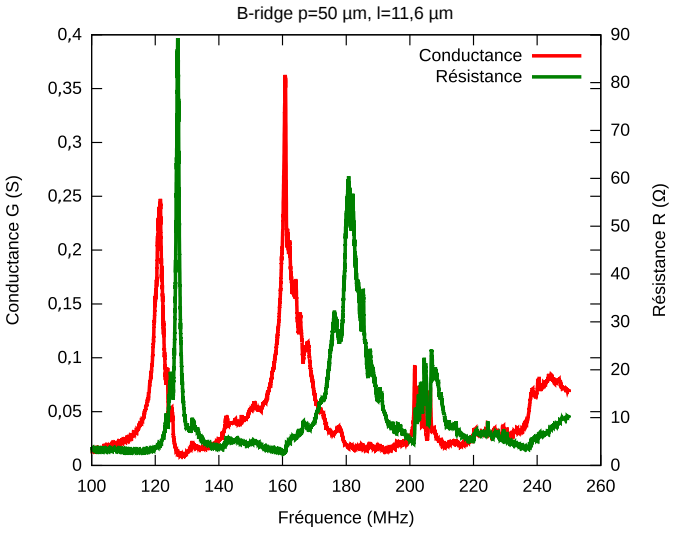


FIGURE 3.36 – Vue schématique d'un ruban suspendu, structure de type *B-ridge*

principal atout de cette structure vise à ramener les électrodes à la surface en passant par le fond de la tranchée qui remonte vers la surface. Cet avantage rend possible la caractérisation de dispositifs adaptés aux exigences de connectiques de la microélectronique, illustré par les plots de connexion de la figure 3.36. Nous avons réalisé des filtres à partir de ces structures, présentés en section 3.3.5. La figure 3.37 (a) montre la caractérisation d'une structure de type *B-ridge*, de période 50 µm, réalisée dans le matériau provenant de la société Roditi déjà utilisé pour les rubans dont les mesures sont présentées en figure 3.35, présentant des largeurs de barreaux identiques. Leurs caractérisations sont mises en parallèle en figure 3.37 (b). Nous montrons ainsi les différences de réponses acousto-électrique entre les deux structures et nous constatons que seule la forme des pics change, les vitesses équivalentes de phase restant identiques, de même que les couplages électromécaniques. Le coefficient de qualité de la résonance Q_r s'élève à 56 dans le cas de *B-ridges* pour le mode de cisaillement et à 40 pour le mode longitudinal, soit près de deux fois moins que pour une structure de type ruban. Le coefficient de qualité de l'antirésonance Q_a du mode longitudinal s'élève à 168 pour la structure ruban et à 111 pour la structure *B-ridge*. Le coefficient de qualité de l'antirésonance Q_a du mode de cisaillement passe quant à lui de 54 pour la structure ruban à 32 pour la structure *B-ridge*. Ces différences sont probablement dues aux zones d'encastrement, où l'épaisseur de la structure varie certainement, favorisant le transfert d'énergie par une adaptation d'impédance acoustique. Cette diminution du coefficient de qualité est donc intrinsèque à la géométrie de la structure, tous les *B-ridges* caractérisées présentent des coefficients Q moins élevés que leur équivalent en structure de type ruban. Une structure de type *B-ridge* possède néanmoins une robustesse maximale parmi les structures fabriquées. Son utilisation en temps qu'élément d'impédance dans un filtre est donc envisageable puisque plusieurs résonateurs pourront ainsi être connectés entre eux.

Les structures rubans et *B-ridges* réalisées sur la même tranche de matériau présentent la même sensibilité thermique. Seul le suivi des modes sur *B-ridge* en fonction de la température est reporté en figure 3.38. Pour un un ratio l/p de 0,23 correspondant à notre expérience, les CTF attendus sont de -93 ppm/K pour le mode de cisaillement et de -74 ppm/K pour le mode longitudinal. La caractérisation montre un CTF de -105 ppm/K pour le mode de cisaillement et de -73 ppm/K pour le mode longitudinal. La cohérence théorie/expérience mise en évidence ici est importante pour de futures exploitations de ces dispositifs dans des systèmes soumis à des variations de température. Nous envisageons de déposer de la silice sur les flancs des structures pour diminuer le CTF et ainsi exploiter un mode ayant une fréquence aussi stable que possible face aux variations de température.

(a)



(b)

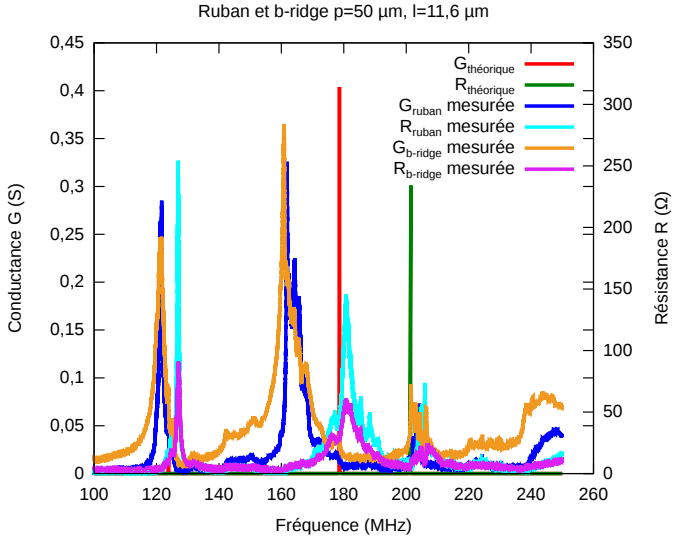


FIGURE 3.37 – Figures illustrant (a) la caractérisation d'un *B-ridge* de $LiNbO_3$ polarisé périodiquement et (b) comparaison avec une structure ruban

3.3.4.4/ CONCLUSION SUR LES CARACTÉRISATIONS DE DISPOSITIFS RÉALISÉS SUR $LiNbO_3$

Nous avons fabriqué et caractérisé trois types de structures, chacune présentant des avantages et des inconvénients. Nous avons donné dans les sections précédentes les caractérisations quantitatives de chaque structure. Un résumé qualitatif est donné dans le tableau 3.3. L'ensemble de ces dispositifs sur $LiNbO_3$ permet de valider les concepts montrés par simulation. Ces dispositifs de conception originale et aux caractéristiques spécifiques (liées à la ferroélectricité) permettent d'envisager leur utilisation pour des systèmes acousto-électriques en télécommunication. Cependant, les coefficients de qualité et les CTF des modes exploitables s'avèrent des facteurs limitant pour leurs futures applications. Le coefficient de qualité dépend d'une combinaison entre la variation totale d'épaisseur de la structure et la sensibilité du mode à la variation d'épaisseur. Pour améliorer la valeur de ce coefficient, une solution consiste à développer l'étape de découpe à la scie pour amoindrir le TTV des structures. Une autre solution consiste à se placer à un ratio l/p pour lequel la fréquence varie peu en fonction de la largeur, ainsi le TTV influencera moins le mode

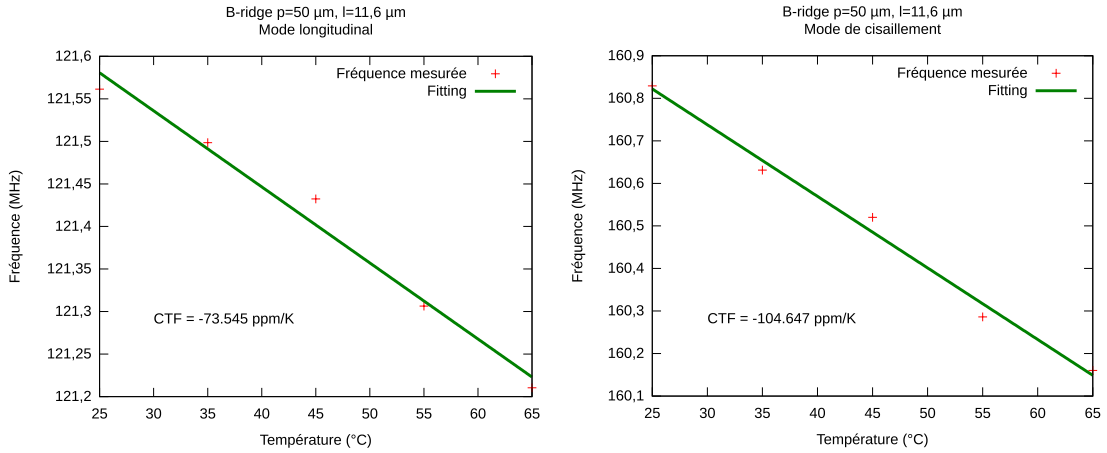


FIGURE 3.38 – Suivi en température du mode longitudinal et du mode de cisaillement pour les structures *B-ridge*

	Ruban libre	Ruban	*B-ridge*
Q	autour de 100	autour de 100	inférieur à 100
fréquence de travail	dizaines de MHz	centaines de MHz	centaines de MHz
Robustesse	fragile (pas d'encastrement)	peu fragile (encastrement partiel)	robuste (encastrement total)
Capacité d'intégration en microélectronique	mauvaise (pas de plots de connexion)	moyenne (plot de connexion difficilement accessibles)	bonne (plots de connexion en surface)

Tableau 3.3 – Tableau de comparaison qualitatif des structures caractérisées

mais ce dernier ne pourra pas atteindre les valeurs maximales de vitesses équivalente de phase et de couplage électromécanique. Le CTF dépend quant à lui du matériau utilisé, c'est pourquoi des structures acoustiques de type ruban ont été réalisées sur $LiTaO_3$, comme présenté dans la section suivante.

3.3.4.5/ STRUCTURES DE TYPE *B-ridge* SUR $LiTaO_3$

Le tantalate de lithium est un matériau aux propriétés voisines du $LiNbO_3$. Ses propriétés de couplage électromécanique sont toutefois moindres mais sa sensibilité thermique plus avantageuse que celle du $LiNbO_3$, comme le prévoit les simulations réalisées (section 3.2.4.4). Le procédé de fabrication de structures *B-ridges* sur $LiTaO_3$ est identique à celui montré précédemment, seuls les paramètres d'inversion de domaines sont modifiés (temps de stabilisation des domaines de plusieurs secondes au lieu de quelques dizaines de millisecondes [100]). Nous avons réalisé des dispositifs de 50 µm de période pour vérifier les valeurs de couplage, de vitesse de phase et de CTF données par les simulations (section 3.2.4.4). La figure 3.39 montre une caractérisation de *B-ridge* d'une largeur de 21,5 µm, valeur choisie pour le compromis qu'elle offre entre le couplage, la stabilité face aux variations de largeur du ruban et le CTF du mode de cisaillement. Une seule contribution apparaît sur cette caractérisation, les autres étant considérées comme négligeables du

fait de leurs amplitudes. Le mode visualisé correspond à du cisaillement pur. À la différence du $LiNbO_3$, la ligne de base est peu perturbée aux alentours du pic, ce qui permet d'envisager l'utilisation de ce type de dispositif en temps qu'élément d'un filtre sans engendrer de contributions dégradant la figure spectrale visée. Les caractéristiques principales du mode sont données dans le tableau 3.4 et y sont comparées aux valeurs théoriques fournies par la simulation.

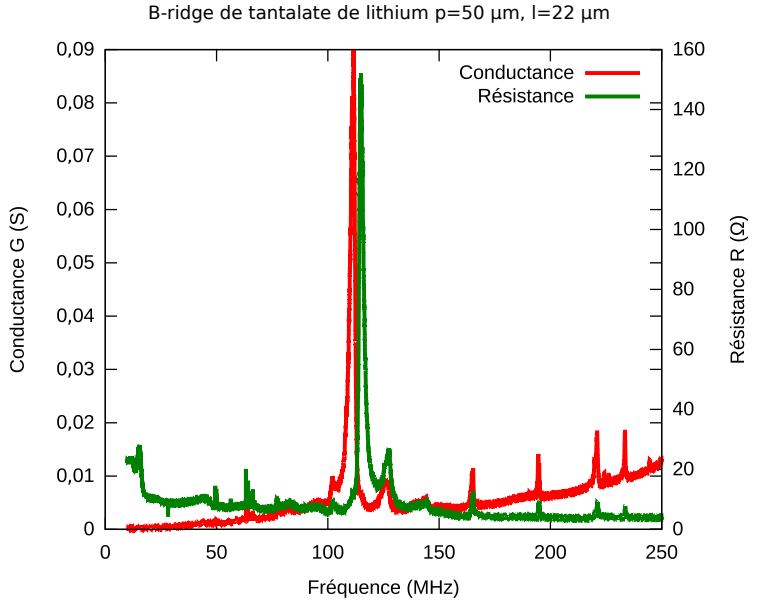


FIGURE 3.39 – Caractérisation d'un ruban de $LiTaO_3$ polarisé périodiquement

		Mode de cisaillement					
	l/p	f_r MHz	f_a MHz	k^2 %	Q_{fr}	Q_{fa}	V_Φ ms^{-1}
Théorie	0,43	113,6	119,5	9,68	Nc	Nc	5680
Expérience	0,43	111,6	114,9	5,69	45	48	5578

Tableau 3.4 – Tableau de comparaison théorie/expérience

En termes de vitesse de phase ou de fréquence du mode, l'écart théorie/expérience s'élève à 1,8 % tandis que l'écart théorie/expérience entre les couplages est de 41 %. Le coefficient de qualité était attendu inférieur à 100, comme sur $LiNbO_3$, cependant le mode ne souffre d'aucun parasite significatif sur la bande de fréquence de 10 MHz à 200 MHz. Cette absence de contribution parasite (à la différence avec le $LiNbO_3$) peut s'expliquer par la qualité de l'inversion des domaines, probablement meilleure sur $LiTaO_3$ [100]. Une inhomogénéité d'inversion des domaines ferroélectriques dans le $LiNbO_3$ pourrait donc être la cause de la présence des contributions parasites

La caractérisation en température de ce mode est donné en figure 3.40. Le CTF obtenu est de $-44\,ppm/K$, mais du fait de la définition du pic à son extrémité, cette valeur est donnée à $\pm 10\,ppm/K$. Le CTF attendu était de $-27\,ppm/K$, calculé avec les simulations présentées en figure 3.14. De même que les structures sur $LiNbO_3$, les structures sur $LiTaO_3$ ont montré un accord

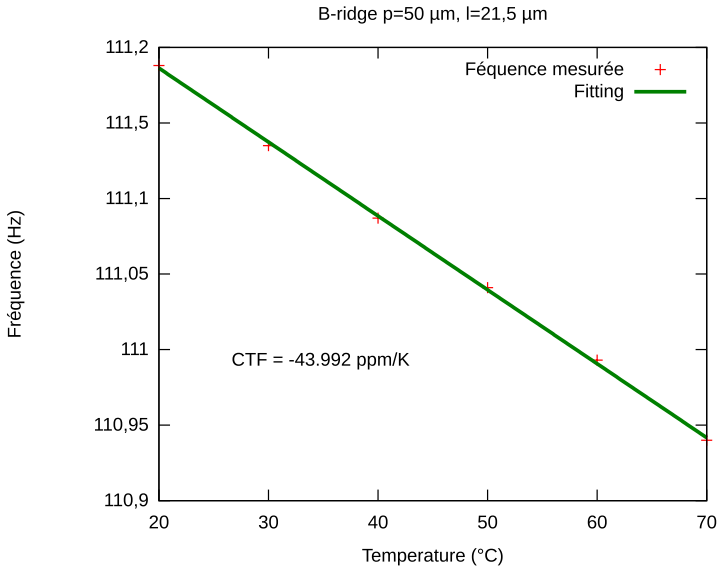


FIGURE 3.40 – Variation de fréquence en fonction de la température pour un *B-ridge* sur $LiTaO_3$

théorie/expérience. La réduction d'un facteur 2 du CTF vis-à-vis du mode de cisaillement sur $LiNbO_3$ permet d'envisager la réalisation de filtres à éléments d'impédance avec des dispositifs sur $LiTaO_3$. Le fait que la ligne de base soit moins perturbée sur $LiTaO_3$ que sur $LiNbO_3$ devrait donner donner lieu à un spectre de filtre conforme aux attentes pour un filtre RF. La partie suivante est consacrée à la réalisation de tels dispositifs avec les résonateurs présentés tout au long de cette section.

3.3.5/ FILTRAGE RADIO-FRÉQUENCE À L'AIDE DE RÉSONATEURS POLARISÉS PÉRIODIQUEMENT

Le filtrage radio-fréquence est un enjeu majeur pour la télécommunication moderne, actuellement réalisé avec des filtres à éléments d'impédance à base de dispositifs à ondes élastiques de surface. La largeur de la bande passante d'un filtre est déterminée par le couplage électromécanique de l'élément de filtrage. Les matériaux tels que le $LiNbO_3$ ou le $LiTaO_3$ sont donc des candidats privilégiés pour la réalisation de dispositifs présentant des bandes passantes en ligne avec les standard de télécommunication cellulaire actuels. Le filtre à élément d'impédance constitue une des applications phare des résonateurs réalisés jusqu'ici. Comme décrit dans la section précédente, il s'avère difficile d'atteindre des valeurs de fréquence telles qu'utilisées aujourd'hui pour les téléphones mobiles (>2 GHz), c'est pourquoi les filtres présentés dans cette section fonctionnent donc à des fréquences plus faibles (quelques centaines de mégahertz). La première partie des sections suivantes se concentre sur la simulation de filtres à partir des simulations de résonateurs par éléments finis. Les filtres réalisés seront ensuite présentés, en donnant leur réponses acousto-électriques et en décrivant leur méthode de fabrication. Certains filtres n'ayant pu être réalisés, ils seront simulés à partir des caractérisations de résonateurs, donnant ainsi un aperçu des caractéristiques du filtre atteignable selon le principe proposé.

3.3.5.1/ Filtres à basse fréquence à base de résonateurs de type ruban libre

Les simulations de filtres sont réalisées par un programme informatique développé au sein de l'équipe permettant de visualiser la réponse électrique de résonateurs disposés en filtre à éléments d'impédance. Ce programme permet de simuler une connexion idéale des résonateurs, selon différentes architectures de filtres : en «L», en «Pi», en «T» ou en «treillis» [147] (voir figure 3.41) et de les cascader. Pour réaliser ces simulations, le programme nécessite des données sur les différents résonateurs qui composent le filtre. Ces données peuvent être issues de simulations par éléments finis (EMMIX2), mais aussi de caractérisation de résonateurs. Réaliser une simulation à partir de données expérimentales permet de prévoir le comportement du filtre si le câblage de celui-ci est parfait (aucune perte en ligne).

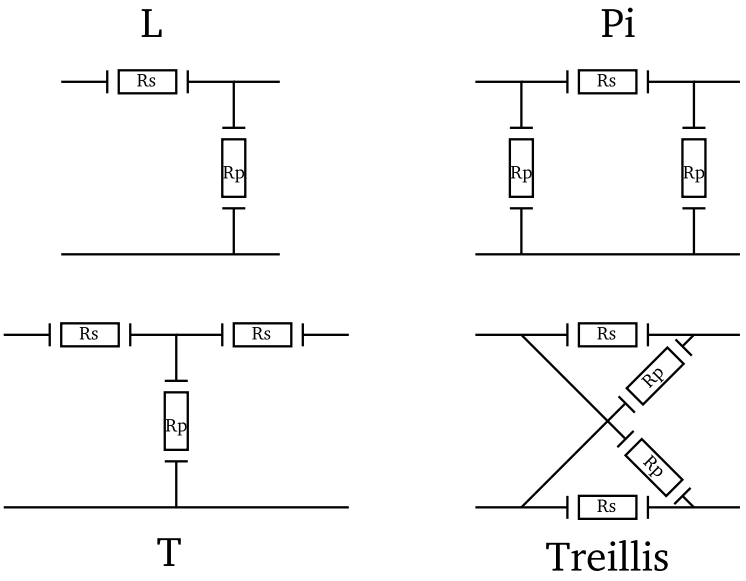


Figure 3.41 – Schéma de différentes architectures de filtres qui peuvent être simulées

Simulation

A basses fréquences (<50 MHz), il est possible de réaliser des filtres à base de résonateurs de type rubans libre fonctionnant aux alentours de 16 MHz. Pour simuler un tel filtre, nous utilisons le même type d'outils que ceux présentés en section 3.2. Pour réaliser un filtre, au moins deux résonateurs sont nécessaires (voir figure 3.41), l'un dit résonateur série et l'autre dit résonateur parallèle. Le principe des filtres à éléments d'impédance repose sur la combinaison des résonances antirésonances des branches série et parallèles. A la résonance, le résonateur se comporte comme une résistance en parallèle avec une capacité et laisse donc passer le signal incident. À l'antirésonance, seule la capacité statique contribue en première approximation au schéma équivalent qui bloque par voie de conséquence les signaux RF incidents. De cette manière, il n'y a pas de chute en transmission entre la résonance du résonateur parallèle et l'antirésonance du résonateur série. Une illustration de ce principe est donnée en figure 3.42, où est présentée la fonction de transfert d'un filtre à éléments d'impédance simulée à partir des résultats de la modélisation d'une structure ruban, pour une période d'inversion de domaine de 600 µm et une largeur de structure de 120 µm pour le résonateur série et de 139 µm pour le résonateur parallèle. Cette simulation fait apparaître une bande passante à −3 dB de 3,4 MHz qui correspond à 20% de la fréquence centrale

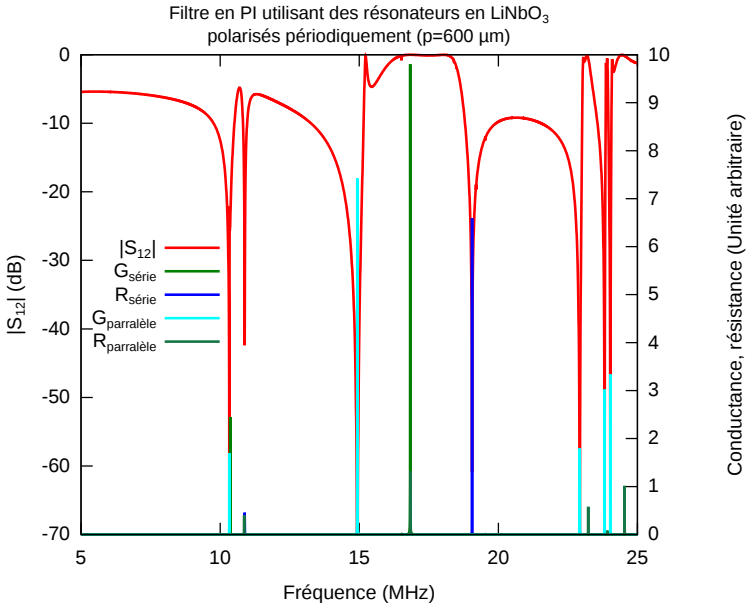


FIGURE 3.42 – Simulation d'un filtre en «Pi» à base de transducteurs polarisés périodiquement sur $LiNbO_3$ simulés par la méthode des éléments finis

à 16,9 MHz pour une simulation de filtre en «Pi». La simulation étant fondée sur des résultats de modélisation par éléments finis ne prenant pas en compte les pertes, la valeur des pertes d'insertion du filtre ne peut être considéré comme représentative d'un composant réel, par contre le rejet lui est réaliste car lié aux propriétés conservatrices du schéma équivalent. Ces simulations permettent de visualiser l'allure de la réponse du filtre en terme d'admittance. Dans le cas d'une architecture en «Pi», nous pouvons donc obtenir un filtre avec une zone de réjection proche de 10 dB entre 11 MHz et 22 MHz. D'autres architectures de filtres ont été simulées pour comparer les efficacités respectives de filtrage et sont présentées en figure 3.43. Nous pouvons ainsi quan-

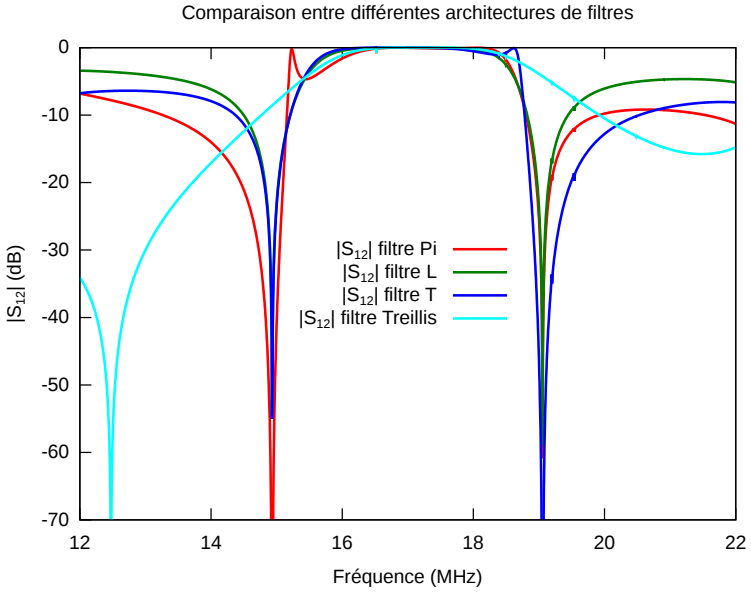


FIGURE 3.43 – Comparaison entre différentes architectures de filtre autour du mode de cisaillement

tifier la différence des niveaux de réjection, ainsi que les bandes de transition, conditionnées par

la variation de la fonction de transfert aux extrémités de la bande passante. Ainsi, le filtre en «L» présente le niveau de réjection le plus faible, mais moins d'ondulation dans la bande passante. Les filtres en «Pi» et en «T» présentent un niveau de réjection plus important que le filtre en «L» et des bandes de transitions plus nettes que les architectures en «L» et en «treillis». L'architecture en «treillis» présente le meilleur niveau de réjection, mais des pentes douces en entrée et sortie de bande passante [148]. Les structures en «T» et en «Pi» présentent donc les meilleurs compromis entre niveaux de réjection et d'ondulation et étroitesse des bandes de transition. Cependant, technologiquement, les structures en «Pi» sont pus facilement réalisables que les structures en «T» puisqu'elles ne nécessitent qu'un seul résonateur «série», c'est-à-dire celui présentant la fréquence de résonance la plus élevée et donc la largeur de ruban la plus faible, qui s'avère plus difficilement réalisable (voir chapitre 2 pour les limites dimensionnelles des rubans). Une architecture en «Pi» sera donc visée lors de la réalisation des rubans libres.

Réalisation et caractérisation

Les résonateurs rubans libres sont réalisés à la scie de précision, comme décrit dans le chapitre 2, puis leurs flancs sont métallisés pour réaliser une paire d'électrode. Les structures sont ensuite reportées sur une plaque de circuit imprimé vierge – Printed Circuit Board (PCB) – via une pâte à l'argent thermodurcie pour leur connexion électrique, comme le montre l'image de la figure 3.44. Les rubans libres sont positionnés au-dessus d'un creux dans la plaque de PCB pour leur laisser la plus grande mobilité possible. Cette configuration permet de minimiser les effets du collage sur le PCB. La caractérisation des structures est réalisée avec un analyseur de réseau. L'analyseur de

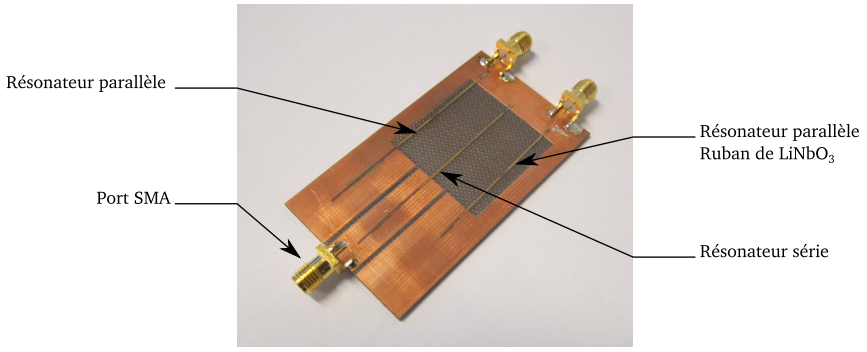


FIGURE 3.44 – Rubans libres conditionnés pour la réalisation d'un filtre à large bande passante

réseau est d'abord calibré dans la plage de fréquence de mesure, puis les critères et le type de mesure sont précisés (nombre de points de mesure, résultats en terme d'admittance, de résistance, etc.). La figure 3.45 montre le résultat obtenu pour le paramètre de transmission S_{12} du dispositif, dans une bande de mesure de 7 MHz (50 % de f_0). La caractérisation de cette structure montre que la réponse présente bien la forme d'un filtre, avec deux fréquences de coupure et une bande passante entre les deux. Cependant, l'atténuation dans la bande passante est de 11 dB, alors que le niveau de réjection est de 12 dB. Une telle atténuation dans la bande passante peut s'expliquer si le dispositif n'est pas parfaitement adapté à 50 Ω (ce qui engendre une augmentation de la réflexion) ou si le coefficient de qualité des résonateurs est très inférieur aux valeurs ciblées, dégradant en partie les bandes de transition. La qualité de l'adaptation d'impédance est mesurée par le coefficient de réflexion S_{11} du filtre, sa valeur doit être la plus basse possible (−15 dB) à l'intérieur de la bande passante, or dans le cas du dispositif caractérisé, la valeur de ce paramètre est comprise entre −5 dB et −3 dB. De même, les coefficients de qualité des résonateurs sont

mesurés entre 10 (résonateur série) et 50 (résonateurs parallèles) ce qui engendre une bande de transition haute particulièrement peu marquée et large (10 dB de dynamique sur une bande de l'ordre du mégahertz). De plus, les résonances des résonateurs parallèles ne sont pas parfaitement confondues. Un décalage fréquentiel de 150 kHz engendre de nombreuses contributions parasites dans la bande passante. Ce décalage est dû à la différence géométrique entre les deux résonateurs parallèles engendrée par la mobilité de la structure durant la découpe. Ce filtre présente néanmoins une bande passante de 1,64 MHz, soit 9,7 % de la fréquence centrale, à −3 dB.

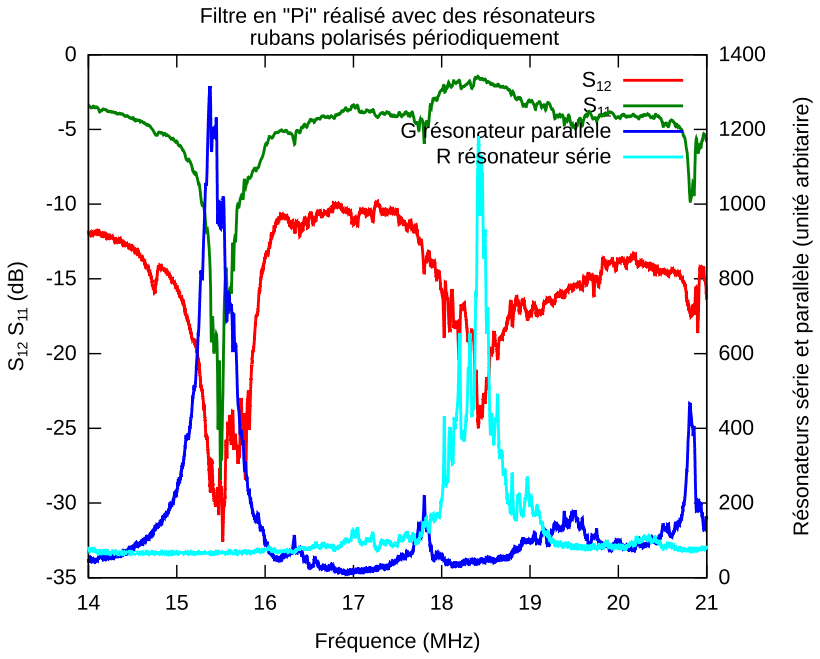


FIGURE 3.45 – Caractérisation de la transmission d'un filtre large bande réalisé avec des rubans libres de $LiNbO_3$ polarisés périodiquement

Ce premier résultat permet d'identifier les principales difficultés rencontrées telles que la dispersion de fréquence entre les deux résonateurs parallèles, l'adaptation d'impédance du dispositif, ainsi que la définition des pics de résistance caractérisée par le coefficient de qualité. Nous avons néanmoins montré la possibilité de réaliser un dispositif innovant présentant les résultats caractéristiques d'un filtre à éléments d'impédance mettant en jeu des résonateurs à base de rubans libres polarisés périodiquement.

3.3.5.2/ FILTRES À FRÉQUENCES INTERMÉDIAIRES (250 MHz) À BASE DE RÉSONATEURS *B-ridges* SUR $LiNbO_3$

Nous avons démontré la faisabilité d'un filtre au voisinage de 16 MHz grâce à l'utilisation de rubans libres polarisés périodiquement. La caractérisation de ce filtre a montré que le dispositif nécessitait des améliorations, notamment en termes de géométrie des résonateurs. Comme décrit dans le chapitre 2, les rubans libres sont difficiles à réaliser à cause de leur mobilité sur le film adhésif utilisé lors de la découpe qui donne lieu à des défauts géométriques au niveau de leur largeur et donc de leur fréquence de résonance. Ainsi, la réalisation de structures de type ruban permet d'améliorer les maîtrise de la largeur des structures, la répétabilité de la scie étant particu-

lièrement garantie dans ces conditions ($\pm 1\,\mu m$). Les structures de type ruban ne permettant pas à l'heure actuelle aucune connexion filaire, les dispositifs à moyenne fréquence sont réalisés avec des structures *B-ridges*. Cette section présente la simulation et la réalisation d'un filtre à 250 MHz utilisant des *B-ridges* polarisés périodiquement.

Choix des dimensions des structures

Pour obtenir des fréquences de travail supérieures à 100 MHz, la période d'inversion de domaine a été fixée à 15 µm. Cette période d'inversion peut donner lieu à des structures fonctionnant à plus de 650 MHz avec un couplage de l'ordre 20 %, si les structures réalisées présentent une largeur de 3 µm. Cependant, si cette configuration permet d'atteindre des caractéristiques intéressantes en termes de couplage et de fréquence, elle est difficile à mettre en œuvre pour la réalisation de filtres. En effet, comme montré en figure 3.11, une structure présentant un rapport l/p égal à 0,2 s'avère très sensible aux défauts structurels, la vitesse équivalente de phase du mode de cisaillement varie de 4,2 % pour une variation du rapport l/p égale à 0,01 (mode couplé à 20 % et présentant une vitesse de phase de $10\,000\,m \cdot s^{-1}$). Cette sensibilité de la fréquence aux variation d'épaisseur signifie que pour obtenir deux fréquences éloignées de quelques dizaines de mégahertz, un écart de largeur de la structure inférieur au micromètre s'avère nécessaire. Une telle maîtrise dimensionnelle n'est pas envisageable avec la méthode de découpe à la scie circulaire. Par conséquent, les structures ont été réalisées avec une largeur aux alentours de 20 µm, pour laquelle la variation de fréquence en fonction du rapport l/p permet une mise en œuvre plus réaliste.

