

Guidage et filtrage des ondes dans les cristaux phononiques

Sarah Benchabane

Mercredi 6 décembre 2006

Institut FEMTO-ST, Département LPMO

1987 : les cristaux phoToniques

- 1987 : émergence des cristaux *phoToniques* (S. John, E. Yablonovitch, *PRL* **58**, 1987)
 - Démonstrations expérimentales 3D/2D
 - Composants optiques viables

Ondes de volume

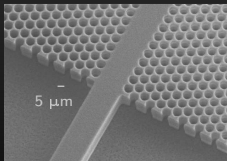
Bandes interdites complètes
Fonctions de guidage et de démultiplexage

Ondes de surface

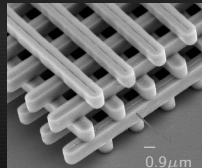
LiNbO₃
Silicium

Acousto-optique

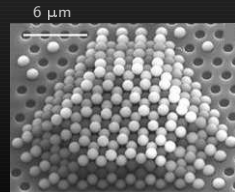
Conclusion et perspectives



www.iap-jena.de



www.sandia.gov



F. Garcia-Santamaria *et al.*,
Adv. Mat. Lett. **14**, 1144 (2002)

1987 : les cristaux phoToniques

- 1987 : émergence des cristaux *phoToniques* (S. John, E. Yablonovitch, *PRL* **58**, 1987)
 - Démonstrations expérimentales 3D/2D
 - Composants optiques viables

Ondes de volume

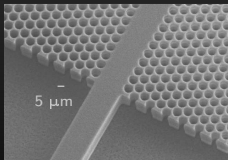
Bandes interdites complètes
Fonctions de guidage et de démultiplexage

Ondes de surface

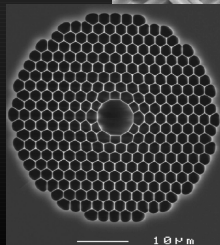
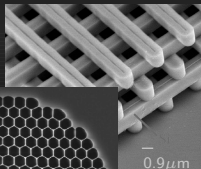
LiNbO₃
Silicium

Acousto-optique

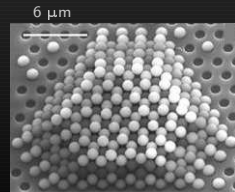
Conclusion et perspectives



www.iap-jena.de



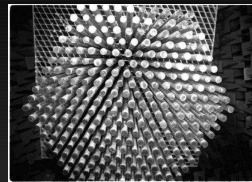
www.crystal-fibre.com



F. Gacia-Santamaria *et al.*,
Adv. Mat. Lett. **14**, 1144 (2002)

1993 : Les cristaux *phoNoniques*

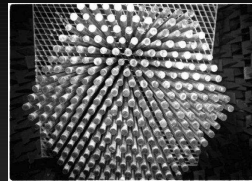
- Analogues élastiques des cristaux photoniques
 - Structures 2- ou 3D constituées de deux matériaux distincts
- Kushwaha *et al.*, PRL 71, 2022 (1993)
Sigalas & Economou, SSC 86, 141 (1993)



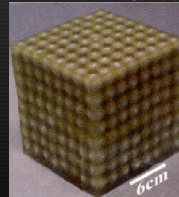
F. Cervera *et al.*, PRL 88,
023902 (2002)

1993 : Les cristaux *phoNoniques*

- Analogues élastiques des cristaux photoniques
 - Structures 2- ou 3D constituées de deux matériaux distincts
 - Kushwaha *et al.*, PRL 71, 2022 (1993)
 - Sigalas & Economou, SSC 86, 141 (1993)
- Comportement similaire
 - Miroirs parfaits



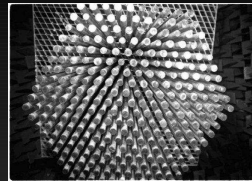
F. Cervera *et al.*, PRL 88,
2002)



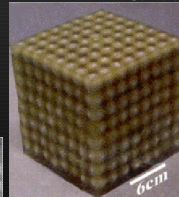
Z. Liu *et al.*, Science
289, 1734 (2000)

1993 : Les cristaux *phoNoniques*

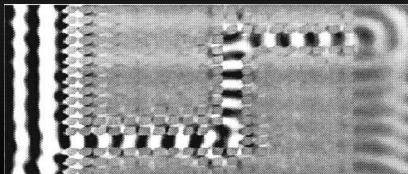
- Analogues élastiques des cristaux photoniques
 - Structures 2- ou 3D constituées de deux matériaux distincts
 - Kushwaha *et al.*, PRL 71, 2022 (1993)
 - Sigalas & Economou, SSC 86, 141 (1993)
- Comportement similaire
 - Miroirs parfaits
 - Confinement de l'énergie
 - Guides



F. Cervera *et al.*, PRL 88, 2002)



Z. Liu *et al.*, Science 289, 1734 (2000)



A. Khelif *et al.*, APL, 84, 4400 (2004)

Du macroscopique au microscopique

- Très large gamme de fréquences de fonctionnement

- Soniques

($\sim\text{cm} - \sim\text{Hz-kHz}$)

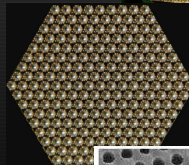
- R. Martinez-Sala *et al.*,
Nature 378, 241 (1995)



- Ultrasonores

($\sim\text{mm} - \sim\text{MHz}$)

- S. Yang *et al.*,
PRL 93, 024301 (2002)

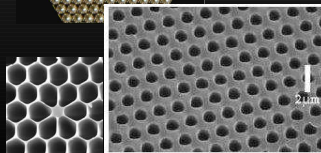


- Hypersoniques

($\sim \mu\text{m} - \sim\text{GHz}$)

Gorishnyy *et al.*, PRL 94, 115501, 2003

Dainese *et al.*, OE 14, 4141, 2006



Jusqu'à présent

- Développements importants d'outils théoriques adaptés
- Bandes interdites dans des cristaux 2- et 3D
- Phénomènes acoustiques originaux

La plupart des travaux concernent les fréquences audibles ou ultrasonores et généralement appliqués aux ondes de volume

Plan de l'exposé

Cristaux phononiques ultrasonores pour les ondes de volume

Bandes interdites complètes

Fonctions de guidage et de démultiplexage

Cristaux phononiques pour les ondes de surface

Cristal phononique piézoélectrique

Cristal phononique en silicium

Acousto-optique dans les matériaux à bandes interdites

Conclusion et perspectives

Plan de l'exposé

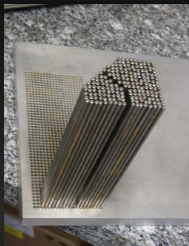
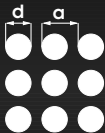
Cristaux phononiques ultrasonores pour les ondes de volume
Bandes interdites complètes
Fonctions de guidage et de démultiplexage

