tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

Résumé de la thèse

“Recherche et développement de transistors bipolaires avancés par le biais de la modélisation technologique”

Ce travail explore le développement technologique de transistors bipolaires à hétérojonction SiGe et SiGeC au moyen de la conception technologique assistée par ordinateur (TCAD). L'objectif est d'obtenir un dispositif avancé très proche du dispositif réalisable, en agissant non seulement au niveau des étapes technologiques, mais aussi en rendant compte assez fidèlement son comportement physique, sa géométrie et ses performances électriques. Les études menées permettent l’obtention du meilleur fonctionnement électrique pour les dispositifs analysés, en particulier avec une fréquence maximale d’oscillation de 500 GHz. Cette valeur correspond à l’objectif fixé par le projet Européen DotFive dans lequel ce travail s’inscrit pour STMicroelectronics, et les évolutions de sa filière BiCMOS avancée. Les résultats de ce travail aide à obtenir des simulations plus physiques et réalistes, à avoir une meilleure compréhension des mécanismes de transport des charges dans la structure, et de faciliter le développement et l'optimisation des transistors bipolaires a hétérojonction (TBH) SiGe et SiGeC.

Le premier chapitre du manuscrit présente le principe de fonctionnement du transistor bipolaire et du TBH SiGe ou SiGeC. Ce chapitre traite également son fonctionnement à haute fréquence, en y décrivant des méthodes d'extraction de la fréquence maximale d’oscillation (f_{MAX}) et de la fréquence de transition du gain en courant (f_T), deux facteurs de mérite qui seront exploités pour l’étude des performances. Le premier chapitre se termine par la description du transport dans les dispositifs bipolaires, notamment le modèle hydrodynamique utilisé lors des simulations.

Le deuxième chapitre analyse les modèles physiques spécifiques aux alliages SiGe et SiGeC contraints sur silicium et utilisés dans la base des TBH, et la simulation électrique de ces dispositifs. Ce chapitre est aussi un important travail de synthèse menant à la sélection, à la mise en œuvre et au développement des modèles dédiés à la simulation des TBH SiGeC.

Le troisième chapitre décrit la plateforme de simulation TCAD développé pour la technologie B3T afin d'obtenir un modèle de TBH (résultats de simulation) très proche du dispositif fabriqué par STMicroelectronics. Dans ce chapitre l'ensemble des étapes de fabrication des TBH de la technologie B3T sont décrites, ainsi que la méthodologie développée pour simuler ces dispositifs.

Le dernier chapitre détaille les architectures de TBH développées durant la thèse. Les structures proposées sont d'une part une version faible cout (moins d'étapes technologiques) et de moindre performance, et à l'inverse des structures à hautes performances nécessitant un cout de production plus élevé. Il est discuté et étudié particulièrement la technologie B4T qui a été réalisée en salle blanche. L'impact des principales étapes de fabrication est analysé afin de trouver les paramètres clés pour accroitre f_{MAX} sans dégrader les autres caractéristiques électriques. A la fin du chapitre, les résultats obtenus sont utilisés pour élaborer une nouvelle plateforme de simulation qui tient compte des meilleurs compromis entre les différents paramètres des procédés de fabrication pour obtenir un TBH SiGeC avec une valeur de f_{MAX} d'au moins 500 GHz.

1 Fonctionnement du transistor bipolaire a hétérojonction SiGe/SiGeC et le transistor bipolaire au silicium

L'ingénierie de bande interdite utilisée dans la conception des TBH SiGe ou SiGeC est la clé de l'amélioration des performances statiques et dynamiques de tels dispositifs. Comme l'alliage SiGe ou SiGeC contraint en compression a une bande interdite plus petite que celle du silicium, un transistor bipolaire avec une base SiGe ou SiGeC conduit à des valeurs beaucoup plus élevées du gain en courant. D'autres avantages (mobilité électronique…) favorisent les performances du TBH npn à base SiGe.

1.1 Fonctionnement à haute fréquence

Les caractéristiques dynamiques d'un transistor disposent de deux principales figures de mérite que sont la fréquence de transition du gain en courant (f_T) et la fréquence maximale d'oscillation (f_{MAX}). Dans cette section nous décrirons l'une des méthodes d'extraction pour f_{MAX} qui a été développée et implémentée dans le simulateur TCAD pour l'étude des résultats de simulation en régime dynamique.