Simulation du filtre

Les simulations du filtre présentées dans cette section sont réalisées à partir de données expérimentales collectées lors de la caractérisation des résonateurs réalisés sur $LiNbO_3$ polarisé périodiquement (période égale à 15 µm). L'intérêt de ce type de simulation consiste à prévoir le comportement d'une structure de filtre avant de réaliser le câblage des résonateurs entre eux. La simulation ne fait pas intervenir les pertes en lignes induites par la connexion des résonateurs entre eux et l'analyseur de réseau. Elle donne cependant une estimation des caractéristiques principales du filtre, comme les bandes de transition, le niveau de réjection ou encore l'ondulation dans la bande passante. La simulation réalisée sur une structure de filtre en «Pi» fondée sur les caractérisations expérimentales des résonateurs est présentée figure 3.46. Cette simulation montre une bande passante plus fine que celle du filtre précédemment présenté, de 1,5 % de la fréquence centrale à −3 dB. Les pertes d'insertion sont calculées pour une adaptation d'impédance à 50 Ω et s'élèvent à 6 dB soit 5 dB de mieux que le filtre à 16 MHz à base de rubans libres. Le niveau de réjection oscille quant à lui entre −12 dB du côté des fréquences basses et −14,5 dB du côté des fréquences hautes. Cette simulation est validée dans le paragraphe suivant qui présente les résultats expérimentaux de cette configuration de filtre.

Réalisation et caractérisation

Les structures *B-ridge* sont fabriquée selon le principe décrit dans le chapitre 2 puis câblées comme le montre la figure 3.26. Le résultat de caractérisation est présenté en figure 3.47. Le résultat diffère de la simulation pour deux raisons. La première tient à la différence entre les largeurs des deux résonateurs parallèles utilisés qui induit là encore une différence de fréquence de résonance pour ces deux composants entrainant un effet de dispersion en entrée de bande passante.

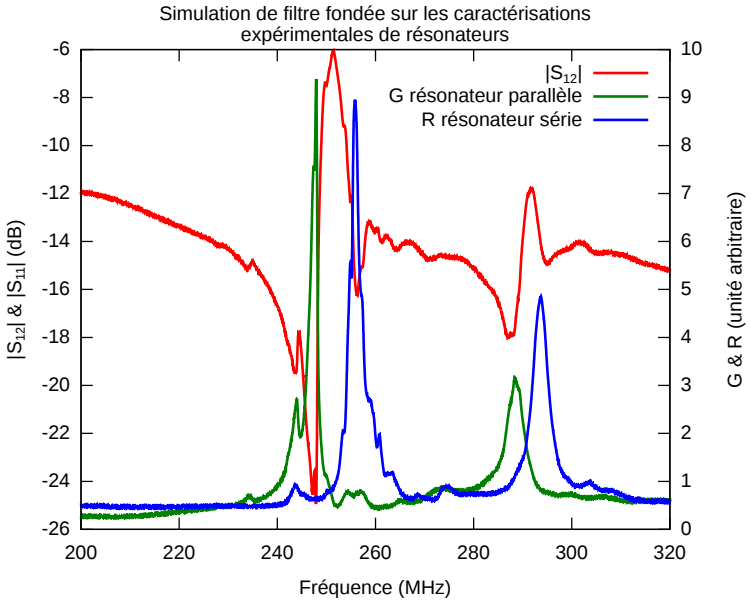


FIGURE 3.46 – Simulation d'un filtre en «Pi» fondée sur la caractérisation de résonateurs de largeurs 17,3 µm (résonateur série) et 20,8 µm (résonateur parallèle) et de période 15 µm

La seconde raison trouve son origine dans la liaison entre les *B-ridges* et l'analyseur de réseau, qui induit des pertes de transmission. Cette structure montre cependant la possibilité de réaliser des filtres à des fréquences supérieures à la centaine de mégahertz. Comme pour les structures de rubans libres, l'ensemble des points à améliorer concerne la définition de la géométrie de résonateurs dont la largeur doit être mieux maîtrisée pour obtenir une meilleure concordance entre les fréquences des deux résonateurs parallèles. Comme il est décrit dans la section 3.3.4.5, la réalisation de ces mêmes structures sur tantalate de lithium donne lieu à une meilleure définition des pics de résonance qui permettrait d'améliorer la capacité de filtrage d'un filtre réalisé avec ce type de résonateur. La simulation d'un tel dispositif est présentée dans la section suivante.

3.3.5.3/ FILTRE À 110 MHZ À BASE DE RÉSONATEURS *B-ridges* SUR $LiTaO_3$

Le tantalate de lithium présente un couplage électromécanique moins important que le niobate de lithium mais la caractérisation de structures de type *B-ridge* sur $LiTaO_3$ à montré que les modes parasites autour de la fréquence de résonance étaient moins nombreux, ce qui permet d'obtenir une ligne de base mieux définie. Cette particularité se retrouve sur les filtres réalisés avec ces structures. Ainsi, la fonction de transfert d'un filtre fondé sur ces résonateurs présente moins de modes parasites hors de la bande passante que ceux à base de $LiNbO_3$.

Le filtre n'a pas été réalisé durant le projet et seule la simulation de celui-ci fondée sur les résultats expérimentaux est présentée ici (figure 3.48). Cette simulation d'une architecture de filtre en «pi» montre la possibilité de réalisation d'un filtre présentant une bande passante de 3,2 MHz, soit 2,8 % de la fréquence centrale (111,4 MHz) à −3 dB. Cette bande relativement étroite par rapport à ce que l'on peut obtenir sur niobate de lithium est compensée par des bandes de transition nettes (les fréquences de résonance des éléments parallèles coïncident) et une pureté spectrale hors bande permettant une ligne de base sans modes parasites. La dynamique de rejet s'avère toutefois plus modeste que pour le filtre précédent. Les pertes d'insertion aux alentours de 3 dB montrent

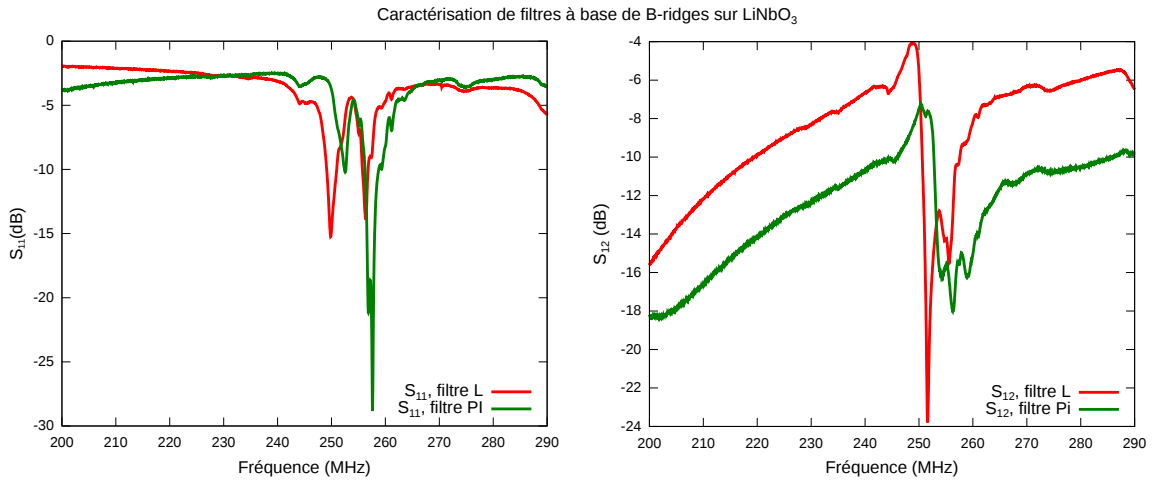


FIGURE 3.47 – Caractérisation d'un filtre en «Pi» et d'un filtre en «L» utilisant des *B-ridges* polarisés périodiquement (période 15 µm) de largeurs 17,3 µm pour le résonateur série, 20,3 µm et 20,8 µm pour les résonateurs parallèles

un accord d'impédance là encore amélioré par rapport à la solution sur $LiNbO_3$. La précision dans le choix de la fréquence s'avère un facteur clé de la réalisation d'un filtre avec des *B-ridge* polarisés périodiquement sur $LiTaO_3$. Cette précision est rendue possible grâce à une sensibilité de la fréquence de résonance en fonction de la largeur de la structure plus faible que sur $LiNbO_3$. Une différence de 2,5 µm sur la largeur de la structure permet de faire coïncider la fréquence de résonance du résonateur série avec l'antirésonance du résonateur parallèle, soit trois fois celle nécessaire pour des filtre à base de $LiNbO_3$.

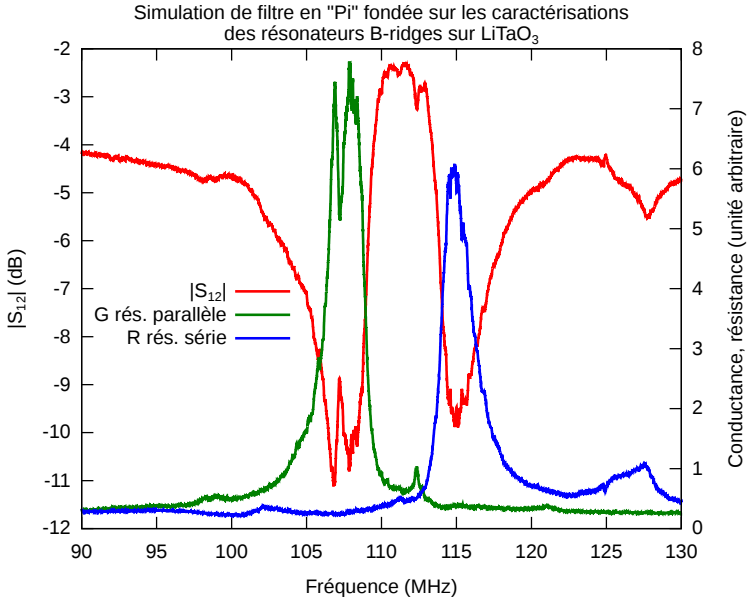


FIGURE 3.48 – Simulation d'un filtre en «pi» utilisant les caractérisations expérimentales des résonateurs réalisés sur $LiTaO_3$ avec une période d'inversion de domaine de 50 µm et une largeur de 24 µm (résonateur parallèle) et de 21,5 µm (résonateur série)

Cette structure n'a pas été réalisée mais notre simulation montre l'intérêt du $LiTaO_3$ pour une réalisation de filtre plus robuste qu'avec des résonateurs sur $LiNbO_3$. Un filtre sur $LiTaO_3$ ne

pourra cependant pas atteindre les largeurs de bande passante de plus de 10 % ou des fréquences supérieures à quelques centaines de mégahertz, contrairement aux filtres réalisés sur $LiNbO_3$. On peut établir qu'en l'état, la technologie ne permet d'obtenir des fonctions de filtrage au niveau industriel ou tout simplement exploitable. En réalisant l'étude jusqu'au bout, on met en évidence les points sur lesquels les efforts doivent être portés quant à la réalisation de filtres exploitables : réalisation du rubans à géométries parfaitement maîtrisée et une connectivité simplifiée sont les points cruciaux à développer.

3.4/ Conclusion

Les structures à hauts facteurs de forme présentent un certain nombre de caractéristiques favorables aux applications de filtrage RF tels qu'un couplage électromécanique égale ou supérieur à ceux des BAW et des SAW ainsi qu'une vitesse équivalente de phase pouvant dépasser les $10\,000\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Ces propriétés ont été établies dans la première partie de ce chapitre par modélisation numérique de différentes structures présentant ou non des inversions de domaines ferroélectriques. Les résultats des simulations indiquent la possibilité d'atteindre des couplages électromécanique de plus de 20 % pour une vitesse équivalente de phase telle qu'énoncée plus haut sur $LiNbO_3$ polarisé périodiquement. Ce résultat montre tout l'intérêt de ce type de structures et conduit à une étude plus approfondie des spécificités dimensionnelles de celles-ci en vue de leur réalisation pratique. Les possibles défauts de verticalité des structures sont pris en compte lors des simulations, ainsi que l'existence d'un congé d'angle à la jonction entre la structure et son embase. Ces simulations permettent de quantifier l'impact de ces imperfections géométriques (liées à la découpe que l'on retrouve sur les dispositifs fabriqués selon les méthodes de découpes à la scie circulaire) sur le fonctionnement de nos transducteurs et plus particulièrement sur leur réponse électrique. Nous retrouvons ainsi les différentes structures évoquées au chapitre 2, à savoir les rubans (libres ou encastrés) et les *B-ridges*, dont les résultats de caractérisation électrique sont présentés dans la seconde partie de ce chapitre. Ces caractérisations sous forme de conductance et de résistance permettent de démontrer la faisabilité de ces dispositifs et de mettre en exergue la correspondance théorie/expérience du couplage électromécanique et de la vitesse équivalente de phase. Les résultats montrent aussi les limites de nos moyens technologiques en soulignant l'impact des variations de largeur des structures sur la maîtrise des fréquences de travail et globalement sur les caractéristiques des modes ainsi excités. En particulier, le coefficient de qualité des résonateurs à base de tels transducteur se révèle critique quand il s'agit de fabriquer des structures pour des fréquences supérieures à la centaine de mégahertz, c'est à dire des structures d'une largeur de l'ordre de la dizaine de micromètre. La découpe à la scie montre en effet ses limites, non pas dans la finesse des structures qui pourrait être diminuée jusqu'à 2 µm (voire 1 µm), mais dans la régularité de l'épaisseur de la structure sur toute la surface de découpe (et plus particulièrement selon la profondeur de la structure). L'amélioration des réponses électriques de nos structure passe donc par l'amélioration de l'étape de découpe à la scie de précision. Malgré ses limitations, cette technologie a permis la réalisation de premiers filtres acousto-électriques à base de structures à hauts facteurs de forme polarisées périodiquement. Ce chapitre montre l'intérêt des rubans polarisés périodiquement pour leur utilisation en tant qu'élément d'impédance, le fonctionnement de nos transducteurs favorisant intrinsèquement un fonctionnement à base d'une onde stationnaire piégée au sein du transducteur. La possibilité d'engendrer des ondes élastiques démontrée ici pousse à envisager des structures complexes au sein desquelles plusieurs phénomènes physiques

pourraient interagir. Ce type de dispositif sera présenté au chapitre 5. Les vertus des rubans pour les applications d'optique guidée sont abordées dans le chapitre suivant.

4

Applications optiques : guides d'ondes à faibles pertes

4.1/ Introduction

Le domaine de l'optique intégré n'échappe pas au phénomène de miniaturisation qui permet l'augmentation du nombre de fonctionnalités par unités de surface. Le guidage optique se trouve au cœur des problématiques de miniaturisation puisqu'il conditionne la propagation du faisceau, élément sensible de la plupart des dispositifs optiques. Les capteurs, filtres ou encore modulateurs électro-optiques utilisent les variations des propriétés de propagation du faisceau lumineux (souvent détectées à l'aide de fonctionnalités optiques de type Mach-Zehnder, cristaux photoniques ou cavités résonantes) pour remplir leurs fonction. Dans un but de miniaturisation, deux objectifs principaux sont visés par les industriels pour les dispositifs électro-optiques utilisant des guides d'ondes optiques : la minimisation des pertes au sein du dispositif et la diminution des tensions de commandes. Avec les techniques classiques de fabrication collectives sur plaques, la combinaison de ces deux critères n'est pas immédiate. La diminution de la tension de commande est généralement obtenue en augmentant le confinement (i.e. en diminuant la section du guide), ce qui tend à augmenter les pertes des dispositifs [149, 150]. Pour répondre à ces problématiques, des structures de type ruban ont été développées [50, 149]. Elles permettent de maximiser l'interaction électro-optique en améliorant le confinement [149], tout en conservant des pertes acceptables pour les applications visées. La minimisation des pertes nécessite des rugosités de surfaces particulièrement faibles aux abords du guide, typiquement de l'ordre du nanomètre RMS. Comme nous l'avons évoqué au chapitre 2, la scie de précision permet d'obtenir des structures de type ruban possédant des flancs aux rugosités proches des valeurs ciblées ici, des flancs verticaux et des largeurs pouvant atteindre le micromètre. De plus, l'utilisation du $LiNbO_3$ est particulièrement répandue dans le domaine de l'optique du fait de sa plage de transparence (de 320 nm à 5000 nm), ses coefficients électro-optiques (en particulier $r_{33} = 30{,}8\,\mathrm{pm}\cdot\mathrm{V}^{-1}$) et ses propriétés non-linéaires. Les structures de type ruban fabriquées à la scie réunissent donc tous les critères pour réaliser un guidage d'onde efficace et ainsi améliorer l'effet électro-optique par rapport aux guides standards. De plus, les développements effectués sur la découpe à la scie de précision permettent d'obtenir des fonctionnalités inédites telles que le confinement hors plan ou l'adaptation de modes optiques.

La première partie de ce chapitre présente la réalisation et la caractérisation de guides optiques

de type rubans simples à hauts facteurs de forme. La méthode et les moyens de caractérisation des guides y sont présentés. Le confinement et les pertes seront quantifiés afin de les comparer à celles des structures existantes et à celles réalisées dans le cadre de ce projet. La deuxième partie se consacre à la fonction d'adaptation (couplage) de mode d'une fibre optique vers une guide de type ruban. Celle-ci est réalisée par les extrémités d'un *B-ridge* qui permet une variation progressive de l'indice effectif du mode guidé. Un état de l'art autour des coupleurs de modes optiques est donné, après quoi les résultats de nos travaux y seront confrontés. La dernière partie de se chapitre se consacre à la réalisation de structures plus complexes mettant en jeu des amincissement locaux réalisés à la scie. L'objectif de ce type de dispositif est d'améliorer le confinement par rapport aux structures rubans et *B-ridges* déjà réalisées. L'objectif de chacune des structures présentée est d'accueillir des cristaux photoniques ou des cavités résonantes afin de réaliser des fonctions de capteurs, de filtres ou de modulateurs électro-optique.

4.2/ Guides d'ondes à saut d'indice

4.2.1/ Intérêt, conception et fabrication

Le guide d'ondes optiques à saut d'indice est une structure composée de plusieurs milieux d'indices de réfraction différents et dont la transition entre chaque milieu se fait de manière discontinue. Une présentation de ces structures et de leur fabrication plus détaillée est donnée au chapitre 2, les différentes méthodes de réalisation d'un guide optique sont données au chapitre 1.

Les pertes de propagation sont définies ici comme la somme des pertes liées à la propagation du faisceau dans un guide d'onde : les pertes par rayonnement, par diffusion, par absorption et par diffraction et sont évaluées en décibel par centimètre. Pour minimiser la puissance consommée, il est nécessaire de minimiser les pertes de propagation et de confiner la lumière dans de faibles volumes (guides de sections de quelques micromètres carrés). La technologie de fabrication par scie diamantée de précision garantie une rugosité inférieure à 10 nm RMS ce qui permet de ne pas dépasser le décibel par centimètre de pertes de propagation (voir section suivante). Le confinement de la lumière est assuré par un guide d'onde à gradient, à saut d'indice ou par une combinaison des deux. En générant un champ électrique au moyen d'électrodes placées de part et d'autre du guide, une interaction électro-optique se produit (le champ électrique modifie l'indice de réfraction du matériau) et peut être utilisée pour réaliser des capteurs, des modulateurs ou des filtres [151–153]. Le taux de recouvrement des champs électriques et optiques définie l'efficacité avec laquelle le champ électrique influe sur le faisceau lumineux, sa valeur dépend en grande partie de la géométrie des électrodes et du guide optique. La figure 4.1 présente les différents recouvrements électro-optiques obtenus par simulation via le logiciel COMSOL®. Ainsi, la simulation montre que le recouvrement électro-optique est deux fois plus élevé dans le cas de structures de type ruban que dans celui de guides standards par diffusion de titane sur niobate de lithium massif, pour un même espacement inter-électrodes. De plus, le champ électrique est uniforme dans un guide de type ruban alors que son module décroit avec la profondeur dans le cas d'électrode coplanaire au guide (cas (a) et (b) de la figure 4.1).

La figure 4.2 décrit le procédé de fabrication des structures réalisées au sein du département d'optique de FEMTO-ST par Courjal et al. [50]. Une diffusion de titane est réalisée afin de confiner le mode verticalement, fonction que ne remplit pas à lui seul le guide ruban à hauts facteurs de

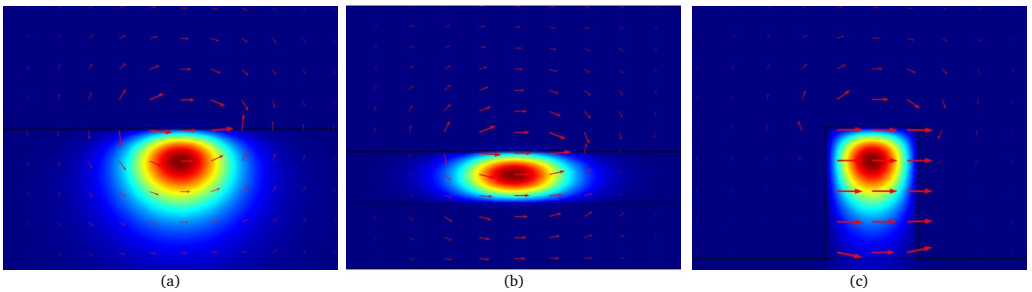


FIGURE 4.1 – Simulation du champ électrique (intensité et direction) permettant de calculer le recouvrement électro-optique pour différentes configurations d'électrodes. (a) niobate de lithium massif avec guide par diffusion de titane en surface, espace inter-électrode de 7 µm, recouvrement électro-optique obtenu par simulation : 0,42. (b) niobate de lithium aminci avec guide par diffusion de titane en surface, espace inter-électrode de 7 µm, recouvrement électro-optique obtenu par simulation : 0,60. (c) guide ruban de largeur 7 µm avec guidage vertical par diffusion de titane et électrodes sur les flancs isolées du guide via une couche de silice de 100 nm, recouvrement électro-optique obtenu par simulation : 0,82

forme. Ces dispositifs seront ensuite munis de cavités Fabry-Perot ou de cristaux photoniques dans le but de réaliser des modulateurs électro-optiques [151]. Dans le cadre des travaux exposés ici, seule la réalisation des guides et des cristaux photoniques est présentée ; le lecteur pourra se référer aux travaux de thèse de Clément Guyot pour plus d'informations sur les modulateurs électro-optiques obtenus par cette méthode.

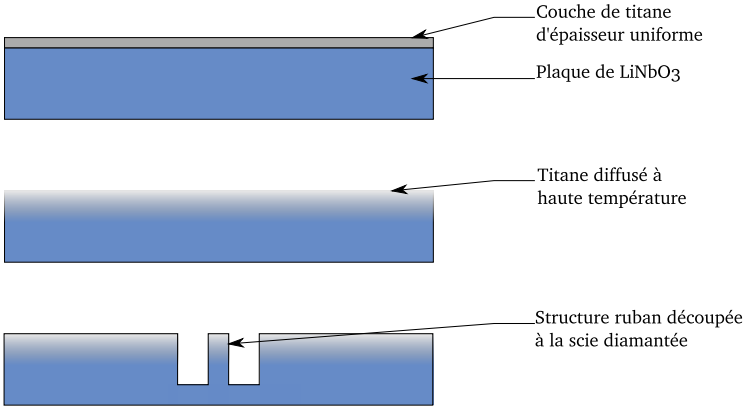


FIGURE 4.2 – Procédé de fabrication d'un guide d'onde optique simple

La structure est fabriquée par découpe à la scie de précision par deux passages de lame successifs, espacés de la largeur de la structure, comme décrit dans le chapitre 2. Les largeurs nécessaires pour ce type de structure sont de l'ordre de 5 à 7 µm [50], ce qui permet d'obtenir des guides dans lesquels ne se propage que le mode fondamental. On dit alors que le guide est monomode. Ce type de structure est caractérisé dans la référence [50] où l'on montre que les pertes de propagation peuvent être ramenée à $0{,}5\,\mathrm{dB}\cdot\mathrm{cm}^{-1}$. Ce résultat est obtenu grâce à la rugosité des flancs mesurée à 4 nm RMS, obtenue lors de la découpe à la scie (voir chapitre 2). La rugosité conditionne directement les effets de diffusion en limite du confinement et s'avère donc primordiale d'optimisation. La rugosité visée est alors très inférieure à la longueur d'onde ($R_q \sim \lambda/1000$). Nous porterons donc une attention particulière à la maîtrise de cette rugosité tout au long de ce

chapitre, en commençant par caractériser l'état des surfaces – sommets et flancs – des rubans.

4.2.2/ Résultats de caractérisation

Les structures réalisées sont dans un premier temps caractérisées au MEB afin de mesurer quantitativement leurs différentes dimensions (largeur, hauteur, longueur, verticalité) et de vérifier qualitativement la qualité du polissage des flancs (état et rugosité des surfaces, présence de fissures). La figure 4.3 montre un exemple de structure dont les flancs ont été polis concomitamment à la découpe à la scie diamantée. Les particules visibles sur la structure de l'image 4.3 sont des dépôts

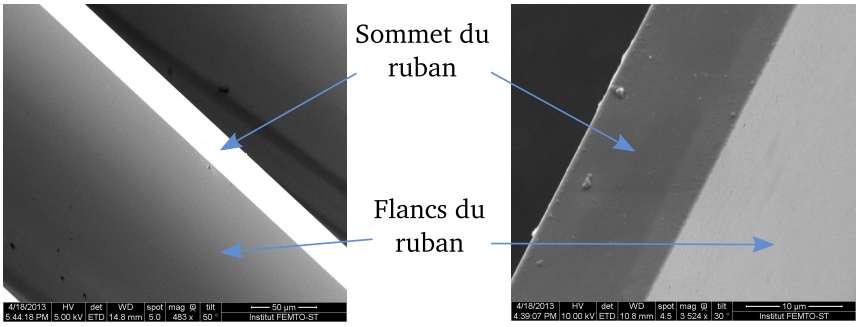


Figure 4.3 – Vue au MEB d'une structure ruban

de matière provenant des résidus engendrés par la découpe à la scie. Ces particules restent adsorbées à la surface et seule une action mécanique comme celle engendrée dans un bain à ultrasons permet de les retirer efficacement, au risque de possibles dégradations structurelles. Les caractérisations optiques seront donc effectuées en présence de ces particules, de quelques centaines de nanomètres voir quelques micromètres de diamètre.

Après les avoir observées au MEB, les structures sont caractérisées en visualisant les modes optiques guidés grâce à un banc schématisé en figure 4.4. Les mesures sont effectuées à une longueur

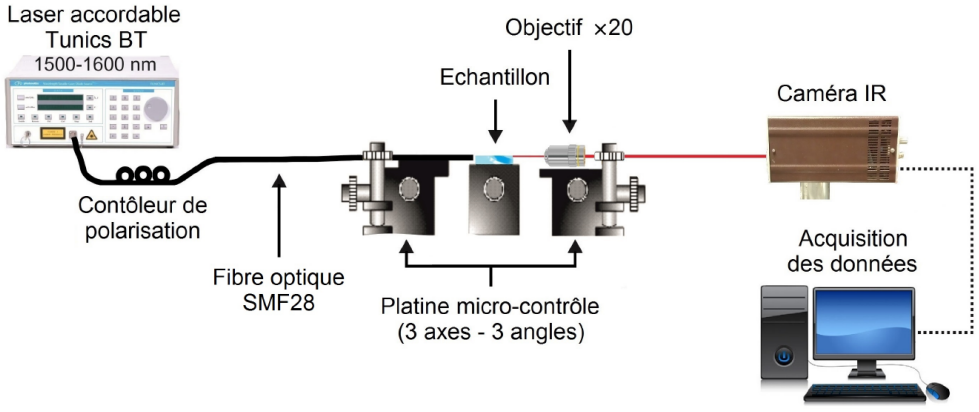
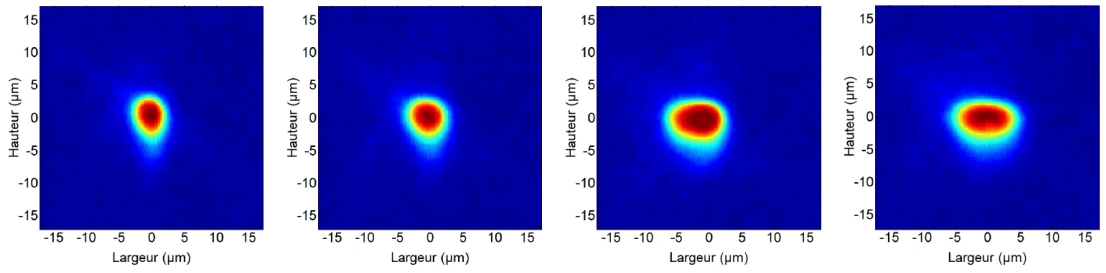


Figure 4.4 – Schéma représentant le banc de caractérisation utilisé pour visualiser les modes optiques

d'onde de 1550 nm – longueur d'onde standard en télécommunications optiques – générée par un laser accordable. La polarisation du faisceau lumineux est modifiable via le contrôleur de polarisation, ce qui permet de choisir entre les polarisations Transverse Électrique (TE) et TM, qui ne

sont pas nécessairement guidées de la même manière. La lumière est injectée avec précision dans la structure grâce aux platines de réglage soutenant l'échantillon. Le mode optique est ensuite visualisé grâce à la caméra infrarouge et à l'objectif de microscope grossissant (×20) situés en sortie du guide. La figure 4.5 montre l'évolution de la forme du mode optique observé pour différentes largeurs de structures. Ainsi, pour des largeurs de rubans inférieures à 8 µm (cf. figures 4.5(a) et



(a) (b) (c) (d)

FIGURE 4.5 – Évolution de la forme du mode optique en fonction de la largeur de la structure. (a) 5,7 µm, (b) 7,6 µm, (c) 9,7 µm, (d) 11,7 µm

(b)), le mode optique est confiné latéralement, alors que cet effet est perdu pour des largeurs supérieures à 9 µm (cf. figures 4.5(c) et (d)). Dans ce dernier cas, les modes sont semblables à ceux propagés dans des guides de type «canal» obtenus par diffusion de titane sur substrat plan. Concernant la profondeur des structures, comme en acoustique, l'évasement en fond de tranchée de la scie induit des pertes par rayonnement dans le substrat. Tandis qu'il était nécessaire de bénéficier d'un rapport de forme supérieur à 20 en acoustique, il faut seulement une profondeur de structure supérieure à une vingtaine de microns en optique pour s'affranchir de l'effet du congé d'angle de dépouille. Les modes optiques ainsi observés ont des hauteurs et largeurs caractéristiques de l'ordre de $6{\times}6\,\mu m^2$.

L'observation des modes optiques permet de confirmer leur caractère monomode et de s'assurer que ceux-ci ne sont pas altérés par des défauts géométriques de la structure. Les dispositifs caractérisés ensuite sont sélectionnés par la forme et la dimension du mode optique observé à la caméra infrarouge. La mesure des pertes de propagation optiques des dispositifs est effectuée via un banc dont le schéma est présenté en figure 4.6. Le faisceau lumineux est généré sur une plage de 1525 nm à 1575 nm par un laser accordable, puis il est polarisé suivant les polarisations TE ou TM. Il est injecté dans le dispositif à caractériser via une fibre optique SMF-28 [154] et le signal transmis est récupéré de la même manière en sortie de guide puis caractérisé via un analyseur de spectre haute résolution (AP2040A APEX). Le signal réfléchi est récupéré à l'entrée du dispositif et mesuré via un analyseur de spectre afin de mesurer la réflexion de la face d'entrée du guide. L'analyseur de spectre permet de mesurer les densités spectrales d'énergies transmises et réfléchies avec une résolution de 0,12 pm, le profil d'intensité périodique visible sur la figure 4.7 étant lié à l'effet Fabry-Perot entre les faces d'entrée et de sortie de la structure guidante. La période de ce signal est appelé Intervalle Spectral Libre (ISL) et permet de calculer la valeur de l'indice de groupe effectif via la formule 4.1, où n_g représente l'indice de groupe effectif, λ la longueur d'onde du faisceau optique et L la longueur de la cavité Fabry-Perot, c'est à dire la longueur de la structure.

$$n_g = \frac{\lambda^2}{2L \cdot ISL} \tag{4.1}$$

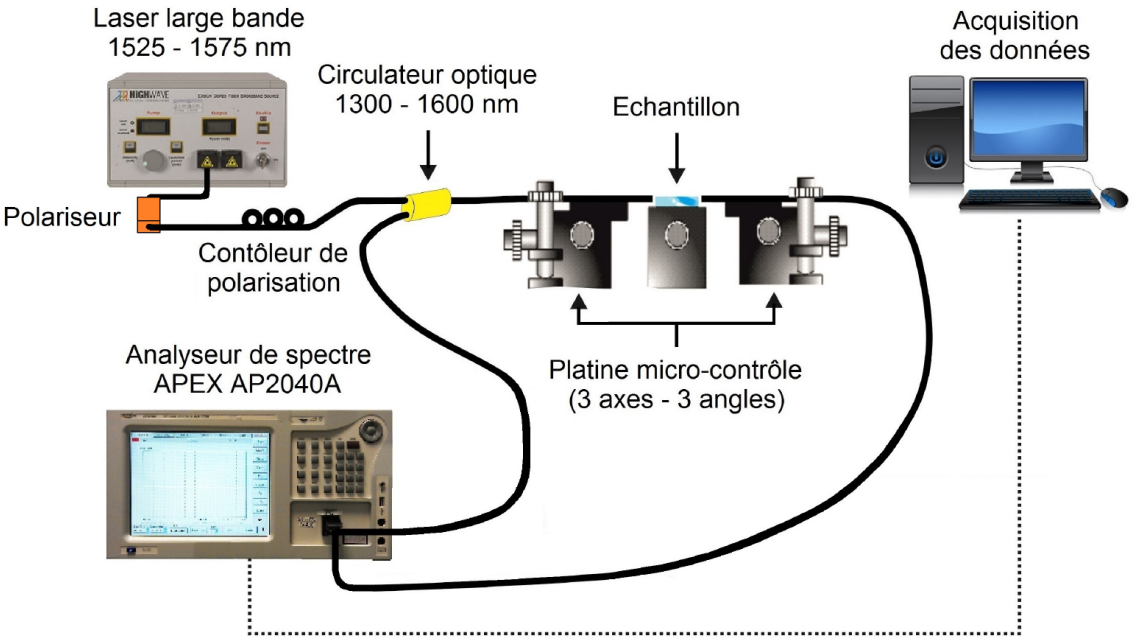


FIGURE 4.6 – Schéma représentant le banc utilisé pour caractériser les pertes optiques

L'indice effectif de groupe n_g indique la vitesse de propagation de l'énergie optique guidée (vi-

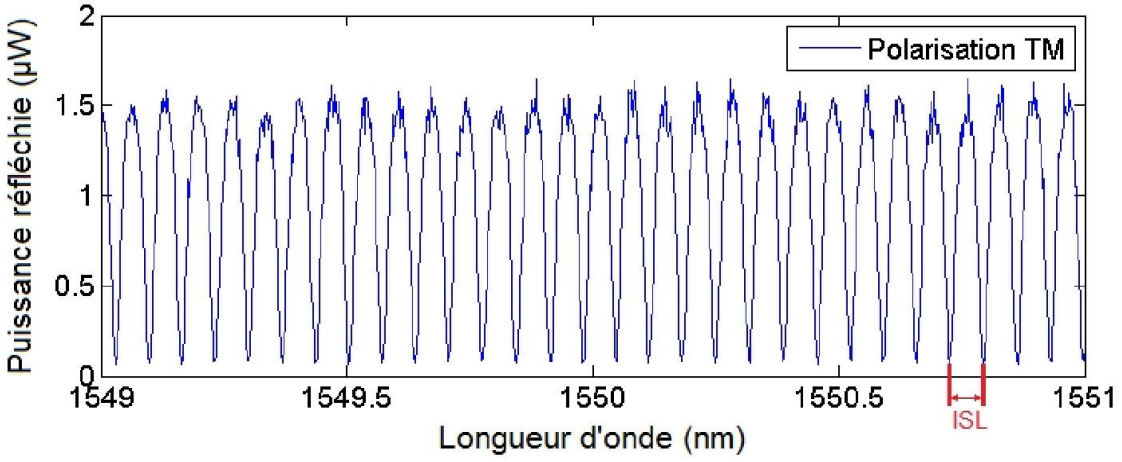


FIGURE 4.7 – Densité spectrale du mode de polarisation TM guidé au sein d'une structure ruban

tesse de groupe v_g) avec $v_g = c/n_g$. La figure 4.7 présente le résultat d'une caractérisation faisant apparaître la mesure de l'ISL. Les pertes de propagation α exprimées en décibel par centimètre sont calculées via l'équation (4.2) où L représente la longueur du guide et K_{R1} un coefficient dépendant des intensités minimales et maximales transmises. Le détail des calculs concernant les pertes de propagation figure en annexe B.

$$\alpha = \frac{-4.34}{L} \cdot \ln(K_{R1}) \tag{4.2}$$

Les pertes de propagation mesurées pour des guides rubans simples atteignent 0,2 dB · cm^{-1}, ce qui est proche de l'état de l'art [50, 155, 156]. Le mode guidé par les dispositifs présente une

largeur à mi-hauteur de 6 µm, alors que les fibres optiques d'entrée et de sortie guident un mode de largeur à mi-hauteur de 10 µm. La différence géométrique de répartition de l'énergie entre la fibre et le guide donne lieu à des pertes dites de couplage. Ces pertes de couplage engendrent une perte de puissance entre les fibres optiques et la structure guidante. Une structure dispersive permettant de passer d'un mode de 10 µm de diamètre à un mode de 6 µm de diamètre de façon continue permettrait d'éviter ce phénomène. Par analogie avec l'électro-acoustique, cette structure doit réaliser une transition d'indice optique de la même manière qu'une adaptation d'impédance acoustique. La structure de *B-ridge* permet de répondre à ce besoin en créant une liaison régulière et continue entre la fibre optique et le ruban, on parle alors de coupleur de modes optiques.