Cristaux phononiques pour les ondes de surface
Cristal phononique piézoélectrique
Cristal phononique en silicium

Acousto-optique dans les matériaux à bandes interdites

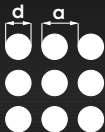
Conclusion et perspectives

Cristaux phononiques pour les ondes de volume



- Tiges d'acier dans l'eau
 - Très fort contraste de propriétés élastiques (densité/vitesses)
- Réseau carré $a = 3\text{mm}$

Cristaux phononiques pour les ondes de volume



- Tiges d'acier dans l'eau
 - Très fort contraste de propriétés élastiques (densité/vitesses)
- Réseau carré $a = 3\text{mm}$

Ondes de volume

Bandes interdites complètes

Fonctions de guidage et de démultiplexage

Ondes de surface

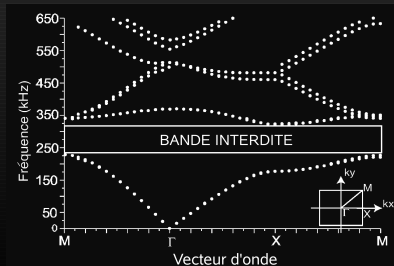
LiNbO₃
Silicium

Acousto-optique

Conclusion et perspectives

● Dimensionnement par FDTD

- Diagrammes de bandes
- **Transmission**
- **Champ de déplacement**



Guidage et filtrage des ondes dans les cristaux phononiques

Sarah Benchabane

Ondes de volume

Bandes interdites complètes

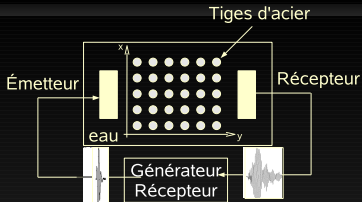
Fonctions de guidage et de démultiplexage

Ondes de surface

LiNbO₃
Silicium

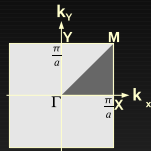
Acousto-optique

Conclusion et perspectives



Bande interdite

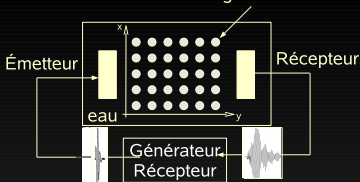
Deux directions de propagation (isotrope) : ΓX , ΓM



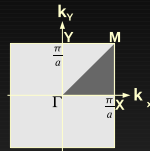
Guidage et filtrage des ondes dans les cristaux phononiques

Sarah Benchabane

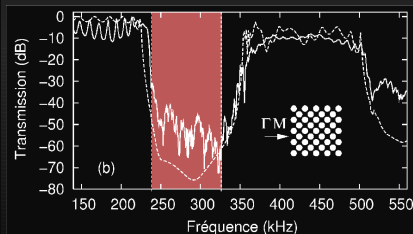
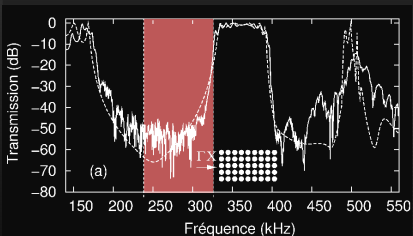
Tiges d'acier



Bande interdite



Deux directions de propagation (isotrope) : ΓX , ΓM



Bande interdite complète pour les ondes de volume

240-325 kHz

Khelif *et al.*, PRB 68, 214301 (2003)

Ondes de volume

Bandes interdites complètes

Fonctions de guidage et de démultiplexage

Ondes de surface

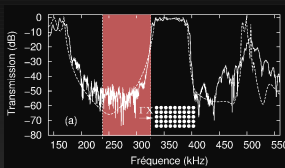
LiNbO₃
Silicium

Acousto-optique

Conclusion et perspectives

Guidage

- Suppression d'une rangée de cylindres – guide d'ondes



Ondes de volume

Bandes interdites complètes

Fonctions de guidage et de démultiplexage

Ondes de surface

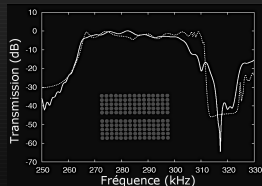
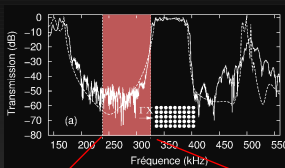
LiNbO₃
Silicium

Acousto-optique

Conclusion et perspectives

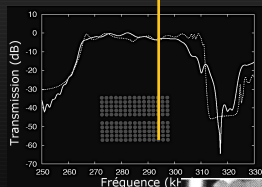
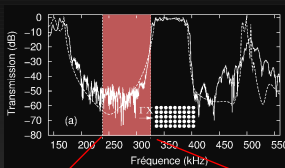
Guidage

- Suppression d'une rangée de cylindres – guide d'ondes

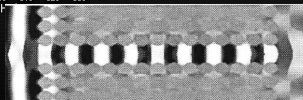


Guidage

- Suppression d'une rangée de cylindres – guide d'ondes



- Champ de déplacement
 $f = 287$ kHz



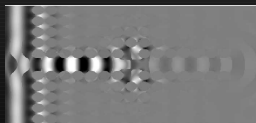
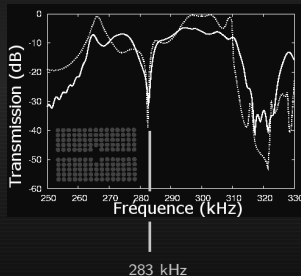
Khelif *et al.*, APL 84, 4400 (2004)

Insertion de résonateurs



- Couplage guide – résonateur

- Zéro de transmission à la résonance



283 kHz

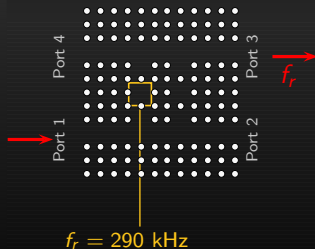


Réjection de l'énergie à l'entrée du guide

Applications potentielles

- Démultiplexage en longueur d'onde

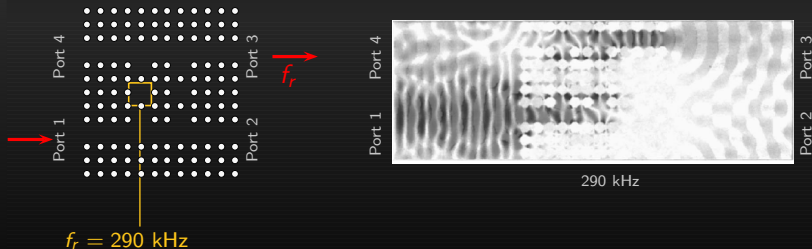
Travaux réalisés dans le cadre d'une collaboration IEMN/FEMTO-ST