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

1.2 Extraction de la fréquence maximale d'oscillation f_{MAX}

Bien que f_{MAX} soit la fréquence de transition du gain de Mason *U*, l'extraction de f_{MAX} peut être faite à une autre fréquence fixée, sur l'hypothèse de décroissance du gain suivant -20dB/décade. Ainsi pour chaque point de polarisation la simulation en régime dynamique est faite pour une zone limitée en fréquence. Dans le script développé nous trouvons un point dans la zone de décroissance à -20dB/décade et à partir de ce point par extrapolation nous obtenons la valeur de la fréquence pour *U = 0dB* comme le montre la **Error! Reference source not found.**.

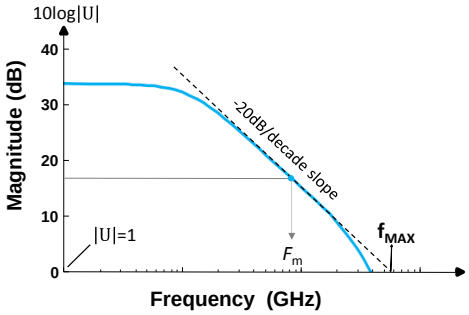


Figure 0.1 Diagramme de Bode pour la méthode d'extraction de f_{MAX} à un point.

1.3 Transport de charge dans les semiconducteurs

Les modèles de transport peuvent varier considérablement en termes de facilité et de précision de la solution. Ils peuvent être physiquement très sophistiqués mais difficiles à résoudre et coûteux en temps de simulation ou facile et rapide à résoudre, mais avec des résultats inexacts. La Figure 1.20 résume les différents niveaux de modélisation et de théorie du transport.

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

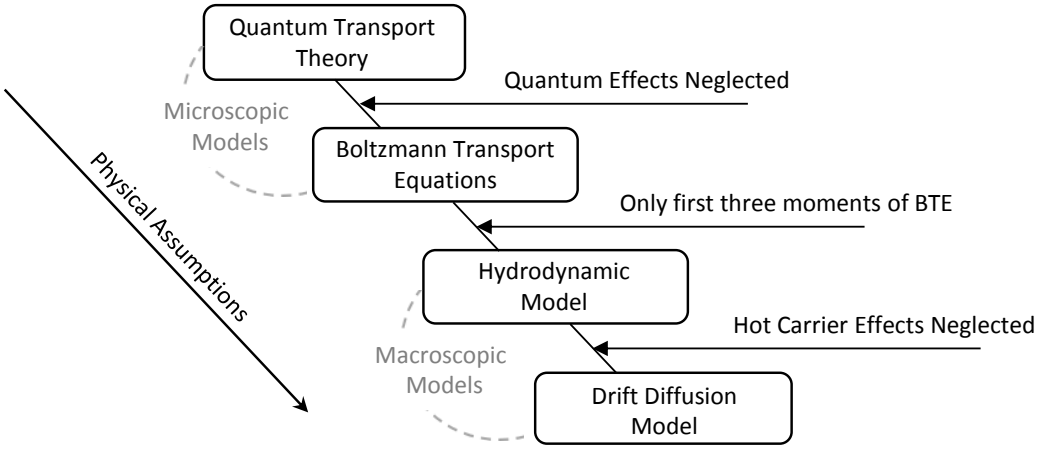


Figure 0.2 Aperçu de la hiérarchie des théories de transport de charge dans les semiconducteurs

1 Modélisation du transport des charges dans les TBH SiGe et SiGeC

La simulation prédictive de TBH avec une base SiGeC biaxialement contrainte sur silicium, nécessite la prise en compte des effets combinés des propriétés spécifiques de l'alliage ternaire SiGeC, et de la contrainte biaxiale induite par le désaccord de maille. Dans nos simulations, nous travaillons avec les premiers modèles analytiques anisotropes basées sur des simulations Monte Carlo (MC) à faible champ électrique pour les alliages SiGeC [Michaillat 09 -10.2].

1.1 Masses effectives d'électrons et de trous

Dans la littérature on trouve trois définitions pour les masses effectives des électrons: 1 / la masse de densité d'états (m^*_{dos}) 2/ les masses longitudinale et transverse $(m_l m_t)$, 3 / la masse effective de conductivité (m^*_{cond}). Pour le simulateur utilisé (Sdevice), nous calculons d'abord la densité effective d'états des électrons et des trous. Ensuite, nous obtenons les masses effectives qui seront utilisées dans le calcul des paramètres de transport.