4.3/ Coupleurs de modes optiques verticaux réalisés à la scie

4.3.1/ Intérêt et présentation des coupleurs de modes optiques

Dans le domaine de l'optique, les dimensions caractéristiques (section) des guides varient de plusieurs centaines de micromètres à quelques centaines de nanomètres en fonction des systèmes et des technologies et selon la nature des modes exploités. La figure 4.8 représente la jonction entre la fibre et le guide ruban. La différence de taille entre les modes des deux structures ne permet pas une bonne injection du faisceau lumineux dans le guide.

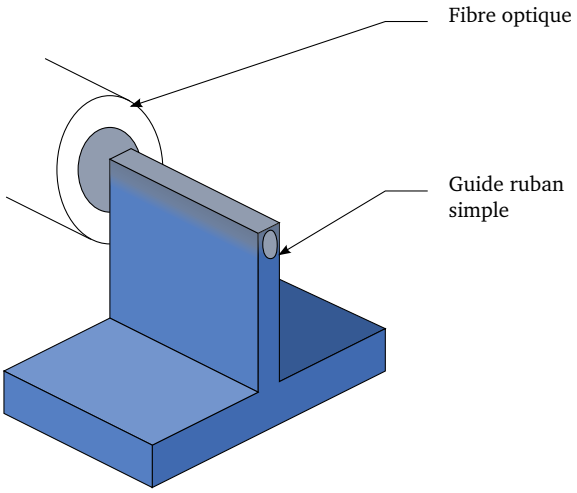


Figure 4.8 – Schéma illustrant la différence de taille entre le mode d'une fibre optique de type SMF-28 et celui d'un guide ruban standard.

Pour passer d'un guide de section donnée à un guide différent en minimisant autant que faire se peut les pertes de couplage évoquées plus haut, le mode optique doit être adapté en dimensions via un coupleur de mode, qui consiste à faire évoluer la section du mode de façon continue d'un guide à l'autre en minimisant tout effet de réflexion indésirable. Ce type de dispositif, largement utilisé pour l'optique fibrée, permet de coupler une fibre optique à différents dispositifs [157] de façon optimale. La figure 4.9 montre le profil d'intensité lors d'une adaptation de mode et un exemple d'adaptation de mode tiré de [158]. Ainsi, le but d'un coupleur de modes consiste à adapter la section du mode optique au sein de la source (ici une fibre optique) à celle au sein du dispositif (de type ruban), pour minimiser les pertes de couplage fibre-guide.

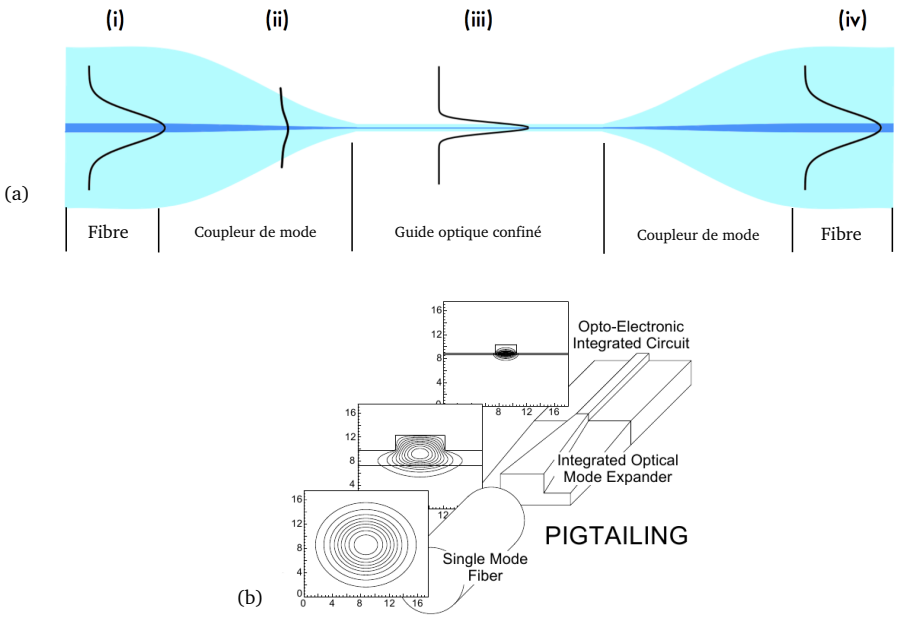


FIGURE 4.9 – Schémas (a) du profil d'intensité lors d'une adaptation de mode et (b) de la géométrie type d'une structure d'adaptation de mode (tirée de [158]). (a) La fibre d'injection (i) est reliée à un coupleur de mode (ii) qui permet de modifier la taille du mode pour l'adapter au guide confiné (iii). En sortie de guide, la lumière est récupérée dans une fibre (iv) à l'aide d'un second coupleur de mode. (b) Coupleur de mode géométrique horizontal réalisé sur tranche de substrat massif avec une vue de la taille des modes aux différents points du dispositif.

Par définition, l'efficacité de couplage optique η est donnée par le rapport de la puissance transmise par le coupleur P_{out} sur la puissance incidente P_{in}, exprimées en Watts :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{4.3}$$

Mathématiquement, l'efficacité de couplage optique est obtenue par le calcul de l'intégrale de recouvrement [159] donnée par l'équation 4.4, où E_{in} et E_{out} sont les distributions de champs des modes fondamentaux portés par deux guides juxtaposés, avec $< a, b >= \iint a(x,y)\overline{b(x,y)}\mathrm{d}x\mathrm{d}y$.

$$\eta = \frac{| < E_{in}, E_{out} > |^2}{< E_{in}, E_{in} >< E_{out}, E_{out} >} \tag{4.4}$$

La valeur de η étant alors comprise entre 0 et 1, où 1 représente un couplage maximal, les champs incidents et transmis étant alors totalement couplés. L'adaptation intermodale est possible en faisant varier de manière progressive la section du guide d'un système vers un autre ; de l'adaptation géométrique résulte l'adaptation optique. Les coupleurs de modes sont alors classés selon des critères optiques et géométriques :

– Critère optique : la conservation de l'énergie du mode fondamental est assurée grâce à un coupleur monomode adiabatique (sans pertes), à la différence de coupleurs multimodes, généralement utilisés pour réaliser un couplage vers un guide multimode depuis un guide monomode ou multimode.
– Critère géométrique : La géométrie la plus courante pour réaliser un coupleur de mode

consiste à faire évoluer continument la section du guide, verticalement ou horizontalement de manière indépendante. Quand l'adaptation géométrique est effectuée latéralement et verticalement de manière simultanée, le coupleur est dit hybride. Il existe aussi des adaptateurs coniques, souvent utilisés pour les fibres optiques, des coupleurs à double cœur ou encore des structures de couplage réalisées avec des cristaux photoniques [160, 161].

4.3.2/ État de l'art

Les adaptateurs de modes optiques sur fibres sont industriellement matures et commercialisés [157], nous ne traiterons donc pas de ceux-ci dans cette partie. Les adaptateurs de modes optiques sur puces font l'objet de nombreux projets de recherche comme nous le verrons dans cette section. Le domaine de l'optique guidée utilise de nombreux matériaux tels que le verre, le niobate de lithium, des polymères ou encore des semiconducteurs. Des coupleurs de modes réalisés avec ces différents matériaux sont fabriqués afin d'en exploiter toutes les capacités optiques. D'une manière générale, les coupleurs latéraux (définis dans le plan du substrat massif) sont les plus communs du fait de l'utilisation de technologies planaires de microfabrication sur plaques. Les coupleurs verticaux nécessitent une variation d'épaisseur du matériau de guidage qui n'est pas toujours possible via les techniques classiques de microfabrication. Les sections suivantes montrent différentes méthodes de réalisation de coupleurs de modes optiques latéraux et verticaux.

4.3.2.1/ Coupleurs de modes à géométrie latérale

Du fait des dimensions micrométriques des structures utilisées en optique guidée, les coupleurs de modes optiques sont généralement fabriqués par des techniques de microfabrication collectives mettant en jeu la photolithographie sur plaques. Dai *et al.* [162] montrent la faisabilité de coupleurs à simple et double cœur sur une couche de silicium, gravée par méthode réactive ionique – Inductively Coupled Plasma (ICP) –, permettant d'adapter un mode optique de diamètre 3 µm à un guide de section 1 μm^2. Au sein de la référence [158], la géométrie varie horizontalement avec une réduction continue de la largeur de la structure. Le mode optique y est modifié par un empilement de couches de InP et de InGaAs afin d'obtenir un profil d'indice particulier. Cet empilement réalisé par des techniques de microfabrication conventionnelles nécessite de nombreuses étapes incluant un dépôt par MOCVD, de la gravure par plasma réactif ainsi que des étapes de photolithographie. Les pertes de couplage sont réduites de 4 dB dans cette configuration par rapport aux mêmes guides ne présentant pas de coupleur de modes. Jeong *et al.* [163] utilisent quant à eux les techniques de fabrication par photolithographie et gravure sèche pour définir les dimensions latérales d'un coupleur de mode hybride.

Une autre approche consiste à réaliser une structure plane captant le mode optique d'une fibre située hors plan [164–166] à l'aide d'un coupleur constitué d'un réseau de Bragg, comme le montre l'image 4.10 tirée de la référence [165]. Une fois le faisceau optique capté par le réseau de Bragg, le mode optique est confiné dans un guide à l'aide d'un coupleur plan semblable à ceux présentés plus haut (réduction continue de la largeur du guide). Dans cette configuration, le couplage fibre-guide s'avère de 30 % et peut théoriquement atteindre 80 % d'après la référence [166]. Cependant, la nécessité d'un positionnement angulaire précis rend difficile le fibrage de ce type de dispositif.

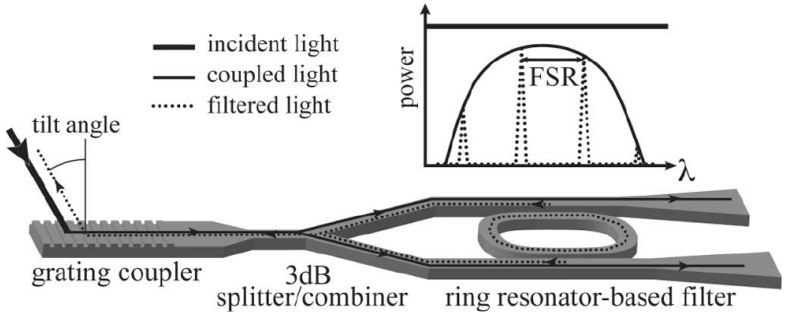


FIGURE 4.10 – Schéma d'un coupleur hors plan à géométrie latérale tirée de [165]

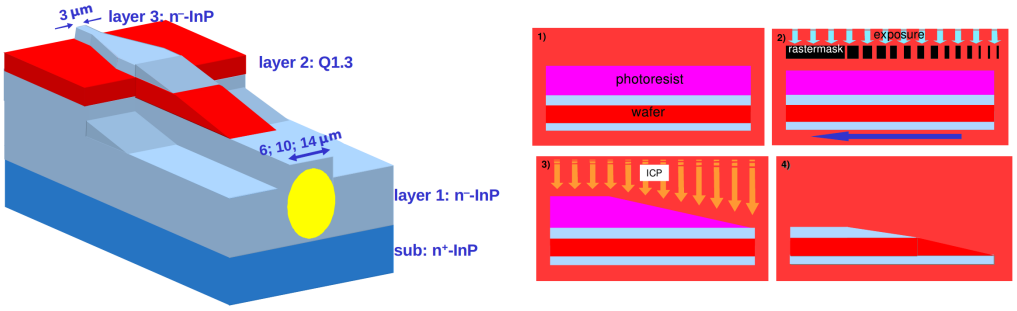
La réalisation de tous les dispositifs présentés dans ce paragraphe utilise les techniques de microfabrication collectives sur plaque. Celles-ci sont particulièrement efficaces pour réaliser une variation continue de la largeur du guide afin de réaliser l'adaptation d'indice nécessaire au couplage de la fibre avec le guide. Ces mêmes méthodes de fabrication sont employées pour fabriquer des coupleurs verticaux après les avoir adaptés à la structuration hors plan.

4.3.2.2/ COUPLEURS DE MODES À GÉOMÉTRIE VERTICALE

Pour réaliser des coupleurs verticaux, Jeong *et al.* [163] utilisent la méthode dite de *shadow-mask* (masque d'ombrage) qui permet de réaliser une pente de 500 µm de longueur lors de l'étape de photolithographie. Cette pente est en grande partie déterminée par la distance entre le masque et le substrat. Ces coupleurs sont réalisés sur un circuit optique plan – Planar Lightwave Circuit (PLC) – à base de silice, les motifs et l'amincissement étant obtenus par gravure sèche. Ces coupleurs ont permis une réduction des pertes de couplage de 1,1 dB par rapport à des guides similaires directement connectés aux fibres optiques sans l'intermédiaire d'un coupleur de modes.

Comme décrit dans la référence [158], un coupleur de mode hybride peut être réalisé par empilement, en rajoutant une structuration verticale à l'ensemble [167, 168]. Les pertes au sein d'un coupleur selon cette géométrie s'élèvent à 0,4 dB et les pertes de couplage fibre-guide atteignent 1 dB. Une vue schématique de ce dispositif tirée de la référence [167] est présentée en figure 4.11. La structuration verticale est réalisée grâce à un masque gradué qui permet d'insoler une résine de manière à lui donner un profil incliné après révélation, qui est ensuite transmis à la structure lors de sa gravure. Pour la structure hybride présentée en référence [169] et réalisée par une combinaison de gravure sèche, d'oxydation thermique et de gravure humide, Li *et al.* obtiennent l'adaptation d'un mode de 4.6×3,1 µm^2 à une section de 280×500 nm^2. Les pertes de couplage fibre-guide annoncées pour ce type de dispositif sont de 1,52 dB.

Une autre méthode de réalisation consiste à créer un profil d'indice variable suivant l'épaisseur du substrat. Pour ce faire, on module de façon maîtrisée la profondeur d'implantation ionique [170], réalisée par voie humide sur un substrat (de verre ou niobate de lithium) protégé par un masque de nitrure de silicium ouvert à l'emplacement des guides. Le profil d'indice est ensuite conditionné lors de la diffusion d'ions à travers le masque par la vitesse d'introduction de la puce dans un bain de $AgNO_3$ porté à 235°C. L'efficacité de couplage annoncée est de 93 %, avec des pertes liées à l'adaptateur de mode (d'une longueur de 5 mm) de 1 dB pour réaliser la transition d'un d'un guide de largeur 4 µm vers un autre de largeur 400 nm.



(a) (b)

FIGURE 4.11 – (a) Schéma d'un coupleur de mode vertical et (b) méthode de fabrication utilisée pour le réaliser. Images tirées de la référence [167]

Chacune des méthodes présentées pour réaliser des coupleurs de modes verticaux ou horizontaux possède ses avantages et permet l'adaptation optique pour des dispositifs spécifiques aujourd'hui utilisés par des grands groupes tels que Hitachi ldt. [171] ou Alcatel [172]. Une liste plus exhaustive des géométries d'adaptateurs de mode est donnée dans les travaux de thèse de M. Galarza Galarza [158]. Cependant, l'ensemble de ces méthodes est adapté à la réalisation de coupleurs pour des dispositifs plans, ou de l'ordre du micromètre de hauteur maximum. Dans le cadre de la réalisation de dispositifs optiques utilisant des structures rubans de plusieurs dizaines de micromètres de hauteur, aucune des méthodes présentées ne convient à l'adaptation de modes. Par ailleurs, la majorité des techniques présentées ici nécessitent de lourdes étapes technologiques. Le développement de structures de type *B-ridge* ouvre par contre la voie à la fabrication de coupleurs de modes optiques pour des structures à hauts facteurs de forme. Nous expliquerons le principe mis en œuvre et décrirons nos résultats dans les paragraphes suivants.

4.3.3/ COUPLEURS DE MODES RÉALISÉS À LA SCIE DE PRÉCISION

Intérêt des structures

La minimisation des pertes est un enjeu majeur pour les industriels du domaine de l'optique guidée. Une partie des ces pertes est liée à la propagation du faisceau dans le guide, d'autres aux interfaces entre les fibres d'injection et le guide. Plus précisément, les pertes d'insertion sont composées des pertes dites de transmission, de couplage et de propagation. Nous sommes parvenus à montrer qu'un guide de type ruban réalisé à la scie possédait des pertes de propagation suffisamment faibles pour les applications visées (inférieur au décibel par centimètre). Les pertes de transmissions apparaissent à cause de la différence d'indice entre les interfaces fibres-guide. Afin de minimiser ces pertes, les industriels ont recours à une colle d'indice optique dont la valeur est comprise entre celui de la fibre et celui du guide, avec laquelle la fibre est maintenue contre l'entrée du guide. Les pertes de couplage sont dues au taux de recouvrement des champs électriques des modes de la fibre et du guide (cf. équation 4.4). Les coupleurs de modes optiques visent donc à maximiser le taux de recouvrement pour minimiser les pertes de couplage. Les sections précédentes montrent comment est habituellement réalisée la fonction de coupleur de mode pour des dispositifs planaires ou possédant une dimension hors plan de l'ordre du micromètre. Nous nous intéresserons ici à la réalisation d'un coupleur de mode pour des structures de type rubans à hauts facteurs de forme.

Comme les coupleurs réalisés par des techniques de fabrication collectives sur plaques, ceux réalisés à la scie de précision s'appuie sur une adaptation de mode par transformation géométrique induisant une variation progressive de l'indice effectif et de la distribution géométrique du mode. Les sections des modes au sein de guides de type ruban à hauts facteurs de forme sont généralement de l'ordre de $5 \times 4\,\mu m^2$ (hauteur×largeur) alors que le mode d'une fibre optique de type SMF-28 possède un diamètre de 10,5 µm [154]. L'objectif est donc de réaliser une transition géométrique qui permette au mode de passer de la taille de la fibre à celle du guide. Nous devrons veiller à ce que les coupleurs de modes ne rajoutent pas de pertes de propagation, auquel cas le bénéfice de la minimisation des pertes de couplage serait perdu. Les pertes de propagation sont exprimées en décibel par centimètre, les pertes liées à la propagation du faisceau dans le coupleur augmentent donc avec la longueur de celui-ci. Cependant, une transition trop brutale entraîne des pertes rayonnées dans la zone de transition. Une optimisation de la longueur devra donc être envisagée pour maximiser l'effet du coupleur de mode sans ajouter de pertes significatives aux guides de type rubans.

Principe de fonctionnement

Les coupleurs de modes optiques réalisés à la scie se fondent sur une adaptation progressive du mode optique du guide ruban jusqu'au mode optique de la fibre. Cette fonction est réalisée par la géométrie de la structure fabriquée via la scie circulaire de précision. Comme présenté au chapitre 2, les *B-ridges* présentent des zones de transition en profondeur liées à l'empreinte de la lame de scie dans le matériau. Ces zones de transition réalisent la fonction de coupleur de modes optiques, comme l'illustre le schéma de la figure 4.12. Le guide ruban réalise la fonction de guidage latéral ;

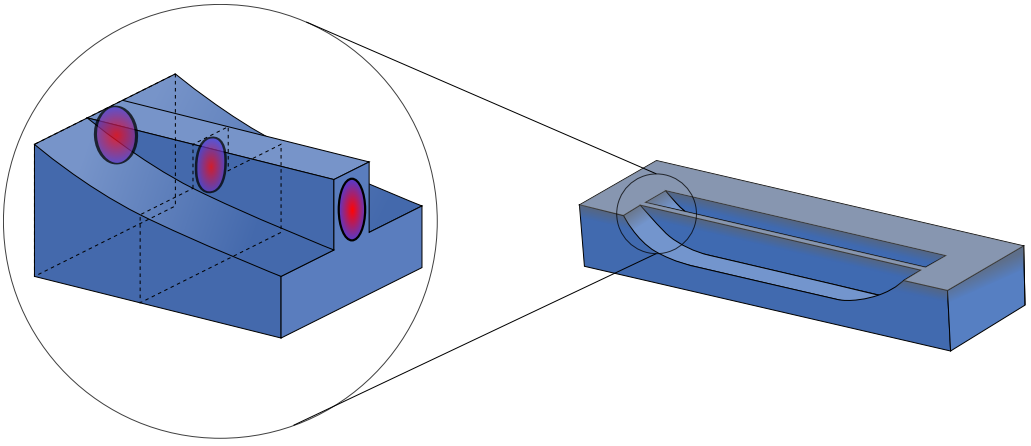


FIGURE 4.12 – Schéma représentant l'évolution de la section du mode le long du coupleur de mode

le guidage vertical étant réalisé par une diffusion de titane comme indiqué dans la section 4.2. La figure 4.13 résume le procédé de fabrication et présente la géométrie d'un coupleur de mode réalisé à la scie de précision.

Les résultats attendus pour ce type de structure ont été quantifiés à l'aide de simulations (utilisant la méthode *Pseudospectral Time Domain (PSTD)*) réalisées par F. Devaux au sein du département d'optique de l'institut FEMTO-ST . Ces simulations prévoient que les pertes de couplage entre une fibre optique SMF-28 et un guide canal réalisé par diffusion de titane s'élèvent à 1,36 dB. Cette valeur est élevée à 2,29 dB pour un guide ruban de largeur 6 µm mais en revanche, ce dernier assure un confinement deux fois supérieur aux guides par diffusion de titane standard. La

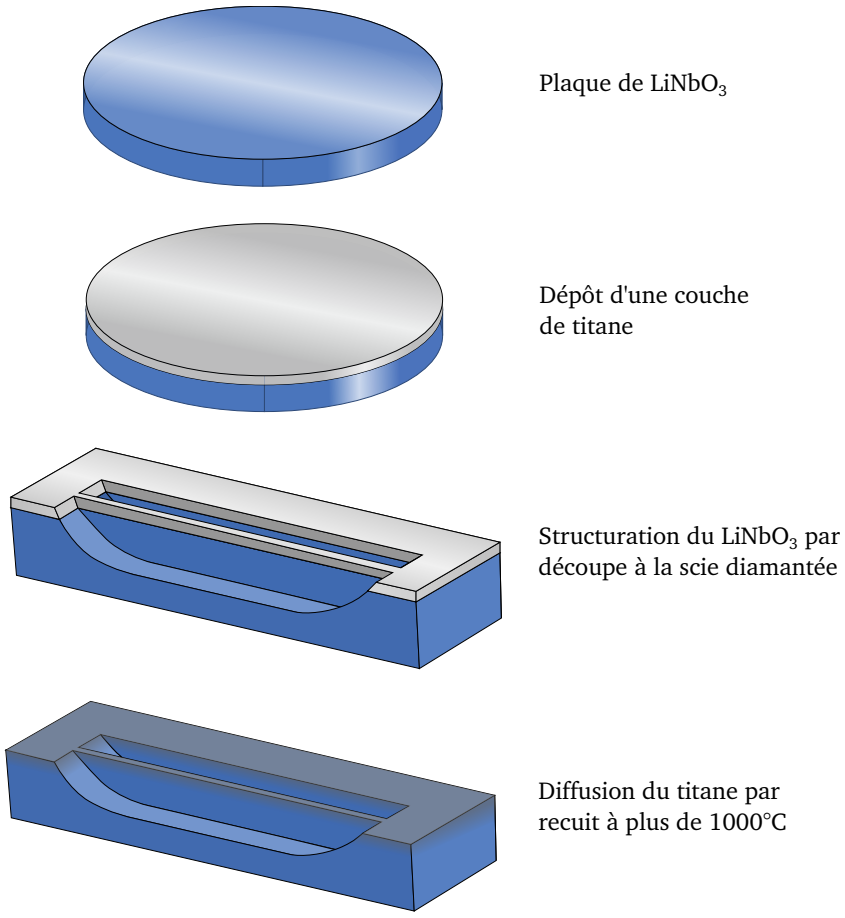


FIGURE 4.13 – Résumé du procédé de fabrication pour un guide optique avec coupleur de mode

simulation montre enfin que les pertes de couplage pour une structure présentant un coupleur de mode réalisé à la scie diminuent avec le rayon de courbure de la lame et donc avec la longueur du coupleur. Les simulations étant particulièrement chronophages, celles-ci ont été limitées à des valeurs de rayon de lame de 5 mm. Les résultats de ces simulations sont donnés dans le tableau 4.1. D'après ces simulations, un coupleur de mode réalisé avec une lame de diamètre 5 mm di-

Type de guide	Rayon de courbure (µm)	Pertes de couplage (dB)	Section du guide (µm)
Guide par diffusion de titane	-	1,37	15
Ruban simple	-	2,29	7,2
B-ridge	1	2,44	7,2
	3	2,01	7,2
	5	1,74	7,2

Tableau 4.1 – Tableau récapitulatif des résultats de simulations montrant l'efficacité des coupleurs de modes réalisés à la scie

minuerait les pertes de couplage de 0,55 dB tout en assurant le confinement du mode au sein du ruban. L'objectif visé par nos structures est donc de réduire les pertes de couplage d'au moins 0,55 dB par face.

Réalisations et résultats

Afin de valider le principe de fonctionnement des coupleurs de modes, des structures de type *B-ridges* présentant une diffusion de titane en surface on été réalisées. Des structures de ce type ont été fabriquées avec différentes profondeurs et largeurs de guide, par soucis de clarté, nous présenterons ici uniquement les résultats représentatifs. Pour qualifier le fonctionnement d'un coupleur de modes optiques, il est nécessaire de comparer la section du mode en entrée du coupleur et au sein du guide ruban. Pour cela, deux rubans de même largeur ont été réalisés, l'un avec un coupleur de mode (*B-ridge*) et l'autre sans (ruban simple). La lumière est injectée via une fibre optique SMF-28 (mode optique de diamètre 10,5 µm à 1550 nm [154]) puis elle est récupérée via un objectif de microscope (×20) après avoir traversé la structure. Le mode de sortie est visualisé grâce à une caméra infrarouge et permet de constater la différence entre les modes en sortie de structures avec et sans coupleur, comme l'illustre la figure 4.14.

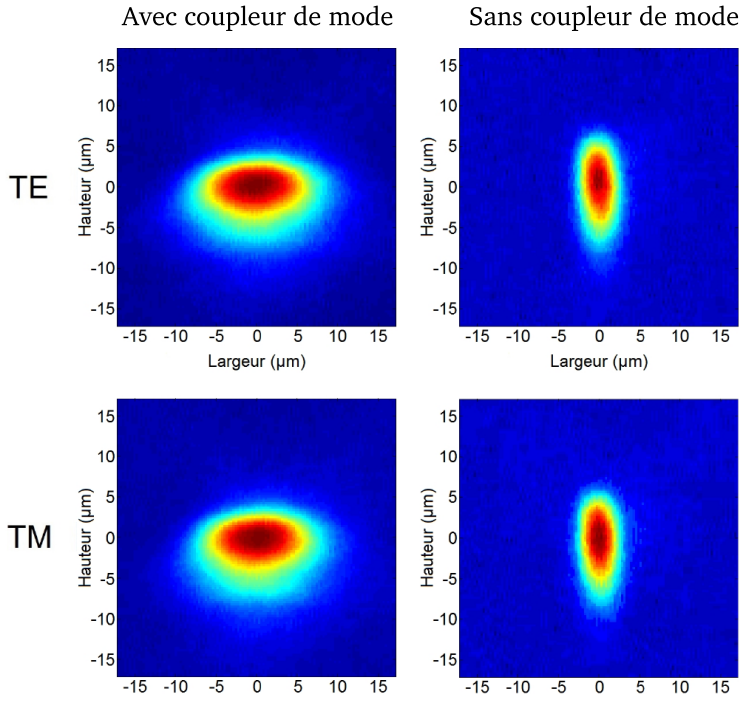


FIGURE 4.14 – Observation des modes en sortie des structures avec et sans coupleur

L'intégrale de recouvrement permet de calculer les pertes de couplage entre la fibre et le coupleur (ou le guide), ce qui permet de quantifier son efficacité. Les pertes de couplage d'un guide témoin s'élèvent à 2,4 dB par face. Celles d'une structure possédant un coupleur de mode réalisé par découpe à la scie sont réduites à 0,8 dB par face. L'efficacité de ce type de structure est donc avéré. Le tableau 4.2 présente les différentes contribution de pertes au sein du coupleur de mode.

Les études préliminaires ont montré que la forme du coupleur de mode réalisé par sciage influence son efficacité. Bien que le diamètre des lames soit restreint à une plage de 52 mm à 56 mm, il est toutefois possible de modifier la géométrie du coupleur en effectuant une variation de profondeur de découpe. Les pentes alors formées par l'empreinte de la scie sont plus ou moins abruptes. Ainsi la longueur de transition est maîtrisée et peut être modifiée suivant l'utilisation de la structure. Afin de calculer les dimensions de coupleur atteignables avec cette méthode de fabrication, il est nécessaire de quantifier la longueur et la profondeur utile du coupleur de mode, c'est à dire celles pour lesquelles se produit une variation de la section du mode. Cet expérience a été menée

Polarisation	Ruban muni de coupleurs de modes			Ruban standard
	Pertes de propagation ($dB \cdot cm^{-1}$)	Pertes de couplage (dB)	Pertes totales par coupleur (dB)	Pertes de couplage (dB)
TE	0,15	0,80	$0,02 + 0,8 = 0,82$	2,4
TM	0,18	0,80	$0,02 + 0,8 = 0,82$	2,4

Tableau 4.2 – Tableau récapitulatif des pertes liées au coupleur de modes

avec une structure présentant un coupleur de mode qui a été découpé à différentes abscisses pour y visualiser le mode. La taille des mode est caractérisée pour chaque abscisse de mesure et reportée sur la figure 4.15.

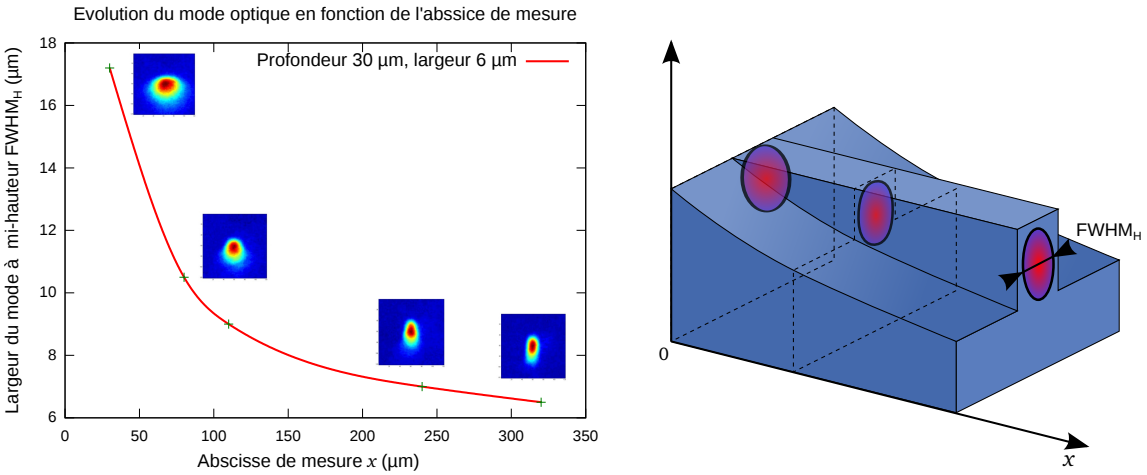


FIGURE 4.15 – Évolution de la largeur du mode optique en fonction de l'abscisse de mesure

On en déduit ainsi la longueur utile du coupleur de mode (variation de géométrie du mode) environ égale à 350 µm, ce qui correspond (en utilisant la formule 2.1) à une profondeur de 12 µm. Ainsi en faisant varier la profondeur de coupe, la longueur utile du coupleur de mode peut varier de 400 µm à 40 µm. Cette méthode de fabrication présente une modularité qui permet de choisir la longueur de coupleur de mode sur un ordre de grandeur.

4.3.4/ CONCLUSION SUR LES COUPLEURS DE MODE RÉALISÉS À LA SCIE

Cette section met en avant la réalisation de structures innovantes permettant de coupler une fibre optique avec un guide de type ruban à hauts facteurs de forme. Nous avons été les premiers à proposer cette approche au mieux de notre connaissance et par conséquent nous avons envisagé une demande de dépôt de brevet [137]. La caractérisation optique de guides rubans avec coupleurs de mode a montré l'efficacité de ce dernier en adaptant la dimension du mode optique, sans dégrader la propagation, donnant lieu à des pertes d'insertion comparables à celles des guides rubans simples. De plus, la longueur du coupleur de mode peut être modifiée sur une large plage permettant différents types d'adaptations. Il est ainsi envisageable de réaliser des coupleurs de modes pour différentes fibres optiques et pour différentes largeurs de ruban. Enfin, ce type de structure ne nécessite aucune étape de photolithographie, lui conférant ainsi une certaine simplicité de réalisa-

tion. Les coupleurs de modes réalisés à la scie ont montré leur capacité à adapter un mode optique à des dimensions inférieures à la dizaine de micromètres. Les dispositifs présentés jusqu'à présent montrent un fort confinement latéral, mais un confinement vertical faible. Les développements liés à la découpe à la scie (voir chapitre 2) ont montré qu'il est possible d'amincir localement un matériau avec une grande précision, permettant de confiner la lumière dans des volumes plus faibles encore, comme le montre la section suivante.