Applications potentielles

- Démultiplexage en longueur d'onde

Travaux réalisés dans le cadre d'une collaboration IEMN/FEMTO-ST



Couplage guide 1 - guide 2
Démultiplexage en longueurs d'onde

Pennec *et al.*, APL 87, 261912 (2005)

Plan de l'exposé

Cristaux phononiques ultrasonores pour les ondes de volume
Bandes interdites complètes
Fonctions de guidage et de démultiplexage

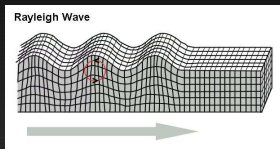
Cristaux phononiques pour les ondes de surface
Cristal phononique piézoélectrique
Cristal phononique en silicium

Acousto-optique dans les matériaux à bandes interdites

Conclusion et perspectives

Bandes interdites pour les ondes élastiques de surface

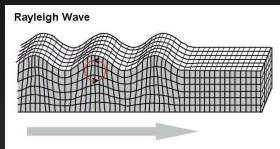
Ondes de surface (SAW)



- Confinement intrinsèque des ondes élastiques dans la direction normale à la surface

Bandes interdites pour les ondes élastiques de surface

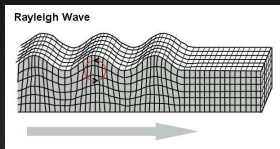
Ondes de surface (SAW)



- Confinement intrinsèque des ondes élastiques dans la direction normale à la surface
- Génération et détection par **transducteurs à peignes interdigités** (IDT's) sur substrat piézoélectrique

Bandes interdites pour les ondes élastiques de surface

Ondes de surface (SAW)

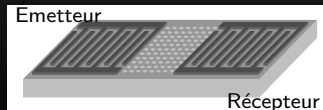


- Confinement intrinsèque des ondes élastiques dans la direction normale à la surface

- Génération et détection par **transducteurs à peignes interdigités** (IDT's) sur substrat piézoélectrique

Cristaux phononiques de surface

- Structuration 2D autorise un **confinement quasi-3D**
- Expériences illustratives



État de l'art

- Étude théorique de la propagation des modes de surface
 - Tanaka & Tamura, PRB 58, 7948 (1998) – PRB 60, 13294 (1999)
- Mise en évidence **théorique** de l'existence de bandes interdites complètes
 - V. Laude *et al.*, PRE 71, 03667 (2005)
- Démonstrations expérimentales
 - Plaque de marbre – Meseguer *et al.*, PRB59, 12169 (1999)
 - Ondes de surface de l'eau – Jeong *et al.*, APL 85, 1645 (2004)
 - **Bande d'arrêt directionnelle** dans un cristal **micronique** (ZnO/Si) – Wu *et al.*, JAP 97, 094916 (2005)

Cristal phononique en LiNbO_3

- Coefficients piézoélectriques élevés
- Nombreuses propriétés physiques
 - électro-optique, acousto-optique, non-linéaire...
- Largement répandu en optique intégrée



À terme : bon candidat à la mise en place
d'interactions acousto-optiques

Conditions d'obtention de bandes interdites complètes

- Très forts contrastes de propriétés élastiques
Solide/Vide

Mais...

Ondes de
volume

Bandes
interdites
complètes

Fonctions de
guidage et de
démultiplexage

Ondes de
surface

LiNbO₃
Silicium

Acousto-
optique

Conclusion et
perspectives

Conditions d'obtention de bandes interdites complètes

- Très forts contrastes de propriétés élastiques
Solide/Vide

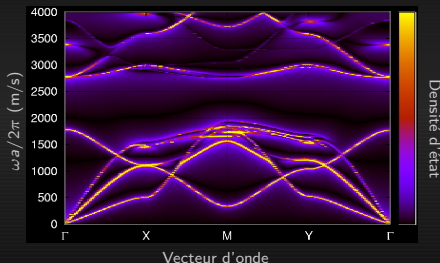
Mais...

- Contrastes de vitesses et de densités
- Forte anisotropie
- Modes longitudinaux (compression) et transverses (cisaillement) fortement couplés

Conception



- Réseau carré
- Décomposition en ondes planes – ondes de surface



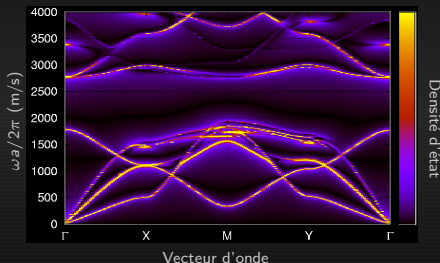
Coïncidence des positions et largeurs des bandes interdites pour les ondes de volume et pour les ondes de surface



Conception



- Réseau carré
- Décomposition en ondes planes – ondes de surface



Coïncidence des positions et largeurs des bandes interdites pour les ondes de volume et pour les ondes de surface

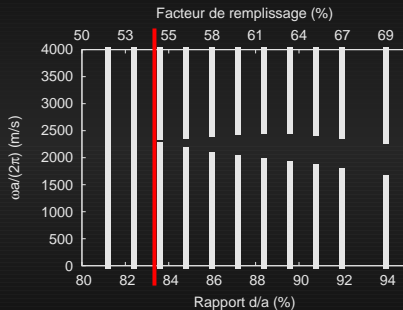
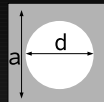


Utilisation d'un modèle éléments finis pour les ondes de volume

Conception (2)

Facteur de remplissage critique

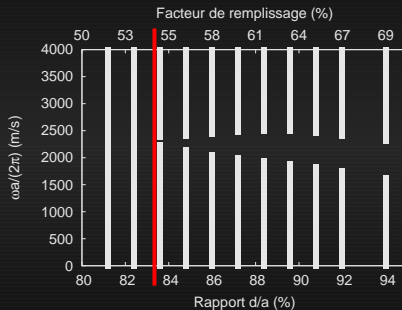
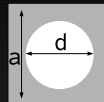
- Rapport diamètre sur période $\geq 0,84$



Conception (2)

Facteur de remplissage critique

- Rapport diamètre sur période $\geq 0,84$



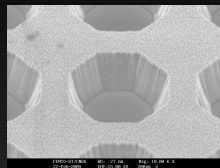
Fréquence de fonctionnement visée : 200 MHz

- Constante de maille : 10 μm
- Diamètre des trous : 9 μm
- Largeur relative : $\Delta f/f = 0,35$

Fabrication

Procédé de fabrication

- Niobate de lithium en coupe Y
- Gravure ionique réactive SF_6
- 2 μbar
- 200 W
- Vitesse de gravure : $50 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$