1.2 Les modèles de densité effective d'états

Nous proposons de nouveaux modèles analytiques pour la densité effective d'états pour la base SiGeC, avec moins d'erreurs d'approximation par rapport à ceux déjà existants. Ces modèles ont été élaborés pour les couches SiGeC relaxées ou contraintes. Les modèles sont calibrés à partir des résultats de simulation Monte Carlo. Cette approche a également

été utilisée par Sasso, et al. [Sasso 10], avec pour différence que les modèles exposés ne prenaient pas en compte des dépendances critiques comme les effets liés à la contrainte ni l'influence de la teneur en carbone. D'autre part, les modèles existants de densité effective d'états sont une approximation assez simplifiée, basé sur un rapport constant entre le produit la densité effective d'états du silicium et du silicium-germanium [Hueting 96]. La densité effective d'états en bande de valence est fixée à celle du silicium massif [Pejcinovic 89], ou suppose une dépendance linéaire avec la fraction molaire [People 86].

En raison de la dépendance de la bande interdite de densité d'états [Buffler 98], le modèle de dépendance en fonction de la teneur en Ge est basé sur la formule de Bean [Bean 92], qui décrit la variation de bande interdite dans les alliages SiGe contraint en compression sur silicium. L'effet supplémentaire lié à la fraction molaire y de carbone sur la bande interdite est approximée par l'ajout d'un terme linéaire en y [Pakfar 03], exprimé comme suit :

$$f(x,y) = c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 + c_4 y \qquad 2.1$$

où x est la teneur en germanium, y est la teneur en carbone et les coefficients c_1 à c_4 sont définis selon Palankovski, Gonzalez and Kosina [Palankovski 99].

Sur la base des calculs théoriques dans les alliages contraints SiGe effectués par People [People 85] [People 86] et en considérant que la contrainte biaxiale divise les 6 vallées Δ en deux familles, 2 vallées Δ_{001} décalées vers les hautes énergies, et 4 vallées Δ_{100} et Δ_{010} abaissées en énergie, ceci est exprimer avec deux coefficients M_{c1} and M_{c2} [Pejcinovic 89]. L'expression finale pour la densité effective d'états en bande de conduction est alors:

$$N_{C_SiGeC} = 2\left(\frac{2\pi m_{de} kT}{h^2}\right)^{3/2}\left[M_{c1} + M_{c2}\exp\left(\frac{\Delta E_c * f(x,y)}{kT}\right)\right]\frac{C_e}{C_\chi(z)} \qquad 2.2$$

L'allure du modèle de densité d'états pour les électrons est représentée en **Error! Reference source not found.** pour différentes valeurs de température.

Dans le cas des trous, la levée de dégénérescence est exprimée avec M_{V1}, M_{V2} and M_{V3} selon Prinz *et al*. [Prinz 89]:

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

$$N_{V_SiGeC} = 2\left(\frac{2\pi m_{dh} kT}{h^2}\right)^{3/2}\left[M_{v1} + M_{v2}\exp\left(\frac{\Delta E_{v1} * f(x,y)}{kT}\right) + M_{v3}\exp\left(\frac{\Delta E_{v2} * f(x,y)}{kT}\right)\right]\frac{C_h}{C_\chi(z)} \qquad 2.3$$

Les paramètres C_e de l'équation **Error! Reference source not found.** et C_h de l'équation **Error! Reference source not found.** sont des coefficients de courbure pour la bande de conduction et la bande de valence. Le modèle de densité d'états pour les trous est représenté en **Error! Reference source not found.**.