4.4/ Guides à forts confinements par amincissement local

Le développement de structures *B-ridges* a permis la réalisation de guides adaptés à l'injection de lumière par fibre optique et tirant parti des avantages de structures rubans en termes de pertes d'insertion et de confinement. Cette méthode unique de réalisation par découpe à la scie de précision permet d'explorer des géométries originales, comme nous l'avons montré au chapitre 2. En effet, l'optimisation du confinement de la lumière au sein du guide permet par exemple de réduire les tensions de commandes nécessaires en augmentant les interactions électro-optiques pour obtenir les fonctions de modulateurs ou de filtres souhaitées [40] (voir section 4.2.1). Nous nous sommes donc orientés dans cette voie en combinant les méthodes d'amincissement et les structures évoquées au chapitre 2. Cette section présente les dispositifs réalisés selon cette approche.

4.4.1/ Membranes suspendues

Les guides réalisés par diffusion de titane présentent un gradient d'indice optique dans ses dimensions latérales et verticales. Un saut d'indice vertical permet de confiner le mode dans un volume plus faible ; pour cela, un amincissement local est réalisé sous un guide à gradient d'indice. Les structures nécessitant le minimum d'étapes technologiques et permettant la fonction de confinement vertical désirée sont les membrane suspendues. Ces structures présentent un amincissement local progressif réalisé par la descente de la lame dans le matériau massif en mode «couperet». En réalisant cet amincissement en regard du guide à gradient d'indice, ce dernier présente alors un saut d'indice vertical. L'épaisseur de la membrane détermine le confinement du mode optique.

Le procédé de fabrication débute par la réalisation de motifs en titane par procédé photolithographique sur une plaque de $LiNbO_3$. Les motifs représentent des lignes de plusieurs centimètres de longueur pour une largeur d'environ 6 µm. Les pistes de titane ainsi déposées diffusent ensuite dans le $LiNbO_3$ grâce à un recuit à très haute température (plus de 1000°C). Cette diffusion permet de créer un guide optique à la surface de la structure. La plaque est ensuite retournée lors de l'étape de découpe et un amincissement local en face arrière est réalisé en regard du ruban de titane diffusé, comme le présente la figure 4.16. L'amincissement local à l'endroit le plus fin peut atteindre 4,5 µm. Un guide présentant une telle membrane a été réalisé selon ce procédé. Les résultats de sa caractérisation sont reportés ci-après

Les structures sont caractérisées en visualisant la section des modes optiques qui peuvent s'y propager grâce à une caméra infrarouge et un objectif de microscope ×20 (montage présenté en figure 4.4). Grâce à la transition de l'amincissement (et donc à la modification de la distribution d'énergie) réalisé par le profil de la lame, les modes optiques visualisés en sortie sont similaires à ceux observés sur des guides classiques à diffusion de titane (sans amincissement). La figure

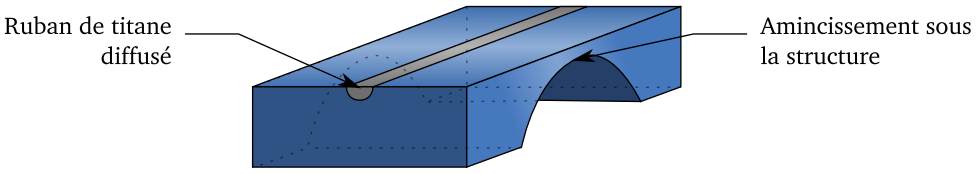


FIGURE 4.16 – Schéma d'une structure en pont suspendu

4.17 présente les résultats obtenus pour la caractérisation des guides localement amincis. Les modes sont mesurés horizontalement ($FWHM_H$ – Full Width at Half Maximum (FWHM) –) et verticalement ($FWHM_V$) pour les deux polarisation TE ($FWHM_{TE}$) et TM ($FWHM_{TM}$). Pour le dispositif testé, on obtient $FWHM_{HTE} = 4{,}5\,\mu m$, $FWHM_{VTE} = 3{,}4\,\mu m$ et $FWHM_{HTM} = 4{,}7\,\mu m$, $FWHM_{VTM} = 3{,}8\,\mu m$. Ces valeurs sont équivalentes à celles obtenues pour un guide témoin – dont les résultats de caractérisation ne sont pas présentés ici – sans amincissement, réalisé et caractérisé dans les mêmes conditions que la structure présentée ici.

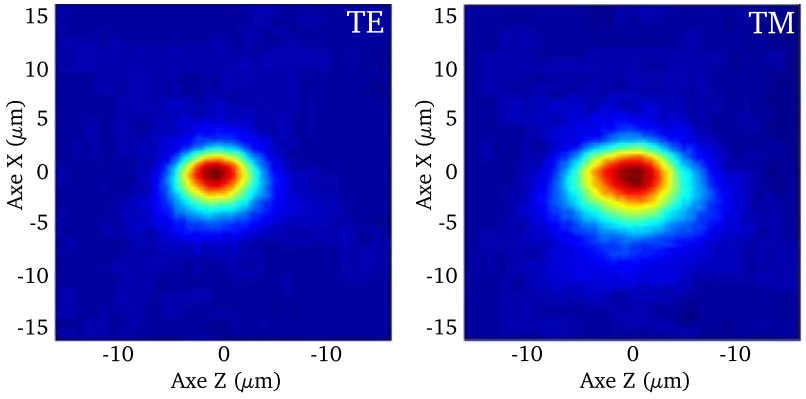


FIGURE 4.17 – Visualisation à la caméra infrarouge des modes guidés au sein d'un guide à diffusion de titane aminci localement pour les deux polarisation TE et TM.

Les pertes mesurées s'élèvent à $0{,}27\,dB \cdot cm^{-1}$ pour la polarisation TM et à $1{,}25\,dB \cdot cm^{-1}$ pour la polarisation TE. Le guide standard de référence présente quant à lui des pertes de $0{,}07\,dB \cdot cm^{-1}$ pour la polarisation TE et $0{,}13\,dB \cdot cm^{-1}$ pour la polarisation TM. Cette comparaison permet de quantifier les pertes liées à l'amincissement local du guide. L'augmentation significative des pertes de propagation (de $0{,}19\,dB \cdot cm^{-1}$ pour la polarisation TM et de $1{,}12\,dB \cdot cm^{-1}$ pour la polarisation TE) est attribuée à l'amincissement local de la structure. En effet, l'amincissement induit une augmentation de la densité de puissance à l'interface air/$LiNbO_3$, ce qui augmente les pertes par diffusion liées à la rugosité de la surface amincie [150]. Une des voies envisagées pour réduire ces pertes consiste à réaliser la diffusion de titane après l'amincissement. Le recuit de diffusion à plus de 1000 °C aurait alors un effet lissant sur l'empreinte laissée par la lame dans le matériau, permettant ainsi de réduire la rugosité et donc de diminuer les pertes par diffusion induites par l'amincissement local.

La caractérisation de la structure montre qu'il est possible de réaliser une membrane d'épaisseur 4,5 µm directement sur un guide à diffusion de titane, sans avoir recours au report de puces sur un substrat. Cette configuration présente un avantage intéressant, puisqu'elle permet de conserver une surface plane qu'il est possible de fonctionnaliser avec des électrodes pour réaliser un modulateur électro-optique par exemple. Le fait de conserver une surface libre et intacte permet de réaliser une structuration par FIB, puisque l'accès à la surface à structurer est immédiat contrairement à

d'autres géométries présentées dans les sections suivantes. Ainsi, ce type de dispositif a permis de réaliser des réseaux de Bragg [1], comme le montre la figure 4.19 pour la réalisation de filtres et de modulateurs. Ces structures présentent l'intérêt de fortement confiner la lumière verticalement grâce à l'amincissement local, l'empêchant ainsi de fuir dans le substrat, comme c'est le cas avec les structures non amincies pour lesquelles on assiste à une diffusion de la lumière hors du guide causé par l'angle des lames du réseau de Bragg (illustration de ce phénomène figure 4.18).

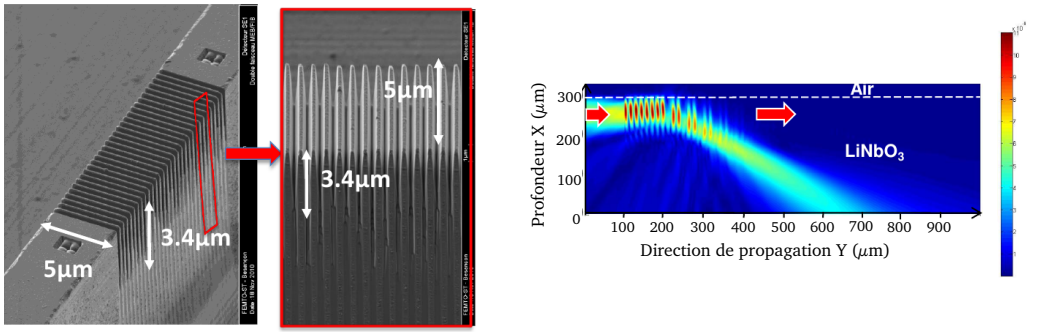


FIGURE 4.18 – Image MEB d'un réseau de Bragg réalisé sur un ruban découpé à la scie et effet de l'angle des lames sur le faisceau lumineux

Une étude théorique menée par C. Guyot au sein de l'institut FEMTO-ST montre que la verticalité des flancs des lames du réseau a un impact non négligeable sur l'efficacité du réflecteur de Bragg. Une verticalité non nulle dévie le faisceau optique et diminue l'efficacité de la réflexion du réseau, comme l'illustre l'image de la figure 4.18. Contrairement aux réseaux de Bragg réalisés sur substrats massifs où les verticalités des flancs sont d'environ 82° [173], celui réalisé sur une membrane présente des flancs particulièrement verticaux (défaut de verticalité inférieur à 1°). Ce phénomène apparaît grâce au caractère débouchant des trous réalisés au FIB qui permet une évacuation de la matière contrairement aux réseau de Bragg classiques présentant des trous borgnes où la matière se dépose au fond et sur les flancs des trous. En améliorant la verticalité du réseau, cette méthode de fabrication permet une augmentation de la réflexion du dispositif. Le réseau de Bragg réalisé ici ne permet pas de confirmer ce gain – uniquement démontré par simulation (cf. travaux de thèse de C. Guyot) – du fait de son pas et de son rapport cyclique, alors dimensionnés (à l'aide d'un modèle 2D) pour des verticalités proches de 4°. Toutefois, cette méthode développée durant le projet présente des perspectives intéressantes en conservant sa simplicité de fabrication.

L'amincissement local des structures présentées ici est limité aux alentours de 5 µm (±1 µm). Pour améliorer le confinement à des valeurs proches du micromètre carré, le recours aux méthodes de report de plaques s'avère nécessaire. De telles structures sont caractérisées dans les paragraphes suivants.

4.4.2/ *B-ridges* AMINCIS

L'objectif des structures de type *B-ridges* amincis vise à confiner la lumière de la même manière que les *B-ridge* à hauts facteurs de forme en rajoutant un saut d'indice pour le confinement vertical, à la place du gradient d'indice réalisé par diffusion de titane décrit précédemment. Pour cela, une plaque de $LiNbO_3$ est reportée sur un substrat massif par l'intermédiaire d'une couche métallique ou époxy (*Vitralit*). Un *B-ridge* est alors usiné dans le $LiNbO_3$ puis aminci sur toute

1. Caractérisés dans les travaux de Clément Guyot dans le cadre du projet ANR MatEtPro CHARADES

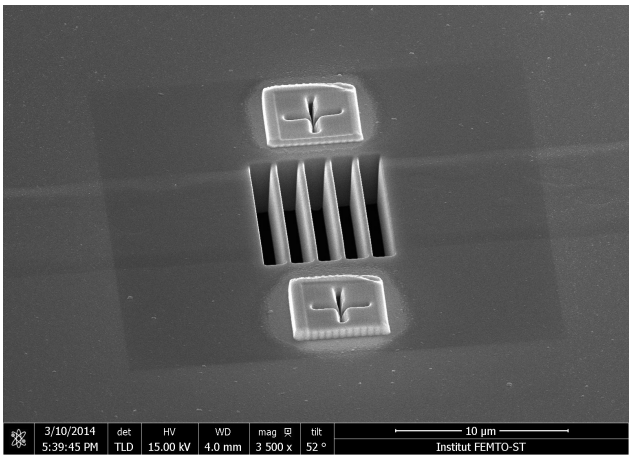


FIGURE 4.19 – Image MEB d'un réseau de Bragg réalisé sur un ruban de titane diffusé dans du $LiNbO_3$ et aminci à la scie en face arrière. Le réseau présente une verticalité proche de 89° grâce au caractère débouchant des trous réalisé au FIB.

sa longueur. Les étapes d'amincissement et de découpe du *B-ridge* peuvent être interverties, les résultat obtenus sont sensiblement identiques. Le schéma de la figure 4.20 présente la géométrie d'une telle structure.

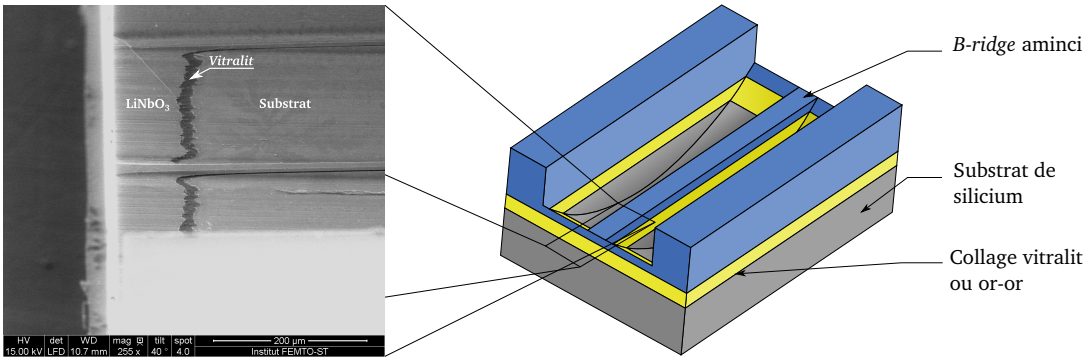


FIGURE 4.20 – Schéma présentant une structure de *B-ridge* sur une membrane réalisée à la scie

Collage or-or

La méthode de report par couche d'or intermédiaire est présentée dans le chapitre 2. Grâce à sa tenue remarquable à la découpe, elle permet de réaliser des structures d'une section de $2{\times}6\,\mu m^2$. La précision et la régularité de l'amincissement sont données par le parallélisme des plaques utilisées, ce qui permet d'obtenir un amincissement de plusieurs millimètres de longueur avec des variations d'épaisseur de seulement quelques centaines de nanomètres. Le *B-ridge* est aminci sur toute sa longueur (5 mm à une épaisseur de 2 µm, pour une largeur de 6 µm).

La caractérisation de ce dispositif montre que seule la polarisation TE est guidée. La polarisation TM est entièrement absorbée par l'interface d'or située sous le $LiNbO_3$. L'absorption du mode optique par l'or est liée à son coefficient d'extinction (partie imaginaire de l'indice de réfraction) qui représente la perte d'énergie d'un rayonnement électromagnétique traversant un matériau. Dans le cas de l'or, ce coefficient est égal à 9,81 à 1550 nm, soit trois ordres de grandeurs supérieurs à

celui du $LiNbO_3$. La section du guidé est présentée en figure 4.21. Une couche (par exemple de SiO_2) intermédiaire d'indice adapté située entre le $LiNbO_3$ et la couche d'or permettrait d'améliorer le guidage du dispositif. Cette configuration représente une des pistes les plus prometteuses pour les réalisations futures de dispositifs optiques guidés puisque les structures bénéficient de la qualité des réalisations sur couches d'or (cf. chapitre 2) et du confinement apporté par une couche intermédiaire et un amincissement.

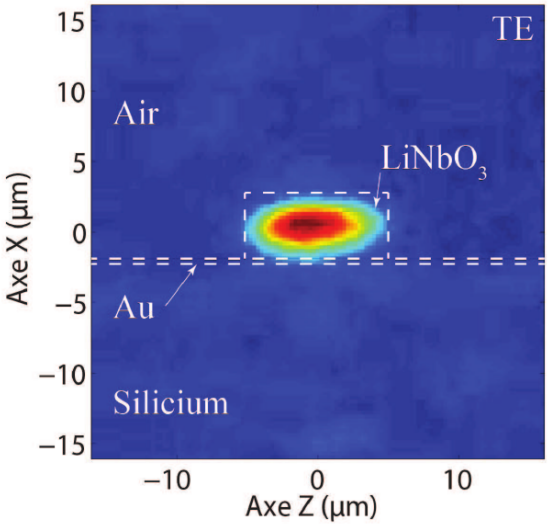


FIGURE 4.21 – Visualisation à la caméra infrarouge de la section du mode de polarisation TE se propageant dans un guide de type *B-ridge* aminci

Collage *epoxy*

Le collage à l'aide de couches d'époxy de type *vitralit* permet de réaliser des structures de sections plus importantes qu'avec un collage métallique, de l'ordre de $6{\times}7\,\mu m^2$. Cependant, cette méthode permet de coller des puces de dimensions variables entre elles, tandis que le collage métallique nécessite l'utilisation de plaques de diamètre 76 mm ou 100 mm. Cette flexibilité facilite le développement de cette méthode mais peut donner lieu à des défauts de parallélisme entre la puce et le substrat, du fait de l'inhomogénéité possible de répartition de la colle sur les surfaces. L'image 4.22 montre une structure *B-ridge* avec membrane réalisée à la scie. Une puce de $LiNbO_3$ dont la surface a subit une diffusion de titane est reportée sur du $LiNbO_3$ vierge via une couche de *vitralit*. Une structure *B-ridge* y est ensuite réalisée puis le ruban est aminci sur toute sa longueur. Comme décrit au chapitre 2, la largeur atteignable avec un tel collage se situe autour de 5 µm (dépendant de l'amincissement). La structure caractérisée ici présente une largeur de 8,3 µm pour une épaisseur de $LiNbO_3$ de 6 µm et une longueur de 5 mm. L'image 4.22 montre la caractérisation dimensionnelle de la structure au microscope à balayage électronique. La caractérisation optique des structures donnée en figure 4.23 permet de vérifier que le confinement vertical est plus marqué que le confinement horizontal. Les valeurs relevées pour les largeurs de section du mode sont $FWHM_{HTE} = 17\,\mu m$, $FWHM_{VTE} = 4{,}79\,\mu m$, $FWHM_{HTM} = 10{,}37\,\mu m$, $FWHM_{VTM} = 4{,}25\,\mu m$. Les largeurs à mi-hauteur des modes sont plus importantes que celles du guide pour TE et TM car la section réalisée par le *B-ridge* s'élargit à son extrémité. Les mesures de sections des modes n'ont pas été effectuées dans la partie la plus fine du dispositif à cause de sa fragilité qui empêche

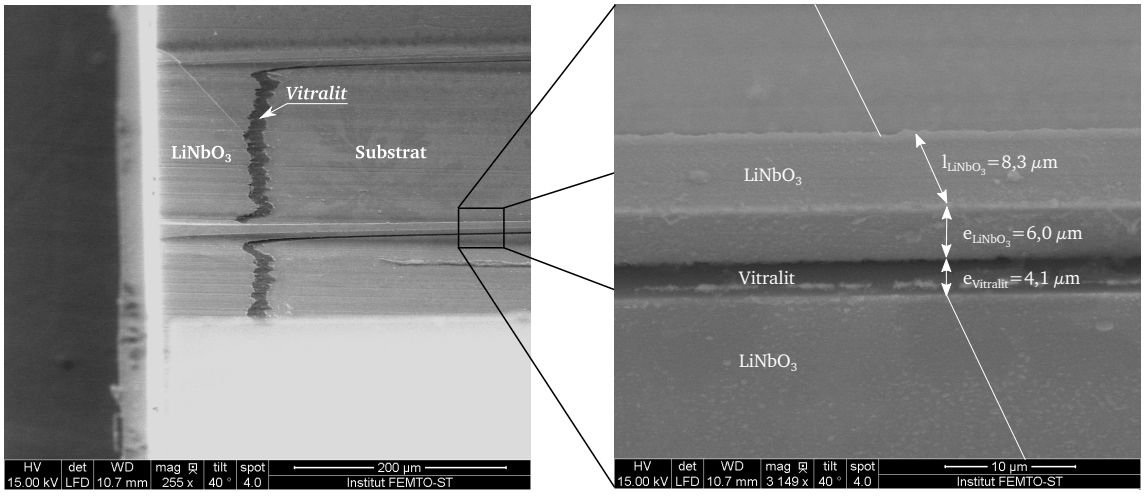


FIGURE 4.22 – Image MEB d'un *B-ridge* aminci vu de dessus

toute découpe transverse. Cependant, les calculs numériques nous permettent d'estimer que la largeur du mode décroît le long de l'adaptateur de mode, comme pour une structure non amincie. La caractérisation de cette structure fait apparaître le caractère multimode du guide lié à sa largeur trop importante pour permettre un guidage monomode (caractéristique qui serait obtenue pour une section proche du micromètre carrée).

Les pertes de propagation mesurées pour ce guide, $\alpha_{TM} = 2{,}823\,\mathrm{dB \cdot cm^{-1}}$ et $\alpha_{TE} = 3{,}375\,\mathrm{dB \cdot cm^{-1}}$, s'avèrent bien supérieures aux pertes de guides classiques de l'ordre du dixième de décibel par centimètre. La majeure partie de ces pertes est liée à la rugosité de 6 nm RMS

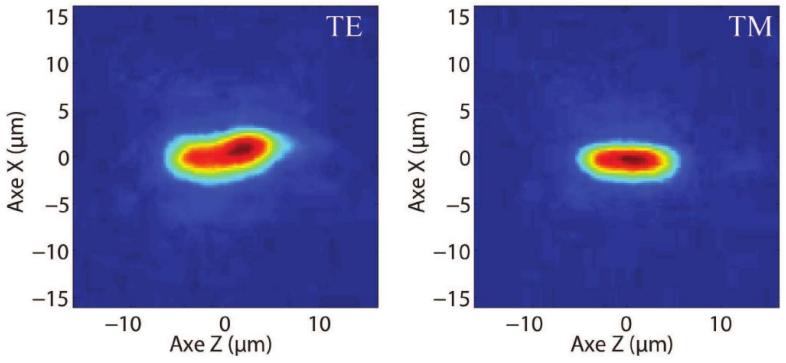


FIGURE 4.23 – Section des modes optiques guidés au sein d'un *B-ridge* aminci sur *vitralit* pour les polarisations TE et TM

mesurée à la surface de la structure amincie. De plus, l'amincissement étant réalisé sur toute la longueur de la structure, la rugosité engendre des pertes par diffusion sur une longueur de 5 mm, à la différence d'amincissements ponctuels comme dans le cas des membranes suspendues (cf. section 4.4.1). Du fait de la présence de la *Vitralit*, un recuit à très haute température (proche de 1000 °C) n'est pas envisageable pour lisser les surfaces du dispositif.

Ces structures ne permettent pas d'améliorer le confinement d'un guide classique compte tenue des largeurs minimales atteignables, supérieures à 5 µm pour des amincissements inférieurs à 10 µm. Ces premiers amincissements ont cependant montré notre maîtrise de ce mode d'usinage à la scie de précision et la faisabilité de telles structures.

4.4.3/ Rubans simples localement amincis

Les structures de type ruban simples à hauts facteurs de forme montrent des résultats intéressants en termes de pertes d'insertion et de confinement. Nous nous sommes donc intéressés à celles-ci pour tester les caractéristiques fonctionnelles de guides suspendus. L'objectif est d'obtenir une zone au confinement proche du micromètre carré pour exalter les interactions électro-optiques. Pour parvenir à une telle structure, un ruban simple est aminci en face face arrière du dispositif (cf. chapitre 2, section 2.3.5). Le procédé de fabrication de ces structures est présenté au chapitre 2 et rappelé en figure 4.24. Une première étape de diffusion de titane à la surface du dispositif est nécessaire avant la réalisation des structures afin de guider le mode optique sur la crête du ruban. Un guide ruban simple est ensuite réalisé sur le substrat, puis la structure est reportée sur un superstrat via un collage époxy. L'intérêt de ce collage réside dans la fluidité de la colle qui remplie les tranchées réalisées à la scie, maintenant ainsi le guide latéralement et verticalement. Ce type de procédé a été développé pour palier l'impossibilité de réaliser des membranes de moins de 5 µm sur des substrats non-reportés. Comme il a été développé dans le chapitre 2, la déformation structurelle du film adhésif sur lequel sont collés les dispositifs à découper est trop importante pour maintenir des membranes. Ainsi, la présence du superstrat permet de réduire la déformation de la membrane lors de sa fabrication, et donc de pouvoir accéder à des épaisseurs de membranes inférieures à 5 µm.

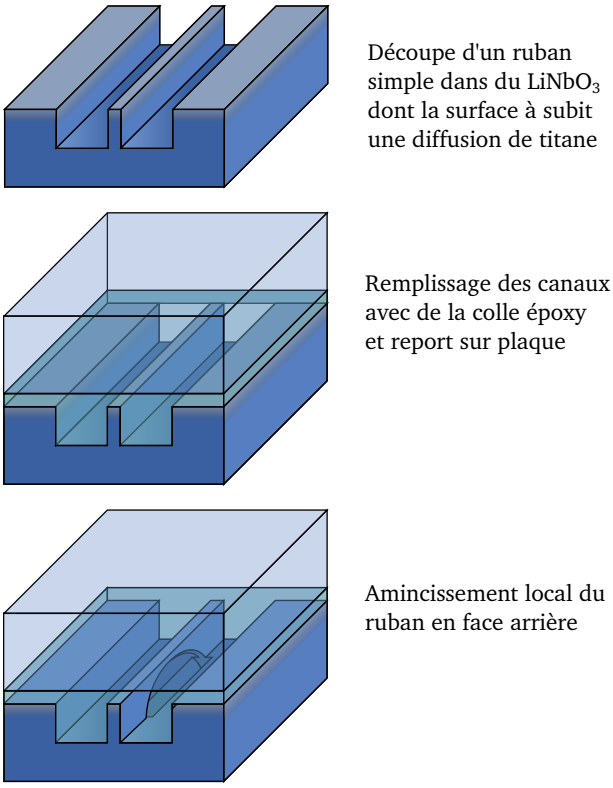


Figure 4.24 – Schéma illustrant le procédé de fabrication des structures rubans amincies localement en face arrière

Cette architecture de dispositif présente plusieurs avantages qui permettent d'obtenir des structures robustes et fonctionnelles. Ces structures bénéficient de conditions de fabrication particulièrement favorables, puisque les rubans sont dans un premier temps découpés sur des profondeurs

de 30 µm à 50 µm sur une plaque de $LiNbO_3$ ayant subi une étape de diffusion de titane. Ces conditions de découpe de ruban simple permettent d'atteindre les dimensions énoncées au chapitre 2 (largeur minimale reproductible de 2 µm) et permettent de découper des structures présentant des modes dont la section atteint $6 \times 6\,\mu m^2$ (cf. section 4.2) voire moins. Les rubans réalisés mesurent entre 1 µm et 5 µm de largeur pour une profondeur de 30 µm.

Après avoir réalisé une puce contenant ces structures, les canaux formés par le passage de la scie sont remplis avec de la colle, qui recouvre également les structures rubans. Une puce de même dimension est reportée à la surface des structures, permettant l'étalement de la colle et conférant une certaine robustesse à l'ensemble. Cette étape est particulièrement délicate compte tenu des dimensions de puces ($1\times1{,}5\ cm^2$) qui peut engendrer des variations de parallélisme entre les deux faces en regard séparées par la colle. Les structures amincies sur toute leur longueur avec ce procédé souffrent d'une variation d'épaisseur qui modifie l'indice effectif du mode et dégrade les résultats (cf. chapitre 5). Ce défaut de parallélisme n'est cependant pas limitant pour la réalisation de structures à amincissement local, sur lesquelles le calibrage de la profondeur peut être réalisé à proximité du point de descente de la lame en mode couperet.

L'étape d'amincissement se compose de deux parties. La première consiste en un calibrage de la profondeur à proximité de la structure à amincir et permettant le contrôle de la profondeur de sciage avec une précision de l'ordre de 100 nm, la maîtrise de la profondeur étant quant à elle limité à 1 µm (cf. chapitre 2). La seconde consiste en l'amincissement de la structure, qui présente alors un profil d'épaisseur ayant la géométrie de la lame. L'amincissement est réalisé par une descente de lame en mode couperet qui permet d'obtenir une précision en terme de profondeur nettement supérieure aux autres configurations de découpe. Un amincissement local (sans avance le long de l'axe X) permet d'obtenir des structures d'une section minimale proche de $1\times2\,\mu m^2$. Cette géométrie confère une certaine robustesse aux structures, permettant d'envisager leur utilisation au sein de systèmes hôtes et facilitant leur manipulation. La visualisation des sections des modes optiques mesurées sur ces structures est donnée en figure 4.25 et montre les polarisations TM pour trois structures fabriquées selon l'approche décrite ci-dessus.

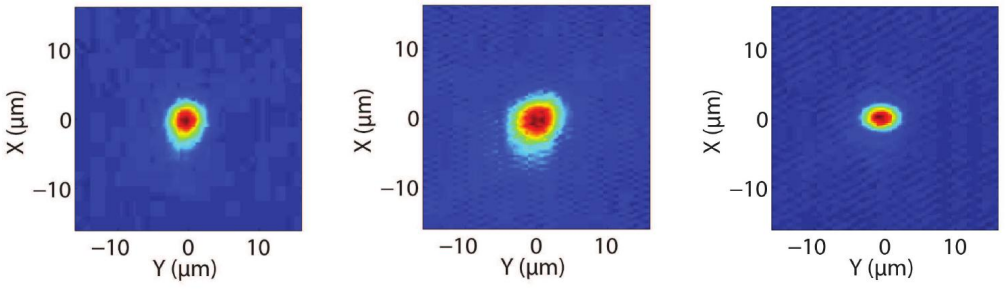


FIGURE 4.25 – Visualisation des sections des modes de polarisation TM pour des rubans de largeur 6 µm. De gauche à droite : ruban témoin non aminci, ruban aminci en son centre à 1,2 µm et ruban aminci à 4,2 µm à son extrémité.

Les rubans présentent tous trois une largeur de 6 µm. Le ruban témoin non aminci est caractérisé sur la figure 4.25 (image de gauche) et présente les dimensions suivantes : $FWHM_{HTM} = 5{,}3\,\mu m \pm 0{,}5\,\mu m$, $FWHM_{VTM} = 5{,}8\,\mu m \pm 0{,}5\,\mu m$. Les pertes de propagation dans cette structure sont de $\alpha_{TE} = 0{,}59\,dB \cdot cm^{-1}$ et $\alpha_{TM} = 0{,}50\,dB \cdot cm^{-1}$. Le second ruban (image au centre) est aminci à 1,2 µm en son centre, les mesures montrent que $FWHM_{HTM} = FWHM_{VTM} = 6{,}0\,\mu m \pm 0{,}5\,\mu m$ en sortie de guide et donc après la zone de transition, le mode est similaire à celui du ruban

témoin, aux incertitudes de mesure près. Cette variation de la dimension du mode peut s'expliquer par une différence de quelques centaines de nanomètres dans la largeur des structures, liée à la répétabilité de la machine de découpe. De plus, le guide étant entouré de *vitralit* pour trois de ses faces, le contraste d'indice est plus faible qu'avec l'air, ce qui diminue le confinement. Les pertes mesurées pour ce dispositif sont de $\alpha_{TE} = 0{,}8\,\mathrm{dB}\cdot\mathrm{cm}^{-1} \pm 0{,}2\,\mathrm{dB}\cdot\mathrm{cm}^{-1}$ et $\alpha_{TM} = 1{,}0\,\mathrm{dB}\cdot\mathrm{cm}^{-1} \pm 0{,}2\,\mathrm{dB}\cdot\mathrm{cm}^{-1}$. La figure de droite montre la caractérisation d'un ruban aminci à son extrémité. L'amincissement étant plus délicat en cet endroit de la structure, cette dernière est amincie à 4,2 µm. Ce guide sert à confirmer le bon confinement du mode lors de l'amincissement, ainsi nous obtenons pour ce mode $FWHM_{HTM} = 5\,\mu\mathrm{m} \pm 0{,}5\,\mu\mathrm{m}$ et $FWHM_{VTM} = 3{,}4\,\mu\mathrm{m} \pm 0{,}5\,\mu\mathrm{m}$. Le confinement est donc amélioré au niveau de l'amincissement, tout en conservant le caractère monomode du guide. Ces caractérisations montrent qu'un tel amincissement engendre des pertes de propagation qui s'avèrent légèrement supérieures à $1\,\mathrm{dB}\cdot\mathrm{cm}^{-1}$. Cette méthode de fabrication permet d'envisager la réalisation de guides amincis pour ensuite y effectuer une modulation électro-optique. Cependant, le point d'amincissement maximal de la structure se trouve à une profondeur de près de 500 µm, configuration défavorable à la structuration par faisceau d'ion focalisé. D'un point de vue structurel, la robustesse du dispositif se trouve améliorée par le conditionnement du guide au cœur d'un système massif (cf. figure 4.24). L'intégration de ces dispositifs au sein de systèmes optiques s'en trouvera facilitée. Le couplage fibre-guide de ce type de structure soulève la même problématique que les structures de type rubans simples. Nous nous sommes donc naturellement orientés vers la réalisation de guides de type *B-ridges* amincis localement pour bénéficier de l'adaptation dimensionnelle du mode à l'extrémité de ces guides amincis.

4.4.4/ *B-ridges* LOCALEMENT AMINCIS EN FACE ARRIÈRE

Les *B-ridges* présentés ici, localement amincis en face arrière, possèdent donc un coupleur de mode, à la différence des rubans amincis présentés au paragraphe précédent. Leur fabrication est identique à l'approche présentée au paragraphe 4.4.3, à la différence que la lame ne parcourt pas toute la longueur de la puce afin d'obtenir des structures avec coupleur de modes adaptées à l'injection de lumière par fibre optique. Le point limitant de ce type de structures, qui présente en outre une robustesse avérée, réside dans la structuration de réseaux de Bragg ou de cristaux photoniques. En effet, la structure se trouve à près de 500 µm de la surface, et dans une gorge de quelques centaines de micromètres de largeur. Dans ces conditions de travail, le positionnement du FIB lors de la gravure de différentes structures sur le guide ne sera pas optimale. Seule la réalisation d'une structure en bord de puce permettrait un accès complet et optimal au guide mais diminuerait la robustesse du dispositif. Pour des raisons d'efficacité d'injection, nous avons limité la largeur des structures rubans à 6 µm. Cependant, les *B-ridges* présentent naturellement des coupleurs de modes optiques, il est donc possible de diminuer leur largeur sans dégrader les pertes d'insertion. Les structures sont amincies à la même valeur que leur largeur, pour obtenir une section carrée dans la zone d'amincissement maximal. Ainsi, nous avons pu caractériser des *B-ridges* de largeurs (et d'épaisseurs) 5 µm, 3,1 µm et 2,1 µm. La section la plus fine réalisée, montrée en figure 4.26, présente une largeur de *B-ridge* de 1,26 µm pour une épaisseur de 1 µm. L'épaisseur de la structure n'a pas été mesurée faute de moyens de contrôle non destructifs adaptés. Cette structure présentant les dimensions les plus faibles réalisées effectivement n'a cependant pas pu être caractérisée. La visualisation des modes pour la structure de largeur et épaisseur 5 µm est donnée en figure 4.27, les mesures qui s'y rapportent sont données par le tableau 4.3.