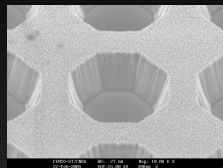
$$d = 16 \mu\text{m}$$

$$p = 10 \mu\text{m}$$

Fabrication

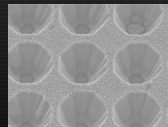
Procédé de fabrication

- Niobate de lithium en coupe Y
- Gravure ionique réactive SF₆
- 2 μbar
- 200 W
- Vitesse de gravure : 50 nm.min⁻¹
- Masque de **nickel électrolytique** (sélectivité : 20:1)
- Pente de gravure significative
- Facteur de forme max : 1,5



$d = 16 \mu\text{m}$
 $p = 10 \mu\text{m}$

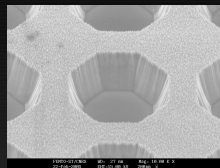
$d = 9 \mu\text{m}$
 $p = 10 \mu\text{m}$



Fabrication

Procédé de fabrication

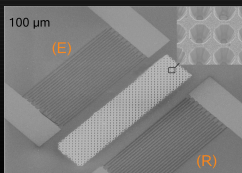
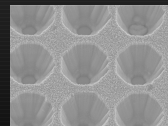
- Niobate de lithium en coupe Y
- Gravure ionique réactive SF₆
- 2 μ bar
- 200 W
- Vitesse de gravure : 50 nm.min⁻¹



$d = 16 \mu\text{m}$
 $p = 10 \mu\text{m}$

- Masque de **nickel électrolytique** (sélectivité : 20:1)
- Pente de gravure significative
- Facteur de forme max : 1,5

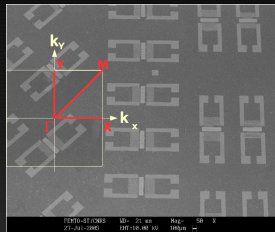
$d = 9 \mu\text{m}$
 $p = 10 \mu\text{m}$



- Lithographie optique
- Cristal de 10 périodes de long

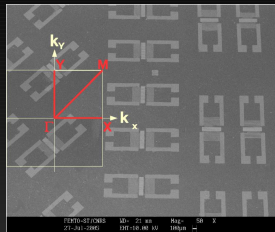
Caractérisations électriques

- Directions principales de la zone de Brillouin irréductible (ΓX , ΓM , ΓY)

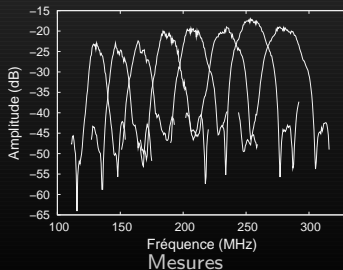
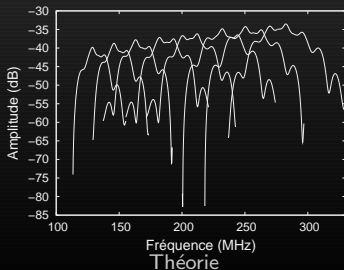


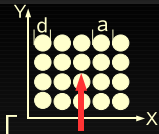
Caractérisations électriques

- Directions principales de la zone de Brillouin irréductible (ΓX , ΓM , ΓY)
- 8×3 lignes à retard

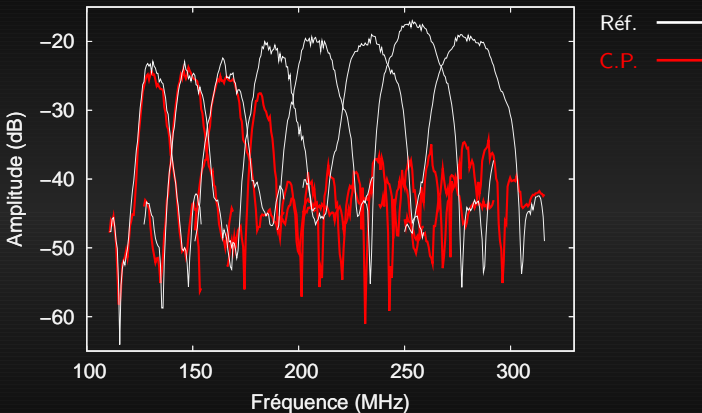


Source "large bande"

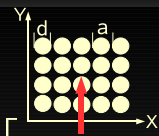




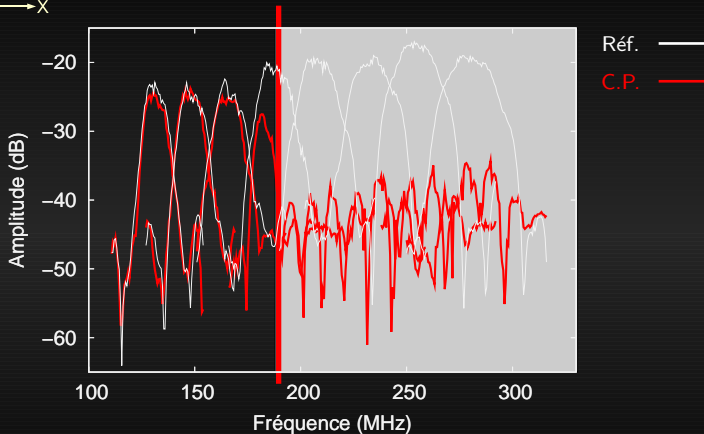
Caractérisation électrique - ΓY



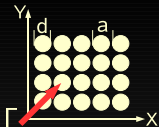
- Extinction du signal au-delà de 190 MHz



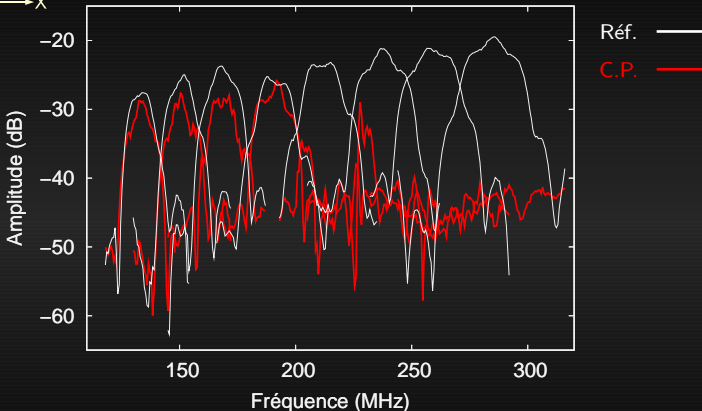
Caractérisation électrique - ΓY



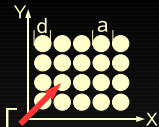
- Extinction du signal au-delà de 190 MHz
- Pas de transmission à haute fréquence (> 250 MHz)