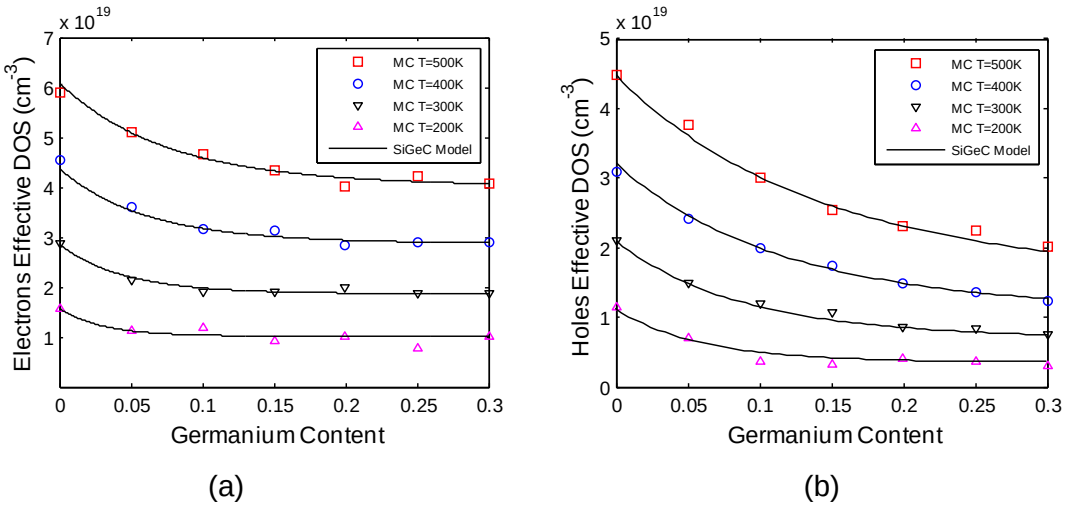


Figure 0.3 Modèles pour la densité d'états pour les alliages $Si_{1-x-y}Ge_xC_y$. Les symboles représentent les simulations Monte Carlo, les lignes notre modèle, pour les électrons (a) et les trous (b).

Les modèles de la densité d'états ont été implémenté dans le simulateur, ainsi que tous les modèles dédiés au matériau SiGeC : la bande interdite, la mobilité des électrons et des trous et le temps de relaxation de l'énergie.

1.3 Le modèle de bande interdite

Dans nos simulations, la réduction de bande interdite selon le taux de Ge et de C est modélisée avec la formule de Bean [Bean 92], en particulier pour les alliages SiGe contraint en compression. En fonction de la température, avec un coefficient c_4 pour l'influence du carbone, l'expression de bande interdite devient:

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

$$E_g(x,y,T) = E_{g_0} - \frac{\alpha T^2}{T+\beta} + c_1 x + c_1 x^2 + c_1 x^3 + c_4 y$$

1.4 Modèles de mobilité des électrons et des trous dans les couches contraintes SiGeC fortement dopées

Durant ce travail, nous avons utilisé les modèles analytiques anisotropes basées sur des simulations Monte-Carlo à faible champ pour les alliages SiGeC [Michaillat 09 -10.2]. Ces modèles ont été développés pour les alliages relaxés et contraint sur silicium, lorsque le transport des électrons et des trous est homogène et stationnaire. Les mécanismes pris en compte sont les interactions entre porteurs de charge entre-eux, les interactions avec les phonons, les impuretés neutres et ionisées, les pièges et les défauts du réseau cristallin et enfin l'ionisation par choc.

1.5 Le modèle du temps de relaxation de l'énergie

Le temps de relaxation de l'énergie des porteurs est le temps moyen requis pour qu'une population de porteurs excités revienne à l'équilibre. Ce temps de relaxation caractérise la capacité du matériau à dissiper l'énergie des porteurs aux travers d'interactions inélastiques de type porteur-phonon ou par ionisation par choc. Il peut être calculé par simulation Monte Carlo dans un matériau homogène en régime stationnaire du transport. la modélisation du transport de charge à haute énergie nécessite une description numérique assez étendue de la structure électronique. Dans nos simulations le modèle utilisé a été extrait selon la méthode indirecte développée par Palankovski [Palankovski 99]. Pour les alliages SiGeC il a été modélisé par Michaillat [Michaillat 10.2] comme une fonction du rapport entre la température du réseau cristallin et la température des porteurs.

2 Influence des paramètres technologiques sur la technologie B3T

La technologie B3T est une technologie bipolaire issue de la dernière technologie haute vitesse 0.13µm BiCMOS9MW de STMicroelectronics [Chevalier 05] [Chevalier 09]. Elle s'inscrit dans les évolutions successives de la technologie de TBH SiGeC de STMicroelectronics. Pour chaque changement, la valeur de f_{MAX} s'est améliorée de 100 GHz. Ainsi pour la technologie B3T la valeur de f_{MAX} est d'environ 300 GHz, pour la

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

technologie suivante B4T f_{MAX} vaut environ 400 GHz et pour B5T, la valeur de f_{MAX} visée est 500 GHz.