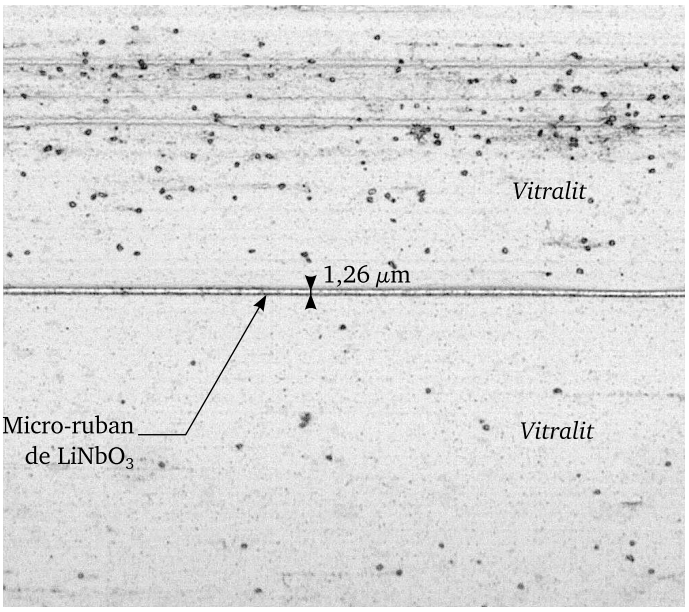


FIGURE 4.26 – Image au microscope optique d'un *B-ridge* aminci en face arrière présentant une largeur de 1,26 µm pour une épaisseur minimale de 1 µm (non contrôlée)

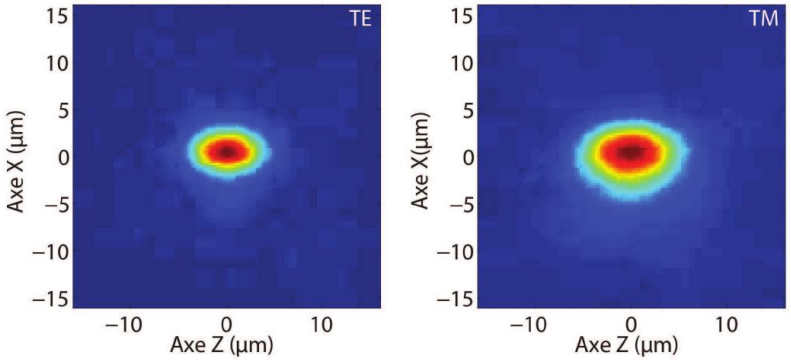


FIGURE 4.27 – Visualisation du mode guidé par une structure de *B-ridge* amincie à 5 µm en face arrière

Le tableau 4.3 présente un récapitulatif des propriétés des modes optiques se propageant dans les différentes structures réalisées. Ainsi, la dimension des modes en sortie de coupleurs n'est que peu modifiée par la largeur et l'épaisseur du guide, comme le montrent les mesures des profils d'intensité. Le coupleur permet donc de restituer le mode optique d'un guide classique en sortie, ce qui favorise de faibles pertes de couplage. Ce résultat était attendu et recherché pour minimiser les pertes de couplage entre une fibre optique et le guide. Les pertes de propagation se trouvent augmentées par rapport à celles des structures rubans amincies en face arrière. Cette augmentation s'explique par la différence de largeur des guides, plus faibles dans le cas de *B-ridges*, ce qui rend le mode plus sensible à la rugosité des surfaces (en augmentant le confinement, la densité de puissance augmente à l'interface ce qui engendre des pertes par diffusion [150]). La mesure des pertes de propagation pour la structure présentant une section de $2\times2\,\mu m^2$ est faussée par la présence d'une fissure dans la structure, d'où des valeurs de pertes particulièrement élevées. Ces caractérisations permettent de constater la quasi indépendance de la largeur des modes par rapport à la valeur de l'amincissement par la comparaison des valeurs de FWHM verticales, ainsi qu'une

Largeur et profondeur du *B-ridge*	5 µm		3,1 µm		2,1 µm	
Polarisation	TE	TM	TE	TM	TE	TM
FWHM horizontale (µm)	5,13	7,05	5,45	7,44	4,07	6,94
FWHM verticale (µm)	3,19	4,46	3,56	5,74	2,99	5,64
Pertes de propagation ($dB \cdot cm^{-1}$)	3,27	1,19	2,24	1,75	27,3	26,55

Tableau 4.3 – Tableau récapitulatif des propriétés des modes optiques dans des *B-ridges* localement amincis en face arrière

dépendance modérée à la largeur de la structure, qui montre tout l'intérêt des adaptateurs de mode. Les pertes de propagation sont quant à elles dégradées par l'augmentation de la rugosité relative liée à l'amincissement à la scie diamantée.

4.4.5/ Synthèse sur le développement de structures amincies

L'amélioration du confinement de modes optiques passe par la réalisation de guides optiques de sections proportionnelles à la section du mode visée. Pour ce faire, nous avons développé la méthode d'amincissement à la scie de précision. Nous obtenons ainsi des structures inédites faisant l'objet de deux brevets [137, 174] en cours de dépôt. Ces brevets portent sur les méthodes de fabrication des coupleurs de modes optiques et d'amincissements locaux par découpe à la scie de précision. Ainsi, nous avons réalisé des structures telles que des membranes suspendues, des *B-ridges* amincis sur toute leur longueur ou encore des rubans et *B-ridge* amincis en face arrière. Chaque structure présente un intérêt spécifique mais les dernières réalisations montrent une robustesse optimale et permettent d'accéder à des sections de modes proches du micromètre carré, tout en conservant une adaptation de mode à des fibres SMF-28 utilisées pour injecter la lumière au sein de guides. De telles épaisseurs permettraient de réaliser des cristaux photoniques par FIB sur toute la profondeur de la structure, maximisant ainsi leurs effets comme nous l'avons évoqué précédemment. La combinaison entre les structures *B-ridges* amincies sur toute leur longueur et celles amincies en face arrière permet d'envisager la réalisation de fils de $LiNbO_3$. Nous avons ainsi réalisé des fils entourés de colle qui présentent une section de 4,5×4,5 μm^2 sur une longueur de 3 mm. Ces fils sont présentés dans le chapitre 5 pour leur utilisation en optique non linéaire.

4.5/ Conclusion sur le chapitre

Les dispositifs réalisés à la scie circulaire de précision présentent des qualités démontrées en matière de rugosité, de pertes de propagation et de confinement des modes optiques. Depuis la réalisation des premières structures à hauts facteurs de forme sur $LiNbO_3$ jusqu'à la réalisation de *B-ridges* amincis, un certain nombre d'évolutions techniques a eu lieu, notamment grâce à l'acquisition d'une machine de découpe plus précise et plus stable. Les premiers guides de type ruban à hauts facteurs de forme ont permis d'établir une référence en termes de pertes de propagation et de dimensions du mode optique. La réalisation de structures de type *B-ridges* a permis l'adaptation entre le mode optique d'une fibre SMF-28 et un guide ruban à hauts facteurs de forme. La méthode de réalisation et les résultats obtenus sur ces dispositifs à adaptation de modes optiques ont permis le dépôt d'une demande de brevet [137]. Connaissant une méthode d'adaptation de mode efficace pour ces structures, les développements se sont portés vers l'amincissement de celles-ci

pour diminuer encore les dimensions du mode optique. Nous avons alors développé la méthode d'amincissement local à la scie, permettant de réduire l'épaisseur des dispositifs à 1 µm, avec un potentiel d'amélioration qui permettra probablement la réalisation de structures d'épaisseurs submicroniques, comme l'ont montré les premiers amincissements à 300 nm (voir figure 2.14). La transition régulière d'épaisseur permet là encore de réaliser une adaptation de mode et de minimiser les pertes d'insertion. Cette méthode d'amincissement et les résultats qui s'y rapportent font l'objet d'une seconde demande de brevet [174].

La réalisation de structures micrométriques pour le confinement bidimensionnel de modes optiques ouvre la voie à la réalisation de dispositifs de génération de seconde harmonique nécessitant à la fois des domaines polarisés périodiquement sur $LiNbO_3$ et un guide optique. Ces structures hybrides utilisant à la fois la possibilité d'inverser la polarisation du $LiNbO_3$ et l'optique font l'objet du chapitre 5. Dans cette optique d'hybridation, les perspectives de réalisation de dispositifs acousto-optiques seront présentées.

5

Structures complexes pour composants hybrides

5.1/ Introduction

Les dispositifs réalisés par découpe à la scie de précision ont montré leur intérêt dans le domaine de l'acoustique et de l'optique avec la réalisation de guides d'onde efficaces et innovants. Les dispositifs acoustiques peuvent exploiter par exemple des domaines ferroélectriques alternés pour générer une onde élastique, tandis que la structuration des dispositifs optiques est utilisée pour confiner la lumière dans des faibles volumes. La combinaison de la ferroélectricité et de l'optique permet l'exploitation d'un phénomène utilisé en optique non linéaire : le quasi-accord de phase [175]. Ce phénomène est utilisé pour réaliser des fonctions telles que le doublage de fréquence ou la somme de fréquences. Le confinement des ondes pour de tels dispositifs est étudié depuis plusieurs années, la découpe de structures à la scie de précision fait partie des méthodes de réalisation émergentes de tels guides [117]. Ce chapitre montre dans un premier temps la faisabilité de dispositifs permettant un doublage de fréquence, en étudiant des guides dont l'intégralité des étapes technologiques est maîtrisée au sein de l'institut FEMTO-ST. Ces guides ont pour vocation d'améliorer l'efficacité de conversion des dispositifs actuels en améliorant les conditions de guidage du mode optique.

Ce type de dispositif utilise l'interaction de la lumière avec les domaines ferroélectriques alternés, mais en excitant électriquement ces mêmes domaines, il est possible d'engendrer une onde élastique au sein du matériau, modifiant a priori les conditions de propagation de l'onde optique. En effet, comme décrit au chapitre 1, l'onde élastique modifie localement les propriétés du matériau de manière à ce que les conditions de propagation de l'onde optique change dynamiquement. La réalisation de tels dispositifs est envisagée comme perspective au développement des dispositifs à hauts facteurs de forme pour moduler par exemple le transfert d'information par signal optique et sera présentée dans la seconde partie de ce chapitre.

5.2/ Génération de second harmonique dans un guide optique

La génération de second harmonique [175] est un phénomène optique non linéaire qui peut être exploité dans les guides à base de $LiNbO_3$ pour le mélange de signaux et donc la transpo-

sition de fréquence. L'onde optique doit traverser un milieu possédant une non-linéarité de second ordre (effet faisant intervenir trois ondes dont les fréquences ω_1, ω_2, ω_3 vérifient la relation $\omega_3 = \omega_1 \pm \omega_2$) avec des intensités suffisantes pour favoriser l'apparition du phénomène de génération de second harmonique. De plus, pour atteindre des efficacités de conversion de fréquence notables il faut maintenir un accord de phase entre l'onde initiale et le second harmonique engendré. Il existe deux méthodes principales pour obtenir cet accord de phase, la première est fondée sur l'utilisation de la biréfringence d'un matériau, l'autre sur l'inversion périodique de domaines ferroélectriques. Ces deux méthodes sont présentées dans cette section. Nous accorderons cependant une importance particulière à la seconde dans la perspective d'utiliser nos barreaux polarisés périodiquement pour ce type d'application.

5.2.1/ État de l'art

La génération de second harmonique ou doublage de fréquence a d'abord été réalisée via des effets non linéaires de cristaux biréfringents en injectant une lumière particulièrement intense dans un guide constitué au sein de tels matériaux. Les matériaux possédant des coefficients non-linéaires suffisamment forts pour doubler la fréquence d'une onde optique sont (entre autres) le $LiIO_3$, le $KNbO_3$ ou encore le $KTiOPO_4$ (KTP). Le principe physique alors employé pour réaliser le doublage de fréquence est décrit par R.W. Boyd [175]. Le mécanisme opératoire correspondant consiste à envoyer une onde optique intense dans le cristal. Les photons incidents se combinent pour générer un photon d'une fréquence et d'une énergie double de la leur. La description théorique de ce phénomène est décrit dans l'ouvrage de R.W. Boyd [175]. Cet effet de non linéarité à été montré pour la première fois par Peter Franken *et al.* [115]. Cette méthode permet cependant de doubler efficacement la fréquence uniquement pour des longueurs d'ondes précises en accord de phase grâce à la biréfringence du matériau. En effet, la condition d'accord de phase par biréfringence s'écrit :

$$n_e(\theta, 2\omega) = n_o(\omega) \tag{5.1}$$

avec ω la pulsation de l'onde pompe, θ l'angle d'incidence de la lumière sur le matériau, n_e l'indice extraordinaire du matériau dans la direction de propagation et n_o l'indice ordinaire du matériau selon la direction de propagation. L'accord de phase par biréfringence se produit pour une configuration pour laquelle les indices ordinaires et extraordinaires sont égaux (cf. équation (5.1)) ce qui limite en général l'accord à des longueurs d'ondes restreintes.

Le doublage de fréquence par quasi accord de phase permet quant à lui de profiter du coefficient de non linéarité du matériau le plus élevé du $LiNbO_3$ (d_{33}) et également d'obtenir l'accord de phase pour une grande gamme de longueur d'onde.

Le doublage de fréquence par quasi accord de phase (QPM) est une méthode très utilisée non seulement pour le doublage de fréquence mais également pour réaliser – entre autres – la fonction d'Oscillateur Paramétrique Optique (OPO). Bien qu'il ait été découvert au même moment que l'accord de phase par biréfringence [176], le QPM fut initialement peu utilisé du fait de l'impossibilité d'orienter la polarisation des matériaux avec des périodes micrométriques. Les premiers travaux portant sur le quasi accord de phase par inversion de domaines périodiques utilisant la photolithographie étaient en effet fondées sur la diffusion d'un dopant ou d'ions à travers un masque [177, 178]. Cette approche ne permettait pas d'inverser le matériau sur des épaisseurs de plus de quelques micromètres. L'essor de la photolithographie a alors permis une banalisation du QPM à partir des années 80 avec les premières inversions de domaines par application d'un champ

électrique sur les matériaux tels que le $LiNbO_3$ et le $LiTaO_3$ [179]. Le quasi accord de phase permet de générer un second harmonique sur une plage de longueurs d'ondes liée essentiellement à la limite technologique de l'inversion de domaine et à la transparence du matériau, contrairement à la génération de second harmonique par biréfringence. Son utilisation est donc rendue plus souple et polyvalente que son alternative historique, d'où son succès pour les applications qui nous intéressent ici.

Comme il est décrit dans le chapitre 1, une onde optique possédant deux fois la fréquence du faisceau pompe est générée lors d'une propagation dans un milieu non linéaire. En se plaçant à des puissances telles que l'on considère qu'il n'y a pas déplétion de la pompe (i.e. la puissance du second harmonique reste négligeable devant celle de la pompe), l'intensité du second harmonique $I(2\omega, l)$, après propagation sur une longueur l d'interaction lumière-matériau polarisé périodiquement, est donnée par la formule de l'équation (5.2) :

$$I(2\omega, l) = \frac{2\omega^2 d_{eff}^2 l^2}{n_{2\omega} n_\omega^2 c^3 \epsilon_0} \left(\frac{sin(\Delta k l/2)}{\Delta k l/2} \right)^2 I^2(\omega) \tag{5.2}$$

avec ω la pulsation du faisceau pompe, d_{eff} le coefficient non linéaire quadratique du matériau, n_ω l'indice de réfraction à la pulsation ω, ϵ_0 la constante de permittivité du vide et Δk le désaccord de phase entre le faisceau pompe et le second harmonique. De plus, $\Delta k = K_2 - 2K_1$ avec :

$$\begin{cases} K_1 = \dfrac{2\pi}{\lambda_\omega} n_{e(\omega)} \\ K_2 = \dfrac{2\pi}{\lambda_{2\omega}} n_{e(2\omega)} \end{cases} \tag{5.3}$$

où K_1 est le nombre d'onde de la pompe et K_2 le nombre d'onde de du second harmonique. L'inversion périodique permet de compenser le désaccord de phase existant, le désaccord de phase s'écrit alors [180] :

$$\Delta k = K_2 - 2K_1 - K \tag{5.4}$$

avec K le vecteur d'onde associé à la périodicité de l'inversion de domaine. Ainsi si l'on choisit la période de l'inversion Λ telles que :

$$K = \frac{2\pi}{\Lambda} = K_2 - 2K_1 \tag{5.5}$$

La conversion sera optimisée en minimisant le désaccord de phase ($\Delta k \to 0$), on déduit donc de la relation précédente la valeur de Λ optimale :

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2(n_{e(\frac{\lambda}{2})} - n_{e(\lambda)})} \tag{5.6}$$

avec λ la longueur d'onde de la pompe et $n_{e\lambda}$ l'indice de réfraction du matériau évalué à la longueur d'onde λ. Les dispositifs de doublage de fréquence sont en général caractérisés par leur efficacité de conversion η_{SHG} (en W^{-1}) [117] tel que :

$$P_{2\omega} = \eta_{SHG} P_\omega^2 \tag{5.7}$$

avec P_ω la puissance du signal à la pulsation ω. On trouve cependant d'autres définition de ce rendement, comme le rendement normalisé η_{norm}, alors exprimé en $W^{-1}m^{-2}$, qui tient compte de la longueur d'interaction l :

$$P_{2\omega} = \eta_{norm} l^2 P_\omega^2 \tag{5.8}$$

Enfin il est utile de donner le rendement η défini comme le rapport de $P_{2\omega}$ sur P_ω ($\eta = \frac{P_{2\omega}}{P_\omega}$), exprimé en %, qui donne la proportion du signal doublé dans un dispositif pour une puissance donnée.

Les efficacités de conversion typiques obtenues vont de quelques pourcents à plus de $100\,\% \cdot \mathrm{W}^{-1}$. Des valeurs record de plus de $3000\,\% \cdot \mathrm{W}^{-1}$ sont annoncées, sous réserve de pouvoir fabriquer un dispositif de 6 cm de longueur [117], ce qui correspond à une efficacité normalisée proche de $100\,\% \cdot \mathrm{W}^{-1} \cdot \mathrm{cm}^{-2}$. En utilisant un cristal de PPLN de 18 mm de longueur, une efficacité de 49 % peut être obtenue grâce à un guide plan réalisé à partir d'un cristal dopé au MgO, en utilisant une puissance du signal pompe de 0,88 W [181].

La conversion de longueur d'ondes peut ainsi avoir lieu dans un cristal massif polarisé périodiquement ou dans un guide d'onde permettant de confiner la lumière sur de grandes longueurs. La combinaison de ces deux approches est rendue possible par notre technologie de sciage. La réalisation de tels guides optiques complexifie le procédé de fabrication des dispositifs, mais permet d'améliorer l'efficacité de conversion, comme le montre la section suivante.

5.2.2/ Intérêt des guides fortement confinés

La génération de second harmonique peut s'effectuer au sein d'un cristal massif polarisé périodiquement, sans y avoir inscrit de guide d'onde. La simplicité de fabrication de ces dispositifs en comparaison de ceux utilisant des guides a permis de montrer leurs capacités de doublage de fréquence sur une plage allant de 325 nm [182] à 5,25 µm [183]. Ces dispositifs sont largement utilisés comme éléments de conversion pour les OPO. Dans le cas d'un dispositif massif dans lequel la lumière est focalisée, la puissance du signal doublé $P_{2\omega}$ augmente linéairement avec sa longueur l comme le montre l'équation (5.9) tirée de [117].

$$P_{2\omega}/P_\omega = \eta_c l P_\omega \tag{5.9}$$

Ceci entre en contradiction avec l'équation 5.2 où l'on peut voir que l'efficacité de conversion est normalement proportionnelle au carré de la longueur d'interaction. Cependant, le résultat donnés par l'équation (5.9) prend en considération la diffraction du faisceau lors de sa propagation. L'équation (5.8) est quant à elle utilisable pour les guides dans lequel la lumière est confinée, le rendement dépend alors du carré de la longueur. Le confinement latéral de la lumière offre donc un effet multiplicatif sur l'efficacité de conversion. De plus, en combinant les équation (5.2) et (5.7), sachant que $I = P/S$ avec S la section du mode guidé, on obtient l'équation (5.10) :

$$\eta_{SHG} = \frac{1}{S} \frac{2\omega^2 d_{eff}^2 l^2}{n_{2\omega} n_\omega^2 c^3 \epsilon_0} sinc^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right) \tag{5.10}$$

Cette équation met en évidence l'augmentation de l'efficacité de conversion inversement proportionnel à la section du mode guidé. En utilisant la formule de l'équation (5.7), Kou *et al.* [120] ont mesuré efficacité de conversion η_{SHG} de $4600\,\% \cdot \mathrm{W}^{-1}$ dans un guide ruban de PPLN de lon-

gueur 50 mm, reporté sur du $LiNbO_3$ massif grâce à une couche de colle époxy et une couche de SiO_2. La section des guides utilisés varie de $4{\times}7\,\mu m^2$ à $4{\times}9\,\mu m^2$, leur usinage est réalisé par gravure en voie humide. Ces résultats montrent l'intérêt de confiner la lumière dans des sections micrométriques pour ces applications. Ainsi, la méthode de fabrication de ce type de dispositif à la scie diamantée apparaît tout à fait adapté puisqu'elle permet la réalisation de guides amincis de quelques micromètres carrés de section minimale.

La méthode de fabrication de ruban à la scie diamantée pour des application de doublage de fréquence a fait l'objet de diverses études dans le domaine de la génération de second harmonique [95, 96, 184]. Les développements effectués sur la découpe de précision à la scie diamantée – avec notamment l'amincissement local de structures – ou le collage par résine présentés dans les chapitres précédents ont permis de diminuer les sections accessibles par cette méthode. Ces développement appliqués à la génération de second harmonique peuvent conduire à un gain d'efficacité de conversion en comparaison aux dispositifs existants. La section suivante montre les réalisations de guides amincis pour des applications de doublage de fréquence.

5.2.3/ Réalisation et caractérisation des structures

Deux types de guides ont été réalisés pour les comparer et définir les technologies les mieux adaptées à leur réalisation :

- La première consiste à amincir une plaque de $LiNbO_3$ sur toute sa surface par CMP après l'avoir reportée sur un substrat massif, puis à y réaliser un guide par sciage. Les largeurs des rubans obtenues sont limitées à une dizaine de micromètres du fait du décollement du $LiNbO_3$.
- La seconde solution consiste à réaliser un amincissement des structures via la scie diamantée comme présenté dans le chapitre 1. Ce type de découpe permet la fabrication de rubans de $LiNbO_3$ de largeur et d'épaisseur 4,5 µm sur une longueur de 2 mm.

5.2.3.1/ Présentation du banc de caractérisation expérimental

Les dispositifs sont caractérisés sur un banc de mesure optique dont les éléments sont schématisés en figure 5.1. Le faisceau pompe réclame plusieurs éléments à combiner pour sa synthèse et peut provenir de deux sources optiques différentes. La première repose sur l'utilisation d'un oscillateur paramétrique optique femtoseconde, l'impulsion engendrée par l'oscillateur dure 200 fs avec un taux de répétition de 80 MHz. Sa plage d'accordabilité en longueur d'onde s'étend de 1000 nm à 1620 nm. La seconde source est une diode laser à cavité externe fonctionnant en régime continu sur une plage de 1520 nm à 1580 nm qui peut être amplifiée à l'aide d'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium. Ces faisceaux sont envoyés sur un objectif de microscope permettant de les focaliser sur la surface d'entrée du guide. La puce contenant le guide est placée sur une platine dont les déplacements selon les trois axes sont réalisées par des vis micrométriques de manière à optimiser l'injection. Un autre objectif est placé en sortie pour visualiser les modes par caméra infrarouge. La sortie de guide peut aussi être dirigée vers un analyseur de spectre pour analyser les longueurs d'ondes en présence. Un puissance-mètre est également utilisé pour les mesures quantitatives de la puissance du faisceau pompe et du faisceau doublé.

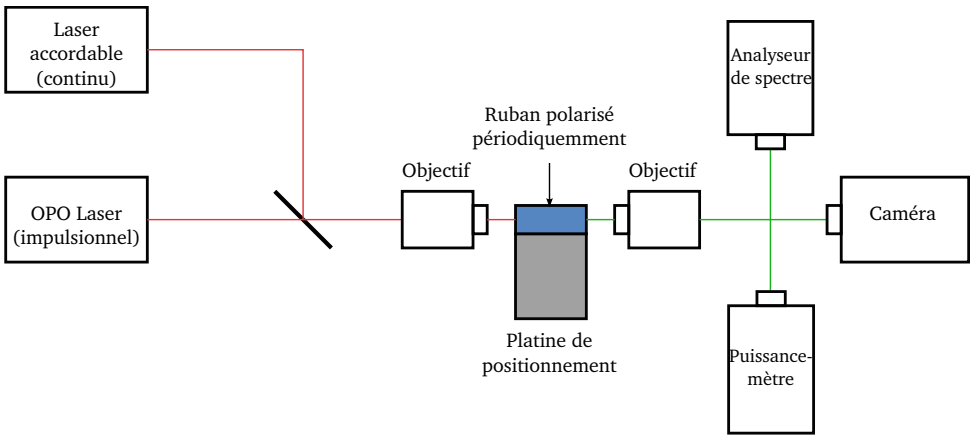


FIGURE 5.1 – Banc de caractérisation utilisé pour quantifier l'efficacité de conversion de génération de second harmonique des structures de type rubans

5.2.3.2/ STRUCTURES RUBANS SUR PLAQUES INTÉGRALEMENT AMINCIES

Le report de plaques de $LiNbO_3$ sur Si permet de réaliser des amincissements de l'ordre de la dizaine de micromètres à l'aide d'une machine de rodage-polissage. L'avantage de ce type d'amincissement tient à la rugosité de la surface R_q, évaluée autour de 1 nm. Cela permet de limiter les pertes par diffusion lors de la propagation du faisceau optique dans le guide. De plus, ce type d'amincissement de plaques permet d'obtenir des variations d'épaisseurs totales maîtrisées, de l'ordre du micromètre sur une plaque de 100 mm de diamètre. La maîtrise dimensionnelle est particulièrement nécessaire pour ce type d'applications, du fait de la dépendance des conditions de propagation à la section du guide. Des simulations effectuées par M. Chauvet au sein de l'institut FEMTO-ST montrent l'évolution de la période d'inversion de domaine nécessaire à la minimisation du désaccord de phase lors de la génération de second harmonique en fonction de la section du guide optique. Le résultat de ces simulation est montré en figure 5.2 pour différentes longueurs d'ondes pompes.

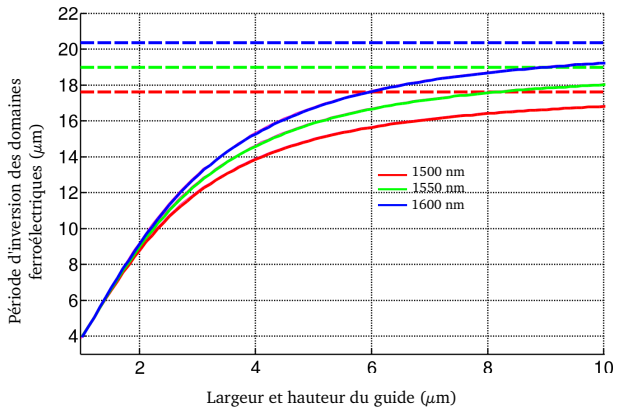


FIGURE 5.2 – Période d'inversion de domaine nécessaire à l'accord de phase pour la génération de second harmonique en fonction de la longueur des côtés d'un guide de section carrée. Simulations effectuées pour plusieurs longueurs d'ondes pompes.

Ces simulations montrent le lien qui existe entre le pas d'inversion des domaines ferroélectriques et la section du guide ; elles permettent ainsi de dimensionner les guides rubans réalisés. Cette figure montre en outre que la sensibilité du pas d'inversion de domaine à la taille du guide augmente rapidement pour des sections de guide inférieures à $3{\times}3\,\mu m^2$. La précision dimensionnelle en terme de largeur et de hauteur du ruban devra être améliorée par rapport aux valeurs actuelles pour réaliser des guides de section proche du micromètre carré.

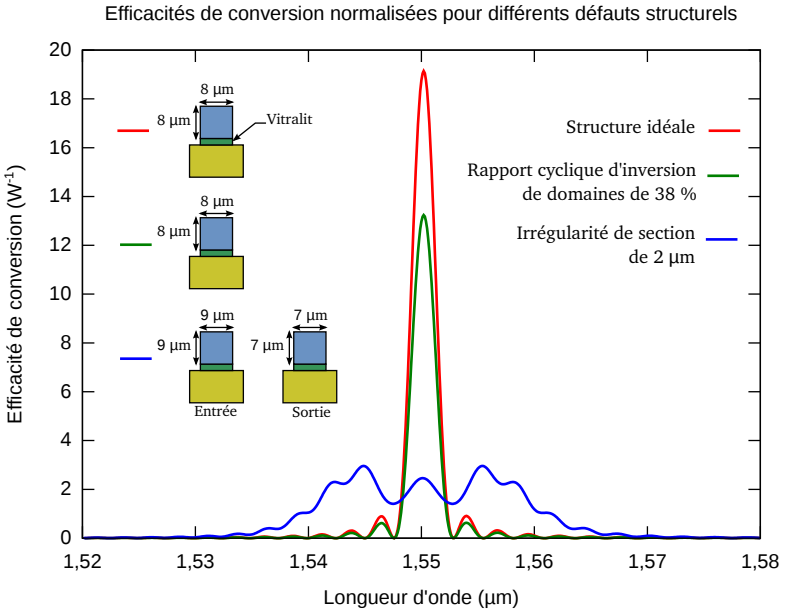


FIGURE 5.3 – Efficacités de conversion pour un guide ruban de $LiNbO_3$ reporté sur un substrat de silicium par une couche de *Vitralit*. Longueur des structures 5 mm, période d'inversion de domaine 18,1 µm, à 20 °C

L'efficacité de conversion dépend non seulement de la précision de découpe, mais aussi de son uniformité. En effet, comme le montre l'équation (5.6), la période d'inversion de domaine pour laquelle nous obtenons l'accord de phase est dépendante des indices effectifs du mode guidé. Toutefois, l'indice effectif d'un mode dépend de la section du guide ; une variation de celle-ci engendre donc une modification de la période d'inversion de domaine nécessaire au quasi accord de phase. La période d'inversion des domaines réalisés sur les dispositifs étant constante, toute variation de section du guide entrainera un désaccord de phase conduisant à une perte de l'efficacité de conversion ($\Delta kl \neq 0$). Des simulations effectuées par M. Chauvet et présentées en figure 5.3 montrent la dépendance de l'efficacité de conversion pour trois configurations de dispositifs. La première (courbe rouge) présente une structure dont la période d'inversion de domaine (de rapport cyclique 50 %), la longueur et la section sont constantes et respectivement fixées à 18,1 µm, 5 mm et $8{\times}8\,\mu m^2$. La deuxième (courbe bleue) simule un défaut de rapport cyclique dans l'inversion de domaine, alors fixée à 38 %, la section et la longueur restent identiques à celles la structure précédente. La troisième présente une structure dont la section varie de $9{\times}9\,\mu m^2$ à $7{\times}7\,\mu m^2$ en fonction de l'abscisse de mesure le long de la propagation. Ces résultats montrent que des variations de largeur et d'épaisseur de 2 µm engendrent une perte d'efficacité de conversion d'un facteur 6. La méthode de report de plaque et amincissement par rodage-polissage suivi d'une découpe à la scie de précision semble tout à fait adaptée au maintien d'une section constante (variations de largeur

et d'épaisseur inférieure au micromètre) sur des longueurs avoisinant le centimètre.

Nous avons donc réalisé un guide selon cette approche sur une plaque de $LiNbO_3$ reportée via de la *Vitralit* sur un substrat de silicium et présentant une période d'inversion de domaines de 20 µm. Le $LiNbO_3$ est aminci à 8 µm mais son défaut d'adhérence n'a pas permis de réaliser des guides de largeur inférieure à 26 µm. Le mode n'est alors pas confiné dans sa largeur. La figure 5.4 montre néanmoins la caractérisation d'un tel guide. Cette caractérisation fait apparaître le défaut

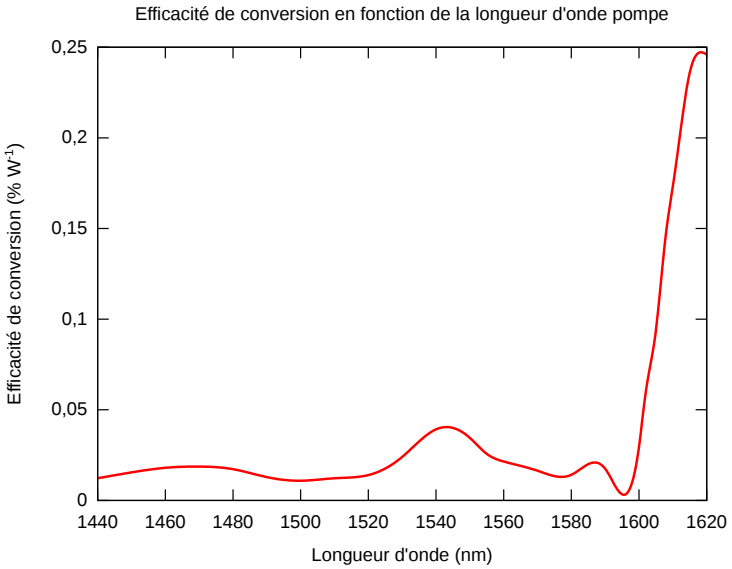


FIGURE 5.4 – Efficacité de conversion du guide en fonction de la longueur d'onde de la pompe

d'adaptation des dimensions du guide à la période d'inversion de domaine. La longueur d'onde pour laquelle nous obtenons l'accord de phase est alors décalée vers des valeurs en limites hautes de celles atteignables avec l'oscillateur paramétrique optique (1620 nm). De plus, l'efficacité de couplage n'y dépasse pas $0{,}3\,\% \cdot \mathrm{W}^{-1}$. Cette valeur est dégradée par plusieurs facteurs dont l'irrégularité de la période d'inversion de domaines et de la section du ruban. Notons également que la largeur spectrale du laser OPO est ici supérieure à la bande passante théorique du second harmonique ce qui dégrade la mesure. Cette caractérisation montre le caractère multimode du guide en présentant deux maxima distincts, l'un correspondant au mode fondamental et l'autre à un mode d'ordre supérieur. En effet, l'indice effectif dépendant de l'ordre du mode, chaque mode possède ses propres conditions de propagation. Pour maximiser l'efficacité de la structure, le guide devrait être monomode pour guider uniquement le mode fondamental et ainsi ne pas perdre d'énergie dans le doublage de fréquence de modes d'ordres supérieurs. Il est également possible d'optimiser les conditions d'injection dans le guide afin d'exciter principalement le mode fondamental même si la structure est multimode.