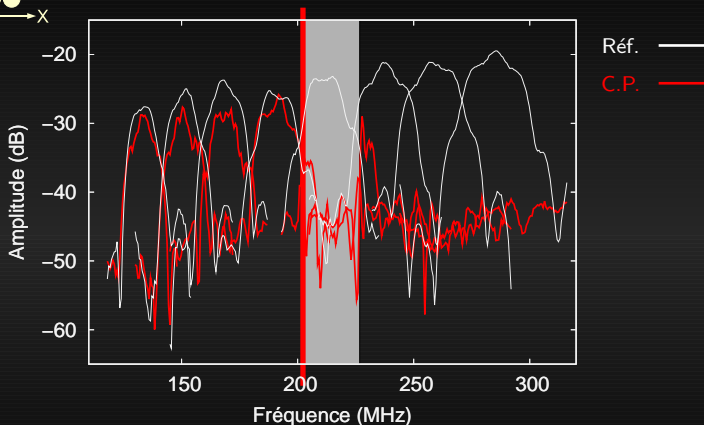
Caractérisation électrique - ΓM



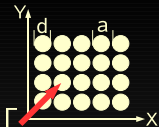
- Taux d'extinction élevé (20 dB) de 200 à 230 MHz



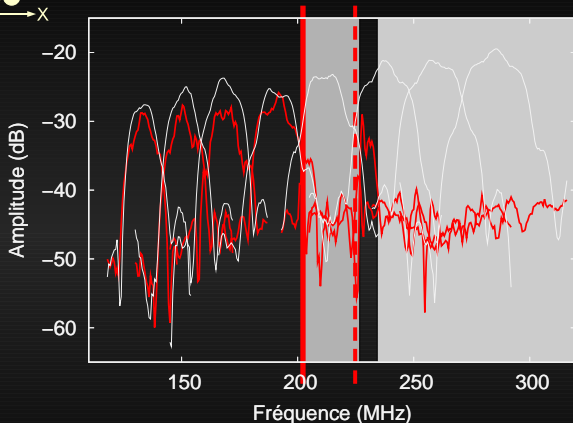
Caractérisation électrique - ΓM



- Taux d'extinction élevé (20 dB) de 200 à 230 MHz
- Pic de transmission (6 MHz) autour de 230 MHz



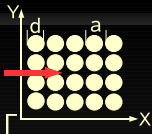
Caractérisation électrique - ΓM



Réf. —

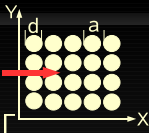
C.P. —

- Taux d'extinction élevé (20 dB) de 200 à 230 MHz
- Pic de transmission (6 MHz) autour de 230 MHz
- Extinction du signal au-delà de 235 MHz



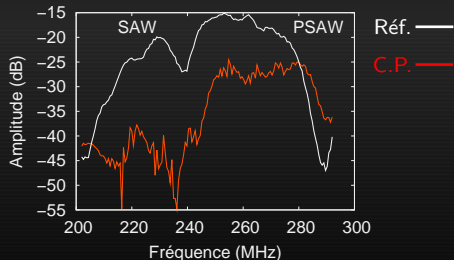
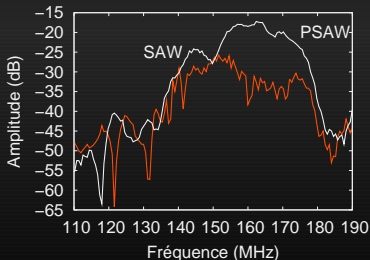
Caractérisation électrique - ΓX

- Propagation d'ondes de Rayleigh et de Pseudo (leaky) ondes de surface (PSAW) à polarisation transverse
- PSAW : onde de surface à pertes avec une forte profondeur de pénétration
- Vitesses proches : recouvrement partiel des signaux



Caractérisation électrique - ΓX

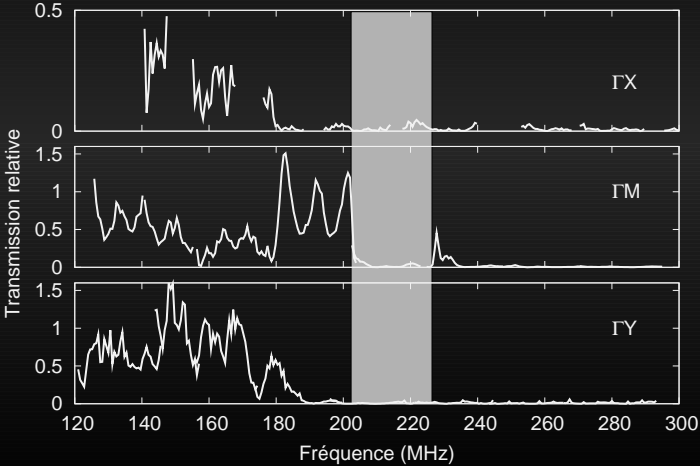
- Propagation d'ondes de Rayleigh et de Pseudo (leaky) ondes de surface (PSAW) à polarisation transverse
- PSAW : onde de surface à pertes avec une forte profondeur de pénétration
- Vitesses proches : recouvrement partiel des signaux



- SAW : Extinction dès 180 MHz
- Pas de transmission à haute fréquence

Après normalisation

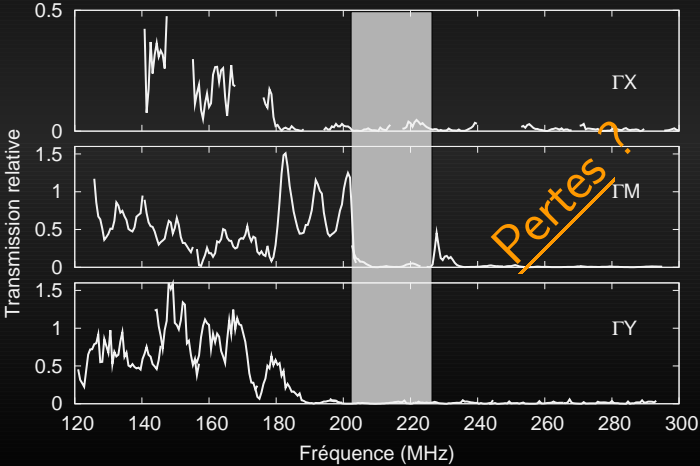
Bande interdite complète entre 200 et 230 MHz
Largeur relative de 14%



- Ondes de volume
 - Bandes interdites complètes
 - Fonctions de guidage et de démultiplexage
- Ondes de surface
 - LiNbO₃
 - Silicium
- Acousto-optique
- Conclusion et perspectives

Après normalisation

Bande interdite complète entre 200 et 230 MHz
Largeur relative de 14%



- Ondes de volume
 - Bandes interdites complètes
 - Fonctions de guidage et de démultiplexage
- Ondes de surface
 - LiNbO₃
 - Silicium
- Acousto-optique
- Conclusion et perspectives