La puissance du signal doublé augmente de manière quadratique avec la puissance du signal émis pour des efficacités de conversion faibles (cf. équation (5.8)), ce qui se vérifie sur la courbe expérimentale de la figure 5.5 qui présente l'évolution du rapport $p_{2\omega}/p_{\omega}$ en fonction de la puissance moyenne de la pompe. Cette figure montre qu'il est possible d'atteindre un rendement de conversion global de plus de 70 % à des puissances moyennes de l'ordre de 20 mW. À de telles puissances, la structure émet une couleur verte qui ne correspond pas à la longueur d'onde du signal doublé aux alentours de 800 nm (fonction de la longueur d'onde pompe). Une analyse spec-

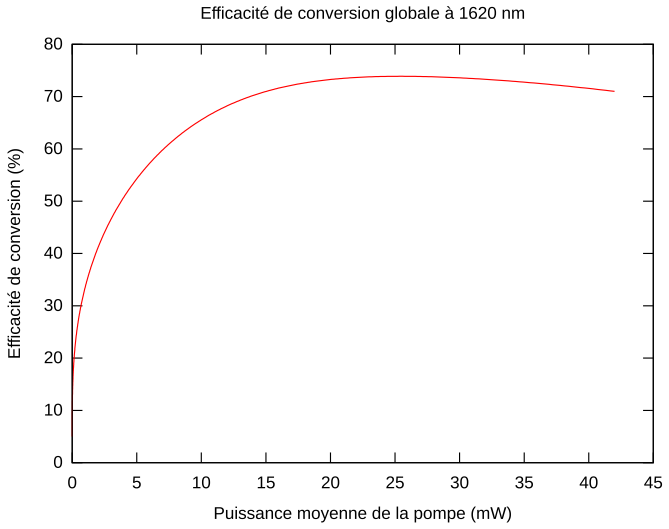


FIGURE 5.5 – Rendement global de conversion de la structure ($p_{2\omega}/p_{\omega}$) à 1620 nm

trale, présentée en figure 5.6, permet de constater la présence de trois pics de longueurs d'ondes distinctes. Le premier situé à 790 nm correspond à la longueur d'onde du second harmonique gé-

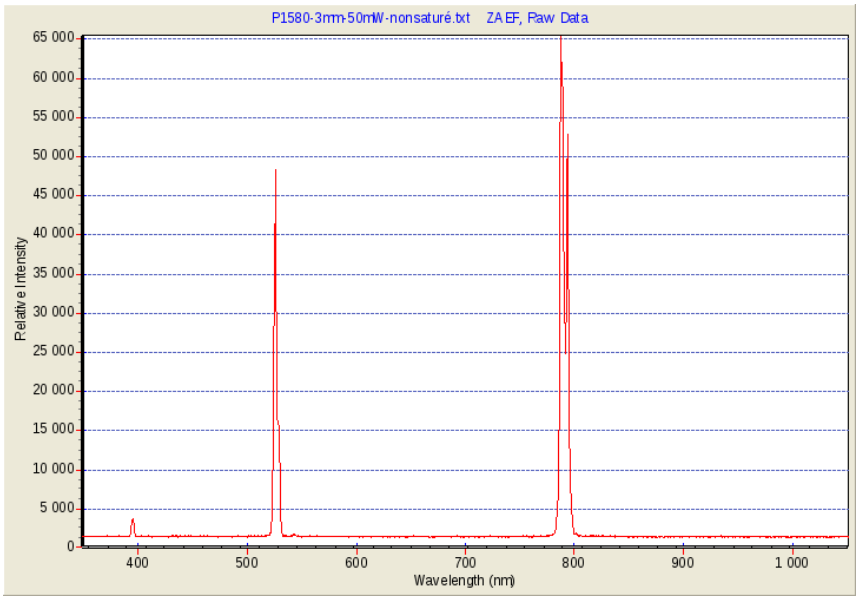


FIGURE 5.6 – Analyse spectrale du signal de sortie montrant trois pics à des longueurs d'ondes distinctes

néré par un faisceau pompe à 1580 nm, le second à 526 nm correspond à la somme de fréquence entre le signal de la pompe et le second harmonique. En effet, la somme de fréquence f_{SFG} (pour Sum Frequency Generation) est ici égale à $f_{SFG} = f_P + f_{SHG}$ où f_P est la fréquence de la pompe et f_{SHG} la fréquence du second harmonique généré par le doublage de fréquence. En termes de longueurs d'ondes, cette formule s'écrit :

$$\lambda_{SFG} = \frac{\lambda_p \lambda_{SHG}}{\lambda_p + \lambda_{SHG}} \tag{5.11}$$

En appliquant cette formule avec le faisceau pompe à 1580 nm et le second harmonique à 790 nm, on retrouve bien la longueur d'onde sommée à 526,6 nm. Enfin, un troisième pic est visible à 390 nm sur le relevé spectral du signal de sortie. Il correspond à la somme de la pompe avec le signal à 526 nm. Les conditions d'accord de phase (ici les trois faisceaux doivent être accordés en phase) n'ont pas été optimisées pour réaliser ces sommes de fréquence, d'où leurs amplitudes moins importantes que le second harmonique. Une observation expérimentale de ce phénomène de somme de fréquence est illustrée en figure 5.7 avec la présence d'une émission dans le vert le long de la structure. Cette image permet en outre de visualiser l'augmentation de l'intensité lumineuse au cours de la propagation de la lumière. À gauche de l'échantillon se trouve la face d'injection où l'intensité de la lumière verte est faible, à droite, en face de sortie, l'intensité est maximale après avoir traversé le guide d'ondes.

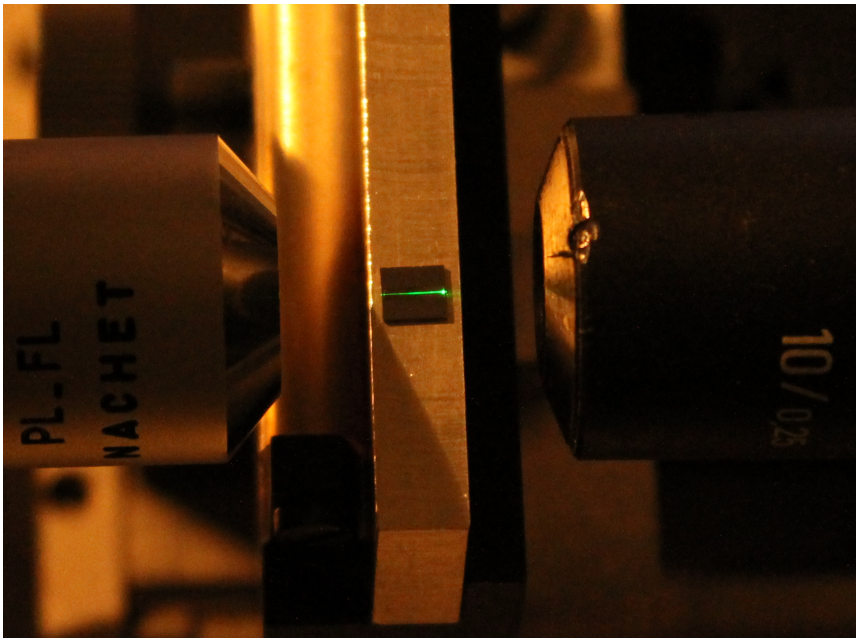


FIGURE 5.7 – Illustration du phénomène de somme de fréquence dans le proche infrarouge pour engendrer une longueur d'onde visible. La couleur verte est due au faisceau de longueur d'onde 526 nm généré par la somme de fréquence entre le faisceau pompe à 1520 nm et le second harmonique à 790 nm

L'efficacité de conversion de ce dispositif n'est pas optimale du fait que la longueur d'onde du faisceau pompe ne soit pas adaptée au pas d'inversion de domaines pour lequel nous obtenons le quasi-accord de phase optimal. Une structure présentant un pas d'inversion de domaines de 18,6 µm et une section de $18\times10\,\mu m^2$ a été réalisée pour déplacer l'optimum de conversion vers une longueur d'onde faisant partie de la bande de longueur d'ondes atteignables par nos équipements. De plus, cette seconde structure est caractérisée à l'aide d'un laser continu (à la différence du laser femtoseconde qui produit une lumière pulsée), qui correspond à l'utilisation visée du dispositif. De plus, le laser utilisé possède une meilleure pureté spectrale que celle du signal obtenu par le laser femtoseconde, permettant ainsi une caractérisation plus précise de l'efficacité de conversion. La figure 5.8 présente la caractérisation de ce dispositif. L'efficacité de conversion maximale de ce dispositif s'élève à $5{,}5\,\% \cdot W^{-1}$ à 1573 nm pour une longueur de dispositif de 1,5 cm. Il existe cependant plusieurs maxima d'efficacité du fait des variations de géométrie au cours de la propagation de la lumière dans le ruban. En outre, la source utilisée pour ces carac-

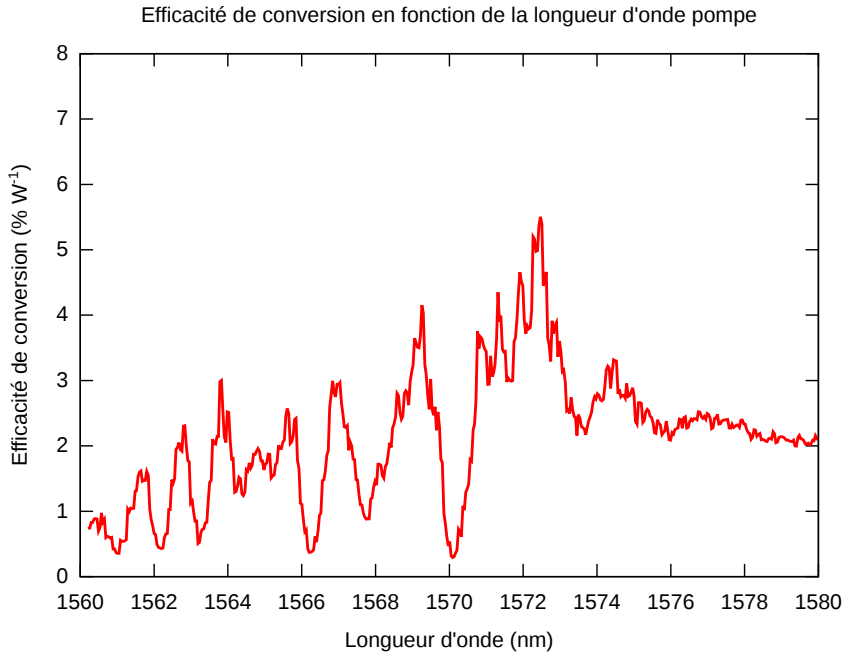


FIGURE 5.8 – Efficacité de conversion en fonction de la longueur d'onde pour un dispositif de section $18\times10\,\mu m^2$ et présentant une période d'inversion de domaine de 18,6 µm

térisations générant un spectre plus fin que celle utilisé précédemment, le niveau de détail de la courbe augmente.

Les structures caractérisés ici ont permis la validation du procédé de fabrication avec une nécessité d'améliorer l'uniformité de la section le long de la propagation et de maximiser le confinement afin d'augmenter l'efficacité de conversion. Dans cette dynamique de fabrication et bénéficiant des améliorations technologiques liées à la découpe de précision, des dispositifs réalisés par amincissement local sont présentés en section suivante afin de répondre aux enjeux de confinement nécessaires à l'amélioration de l'efficacité de conversion du doublage de fréquence.

5.2.3.3/ STRUCTURES RUBANS AMINCIES PAR SCIAGE

L'amincissement par découpe à la scie de précision permet d'atteindre des sections de rubans jusqu'alors impossibles à obtenir avec les moyens classiques d'amincissement. Le chapitre 2 présente la fabrication et les dimensions minimales de tels dispositifs. L'objectif principal de ces dispositifs amincis à la scie vise à maximiser le confinement des guides ainsi mis en œuvre pour augmenter la densité de puissance du faisceau optique et par conséquent l'efficacité de conversion. Dans le domaine de l'optique, le chapitre 4 montre les possibilités d'amincissements en un point effectués à partir d'une simple descente de lame dans l'échantillon en mode couperet. Dans le cas de l'optique non linéaire et particulièrement pour la génération de second harmonique, nous avons montré qu'une variation de section engendre une modification des conditions de propagation et donc une dégradation de l'efficacité de conversion. La section devant alors être constante le long de la propagation, les amincissements seront réalisés par l'avance de la lame le long de la structure pour réaliser des structures telles que celle présentée en figure 5.9 (notons que le $LiNbO_3$ est polarisé périodiquement au préalable). Comme l'indique le chapitre 2, l'inconvénient

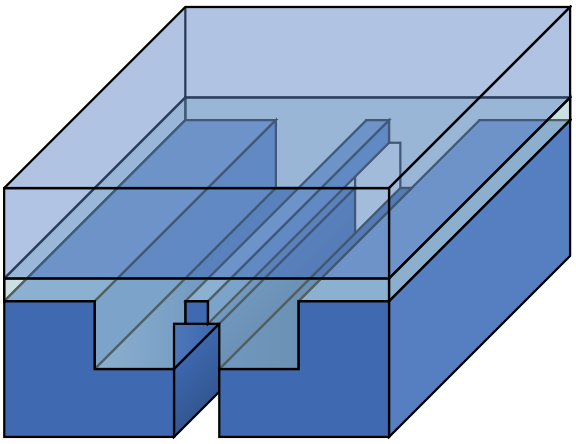


FIGURE 5.9 – Géométrie des structures réalisées par amincissement local à la scie de précision

de cette méthode de fabrication réside dans l'inhomogénéité de la section du guide, en particulier de son épaisseur. En effet, lors du report de l'échantillon contenant les structures, un défaut de parallélisme peut se former entre l'échantillon et le substrat. Cette méthode a cependant permis de réaliser un guide de section 4,5×4,5 μm^2, au centre d'un guide ruban d'une longueur de 2 mm. Le profil d'intensité en sortie de l'échantillon est présenté en figure 5.10, où $FWHM_v = 5{,}42\,\mu m$ et $FWHM_h = 5{,}76\,\mu m$. Cependant, la période d'inversion de domaine de cet échantillon de 18,6 µm

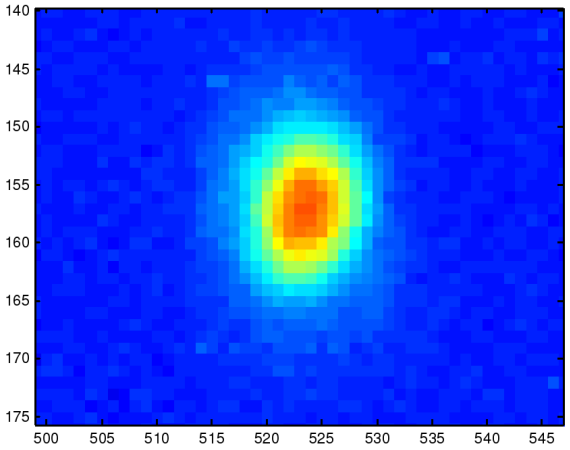


FIGURE 5.10 – Distribution du mode guidé à 1550 nm dans un guide ruban réalisé par amincissement local à la scie de précision

n'est pas adaptée au doublage de fréquences disponibles avec nos équipements. Les simulations effectuées par M. Chauvet au sein du département d'optique de l'institut FEMTO-ST montrent que l'accord de phase est optimal – avec une telle structure – pour une période d'inversion de domaine de 15 µm à la longueur d'onde pompe de 1550 nm. Le désaccord de phase engendré par les 3,6 µm de différence entre la période d'inversion de domaine du guide et la période optimale de conversion est trop importante pour réaliser la génération de second harmonique. Les résultats concernant cette caractérisation ne sont donc pas présentés. Cependant, le confinement des modes dans des sections d'un ordre de grandeur plus faibles que celles obtenues par CMP permet d'envisager une augmentation proportionnelle de l'efficacité de conversion en cas d'accord

de phase.

Ce type de rubans ouvre la voie à des structures aux capacités de génération de second harmonique améliorées par rapport aux pratiques actuelles, après avoir optimisé les conditions de fabrication. Les verticalités des flancs de plus de 88 ° permettent de limiter les variations de largeur des structures contrairement aux rubans réalisés par gravure chimique (par voie sèche ou humide). Des techniques d'amincissement permettant une plus grande uniformité de l'épaisseur des structures amincies que celles offertes par les conditions actuelles sont à l'étude. Elles devraient permettre de limiter les variations d'épaisseur totales au micromètre sur des longueurs supérieures au centimètre.

Les structures amincies selon les deux méthodes présentées consistent en des guides sans coupleur de mode optique. Du fait que le banc de mesure n'utilise pas de fibre optique mais un objectif de microscope pour la focalisation du faisceau, il devient possible de mettre en forme le faisceau afin que celui-ci soit adapté au mode guidé. Les structures testées présentant des coupleurs de mode ne sont pas présentées ici. Leurs caractérisation délivre le même type de résultats, avec une efficacité de conversion identique (voire inférieure) aux guides sans coupleurs de modes.

Bien que l'efficacité du doublage de fréquence n'atteigne pas des valeurs à l'état de l'art, nous avons cependant montré la faisabilité de la méthode et donné des perspectives de réalisation prometteuses. Les structures faisant appel au confinement de modes optiques et à l'interaction de domaines ferroélectriques ne sont pas uniquement utilisables dans le cadre du quasi accord de phase. En effet, comme il a été décrit dans le chapitre 3, les domaines ferroélectriques alternés permettent la génération d'ondes élastiques de volume, auxquelles nous pouvons envisager de coupler un faisceau lumineux. Cette interaction fait l'objet de la section suivante, dédiée aux perspectives des dispositifs réalisés sur des structures fabriquée par sciage de précision.

5.3/ Perspectives : dispositifs acousto-optiques

Comme montré dans les chapitres précédents, les dispositifs réalisés par découpe à la scie de précision ont été testés comme transducteurs acousto-électriques et comme guides optiques. Cette section montre quant à elle la possibilité de modifier les propriétés d'un faisceau optique en utilisant des domaines ferroélectriques alternés. Comme décrit au sein du chapitre 1, la présence d'ondes élastiques modifie localement les propriétés du matériau et donc les conditions de propagations de faisceaux optiques y étant guidés (variation d'indice de réfraction, voire des conditions dimensionnelles de guidage). Cette modification périodique du matériau peut agir sur la lumière de même manière qu'un réseau de Bragg. Ainsi, il devient possible de réaliser un modulateur acousto-optique en utilisant des longueur d'ondes optiques et acoustiques adaptées à l'apparition du phénomène de diffraction mise en évidence par Bragg. Les premiers dispositifs acousto-optiques utilisant des ondes élastiques générées par un réseau périodique de domaines alternés dans du $LiNbO_3$ ont été réalisés en 2000 [133]. Depuis, plusieurs études ont montré les différents intérêts de ces structures, permettant de réaliser des fonctions telles que la conversion de polarisation [134] ou la modulation de génération de second harmonique [132]. Ces applications sont réalisées en excitant des structures massives, de longueur centimétrique et de section de plusieurs millimètres carrés. Dans une configuration où les électrodes sont placées sur les faces *Y* du dispositif, Yu *et al.* montrent qu'une réduction de la section du dispositif (à une section de $0,5 \times 0,5\,\mathrm{mm}^2$) améliore son efficacité, sa compacité et diminue les tensions de commande [132].

En induisant un effet acousto-optique dans des structures à hauts rapports de forme telles que présentées au chapitre 2 permettant un confinement amélioré (section $5 \times 5\,\mu m^2$), nous pouvons espérer exalter l'effet acousto-optique.

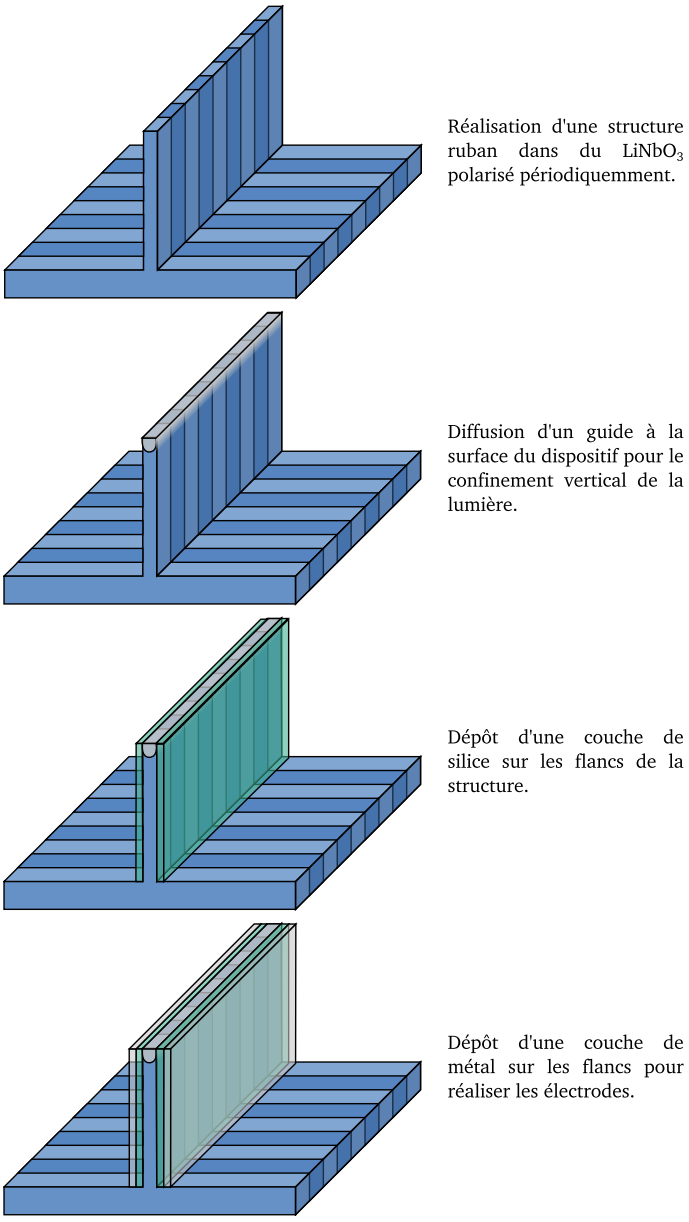


FIGURE 5.11 – Procédé de fabrication des dispositifs acousto-optique pour la modulation d'intensité de faisceaux optiques.

Dans le cas de structures à hauts facteurs de forme réalisées par découpe à la scie de précision, le but consiste à générer l'onde acoustique nécessaire à l'interaction acousto-optique avec des électrodes massives placées sur les flancs du dispositif, comme évoqué dans le chapitre 3. Le mode optique doit quant à lui être guidé à la surface du ruban. Il est donc nécessaire d'avoir recours à l'échange protonique ou à la diffusion de titane en surface de la structure pour créer un tel guide. Une première difficulté survient alors, du fait de l'incompatibilité de certains procédés de fabrication.

La diffusion de titane s'effectuant à plus de 1000 °C, température proche de la température de Curie du $LiNbO_3$, la diffusion d'ions lui a été préférée pour obtenir le guidage optique vertical. Cependant, les électrodes massives placées de part et d'autre du guide absorbent le mode optique, engendrant une perte de guidage à l'intérieur de la structure en $LiNbO_3$. Pour éviter ce phénomène, une couche d'indice optique plus faible que le $LiNbO_3$ doit être placée entre les électrodes et le guide optique. En ce sens, le dépôt d'une couche de silice (matériau présentant l'indice optique idoine) est effectué avant celui des électrodes métalliques. La figure 5.11 résume le procédé de fabrication complet de structures adaptées à l'interaction acousto-optique pour la modulation de faisceaux optiques. La présence d'un diélectrique entre l'électrode et le $LiNbO_3$ engendre inévitablement des modifications sur la réponse acoustique du transducteur. La figure 5.12 montre une augmentation de la vitesse équivalente de phase du mode longitudinal de 1,3 % et de 3,4 % pour le mode de cisaillement dans le cas où 2 µm silice sont placés entre le transducteur et les électrodes. Le coefficient de couplage est quant à lui abaissé de 4 % pour le mode longitudinal et de 2,5 % pour le mode de cisaillement par rapport au cas d'un ruban sans silice sur les flancs.

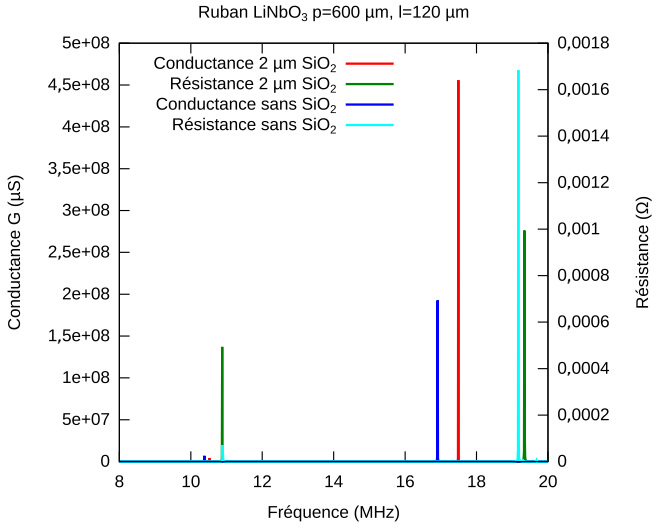


FIGURE 5.12 – Simulation de la présence d'une couche de SiO_2 lors de l'excitation d'un transducteur polarisé périodiquement.

Malgré la diminution du couplage électromécanique de la structure, il reste possible d'exciter des ondes élastiques au travers de la couche diélectrique, permettant d'envisager la réalisation de ce type de dispositif. L'étape critique du procédé de fabrication correspond au dépôt de silice, dont l'épaisseur doit être homogène sur les flancs du ruban. Si aucune méthode de dépôt le permettant n'est actuellement disponible au sein de l'institut FEMTO-ST, nous étudions toutefois une approche utilisant la pulvérisation cathodique, a priori peu directive et susceptible de produire un dépôt sur toute la surface des rubans, permettant de valider cette approche sont actuellement à l'étude afin de réaliser les premiers véhicules de test et de montrer la faisabilité des dispositifs.

A l'exception du dépôt de silice, toutes les étapes technologiques sont maîtrisées pour réaliser ce type de dispositif innovant. Afin d'améliorer le confinement optique, il est envisagé de réaliser des fils de $LiNbO_3$ comme ceux utilisés pour les applications d'optique non-linéaire avec pour objectif l'exaltation de l'effet électro-acousto-optique.

5.4/ Conclusion

L'utilisation des propriétés ferroélectriques du $LiNbO_3$ conduit à la réalisation de réseaux polarisés périodiquement qui peuvent être exploités dans différents domaines de la physique. L'utilisation d'une inversion périodique de domaines pour modifier le support de propagation d'un faisceau optique conduit à l'apparition d'effets non linéaires bien connus, permettant la génération de second harmonique. La réduction de la section des guides optiques alors réalisés à la scie de précision permet une exaltation de l'efficacité de conversion de ce type de structure. Cependant, la maîtrise insuffisante des paramètres géométriques tels que la largeur et la profondeur des guides à la scie de précision ne permet pas aujourd'hui d'améliorer le taux de conversion. De récentes investigations concernant un procédé de fabrication ne nécessitant que très peu d'étapes technologiques devraient toutefois permettre de minimiser les variations dimensionnelles le long de la structure et donc offrir une amélioration importante de l'efficacité de conversion recherchée.

En combinant des réseaux polarisés périodiquement avec une excitation électrique et un faisceau optique, il est théoriquement possible de générer des interactions entre les ondes élastiques engendrées par l'effet électro-acoustique et le faisceau optique. Cette interaction acousto-optique a déjà été montrée avec des structures utilisant du $LiNbO_3$ massif ou des structures rubans de tailles bien supérieures à celles réalisables par découpe à la scie de précision. Les dispositifs en cours de réalisation devraient montrer leurs capacités à exalter l'effet acousto-optique et ainsi diminuer les tensions de commande des dispositifs utilisant ce type d'interactions. L'utilisation de la scie diamantée de précision montre ici encore tout son intérêt pour réaliser des structures à forts confinements bénéficiant du caractère monocristallin des plaques sur lesquelles ils sont réalisés.

Conclusion

La miniaturisation généralisée des dispositifs dans la plupart des domaines industriels demande de repousser continuellement les limites du savoir-faire et des technologies vers la manipulation de l'infiniment petit. La réduction de la taille de dispositifs électro-acoustiques, optiques ou électro-optiques signifie une augmentation du confinement des ondes élastiques ou optiques. L'objectif du projet CHARADES consistait à explorer une méthode de fabrication tridimensionnelle en rupture avec les technologies planaires sur tranche habituellement mises en œuvre pour la réalisation de microsystèmes. Cette méthode de fabrication à la scie diamantée de précision a ouvert la voie à des géométries innovantes permettant des fonctionnalités jusqu'alors inaccessibles via les méthodes classiques de fabrication. Ainsi des structures possédant des facteurs de formes de plus de 300 avec des verticalités de flancs de 88 ° ont été réalisées sur du $LiNbO_3$ monocristallin massif ; aucune autre technique de fabrication ne permet à l'heure actuelle d'obtenir ce résultat. La qualité de ces dispositifs en termes de rugosité est démontrée, les flancs des structures sont polis concomitamment à leur découpe permettant des rugosités de l'ordre de 4 nm RMS. Cette qualité de polissage est la condition pour confiner efficacement les ondes élastiques ou optiques en minimisant les pertes par diffusion. Cette technique de fabrication a permis la réalisation de rubans simples à hauts facteurs de forme permettant des confinements latéraux importants (largeur de structure jusqu'à 1 µm).

Dans l'objectif d'améliorer encore le confinement des ondes, en particulier dans le domaine de l'électro-optique, la combinaison de telles méthodes de découpe avec des techniques avancées de composition de matériaux monocristallins a permis de confiner la lumière verticalement. Cette fonctionnalité a été rendue possible dans le cadre des travaux présentés au sein de ce manuscrit par la capacité de la scie diamantée à amincir localement le matériau en maîtrisant sa profondeur de découpe. La précision de la scie diamantée est telle qu'il est possible d'amincir du $LiNbO_3$ à des dimension submicroniques (300 nm) avec une qualité dite «polie optique» (rugosité de 6 nm RMS). Les méthodes de report développées pour parvenir à de tels résultats confèrent à la structure une certaine robustesse malgré sa finesse en noyant cette dernière dans une colle photodurcissable compatible avec les contraintes de guidage optique. Afin de faciliter la connectique, d'améliorer la robustesse des dispositifs électro-acoustiques et de réaliser une adaptation modale du faisceau optique, des dispositifs à la géométrie innovante (appelés *B-ridges*) ont été réalisés en utilisant les capacités de découpe partielles de la scie diamantée. Les structures ainsi réalisées sont utilisées en électro-acoustique, en électro-optique et en optique non linéaire pour des fonctions nécessitant des connectiques planaires efficaces.

L'électro-acoustique est un domaine dans lequel la demande en dispositifs à couplages électro-mécaniques maximisés et à vitesses de phases élevées (dépassant celles des modes de surface et de volume classique) est en constante augmentation. En ce sens, les dispositifs à hauts facteurs de forme réalisés à la scie diamantée ont été conçus pour répondre à la demande de filtres électro-acoustiques à larges bandes. Les outils de simulation par éléments finis et de frontière permettent de dimensionner les structures à réaliser. Ces dernières peuvent générer deux types d'ondes selon

la méthode de fabrication employée : la première consiste à exciter un ruban de $LiNbO_3$ massif par ses flancs sans traitement préalable. La seconde utilise la génération d'ondes élastiques au sein de rubans à hauts facteurs de forme par excitation de domaines ferroélectriques alternés réalisés avant la découpe de la structure. Cette dernière méthode de fabrication donne lieu à des structures possédant des couplages électromécaniques de plus de 20 % avec des vitesses de phase équivalentes de plus de $10\,000\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Plusieurs de ces structures ont été connectées entre elles pour former des filtres à éléments d'impédance innovants fonctionnant à des fréquences de l'ordre de la centaine de mégahertz. Les résultats encourageants obtenus avec ces dispositifs conduisent à poursuivre le développement de cette méthode de réalisation. En effet, une réduction de la variation totale d'épaisseur du ruban engendrant un gain de coefficient de qualité permettra la production industrielle de ce type de dispositif et d'en exploiter pleinement les avantages manifestes.

L'augmentation du confinement de la lumière permet une réduction de la tension de commande des dispositifs utilisant l'effet électro-optique. Les enjeux industriels sous-jacents poussent au développement de structures de type ruban permettant un confinement accru de l'onde lumineuse. Contrairement au domaine de l'électro-acoustique, ce type de structures est couramment employé en électro-optique avec les techniques planaires de fabrication collectives sur plaque. Cependant, aucune de ces techniques ne permet de réaliser des dispositifs dont les dimensions hors plan excèdent les dix micromètres avec des flancs de qualité «poli optique». Les guides rubans réalisés à la scie permettent donc un confinement maximal (diamètre du mode inférieur à 6 µm) en minimisant les pertes de propagation ($0{,}2\,\mathrm{dB \cdot cm^{-1}}$). Cependant, ce confinement n'est pas adapté au mode de la source – une fibre SMF-28 – de diamètre 10,5 µm, ce qui produit des pertes de couplage entre la fibre et le guide. Pour palier cela, les *B-ridges* réalisés à la scie sont utilisés en tant qu'adaptateur de mode optique. L'idée consiste à faire varier progressivement la taille du mode optique injecté de 10,5 µm à la largeur du mode du guide, et inversement en sortie de guide. Ces dispositifs ont montré leur efficacité en faisant passer les pertes de couplages de 2,4 dB dans le cas d'un guide ruban classique à 0,8 dB dans le cas d'un guide à coupleur de modes de type *B-ridge*. Des amélioration structurelles sont nécessaires pour obtenir un gain d'efficacité des modulateurs et des filtres électro-optiques ; en cela, les guides d'ondes optiques utilisés dans ces dispositifs sont amincis afin d'augmenter le confinement du mode optique et d'améliorer la verticalité des cristaux photoniques qui y sont inscrits. La réduction des pertes (par rapport aux structures classiques) et les capacités de confinement de ce type de structure ont été démontrées, les futurs développements viseront à montrer la réduction de la tension de commande nécessaire au fonctionnement de ces dispositifs.

En optique non-linéaire, le quasi-accord de phase obtenu par inversion de domaines ferroélectriques alternés permet d'optimiser le phénomène de doublage de fréquence. Le guidage optique et plus particulièrement l'amélioration du confinement du faisceau lumineux permet d'exalter les effets non linéaires dont l'intensité est inversement proportionnelle au carré de la section. Les développements d'amincissement locaux à la scie ont permis la réalisation de fils de $LiNbO_3$ de section $4,5 \times 4,5\,\mu\mathrm{m}^2$ sur une longueur de 2 mm. Comme en électro-acoustique, une variation de géométrie entraîne une dégradation de la réponse du dispositif, orientant les développements vers l'amélioration de la précision et de la stabilité de découpe à la scie diamantée.

L'objectif final du projet CHARADES consistait à combiner les effets électro-acoustiques et optiques pour créer une interaction entre phonons et photons. La particularité de ces dispositifs réside dans le mode de génération de l'onde élastique : un ruban de $LiNbO_3$ périodiquement polarisé à hauts facteurs de forme excité via ses flancs. Le confinement des ondes élastiques et optiques devraient conduire à une amélioration de l'interaction acousto-optique en maximisant

l'intensité des champs respectifs dans un volume parfaitement délimité assurant un recouvrement du mode quasi-parfait et donc *a priori* propice à l'interaction. L'efficacité des modulateurs et des filtres accordables acousto-optiques pourrait alors être améliorée.

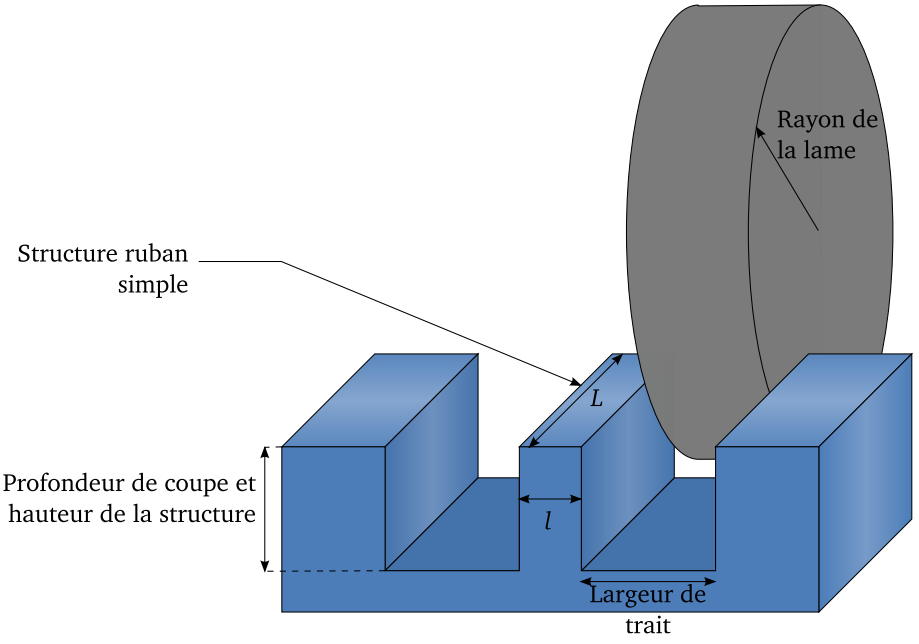
Ce projet de recherche a permis de montrer les capacités d'innovation liées au développement de la découpe à la scie de précision avec une réalité industrielle sous-jacente, comment en attestent les deux demandes de brevet européens qui en ont dérivé. Les perspectives ouvertes par les premiers dispositifs développés ici permettent d'envisager leur future exploitation dans le milieu de la recherche voire dans le milieu industriel, qui serait alors la concrétisation d'un projet soutenu par trois entreprises et l'Agence Nationale pour la Recherche.

ANNEXES

A

Caractéristiques dimensionnelles liées à la découpe

Les caractéristiques dimensionnelles utilisées pour la description de structures réalisées à la scie sont définies ici. Le passage d'une lame de scie circulaire avançant au sein d'un matériau massif laisse une empreinte de section rectangulaire, dépendante de sa largeur et de la profondeur de coupe, comme le montre le schéma de la figure A.1. Cette empreinte longiligne sera appelée trait de découpe. Cette figure montre les caractéristiques dimensionnelles principales utilisée pour dé-



l : largeur ou épaisseur de la structure ruban
L : longueur de la structure ruban

Figure A.1 – Schéma représentant une tranchée de découpe laissée par le passage du lame de scie circulaire et définissant les grandeurs dimensionnelles principales des la structure résultante.

crire les structures réalisées par sciage. Il s'agit cependant d'une représentation idéale de celles-ci, ne tenant pas compte des défaut géométriques engendrés lors de la découpe. En effet, pour décrire plus rigoureusement les structures réalisées par sciage, nous allons prendre en considération des

paramètres tels que la rugosité moyenne quadratique, la verticalité, la planéité, la variation totale d'épaisseur de la structure ou encore le congé d'angle de dépouille. Ces paramètres ont été rapidement présentés dans le chapitre 2. Cette annexe se consacre à la définition précise de chacune de ces grandeurs.

Rugosité moyenne quadratique

La rugosité moyenne quadratique – notée R_q en français et souvent appelée rugosité RMS pour *Root Mean Square* en anglais – représente la moyenne quadratique de toutes les ordonnées du profil pris sur une longueur donnée. Le schéma de la figure A.2 présente un profil de rugosité type et les paramètres qui s'y rapportent. La rugosité moyenne quadratique se calcule avec la formule

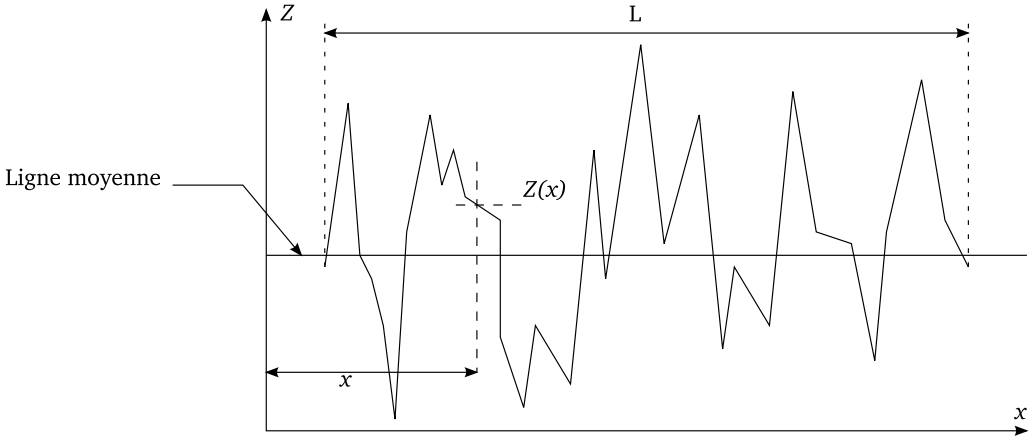


FIGURE A.2 – Schéma montrant un profil de rugosité type (tel qu'obtenu par profilométrie) et détaillant les paramètres de calcul de la rugosité moyenne quadratique

donnée par l'équation (A.1) où L représente la longueur sur laquelle est évaluée le profil et $Z(x)$ l'ordonnée du profil de rugosité évaluée à l'abscisse x.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L}\int_0^L Z^2(x)\,\mathrm{d}x} \tag{A.1}$$

Dans notre étude, la rugosité est mesurée principalement sur les flancs des structures et au fond des tranchées. Les valeurs caractéristiques sont de $r_{q_{flancs}} = 4\,\mathrm{nm}$ et $r_{q_{fond}} = 6\,\mathrm{nm}$ pour une tranchée réalisée sur $LiNbO_3$ par découpe-polissage à la scie diamantée (procédé détaillé au chapitre 2).

Planéité du fond de tranchée

L'empreinte laissée par la lame lorsqu'elle avance à une profondeur fixe dans un matériaux massif présente un profil correspondant à la section de la lame qui évolue tout au long de la découpe. Initialement, ce profil se rapproche d'un plan puis se dégrade à chaque passe dans le matériau à usiner. Pour des découpes de ruban dans du $LiNbO_3$ la planéité doit être corrigée après 1 m de découpe. Pour corriger et améliorer la planéité, nous réalisons une découpe dans du carbure de silicium, un matériau très dur placé à 9,5 sur l'échelle de Mohs (définition au paragraphe suivant). La lame étant constituée de grains de diamants enchevêtrés dans de la résine, elle s'use rapidement lors de l'usinage du carbure de silicium. Après quelques centimètres de découpe, la

lame est usée au point qu'elle affleure la surface. La forme de la section de la lame est donnée par le taux d'ondulation de la plaque de carbure de silicium. La figure A.3 définie la planéité du fond de tranchée P_{ft} égale à l'écart entre le point d'ordonnée maximale (Z_{max}) et le point d'ordonnée minimale (Z_{min}) :

$$P_{ft} = Z_{max} - Z_{min} \tag{A.2}$$

En pratique, la planéité du fond de tranchée est mesurée au MEB, elle est inférieure à 1 µm pour une largeur de lame de 400 µm.

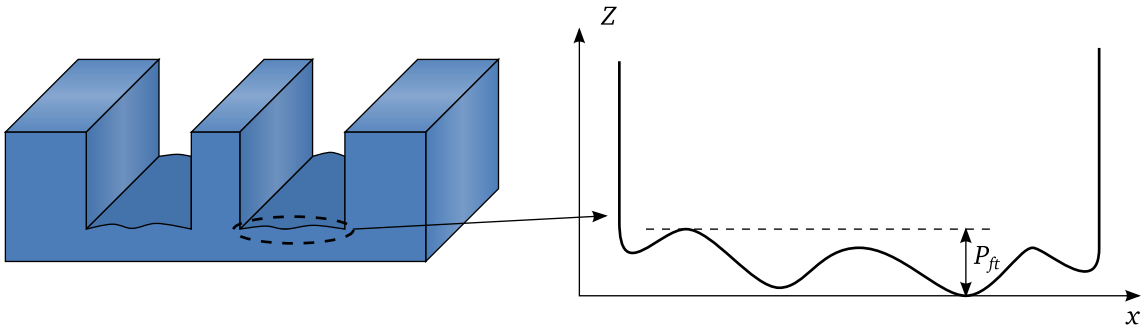


FIGURE A.3 – Schéma présentant le principe d'évaluation de la planéité du fond de tranchée

Échelle de Mohs

L'échelle de Mohs à été mise au point par le minéralogiste allemand Friedrich Mohs au début du XIX^{ème} siècle et a pour but de classer les minéraux selon leur dureté. C'est une échelle ordinale fonctionnant par comparaison. Les matériaux sont classés selon leur capacité à se rayer mutuellement. Ainsi, le matériau au plus bas dans l'échelle de Mohs est le talc dont la dureté est de 1, ce qui signifie qu'il peut être rayé par tous les matériaux dont la dureté est supérieure ou égale à 1. Le matériau se trouvant au plus haut de l'échelle de Mohs est le diamant avec une valeur de 10. Celui-ci ne peut être rayé que par lui-même. Cette relation entre matériaux fondée sur l'expérience permet un classement qu'il est possible de relier de manière approximative à la dureté Vickers, plus largement utilisée en science des matériaux [185]. Le $LiNbO_3$ présente une dureté de Mohs évaluée à 5, celle du $LiTaO_3$ est de 5,5, celle de la langasite atteint 6,6 et celle du quartz vaut 7 (référence de l'échelle de Mohs).

Dureté	Minéral
1	Talc
2	Gypse
3	Calcite
4	Fluorine
5	Apatite
6	Orthose
7	Quartz
8	Topaze
9	Corindon
10	Diamant

Tableau A.1 – Échelle de Mohs

Verticalité

La verticalité des flancs obtenue lors de la découpe à la scie dépend directement de la forme de la lame et de sa capacité à rester droite durant la découpe. La verticalité θ_v est définie par le schéma de la figure A.4. Elle dépend essentiellement des paramètres de rotation et d'avance de

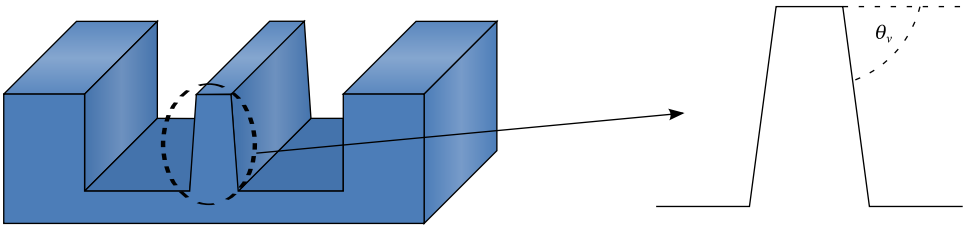


FIGURE A.4 – Schéma présentant la définition de la verticalité

la lame, de son diamètre et son élasticité. Après avoir optimisé les paramètres de découpe pour minimiser la rugosité des surfaces, la verticalité des flancs obtenue et comprise entre 88° et 89,5°.

Défauts de forme et d'ondulation des structures

La découpe à la scie de précision engendre des défauts dont l'amplitude varie le long de la découpe. Par voie de conséquence, on observe une certaine périodicité des défauts de découpe, qui sont alors classés selon leur longueur de répétition. La figure A.5 illustre les trois principaux défauts observés. Le défaut de forme possède la plus grande longueur de répétition. Dans notre cas,

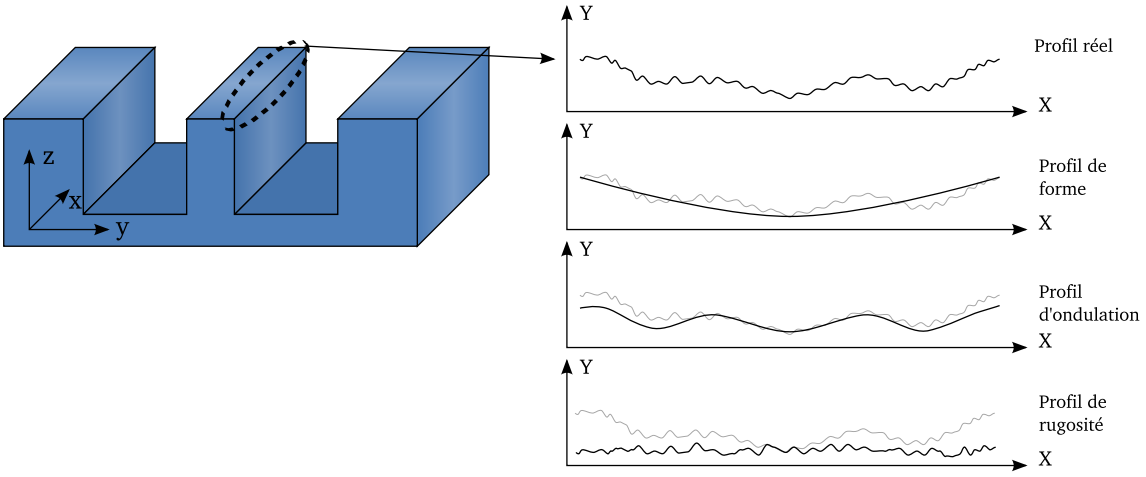


FIGURE A.5 – Schéma présentant les différents défaut structurels liées à la découpe sur une arrête supérieure de ruban

il est causé par la variation de contrainte mécanique qui se produit lors des transitions d'entrée et de sortie de lame dans la matière. Son amplitude peut atteindre 2 µm dans les cas les plus défavorables. Le défaut d'ondulation présente une longueur de répétition moins importante. Il est dû aux phénomènes d'échauffement qui ont lieu à l'interface lame/matière. Son amplitude ne dépasse pas le micromètre. Enfin, le défaut présentant la longueur de répétition la plus faible est la rugosité, définie plus haut. Ces défauts sont caractérisés par leurs amplitudes, dans notre cas, le défaut de

forme à la plus grande amplitude, suivi par le défaut d'ondulation. La rugosité a généralement l'amplitude la plus faible.

Parallélisme des traits

Le parallélisme des traits consiste en la différence de direction de propagation des deux flancs de la structure. Ce défaut est cependant si faible – grâce à la précision angulaire de la machine de découpe – qu'il est négligeable devant les défauts de forme et d'ondulation. La répétabilité angulaire de la scie étant largement inférieure à la seconde d'angle, nous n'observons pas de défaut de parallélisme.

Variation totale d'épaisseur

La variation totale d'épaisseur ou TTV permet d'évaluer les différences d'épaisseur au sein d'une plaque. Il s'agit dans notre cas d'évaluer la variation totale de largeur ou épaisseur d'un ruban, le plan de référence étant donc vertical. La variation totale d'épaisseur du ruban TTV_{ruban} est calculée en effectuant la différence entre l'épaisseur la plus importante e_{max} et la plus faible e_{min} de la structure, $TTV_{ruban} = e_{max} - e_{min}$. Cette valeur s'exprime en micromètre ou en % si elle est normalisée par l'épaisseur moyenne de la structure. Le schéma de la figure A.6 montre la définition de la variation totale d'épaisseur. Celle-ci dépend essentiellement de deux paramètres qui sont l'on-

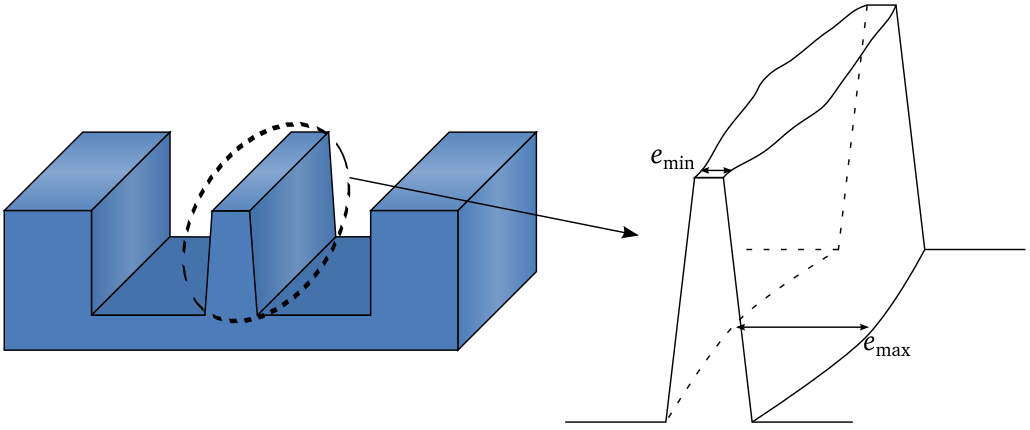


FIGURE A.6 – Schéma présentant la variation totale d'épaisseur d'une structure ruban simple

dulation de largeur et la verticalité des structures. Le parallélisme des traits est négligeable devant les défauts de forme et d'ondulation. Dans notre cas, pour une structure de plusieurs centaines de micromètres de hauteur et de plusieurs centimètres de longueur en $LiNbO_3$, la variation totale d'épaisseur peut atteindre 4 µm (mesures effectuées par microscopie à balayage électronique).

B

Protocole de mesure des pertes de propagation d'un guide optique droit

Les pertes de propagation optiques sont calculés à partir des mesures effectuées lors de la caractérisation des structures. Le guide optique en $LiNbO_3$ est entouré d'air et possède deux interfaces air-guide, une en entrée et une en sortie. On nomme r_{12} le coefficient de réflexion (en champ électrique) à l'entrée du guide, t_{12} le coefficient de transmission (en champ électrique) à l'entrée du guide et r_{23} et t_{23} les coefficients de réflexion et de transmission à la sortie du guide, respectivement. On relie de plus la constante de propagation à la longueur d'onde λ :

$$\beta = \frac{2\pi \cdot n_{eff}}{\lambda} \tag{B.1}$$

avec n_{eff} l'indice effectif de propagation de l'onde optique. D'après la référence [186], les champs réfléchis E_R et transmis E_T s'écrivent sous la forme :

$$\begin{cases} E_R = E_0 \dfrac{R_{12} + R_{23}}{1 + \overline{R_{12}} R_{23}} \\ E_T = E_0 \dfrac{T_{12} + T_{23}}{1 + \overline{R_{12}} R_{23}} \end{cases} \tag{B.2}$$

avec :

$$\begin{cases} R_{12} = \overline{R_{12}} = r_{12} \\ R_{23} = r_{23}\, e^{2i\beta L}\, e^{-\alpha L} \\ T_{12} = t_{12} \\ T_{23} = t_{23}\, e^{i\beta L}\, e^{-\frac{\alpha}{2} L} \end{cases} \tag{B.3}$$

L'expression des champs électriques transmis et réfléchis devient alors :

$$\begin{cases} E_R = E_0 \dfrac{r_{12} + r_{23}\, e^{2i\beta L}\, e^{-\alpha L}}{1 + r_{12} r_{23}\, e^{2i\beta L}\, e^{-\alpha L}} \\ \\ E_T = E_0 \dfrac{t_{12} + t_{23}\, e^{i\beta L}\, e^{-\frac{\alpha}{2} L}}{1 + r_{12} r_{23}\, e^{2i\beta L}\, e^{-\alpha L}} \end{cases} \tag{B.4}$$

Les intensités transmises et réfléchies sont respectivement déduites des amplitudes au carré des champs électriques transmis et réfléchis. On note I_0 l'intensité incidente et on suppose que les

coefficients de réflexion sont réels. Il vient alors :

$$\begin{cases} I_R = I_0 \dfrac{r_{12}^2 + r23^2\,\mathrm{e}^{-2\alpha L} + 2r_{12}r_{23}\,\mathrm{e}^{-\alpha L}\cos(2\beta L)}{1 + r_{12}r_{23}\,\mathrm{e}^{2i\beta L}\,\mathrm{e}^{-\alpha L}} \\ \\ I_T = I_0 \dfrac{|t_{12}|^2 + |t_{23}|^2\,\mathrm{e}^{-\alpha L}}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2\,\mathrm{e}^{-2\alpha L} + 2r_{12}r_{23}\,\mathrm{e}^{-\alpha L}\cos(2\beta L)} \end{cases} \tag{B.5}$$

Quand $\cos(2\beta L) = 1$, I_T est minimal. On note alors I_{Rmin} et I_{Tmin} la valeur des intensités dans ce cas :

$$\begin{cases} I_{Rmin} = I_0 \dfrac{\left(r_{12} + r23\,\mathrm{e}^{-\alpha L}\right)^2}{\left(1 + r_{12}r_{23}\,\mathrm{e}^{-\alpha L}\right)^2} \\ \\ I_{Tmin} = I_0 \dfrac{|t_{12}|^2|t_{23}|^2\,\mathrm{e}^{-\alpha L}}{\left(1 + r_{12}r_{23}\,\mathrm{e}^{-\alpha L}\right)^2} \end{cases} \tag{B.6}$$

Quand au contraire $\cos(2\beta L) = -1$, I_T est maximal. On note alors I_{Rmax} et I_{Tmax} la valeur des intensités dans ce cas :

$$\begin{cases} I_{Rmax} = I_0 \dfrac{\left(r_{12} - r23\,\mathrm{e}^{-\alpha L}\right)^2}{\left(1 - r_{12}r_{23}\,\mathrm{e}^{-\alpha L}\right)^2} \\ \\ I_{Tmax} = I_0 \dfrac{|t_{12}|^2|t_{23}|^2\,\mathrm{e}^{-\alpha L}}{\left(1 - r_{12}r_{23}\,\mathrm{e}^{-\alpha L}\right)^2} \end{cases} \tag{B.7}$$

On introduit alors les notations suivantes :

$$\begin{cases} K_T = \dfrac{\sqrt{I_{Tmax}} - \sqrt{I_{Tmin}}}{\sqrt{I_{Tmax}} + \sqrt{I_{Tmin}}} \\ \\ K_R = \dfrac{\sqrt{I_{Rmin}I_{Tmax}} - \sqrt{I_{Rmax}I_{Tmin}}}{\sqrt{I_{Rmin}I_{Tmax}} + \sqrt{I_{Rmax}I_{Tmin}}} \end{cases} \tag{B.8}$$

En calculant I_{Tmax}/I_{Tmin} puis I_{Rmax}/I_{Rmin} séparément et en cherchant à isoler $r_{23}\,\mathrm{e}^{-\alpha L}$, on obtient :

$$\begin{cases} K_T = r_{12}r_{23}\,\mathrm{e}^{-\alpha L} \\ \\ K_R = \dfrac{r_{23}}{r_{12}}\,\mathrm{e}^{-\alpha L} \end{cases} \tag{B.9}$$

Si les coefficients de réflexion des faces du guide sont identiques ($r_{12} = r_{23}$), on peut déduire les pertes directement de l'équation suivante :

$$\alpha_{dB/cm} = \frac{-4,34}{L}\ln(K_R) \tag{B.10}$$

En permutant les fibres d'entrée et de sortie, r_{12} joue le rôle de r_{23}, t_{12} joue le rôle de t_{23} et inversement. Le coefficient K_T de l'équation (B.9) est inchangé du fait de la symétrie des rôles de

r_{12} et r_{23}, contrairement au coefficient K_R. On introduit alors K_{R2} alors égal à :

$$K_{R2} = \frac{\sqrt{I_{R2min}I_{Tmax}} - \sqrt{I_{R2max}I_{Tmin}}}{\sqrt{I_{R2min}I_{Tmax}} + \sqrt{I_{R2max}I_{Tmin}}} \tag{B.11}$$

Les rôles de r_{12} et r_{23} étant inversés on obtient :

$$K_{R2} = \frac{r_{12}}{r_{23}} \mathrm{e}^{-\alpha L} \tag{B.12}$$

En combinant les équations (B.9) et (B.12) on déduit :

$$K_{R2}K_{R1} = \mathrm{e}^{-2\alpha L} \tag{B.13}$$

On peut alors calculer les pertes de propagation et les coefficients de réflexion comme suit :

$$\alpha_{dB/cm} = \frac{-4,34}{2L} \ln(K_{R1}K_{R2}) \tag{B.14}$$

$$r_{12} = \sqrt{\frac{K_T}{K_{R1}}} \tag{B.15}$$

$$r_{23} = \sqrt{\frac{K_T}{K_{R2}}} \tag{B.16}$$

BIBLIOGRAPHIE

[1] G. Moore, “Progress in digital integrated electronics,” in *Electron Devices Meeting, 1975 International*, vol. 21, pp. 11–13, 1975.

[2] “Site internet de la société ASML.” http ://www.asml.com/.

[3] S. Kumar, “Fundamental limits to Moore’s law,” *Stanford University*, vol. 9, 2012.

[4] G. Moore, “Gordon Moore lors de la conférence IEEE international solid-state circuit conference intitulée "No exponential is forever : but "forever" can be delayed",” février 2003.

[5] M. Bruel, “Process for the production of thin semiconductor material films,” Dec. 1994. US Patent 5,374,564.

[6] “Site internet de la société SOITEC.” http ://www.soitec.com/.

[7] K. Alavi, “Molecular beam epitaxy,” in *Handbook of Compound Semiconductors* (P. H. Holloway and G. E. McGuire, eds.), pp. 84 – 169, Park Ridge, NJ : William Andrew Publishing, 1996.

[8] B. S. Meyerson, “Low-temperature silicon epitaxy by ultrahigh vacuum/chemical vapor deposition,” *Applied Physics Letters*, vol. 48, no. 12, pp. 797–799, 1986.

[9] S. Y. Lee and R. S. Feigelson, “C-axis Lithium Niobate thin film growth on silicon using solid-source metalorganic chemical vapor deposition,” *Journal of Materials Research*, vol. 14, pp. 2662–2667, 6 1999.

[10] M. Chauvet, L. Al Fares, B. Guichardaz, F. Devaux, and S. Ballandras, “Integrated optofluidic index sensor based on self-trapped beams in $LiNbO_3$,” *Applied Physics Letters*, vol. 101, pp. 181104–181104–4, Oct 2012.

[11] E. M. Standifer, D. Jundt, R. G. Norwood, and P. Bordui, “Chemically reduced lithium niobate single crystals : processing, properties and improvements in SAW device fabrication and performance,” in *Frequency Control Symposium, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International*, pp. 470–472, May 1998.

[12] H. Hu, J. Yang, L. Gui, and W. Sohler, “Lithium Niobate-on-insulator (LNOI) : status and perspectives,” *Proc. SPIE*, vol. 8431, pp. 84311D–84311D–8, 2012.

[13] M. Levy and R. Osgood, “Crystal ion-slicing of single-crystal films,” 2000.

[14] J. Steigerwald, S. Murarka, and R. Gutmann, *Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials*. Wiley, 2008.

[15] C.-C. Wu, R.-H. Horng, D.-S. Wuu, T.-N. Chen, S.-S. Ho, C.-J. Ting, and H.-Y. Tsai, “Thinning technology for Lithium Niobate wafer by surface activated bonding and chemical mechanical polishing,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 45, no. 4S, p. 3822, 2006.

[16] F. Schrempel, T. Gischkat, H. Hartung, T. Höche, E.-B. Kley, A. Tünnermann, and W. Wesch, “Ultrathin membranes in x-cut lithium niobate,” *Opt. Lett.*, vol. 34, pp. 1426–1428, May 2009.

[17] T. A. Rabson, R. C. Baumann, and T. A. Rost, "Thin film lithium niobate on silicon," *Ferroelectrics*, vol. 112, no. 1, pp. 265–271, 1990.

[18] N. Vasconcelos, J. Vasconcelos, V. Bouquet, S. Zanetti, E. Leite, E. Longo, L. Soledade, F. Pontes, M. Guilloux-Viry, A. Perrin, M. Bernardi, and J. Varela, "Epitaxial growth of $LiNbO_3$ thin films in a microwave oven," *Thin Solid Films*, vol. 436, no. 2, pp. 213 – 219, 2003.

[19] V. Bouquet, M. I. B. Bernardi, S. M. Zanetti, E. R. Leite, E. Longo, J. A. Varela, M. G. Viry, and A. Perrin, "Epitaxially grown $LiNbO_3$ thin films by polymeric precursor method," *Journal of Materials Research*, vol. 15, pp. 2446–2453, 11 2000.

[20] R. Betts and C. Pitt, "Growth of thin-film lithium niobate by molecular beam epitaxy," *Electronics Letters*, vol. 21, pp. 960–962(2), October 1985.

[21] R. Feigelson, "Epitaxial growth of lithium niobate thin films by the solid source MOCVD method," *Journal of Crystal Growth*, vol. 166, no. 1-4, pp. 1 – 16, 1996. Crystal Growth 1995.

[22] C. Zinck, *Technologie et Caractérisations de Films Minces Piézoélectriques pour la Réalisation de MEMS*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004.

[23] K. Wong, Institution of Electrical Engineers, and I. (Information service), *Properties of Lithium Niobate*. EMIS datareviews series, INSPEC/Institution of Electrical Engineers, 2002.

[24] M. Kadota, Y. Suzuki, and Y. Ito, "FBAR using $LiNbO_3$ thin film deposited by CVD," in *Ultrasonics Symposium (IUS), 2010 IEEE*, pp. 91–94, Oct 2010.

[25] S. Ballandras, G. Ulliac, B. Edouard-Guichardaz, F. Bassignot, and E. Courjon, "Transducteur électroacoustique à polarisation ferroélectrique périodique réalisé sur une structure verticale micro usinée," avril 2011 2013. WO Patent App. PCT/EP2012/069,709.

[26] A. A. Ayón, X. Zhang, and R. Khanna, "Anisotropic silicon trenches 300–500 μm deep employing time multiplexed deep etching (TMDE)," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 91, no. 3, pp. 381–385, 2001.

[27] X. Mellhaoui, *Mécanismes physico-chimiques dans le procédé de gravure plasma du Silicium*. PhD thesis, Université d'Orléans, 2006.

[28] K. J. Owen, B. VanDerElzen, R. Peterson, and K. Najafi, "High aspect ratio deep silicon etching," in *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2012 IEEE 25th International Conference on*, pp. 251–254, Jan 2012.

[29] E. Ng, C.-F. Chiang, Y. Yang, V. Hong, C. Ahn, and T. Kenny, "Ultra-high aspect ratio trenches in single crystal silicon with epitaxial gap tuning," in *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2013 Transducers & Eurosensors XXVII : The 17th International Conference on*, pp. 182–185, IEEE, 2013.

[30] J. Parasuraman, A. Summanwar, F. Marty, P. Basset, D. E. Angelescu, and T. Bourouina, "Deep reactive ion etching of sub-micrometer trenches with ultra high aspect ratio," *Microelectronic Engineering*, vol. 113, pp. 35–39, 2014.

[31] S. Queste, E. Courjon, G. Ulliac, R. Salut, V. Petrini, and J. Rauch, "Deep reactive ion etching of quartz, lithium niobate and lead titanate," *JNTE Proceedings*, 2008.

[32] B. Weigand, M. Stolze, F. Rubel, J. L'huillier, A. Lenhard, C. Becher, and S. Wolff, "Fabrication of ridge waveguides in $LiNbO_3$," in *Applications of Ferroelectrics held jointly with*

2012 European Conference on the Applications of Polar Dielectrics and 2012 International Symp Piezoresponse Force Microscopy and Nanoscale Phenomena in Polar Materials (ISAF/ECAPD/PFM), 2012 Intl Symp, pp. 1–4, July 2012.

[33] G. Ulliac, N. Courjal, H. Chong, and R. D. L. Rue, "Batch process for the fabrication of $LiNbO_3$ photonic crystals using proton exchange followed by CHF_3 reactive ion etching ," *Optical Materials*, vol. 31, no. 2, pp. 196 – 200, 2008.

[34] W. Yang, H.-Y. Lee, W. Kim, and D. Yoon, "Asymmetry ridge structure fabrication and reactive ion etching of $LiNbO_3$," *Optical Materials*, vol. 27, no. 10, pp. 1642 – 1646, 2005.

[35] R. Ghodssi and P. Lin, *MEMS materials and processes handbook*, vol. 1. Springer, 2011.

[36] G. Ulliac, B. Guichardaz, J.-Y. Rauch, S. Queste, S. Benchabane, and N. Courjal, "Ultrasmooth $LiNbO_3$ micro and nano structures for photonic applications ," *Microelectronic Engineering*, vol. 88, no. 8, pp. 2417 – 2419, 2011. Proceedings of the 36th International Conference on Micro- and Nano-Engineering (MNE) 36th International Conference on Micro- and Nano-Engineering (MNE).

[37] S. Benchabane, L. Robert, J.-Y. Rauch, A. Khelif, and V. Laude, "Highly selective electroplated nickel mask for lithium niobate dry etching," *Journal of Applied Physics*, vol. 105, no. 9, p. 094109, 2009.

[38] G. Si, A. J. Danner, S. L. Teo, E. J. Teo, J. Teng, and A. A. Bettiol, "Photonic crystal structures with ultrahigh aspect ratio in lithium niobate fabricated by focused ion beam milling," *Journal of Vacuum Science Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 29, pp. 021205–021205–5, Mar 2011.

[39] S. Yin, I. K. M., and A. A. S. Awwal, "High aspect ratio submicron microstructures in $LiNbO_3$: fabrication and potential applications to photonic devices," *SPIE proceedings series*, vol. 3805, pp. 40–43, 1999. eng.

[40] C. Guyot, G. Ulliac, J. Dahdah, W. Qiu, M.-P. Bernal, F. Baida, and N. Courjal, "Optical characterization of ultra-short Bragg grating on lithium niobate ridge waveguide," *Opt. Lett.*, vol. 39, pp. 371–374, Jan 2014.

[41] H. Hu, R. Ricken, W. Sohler, and R. Wehrspohn, "Lithium niobate ridge waveguides fabricated by wet etching," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 19, pp. 417–419, March 2007.

[42] H. Hu, R. Ricken, and W. Sohler, "Etching of lithium niobate : from ridge waveguides to photonic crystal structures," *ECIO, Eindhoven*, 2008.

[43] W.-L. Chen, R.-S. Chen, J. H. Lee, and W.-S. Wang, "Lithium niobate ridge waveguides by nickel diffusion and proton-exchanged wet etching," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 7, pp. 1318–1320, Nov 1995.

[44] W.-C. Chang, C.-Y. Sue, C.-L. Hsu, L.-Y. Chang, and H.-B. Lin, "Nickel-indiffused lithium niobate ridge optical waveguides fabricated by a novel self-aligned process," in *LEOS '99. IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1999 12th Annual Meeting*, vol. 2, pp. 709–710 vol.2, 1999.