Origine de l'extinction

- Cristal de dimension transverse finie
 - Pénétration de la SAW du même ordre que la profondeur des trous
 - Milieu stratifié : cristal phononique sur niobate de lithium
 - Diffusion hors-plan

Origine de l'extinction

- Cristal de dimension transverse finie
 - Pénétration de la SAW du même ordre que la profondeur des trous
 - Milieu stratifié : cristal phononique sur niobate de lithium
 - Diffusion hors-plan
- Forme conique
 - Réduction de la largeur de bande
 - Couplage avec les modes de volume du substrat

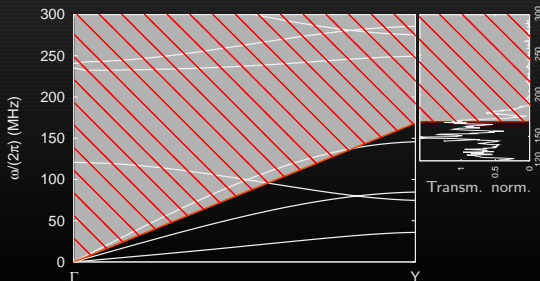
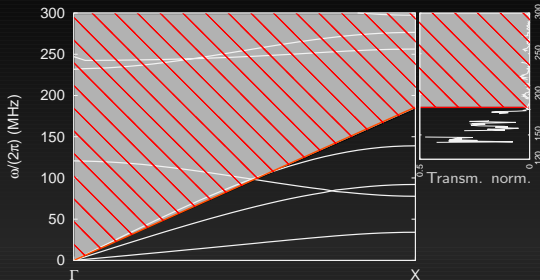
Origine de l'extinction

- Cristal de dimension transverse finie
 - Pénétration de la SAW du même ordre que la profondeur des trous
 - Milieu stratifié : cristal phononique sur niobate de lithium
 - Diffusion hors-plan
- Forme conique
 - Réduction de la largeur de bande
 - Couplage avec les modes de volume du substrat
- Co-existence de modes guidés et rayonnés
 - Cône de lumière
 - Droite $\omega = ck$ correspondant au mode de volume le plus lent



Cône du son

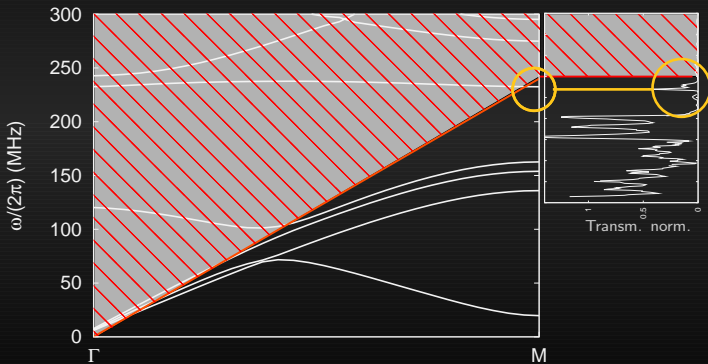
Cône du son



- Explique les pertes à haute fréquence
- Pas de transmission au-delà de la bande interdite pour ΓX et ΓY

Cône du son (2)

Explique le pic de transmission le long de ΓM



Caractérisations électriques : bilan

Démonstration d'une bande interdite complète pour les ondes de surface

Benchabane *et al.*, PRE 73, 065601 (2006)

- En accord avec les prévisions théoriques (sortie de bande d'arrêt en ΓM),

Caractérisations électriques : bilan

Démonstration d'une bande interdite complète pour les ondes de surface

Benchabane *et al.*, PRE 73, 065601 (2006)

- En accord avec les prévisions théoriques (sortie de bande d'arrêt en ΓM),
- reproductible pour des rapports d/a similaires,
- décalage de l'entrée de la zone d'extinction pour des d/a inférieurs

Mais des caractérisations supplémentaires s'imposent...

Caractérisations optiques

- Réalisées à l'Université Technologique d'Helsinki

Sonde interférométrique hétérodyne

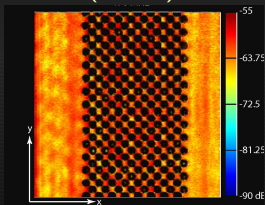
- Génération par transducteurs à peignes interdigités
- Mesure des déplacements des ondes de surface

Cartographie des déplacements

Caractérisations optiques (2)

Direction ΓM

$f = 176$ MHz
(avant)



Ondes de volume

Bandes interdites complètes

Fonctions de guidage et de démultiplexage

Ondes de surface

LiNbO₃
Silicium

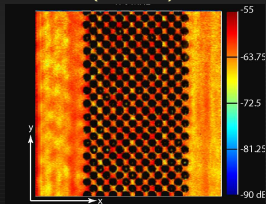
Acousto-optique

Conclusion et perspectives

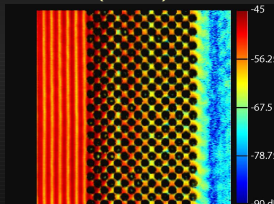
Caractérisations optiques (2)

Direction ΓM

$f = 176$ MHz
(avant)



$f = 212$ MHz
(dans)



Ondes de volume

Bandes interdites complètes

Fonctions de guidage et de démultiplexage

Ondes de surface

LiNbO₃
Silicium

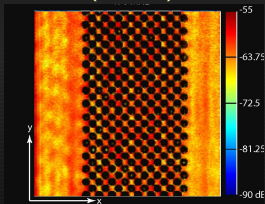
Acousto-optique

Conclusion et perspectives

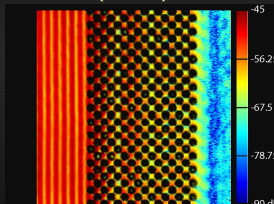
Caractérisations optiques (2)

Direction ΓM

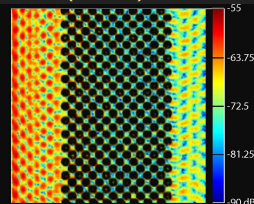
$f = 176$ MHz
(avant)



$f = 212$ MHz
(dans)



$f = 255$ MHz
(après)



Le cristal phononique se comporte bien comme un miroir parfait.

(Images : Kimmo Kokkonen, HUT)

Soutenance de thèse – 6 décembre 2006

Cristaux phononiques sur silicium : s'affranchir du cône du son ?

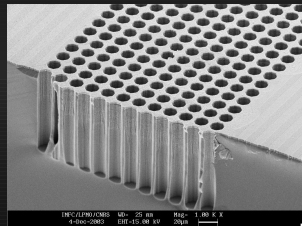
- Couche mince piézoélectrique : caractérisations électriques
- Silicium massif : caractérisations optiques seulement

Cristaux phononiques sur silicium : s'affranchir du cône du son ?

- Couche mince piézoélectrique : caractérisations électriques
- Silicium massif : caractérisations optiques seulement

Dans les deux cas :

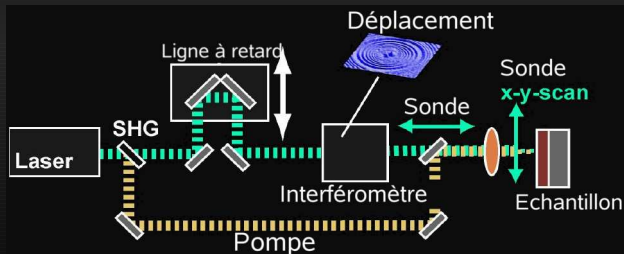
- Usinage par DRIE



Trous de profondeur infinie au
sens des ondes de surface

Caractérisations optiques

- Réalisées à l'Université d'Hokkaido
- Acoustique ultrabrève
- Effet thermoélastique
- Mesure des déplacements normaux à la surface



Pas besoin de transduction piézoélectrique

Guidage et
filtrage des
ondes
dans les
cristaux
phononiques

Sarah
Benchabane

Ondes de
volume

Bandes
interdites
complètes

Fonctions de
guidage et de
démultiplexage

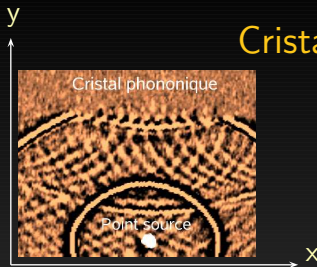
Ondes de
surface

LiNbO₃
Silicium

Acousto-
optique

Conclusion et
perspectives

Cristal parfait



(Images : D. Profunser, Hokkaido)

Soutenance de thèse – 6 décembre 2006

Guidage et filtrage des ondes dans les cristaux phononiques

Sarah Benchabane

Ondes de volume

Bandes interdites complètes

Fonctions de guidage et de démultiplexage

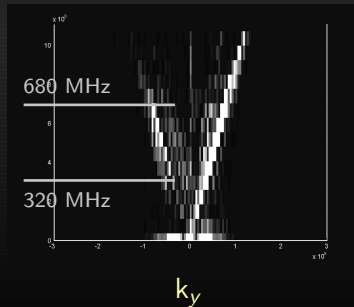
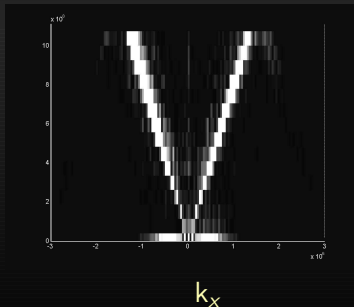
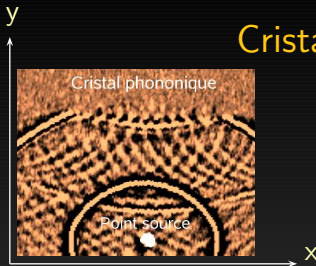
Ondes de surface

LiNbO₃
Silicium

Acousto-optique

Conclusion et perspectives

Cristal parfait



Mais pas de mesure en transmission !

(Images : D. Profunser, Hokkaido)

Soutenance de thèse - 6 décembre 2006

Plan de l'exposé

Cristaux phononiques ultrasonores pour les ondes de volume
Bandes interdites complètes
Fonctions de guidage et de démultiplexage

Cristaux phononiques pour les ondes de surface
Cristal phononique piézoélectrique
Cristal phononique en silicium

Acousto-optique dans les matériaux à bandes interdites

Conclusion et perspectives

Interactions acousto-optiques dans les matériaux à bandes interdites

- Fréquence de fonctionnement de l'ordre du GHz
 - Dimensions micro- ou submicrométriques
- Confinement simultané des deux types d'ondes

Interactions acousto-optiques dans les matériaux à bandes interdites

- Fréquence de fonctionnement de l'ordre du GHz
 - Dimensions micro- ou submicrométriques
- Confinement simultané des deux types d'ondes



Interactions exaltées

Phénomènes inédits ?

Étude théorique de l'interaction en milieu hautement confiné

- Point clé : formes modales arbitraires
- Modèle valide pour un matériau non piézoélectrique isotrope

Effet Pockels

Polarisation non-linéaire

Nelson, Lax, PRL 3, 2778 (1971)

Étude théorique de l'interaction en milieu hautement confiné

- Point clé : formes modales arbitraires
- Modèle valide pour un matériau non piézoélectrique isotrope

Effet Pockels

$$\mathbf{D} = (\epsilon_0 \epsilon_r + \Delta \epsilon_{il}) \mathbf{E}$$

$$\Delta \eta_{ij}(t, \mathbf{r}) = p_{IJ} \mathbf{S}_J$$

$$\Delta \epsilon_{il} = -\epsilon_{ij} \Delta \eta_{jk} \epsilon_{kl}$$

Polarisation non-linéaire

Nelson, Lax, PRL 3, 2778 (1971)

Étude théorique de l'interaction en milieu hautement confiné

- Point clé : formes modales arbitraires
- Modèle valide pour un matériau non piézoélectrique isotrope

Effet Pockels

$$\mathbf{D} = (\epsilon_0 \epsilon_r + \Delta \epsilon_{il}) \mathbf{E}$$

$$\Delta \eta_{ij}(t, \mathbf{r}) = \rho_{IJ} \mathbf{S}_J$$

$$\Delta \epsilon_{il} = -\epsilon_{ij} \Delta \eta_{jk} \epsilon_{kl}$$

Polarisation non-linéaire

Nelson, Lax, PRL 3, 2778 (1971)

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} + \mathbf{P}_{NL}$$

$$\mathcal{P}_i = \epsilon_0 \chi_{ij}^{\omega_s \omega_a \omega_0} E_j u_{k,l}$$

$$\chi_{ij}(kl) = -\epsilon_{im} \epsilon_{jn} P_{mn}(kl)$$

Équation de propagation

- Équation de propagation

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2[\epsilon \mathbf{E}]}{\partial t^2} = \nabla^2(\mathbf{E}) - \nabla[\nabla \cdot (\mathbf{E})]$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2} = \nabla^2(\eta : \mathbf{D}) - \nabla[\nabla \cdot (\eta : \mathbf{D})]$$



Obtention d'équations d'ondes couplées

Équation de propagation

- Équation de propagation

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 [\epsilon \mathbf{E}]}{\partial t^2} = \nabla^2 (\mathbf{E}) - \nabla [\nabla \cdot (\mathbf{E})]$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2} = \nabla^2 (\eta : \mathbf{D}) - \nabla [\nabla \cdot (\eta : \mathbf{D})]$$