[45] D. Jun, J. Wei, C. Eng Png, S. Guangyuan, J. Son, H. Yang, and A. J. Danner, "Deep anisotropic $LiNbO_3$ etching with SF_6/Ar inductively coupled plasmas," *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol. 30, no. 1, pp. –, 2012.

[46] I. E. Barry, G. W. Ross, P. G. Smith, R. W. Eason, and G. Cook, "Microstructuring of lithium niobate using differential etch-rate between inverted and non-inverted ferroelectric domains," *Materials Letters*, vol. 37, no. 4-5, pp. 246 – 254, 1998.

[47] C. L. Sones, S. Mailis, W. S. Brocklesby, R. W. Eason, and J. R. Owen, "Differential etch rates in z-cut $LiNbO_3$ for variable HF/HNO_3 concentrations," *J. Mater. Chem.*, vol. 12, pp. 295–298, 2002.

[48] C. Ruter, S. Suntsov, and D. Kip, "Ultra-smooth ridge waveguides in lithium niobate fabricated by diamond blade dicing and high temperature in-diffusion of titanium," in *Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO EUROPE/IQEC), 2013 Conference on and International Quantum Electronics Conference*, pp. 1–1, May 2013.

[49] C. Ruter, D. Kip, Y. Jia, F. Chen, S. Akhmadaliev, and S. Zhou, "Precision-dicing of Nd :YAG ridge waveguides : A new platform for efficient integrated lasers," in *Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO EUROPE/IQEC), 2013 Conference on and International Quantum Electronics Conference*, pp. 1–1, May 2013.

[50] N. Courjal, B. Guichardaz, G. Ulliac, J.-Y. Rauch, B. Sadani, H.-H. Lu, and M.-P. Bernal, "High aspect ratio lithium niobate ridge waveguides fabricated by optical grade dicing," *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 44, no. 30, p. 305101, 2011.

[51] J. Sun and C. Xu, "466 mW green light generation using annealed proton-exchanged periodically poled MgO :$LiNbO_3$ ridge waveguides," *Opt. Lett.*, vol. 37, pp. 2028–2030, Jun 2012.

[52] T. Kawaguchi, T. Yoshino, J. Kondo, A. Kondo, S. Yamaguchi, K.-I. Noda, T. Nehagi, M. Imaeda, K. Mizuuchi, and Y. Kitaoka, "High-power blue/violet QPM-SHG laser using a new ridge-type waveguide," in *Lasers and Electro-Optics, 2001. CLEO '01. Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on*, pp. 141–142, May 2001.

[53] F. Henrot, F. Bassignot, B. Guichardaz, G. Ulliac, E. Courjon, J.-Y. Rauch, T. Baron, and S. Ballandras, "Acoustic resonator based on periodically poled lithium niobate ridge," *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 60, pp. 1556–1563, 2013.

[54] J. Thiele and M. da Cunha, "Platinum and palladium high-temperature transducers on langasite," *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 52, pp. 545–549, April 2005.

[55] W. Johnson, M. Schulz, and H. Fritze, "Acoustic and electrical properties of $Ca_3TaGa_3Si_2O_{14}$ piezoelectric resonators at elevated temperatures," in *SENSORS, 2013 IEEE*, pp. 1–4, Nov 2013.

[56] W. Johnson, M. Schulz, and H. Fritze, "High-temperature electroacoustic characterization of y-cut and singly-rotated $Ca_3TaGa_3Si_2O_{14}$ resonators," *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 61, pp. 1433–1441, August 2014.

[57] K. Lakin, "Thin film resonators and filters," in *Ultrasonics Symposium, 1999. Proceedings. 1999 IEEE*, vol. 2, pp. 895–906 vol.2, 1999.

[58] C.-C. Nguyen, "MEMS technology for timing and frequency control," *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 54, pp. 251–270, February 2007.

[59] M. Rinaldi, C. Zuniga, C. Zuo, and G. Piazza, "Super-high-frequency two-port AlN contour-mode resonators for RF applications," *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 38–45, Jan 2010.

[60] P. Langevin and C. Chilowsky, "Procédés et appareils pour la production de signaux sous-marins dirigés et pour la localisation à distance d'obstacles sous-marins," 1916.

[61] X. Du, Y. Fu, S. Tan, J. Luo, A. Flewitt, S. Maeng, S. Kim, Y. Choi, D. Lee, N. Park, *et al.*, "ZnO film for application in surface acoustic wave device," in *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 76, p. 012035, IOP Publishing, 2007.

[62] A. Dow, N. Kherani, A. Ahmed, C. Popov, and U. Schmid, "Nanocrystalline diamond/AlN structures for high efficient SAW nano-resonators," in *Applications of Ferroelectrics held jointly with 2012 European Conference on the Applications of Polar Dielectrics and 2012 International Symp Piezoresponse Force Microscopy and Nanoscale Phenomena in Polar Materials (ISAF/ECAPD/PFM), 2012 Intl Symp*, pp. 1–4, July 2012.

[63] M. El Hakiki, O. Elmazria, M. Assouar, V. Mortet, L. Le Brizoual, M. Vanecek, and P. Alnot, "ZnO/AlN/diamond layered structure for SAW devices combining high velocity and high electromechanical coupling coefficient," *Diamond and related materials*, vol. 14, no. 3, pp. 1175–1178, 2005.

[64] "Site internet officiel de la société EPCOS." http ://www.epcos.fr.

[65] T. Makkonen, V. Plessky, W. Steichen, V. Grigorievski, M. Solal, and M. Salomaa, "Longitudinal leaky SAW resonators and filters on YZ-$LiNbO_3$," *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 393–401, Feb 2006.

[66] T. Makkonen, V. P. Plessky, W. Steichen, S. Chamaly, C. Poirel, M. Solal, and M. M. Salomaa, "Properties of LLSAW on YZ-cut $LiNbO_3$: modeling and experiment," in *Ultrasonics, 2003 IEEE Symposium on*, vol. 1, pp. 613–616, IEEE, 2003.

[67] P. Muralt, "Recent progress in materials issues for piezoelectric MEMS," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 91, no. 5, pp. 1385–1396, 2008.

[68] "Site internet de la société Avago Technologies." http ://www.avagotech.com/.

[69] R. Lanz, M.-A. Dubois, and P. Muralt, "Solidly mounted BAW filters for the 6 to 8 GHz range based on AlN thin films," *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, vol. 1, pp. 843–846, 2001.

[70] K. Lakin, G. Kline, and K. McCarron, "High-Q microwave acoustic resonators and filters," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 2139–2146, Dec 1993.

[71] R. Moore, J. Haynes, and B. McAvoy, "High overtone bulk resonator stabilized microwave sources," *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 414–424, 1981.

[72] "Standards on piezoelectric crystals, 1949," *Proceedings of the IRE*, vol. 37, pp. 1378–1395, Dec 1949.

[73] S. Ballandras, R. Lardat, M. Wilm, T. Pastureaud, A. Reinhardt, N. Champavert, W. Steichen, W. Daniau, V. Laude, R. Armati, and G. Martin, "A mixed finite element/boundary element approach to simulate complex guided elastic wave periodic transducers," *Journal of Applied Physics*, vol. 105, pp. 014911–014911–10, 2009.

[74] F. Bassignot, S. Ballandras, G. Ulliac, E. Courjon, and B. Guichardaz, "Transducteurs à polarisation ferroélectrique périodique pour l'excitation d'ondes élastiques guidées dans des structures verticales micro-usinés," 2011.

[75] D. M. Nguyen, *Investigations et caractérisations de fibres et guides optiques très fortement non-linéaires*. PhD thesis, Université Rennes 1, 2011.

[76] J. Teyssier, *Réalisation de guides d'ondes pour l'optique non-linéaire. Développement de nanocomposites inorganiques*. PhD thesis, Université de Savoie, 2004.

[77] L. Arizmendi, "Photonic applications of lithium niobate crystals," *physica status solidi (a)*, vol. 201, no. 2, pp. 253–283, 2004.

[78] R. V. Schmidt and I. P. Kaminow, "Metal-diffused optical waveguides in $LiNbO_3$," *Applied Physics Letters*, vol. 25, no. 8, pp. 458–460, 1974.

[79] S. Orlov, W. Grundkötter, D. Hofmann, V. Quiring, R. Ricken, H. Suche, and W. Sohler, "Mid-infrared integrated optical parametric generators and oscillators with periodically poled Ti :$LiNbO_3$ waveguides," in *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications* (M. Ebrahim-Zadeh and I. Sorokina, eds.), NATO Science for Peace and Security Series B : Physics and Biophysics, pp. 377–392, Springer Netherlands, 2008.

[80] J. Rams and J. Cabrera, "Characterization of $LiNbO_3$ waveguides fabricated by proton exchange in water," *Applied Physics A*, vol. 81, no. 1, pp. 205–208, 2005.

[81] P. Townsend, "Ion implantation and optical devices," *Vacuum*, vol. Volume 34, Issues 3-4, pp. Pages 395–398, 1984.

[82] H. Hu, F. Lu, F. Chen, B. R. Shi, K.-M. Wang, and D.-Y. Shen, "Monomode optical waveguide in lithium niobate formed by MeV Si^+ ion implantation," *Journal of Applied Physics*, vol. 89, pp. 5224–5226, May 2001.

[83] J. Burghoff, S. Nolte, and A. Tünnermann, "Origins of waveguiding in femtosecond laser-structured $LiNbO_3$," *Applied Physics A*, vol. 89, no. 1, pp. 127–132, 2007.

[84] J. Lapointe, "Ecriture de dispositifs photoniques par laser femtoseconde dans le niobate de lithium ($LiNbO_3$)," 2010.

[85] R. Thomson, S. Campbell, I. Blewett, A. Kar, and D. Reid, "Optical waveguide fabrication in z-cut lithium niobate ($LiNbO_3$) using femtosecond pulses in the low repetition rate regime," *Applied physics letters*, vol. 88, no. 11, pp. 111109–111109, 2006.

[86] R. Osellame, M. Lobino, N. Chiodo, M. Marangoni, G. Cerullo, R. Ramponi, H. T. Bookey, R. R. Thomson, N. D. Psaila, and A. K. Kar, "Femtosecond laser writing of waveguides in periodically poled lithium niobate preserving the nonlinear coefficient," *Applied Physics Letters*, vol. 90, no. 24, pp. –, 2007.

[87] E. Fazio, F. Renzi, R. Rinaldi, M. Bertolotti, M. Chauvet, W. Ramadan, A. Petris, and V. I. Vlad, "Screening-photovoltaic bright solitons in lithium niobate and associated single-mode waveguides," *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 12, pp. 2193–2195, 2004.

[88] E. Fazio, W. Ramadan, A. Petris, M. Chauvet, A. Bosco, V. Vlad, and M. Bertolotti, "Writing single-mode waveguides in lithium niobate by ultra-low intensity solitons," *Applied surface science*, vol. 248, no. 1, pp. 97–102, 2005.

[89] J. Safioui, F. Devaux, and M. Chauvet, "Pyroliton : pyroelectric spatial soliton," *Opt. Express*, vol. 17, pp. 22209–22216, Nov 2009.

[90] R. W. Eason, I. E. Barry, G. W. Ross, P. G. Smith, and C. B. Gawith, "Microstructuring in $LiNbO_3$: a route to MEMS devices in piezoelectric crystal media," in *Symposium on Applied Photonics*, pp. 124–133, International Society for Optics and Photonics, 2000.

[91] C. Sones, P. Ganguly, C. Ying, E. Soergel, R. Eason, and S. Mailis, "Poling-inhibited ridge waveguides in Lithium Niobate crystals," *Applied Physics Letters*, vol. 97, no. 15, p. 151112, 2010.

[92] H. Hu, R. Ricken, and W. Sohler, "Lithium niobate photonic wires," *Opt. Express*, vol. 17, pp. 24261–24268, Dec 2009.

[93] S. Takada, M. Ohnishi, H. Hayakawa, and N. Mikoshiba, "Optical waveguides of single-crystal $LiNbO_3$ film deposited by RF sputtering," *Applied Physics Letters*, vol. 24, no. 10, pp. 490–492, 1974.

[94] A. Yamada, H. Tamada, and M. Saitoh, "$LiNbO_3$ thin-film optical waveguide grown by liquid phase epitaxy using Li_2O-B_2O_3 flux," *Applied Physics Letters*, vol. 61, no. 24, pp. 2848–2850, 1992.

[95] K. Mizuuchi, T. Sugita, K. Yamamoto, T. Kawaguchi, T. Yoshino, and M. Imaeda, "Efficient 340 nm light generation by a ridge-type waveguide in a first-order periodically poled MgO :$LiNbO_3$," *Opt. Lett.*, vol. 28, pp. 1344–1346, Aug 2003.

[96] Y. Nishida, H. Miyazawa, M. Asobe, O. Tadanaga, and H. Suzuki, "Direct-bonded QPM-LN ridge waveguide with high damage resistance at room temperature," *Electronics Letters*, vol. 39, pp. 609–611(2), April 2003.

[97] C. E. Rüter, S. Suntsov, D. Kip, G. Stone, V. Dierolf, H. Hu, and W. Sohler, "Characterization of diced ridge waveguides in pure and Er-doped lithium-niobate-on-insulator (LNOI) substrates," vol. 8982, pp. 89821G–89821G–8, 2014.

[98] M. Fejer, G. Magel, D. H. Jundt, and R. Byer, "Quasi-phase-matched second harmonic generation : tuning and tolerances," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 28, pp. 2631–2654, Nov 1992.

[99] E. Courjon, *Transducteurs à domaines ferroélectriques alternés pour composants à ondes de surface appliqués au traitement du signal radio-fréquence par composants passifs*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2009.

[100] F. Bassignot, *Nouveau type d'oscillateur exploitant des transducteurs à domaines ferroélectriques alternés et des matériaux de guidage pour l'excitation d'ondes ultrasonores d'interface*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2011.

[101] B. F. Johnston and M. University, "Fabrication and characterization of poled ferroelectric optical crystals," 2008. Typescript.

[102] "Site internet de l'Université des Sciences Fondamentales de kaunas, Lituanie." http ://www.fmf.lt/.

[103] M. Khachane, *Etude des matériaux ferroélectriques (céramiques et couches minces à base de niobates alcalino-terreux) et multicouches ferroélectriques-catalytiques pour capteur gaz*. PhD thesis, Université du Sud Toulon Var, 2007.

[104] R. Weis and T. Gaylord, "Lithium Niobate : summary of physical properties and crystal structure," *Applied Physics A*, vol. 37, no. 4, pp. 191–203, 1985.

[105] A. Feisst and P. Koidl, "Current induced periodic ferroelectric domain structures in $LiNbO_3$ applied for efficient nonlinear optical frequency mixing," *Applied Physics Letters*, vol. 47, no. 11, pp. 1125–1127, 1985.

[106] A. Martinez, *Convertisseur en longueur d'onde intgré sur le niobate de lithium périodiquement inversé. Étude de la génération de fréquence différence indépendante de la polarisation.* PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2002.

[107] J. Webjorn, F. Laurell, and G. Arvidsson, "Blue light generated by frequency doubling of laser diode light in a lithium niobate channel waveguide," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 1, pp. 316–318, Oct 1989.

[108] M. Yamada and K. Kishima, "Fabrication of periodically reversed domain structure for SHG in $LiNbO_3$ by direct electron beam lithography at room temperature," *Electronics Letters*, vol. 27, pp. 828–829, 1991.

[109] H. Ito, C. Takyu, and H. Inaba, "Fabrication of periodic domain grating in $LiNbO_3$ by electron beam writing for application of nonlinear optical processes," *Electronics Letters*, vol. 27, pp. 1221–1222, 1991.

[110] C. Restoin, C. Darraud-Taupiac, J. L. Decossas, J. C. Vareille, J. Hauden, and A. Martinez, "Ferroelectric domain inversion by electron beam on $LiNbO_3$ and Ti :$LiNbO_3$," *Applied Physics Letters*, vol. 88, no. 11, pp. 6665–6668, 2000.

[111] G. D. Miller, *Periodically Poled Lithium Niobate : modeling, fabrication, and nonlinear-optical performance*. PhD thesis, Stanford University, 1998.

[112] J. H. Ro and M. Cha, "Subsecond relaxation of internal field after polarization reversal in congruent $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$ crystals," *Applied Physics Letters*, vol. 77, no. 15, pp. 2391–2393, 2000.

[113] V. Gopalan, N. A. Sanford, J. A. Aust, K. Kitamura, and Y. Furukawa, *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*. 2000.

[114] T. Verbiest, K. Clays, and V. Rodriguez, *Second-order Nonlinear Optical Characterization Techniques : An Introduction*. Taylor & Francis, 2009.

[115] P. Franken, A. Hill, C. Peters, and G. Weinreich, "Generation of optical harmonics," *Physical Review Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 118–119, 1961.

[116] D. Feng, N.-B. Ming, J.-F. Hong, Y.-S. Yang, J.-S. Zhu, Z. Yang, and Y.-N. Wang, "Enhancement of second-harmonic generation in $LiNbO_3$ crystals with periodic laminar ferroelectric domains," *Applied Physics Letters*, vol. 37, no. 7, pp. 607–609, 1980.

[117] D. S. Hum and M. M. Fejer, "Quasi-phasematching," *Comptes Rendus Physique*, vol. 8, no. 2, pp. 180–198, 2007.

[118] R. Maciejko, *Introduction à l'optique quantique*. Presses internationales Polytechnique, 2008.

[119] L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer, R. L. Byer, W. R. Bosenberg, and J. W. Pierce, "Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled $LiNbO_3$," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 12, pp. 2102–2116, Nov 1995.

[120] R. Kou, S. Kurimura, K. Kikuchi, A. Terasaki, H. Nakajima, K. Kondou, and J. Ichikawa, "High-gain, wide-dynamic-range parametric interaction in Mg-doped $LiNbO_3$ quasi-phase-matched adhered ridge waveguide," *Opt. Express*, vol. 19, pp. 11867–11872, Jun 2011.

[121] W. Risk, T. Gosnell, and A. Nurmikko, *Compact Blue-Green Lasers*. Cambridge studies in modern optics, Cambridge University Press, 2003.

[122] H. Vanherzeele and J. D. Bierlein, "Magnitude of the nonlinear-optical coefficients of $KTiOPO_4$," *Opt. Lett.*, vol. 17, pp. 982–984, Jul 1992.

[123] Y.-R. Shen, "The principles of nonlinear optics," *New York, Wiley-Interscience, 1984, 575 p.*, vol. 1, 1984.

[124] M. Chou, J. Hauden, M. Arbore, and M. Fejer, "1.5-μm-band wavelength conversion based on difference-frequency generation in $LiNbO_3$ waveguides with integrated coupling structures," *Optics letters*, vol. 23, no. 13, pp. 1004–1006, 1998.

[125] Y. Shen, "Surface properties probed by second-harmonic and sum-frequency generation," *Nature*, vol. 337, pp. 519–525, 1989.

[126] S. Ballandras, W. Daniau, B. Gautier, D. Hauden, M. Wilm, V. Laude, V. Ruch, and S. Flambart, "A novel surface wave transducer based on periodically poled piezoelectric domain," *Proceedings of the IEEE Frequency Control Symposium*, pp. 893–896, 2003.

[127] L. Brillouin, "Diffusion de la lumière et des rayons X par un corps transparent homogène influence de l'agitation thermique.," *Annales de physique*, vol. 17, pp. 88–122, 1922.

[128] J. Sapriel, *L'acousto-optique*. Collection de monographies de physique, Masson, 1976.

[129] Berg, *Acousto-Optic Signal Processing : Theory and Implementation, Second Edition*. Optical Science and Engineering, Taylor & Francis, 1995.

[130] "Site internet de la société AA OPTO-ELECTRONIC." http ://www.aaoptoelectronic.com/.

[131] N. Courjal, S. Benchabane, J. Dahdah, G. Ulliac, Y. Gruson, and V. Laude, "Acousto-optically tunable lithium niobate photonic crystal," *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 13, pp. –, 2010.

[132] Z.-Y. Yu, F. Xu, F. Leng, X.-S. Qian, X.-F. Chen, and Y.-Q. Lu, "Acousto-optic tunable second harmonic generation in periodically poled $LiNbO_3$," *Optics Express*, vol. 17, p. 11965, July 2009.

[133] H. Gnewuch, N. K. Zayer, C. N. Pannell, G. W. Ross, and P. G. R. Smith, "Broadband monolithic acousto-optic tunable filter," *Opt. Lett.*, vol. 25, pp. 305–307, Mar 2000.

[134] D. Yudistira, D. Janner, S. Benchabane, and V. Pruneri, "Integrated acousto-optic polarization converter in a ZX-cut $LiNbO_3$ waveguide superlattice," *Opt. Lett.*, vol. 34, pp. 3205–3207, Oct 2009.

[135] "Site internet de la société Disco." http ://www.disco.co.jp/.

[136] A. Ballato, "Polarization matrices of lithium niobate," tech. rep., DTIC Document, 1989.

[137] N. Courjal, F. Henrot, A. Gerthoffer, J.-Y. Rauch, C. Guyot, and B. Guichardaz, "Méthode de fabrication d'un guide d'onde optique à structure "ridge" à faibles pertes de couplage entre le guide d'onde optique à structure "ridge" et une fibre optique, et guide d'onde optique à structure "ridge" fabriqué par cette méthode," 2014.

[138] N. Frank, *Adhesive Wafer Bonding for Microelectronic and Microelectromechanical Systems*. PhD thesis, KTH, Signals, Sensors and Systems, 2002.

[139] K. Tanaka, T. Konishi, M. Ide, and S. Sugiyama, "Wafer bonding of lead zirconate titanate to Si using an intermediate gold layer for microdevice application," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, no. 4, p. 815, 2006.

[140] "Site internet de la société Eleco Produits-EFD, filiale du goupe Panacol Elosol ltd." http ://www.eleco-produits.fr/.

[141] "Site internet de la société Panacol-Elosol GmbH." http ://www.panacol.com/.

[142] G. Dhatt, E. Lefrançois, and G. Touzot, *Finite Element Method*. ISTE, Wiley, 2012.

[143] "Site internet de la société Comsol." http ://www.comsol.com/.

[144] S. Ballandras, V. Laude, T. Pastureaud, M. Wilm, W. Daniau, A. Reinhardt, W. Steichen, and R. Lardat, "A FEA/BEM approach to simulate complex electrode structures devoted to guided elastic wave periodic transducers," in *Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings. 2002 IEEE*, vol. 1, pp. 321–324 vol.1, Oct 2002.

[145] N. Chrétien, J.-M. Friedt, G. Martin, and S. Ballandras, "Acoustic transducers as passive sensors probed through a wireless radiofrequency link," *Instrumentation, Mesure, Métrologie*, vol. 13(3-4), 2013.

[146] G. Douchet, *Contribution à l'étude des matériaux piézoélectriques de synthèse LGS et LGT pour des applications micro-résonateurs basse fréquence*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2010.

[147] "Site internet de l'université du Maine, cours sur les filtres passifs de Pr. J-J Rousseau." http ://www.univ-lemans.fr/.

[148] M. Chatras, S. Bila, S. Giraud, L. Catherinot, J. Fan, D. Cros, M. Aubourg, A. Flament, A. Frappé, B. Stefanelli, *et al.*, "Modeling and design of BAW resonators and filters for integration in a UMTS transmitter," *Modeling and measurement methods for acoustic waves and for acoustic microdevices*, 2013.

[149] I. P. Kaminow, V. Ramaswamy, R. V. Schmidt, and E. H. Turner, "Lithium niobate ridge waveguide modulator," *Applied Physics Letters*, vol. 24, no. 12, pp. 622–624, 1974.

[150] R. Navalakhe, N. Dasgupta, and B. Das, "Fabrication and characterization of single-mode optical waveguide in silicon-on-insulator," in *Proc. Photonics-2008 : International Conference on Fiber Optics and Photonics, December*, pp. 13–17, 2008.

[151] N. Courjal, J. Dahdah, G. Ulliac, P. Sevillano, B. Guichardaz, and F. Baida, "Optimization of $LiNbO_3$ photonic crystals : toward 3D $LiNbO_3$ micro-components," *Opt. Express*, vol. 19, pp. 23008–23016, Nov 2011.

[152] H. Lu, B. Sadani, G. Ulliac, N. Courjal, C. Guyot, J. M. Merolla, M. Collet, F. I. Baida, and M.-P. Bernal, "6-micron interaction length electro-optic modulation based on Lithium Niobate photonic crystal cavity," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 20884–20893, Sep 2012.

[153] H. Lu, B. Sadani, G. Ulliac, C. Guyot, N. Courjal, M. Collet, F. I. Baida, and M.-P. Bernal, "Integrated temperature sensor based on an enhanced pyroelectric photonic crystal," *Opt. Express*, vol. 21, pp. 16311–16318, Jul 2013.

[154] "Site internet de la société Corning." www.corning.com.

[155] V. Dobrusin, S. Ruschin, and L. Shpisman, "Fabrication method of low-loss large single mode ridge Ti :$LiNbO_3$ waveguides," *Optical Materials*, vol. 29, no. 12, pp. 1630 – 1634, 2007.

[156] H. Hu, R. Ricken, and W. Sohler, "Low-loss ridge waveguides on lithium niobate fabricated by local diffusion doping with titanium," *Applied Physics B*, vol. 98, no. 4, pp. 677–679, 2010.

[157] "Site internet de la société Chiral Photonics." http ://www.chiralphotonics.com/.

[158] M. Galarza Galarza, *Leaky-waveguide-based integrated spot-size converters for alignment-tolerant optical fiber coupling.* PhD thesis, Ghent University, 2002.

[159] R. R. Syms and J. R. Cozens, *Optical guided waves and devices*. McGraw-Hill London, 1992.

[160] E. Mägi, P. Steinvurzel, and B. Eggleton, "Tapered photonic crystal fibers," *Opt. Express*, vol. 12, pp. 776–784, Mar 2004.

[161] E. Khoo, A. Liu, and J. Wu, "Nonuniform photonic crystal taper for high-efficiency mode coupling," *Opt. Express*, vol. 13, pp. 7748–7759, Oct 2005.

[162] D. Dai, Y. Tang, and J. E. Bowers, "Mode conversion in tapered submicron silicon ridge optical waveguides," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 13425–13439, Jun 2012.

[163] G. Jeong, D. Kim, J. Choi, D. Lee, M.-Y. Park, J.-B. Kim, H. J. Lee, and H.-Y. Lee, "Low-loss compact arrayed waveguide grating with spot-size converter fabricated by a shadow-mask etching technique," *ETRI journal*, vol. 27, no. 1, pp. 89–94, 2005.

[164] D. Taillaert, W. Bogaerts, P. Bienstman, T. Krauss, P. van Daele, I. Moerman, S. Verstuyft, K. De Mesel, and R. Baets, "An out-of-plane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 38, pp. 949–955, Jul 2002.

[165] M. Verbist, W. Bogaerts, J. Schrauwen, and R. Baets, "Silicon-on-insulator-based retroreflective optical marker chips for simultaneous identification and localization," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 15, no. 5, p. 1427, 2009.

[166] G. Roelkens, D. Vermeulen, D. Van Thourhout, R. Baets, S. Brision, P. Lyan, P. Gautier, and J.-M. Fédéli, "High efficiency diffractive grating couplers for interfacing a single mode optical fiber with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit," *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 13, pp. –, 2008.

[167] F. Soares, F. Karouta, E. Geluk, J. v. Zantvoort, H. d. Waardt, and M. Smit, "Extremely low-loss vertically-tapered spot size converter in InP-based waveguide structure.," in *Proceedings of the 9th Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter*, pp. pp. 127–130, December 2004.

[168] F. Soares, F. Karouta, E. Geluk, J. van Zantvoort, H. de Waardt, R. Baets, and M. Smit, "Low-loss InP-based spot-size converter based on a vertical taper," in *12th European Conference on Integrated Optics (Grenoble, France, 2005)*, pp. 104–107, 2005.

[169] L.-H. Li, M. Sugiyama, Y. Nakano, and A. Higo, "Monolithically integrated low-loss three-dimensional spot-size converter and silicon photonic waveguides constructed by nanotuned bosch process and oxidation," *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, vol. 10, no. 2, pp. 023002–023002, 2011.

[170] G. Y. Wang and E. Garmire, "Efficient coupling into tapered proton-exchanged $LiNbO_3$ waveguides fabricated by vertically controlled immersion," *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 42–44, Jan 1996.

[171] K. Shinoda, K. Hiramoto, M. Sagawa, T. Toyonaka, and K. Uomi, "Circular beam, high power operation of 0.98 μm InGaAs/InGaAsP lasers with a tapered waveguide spot-size expander," *Electronics Letters*, vol. 32, pp. 1101–1102, Jun 1996.

[172] P. Doussiere, P. Garabedian, C. Graver, E. Derouin, E. Gaumont-Goarin, G. Michaud, and R. Meilleur, "Tapered active stripe for 1.5-μm ingaasp/inp strained multiple quantum well lasers with reduced beam divergence," *Applied Physics Letters*, vol. 64, no. 5, pp. 539–541, 1994.

[173] C. Guyot, G. . Ulliac, A. Gerthoffer, J. Dahdah, F. Henrot, B. Sadani, M.-P. Bernal, F. Baida, and C. N., "Caractérisation optique de réseaux de Bragg $LiNbO_3$ ultra-courts," in *Proceeding of JNTE*, 2013.

[174] N. Courjal, F. Henrot, C. Guyot, and E. Fizaine, "Méthode de fabrication d'un guide photonique et guide photonique fabriqué par cette méthode," décembre 2014.

[175] R. Boyd, *Nonlinear Optics*. Elsevier Science, 2003.

[176] J. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing, and P. Pershan, "Interactions between light waves in a nonlinear dielectric," *Physical Review*, vol. 127, no. 6, p. 1918, 1962.

[177] C. J. van der Poel, J. D. Bierlein, J. B. Brown, and S. Colak, "Efficient type I blue second-harmonic generation in periodically segmented $KTiOPO_4$ waveguides," *Applied Physics Letters*, vol. 57, no. 20, pp. 2074–2076, 1990.

[178] E. Lim, M. Fejer, and R. Byer, "Second-harmonic generation of green light in periodically poled planar Lithium Niobate waveguide," *Electronics Letters*, vol. 25, pp. 174–175, February 1989.

[179] S. Matsumoto, E. Lim, H. Hertz, and M. Fejer, "Quasiphase-matched second harmonic generation of blue light in electrically periodically-poled lithium tantalate waveguides," *Electronics Letters*, vol. 27, pp. 2040–2042, Oct 1991.

[180] R. Levy and J. Jonathan, *Optique non linéaire et ses matériaux*. SFO, EDP Sciences, 2012.

[181] K. Sakai, Y. Koyata, and Y. Hirano, "Planar-waveguide quasi-phase-matched second-harmonic-generation device in Y-cut MgO-doped $LiNbO_3$," *Opt. Lett.*, vol. 31, pp. 3134–3136, Nov 2006.

[182] J.-P. Meyn and M. Fejer, "Tunable ultraviolet radiation by second-harmonic generation in periodically poled lithium tantalate," *Optics letters*, vol. 22, no. 16, pp. 1214–1216, 1997.

[183] L. A. Eyres, P. J. Tourreau, T. J. Pinguet, C. B. Ebert, J. S. Harris, M. M. Fejer, L. Becouarn, B. Gerard, and E. Lallier, "All-epitaxial fabrication of thick, orientation-patterned GaAs films for nonlinear optical frequency conversion," *Applied Physics Letters*, vol. 79, no. 7, pp. 904–906, 2001.

[184] J. Sun, Y. Gan, and C. Xu, "Efficient green-light generation by proton-exchanged periodically poled MgO :$LiNbO_3$ ridge waveguide," *Opt. Lett.*, vol. 36, pp. 549–551, Feb 2011.

[185] R. Tilley, *Understanding Solids : The Science of Materials*. Wiley, 2013.

[186] R. Giust, J.-M. Vigoureux, and M. Sarrazin, "Asymmetrical properties of the optical reflection response of the Fabry–Pérot interferometer," *JOSA A*, vol. 17, no. 1, pp. 142–148, 2000.

Résumé :

La miniaturisation est l'objectif actuel de tous les fabricants de composants radio-fréquence depuis plusieurs décennies. Si les composants actifs pour la microélectronique sont fondés sur la structuration de plaques de silicium, les composants passifs reposent sur l'utilisation de cristaux tels que le quartz ou le niobate de lithium. Ce dernier est particulièrement utilisé quand il s'agit de générer et exploiter des ondes élastiques, ainsi que pour le guidage de faisceaux lumineux afin de réaliser des filtres ou des capteurs sensibles à différents paramètres environnementaux. L'amélioration du guidage de ces ondes permet un gain en consommation et en compacité des dispositifs mais nécessite une structuration de la matière souvent tridimensionnelle. Cette étape technologique clé est industriellement mature pour la mise en forme du silicium, mais s'avère difficilement transposable à des matériaux tels que le quartz ou le niobate de lithium. Les travaux présentés dans ce manuscrit visent à réaliser des structures tridimensionnelles à hauts facteurs de forme dans des matériaux monocristallins à l'aide d'une scie circulaire de précision. Des structures utilisant l'inversion périodique de domaine ferroélectrique seront réalisées afin de les utiliser pour y guider des ondes élastiques possédant des couplages électromécaniques particulièrement élevées. Le guidage d'ondes optiques par le biais de ces mêmes structures permet une amélioration du confinement par rapport aux systèmes de guidage massifs classiques couramment utilisés pour la réalisation de filtre ou de modulateur électro-optiques. En utilisant conjointement le guidage d'ondes optiques et les domaines ferroélectriques alternés, les structures ainsi découpées permettent l'apparition de phénomènes optiques non-linéaires exaltés par l'amélioration du confinement. Ces structures ont ainsi montré leur intérêt dans plusieurs domaines de la physique avec un champ applicatif particulièrement vaste.

Mots-clés : Niobate de lithium, Hauts facteurs de forme, Guides d'ondes, Transducteurs polarisés périodiquement

Abstract:

Over the past decades, minutiarization and compacity have become a focus subject for companies specialised in the manufacturing of radio-frequency components. Active components are typically manuafctured on silicon wafers with well-known structuring methods. Passive ones are often manufactured on single cristal such as Quartz or Lithium Niobate, especially for acoustic wave generation or lightwave guiding. The guiding of optical or acoustical waves leads to the manufacturing of sensors or filters which can be used for telecommunications or for the industry. Improvement in waveguiding allows for less power-consuming and more compact devices but a 3D-structuring is usually required. This technology readness is high leveled for silicon structuring but not for single crystals such as Lithium Niobate. This work presents the development and the manufacturing of high aspect ratio three-dimensionnal structures in single-crystals using precise sawing. These structures show an optical waveguiding capability which allow the improvements of electro-optic modulators or filters. Combined with a periodic reversing of Lithium Niobate polarization, these structures allows for bulk acoustic wave generation leading to high electromechanical coupling and equivalent phase velocity resonant modes. In non-linear optic field, this kind of structures lead to the improvement of second harmonic generation efficiency by reducing the cross section of waveguide. The manufactured devices in the framework of this project can actuelly be used in several domains of physic.

Keywords: Lithium Niobate, High aspect ratio, waveguide, periodically poled transducers

■ École doctorale SPIM 16 route de Gray F - 25030 Besançon cedex
■ tél. +33 (0)3 81 66 66 02 ■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr

UFC UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