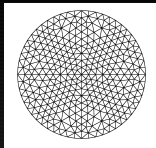


Obtention d'équations d'ondes couplées

- Formulation en \mathbf{E} :
 - Formulation Pockels = Formulation en Nelson, Lax

$$C_{12} = \int_S \mathbf{E}_{1i}^\dagger p_{ijkl} \mathbf{S}_{kl} \mathbf{E}_{2j}$$

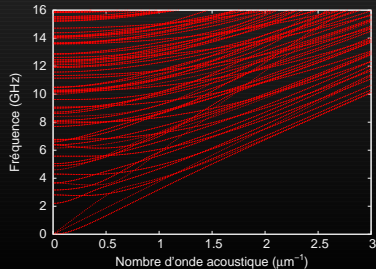
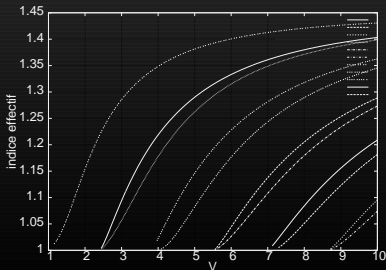
- Termes additionnels dans le cas \mathbf{D}
(issus des **gradients** des champs de déplacements élastiques)



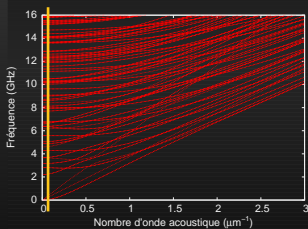
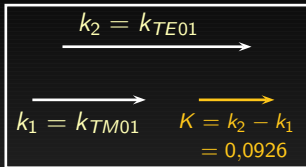
Formes des modes optiques et acoustiques

- Barreau de silice (diamètre = $1 \mu\text{m}$) dans l'air
- Modes optiques
 - Modèle classique d'une fibre à saut d'indice
- Modes acoustiques
 - Calcul par éléments finis (*Waveguide FEM*)

Laude *et al.*, PRB 71, 045107 (2005)



Couplage de polarisation



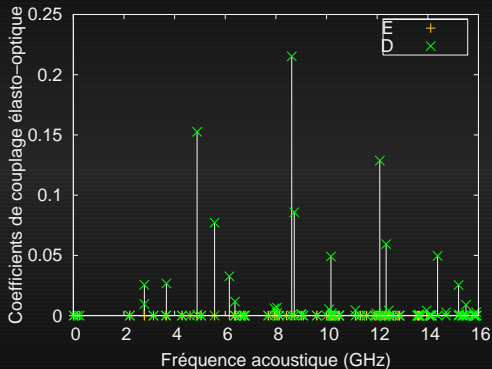
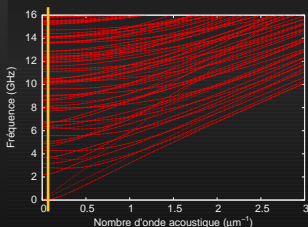
$K = 0,0926$

Couplage de polarisation

$$k_2 = k_{TE01}$$

$$k_1 = k_{TM01}$$

$$K = k_2 - k_1 = 0,0926$$



Remise en cause de la relation entre ellipsoïde des indices et effet acousto-optique...

La mise en place d'expériences se révèle indispensable !

Conclusion

- Étude des phénomènes de guidage et de confinement dans des **cristaux phononiques de volume**
 - Fonctions de guidage et de démultiplexage

Conclusion

- Étude des phénomènes de guidage et de confinement dans des **cristaux phononiques de volume**
 - Fonctions de guidage et de démultiplexage
- Démonstration de l'existence d'une **bande interdite complète pour les ondes de surface**
 - Niobate de lithium et silicium
 - Caractérisations électriques et optiques

Conclusion

- Étude des phénomènes de guidage et de confinement dans des **cristaux phononiques de volume**
 - Fonctions de guidage et de démultiplexage
- Démonstration de l'existence d'une **bande interdite complète pour les ondes de surface**
 - Niobate de lithium et silicium
 - Caractérisations électriques et optiques
- Étude préliminaire des **interactions acousto-optiques** en milieu hautement confiné

Perspectives – Cristaux phononiques

- Pour les cristaux ultrasonores
 - Structures tridimensionnelles
 - Géométrie du réseau / composition de la maille
 - Différentes natures de modes

Thèse de Fu-Li Hsiao

Ondes de
volume

Bandes
interdites
complètes

Fonctions de
guidage et de
démultiplexage

Ondes de
surface

LiNbO₃
Silicium

Acousto-
optique

Conclusion et
perspectives

Perspectives – Cristaux phononiques

Ondes de volume

Bandes
interdites
complètes

Fonctions de
guidage et de
démultiplexage

Ondes de surface

LiNbO₃
Silicium

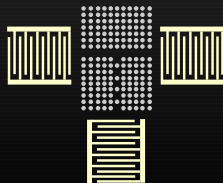
Acousto- optique

Conclusion et perspectives

- Pour les cristaux ultrasonores
 - Structures tridimensionnelles
 - Géométrie du réseau / composition de la maille
 - Différentes natures de modes

Thèse de Fu-Li Hsiao

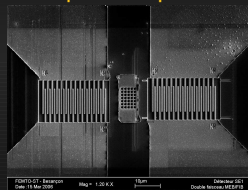
- Ondes de surface
 - Fonctions complexes
 - Calcul de la transmission
 - Structures submicroniques



Perspectives – Acousto-optique

- Généralisation du modèle théorique présenté
- Tirer profit des propriétés optiques du **niobate de lithium**
 - Commande acoustique de cristaux photoniques
 - Cristaux phoXoniques

Collaboration équipe Nanophotonique

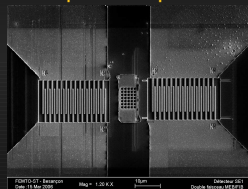


10 µm

Perspectives – Acousto-optique

- Généralisation du modèle théorique présenté
- Tirer profit des propriétés optiques du **niobate de lithium**
 - Commande acoustique de cristaux photoniques
 - Cristaux phoXoniques

Collaboration équipe Nanophotonique



- Sur **fibres optiques**

- Exploitation de l'effet Brillouin stimulé
- Collaboration équipe Optique Non-Linéaire
- Transducteurs actifs sur fibres optiques (couche mince piézoélectrique, couplage d'ondes élastiques, etc...)

Guidage et filtrage des ondes dans les cristaux phononiques

Sarah Benchabane

Mercredi 6 décembre 2006

Institut FEMTO-ST, Département LPMO

Ondes de
volume

Bandes
interdites
complètes

Fonctions de
guidage et de
démultiplexage

Ondes de
surface

LiNbO₃
Silicium

Acousto-
optique

Conclusion et
perspectives