Cette section analyse l'impact sur la technologie B3T du niveau de dopage en bore, et de la composition en carbone et en germanium de la base. Le choix de ces trois paramètres est lié à leur forte influence sur les caractéristiques électriques [Salmon 98] [Hållstedt 04] [Hashim 99]. On montre comment ces trois paramètres peuvent améliorer considérablement les performances du transistor, mais aussi peuvent les dégrader.

2.1 Composition et modélisation de la diffusion des dopants

Contrairement aux alliages III-V et II-VI, la similarité entre atomes de la colonne IV permet l'obtention d'alliage plus facilement en réduisant fortement ou en évitant les problèmes d'hétérogénéité liés à la miscibilité partielle des atomes, aux différences d'ordre atomique à petite et grande échelle dans le matériau, ou bien induit par la stabilité de phase des alliages lors de traitements thermiques.

2.2 Simulation et calibrage des dispositifs B3T

Le calibrage de la technologie B3T consiste à ajuster les paramètres de modélisation par comparaison entre les résultats de simulation et de mesure des dispositifs réels. Les différents paramètres de la simulation sont analysés en fonction de leur impact sur les profils de dopage, sur les structures géométriques et sur les caractéristiques électriques.. Les profils de dopage simulés sont comparés aux profils obtenus par spectroscopie massique d'ions secondaires (SIMS), les structures géométriques sont comparées aux images obtenues par transmission électronique (TEM) et les résultats électriques sont comparés aux caractéristiques statiques et dynamiques des TBH fabriqués.

2.3 Influence du niveau de dopage (bore)

Dans les dispositifs bipolaires avancés, l'épaisseur de la base SiGeC peut être très réduite (10 à 25 nm), sans nuire à l'efficacité de la jonction base-émetteur, et il est possible de fortement doper la base pour maintenir une faible valeur de résistance de base (R_B) et pour éviter le risque de perçage. Une conséquence du niveau de dopage de bore et du profil de dopage est la largeur effective de la base W_B. Pour les faibles niveaux de dopage, le profil de dopage est plus étroit dans la base SiGeC, les frontières des jonctions émetteur-base

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

(EB) et base-collecteur (BC) sont plus proches, et la valeur de W_B, est faible. Au contraire, pour les niveaux plus forts de dopage, le profil de dopage plus étalé éloigne les jonctions BE et BC, conduisant à un W_B plus grand. Le niveau de dopage du bore a aussi une incidence directe sur la mobilité électronique ce qui influence les caractéristiques électriques du dispositif.

2.4 Influence du carbone

L'intérêt du carbone est son effet sur la réduction de la diffusion du bore. Ainsi pour une même dose de de dopage en bore, l'incorporation du carbone favorise un profil de dopage plus étroit et une valeur crête plus élevée, ce qui est propice à une base effective plus étroite.

Lorsque la teneur en carbone est trop élevée, les effets négatifs surpassent le bénéfice escompté sur les performances du transistor. Déjà publié dans différents articles, si la teneur en carbone dépasse 2%, le comportement du dispositif peut être dégradé [Osten 98] [Lanzerotti 96] [Bouhouche 09].

2.5 Influence du profil de germanium

L'ingénierie de bande interdite est utilisée dans la conception des TBH SiGe ou SiGeC biais l'introduction d'un profil de Ge triangulaire, trapézoïdale ou rectangulaire. Dans le cas de la technologie B3T ce profil est essentiellement sous forme trapézoïdale. Ce type de profil crée un gradient en bande de conduction, qui accélère les électrons provenant de l'émetteur vers le collecteur, se traduisant par une réduction du temps de transit dans la base. Le profil de Ge est obtenu par épitaxie en trois marches d'épaisseurs différentes. Nous appelons la première marche GeE (côté émetteur, plus faible taux de Ge), la deuxième GeB (base) et le troisième GeC (côté collecteur).

2.5.1 Effet du pourcentage de germanium côte émetteur (GeE)

La teneur en germanium côté émetteur GeE, varie de 10 à 25% avec une valeur fixe pour GeB de 25% et de 30% pour GeC. L'augmentation de GeE a pour impact une augmentation du gain en courant, de la densité de courant de collecteur et des valeurs de f_T.

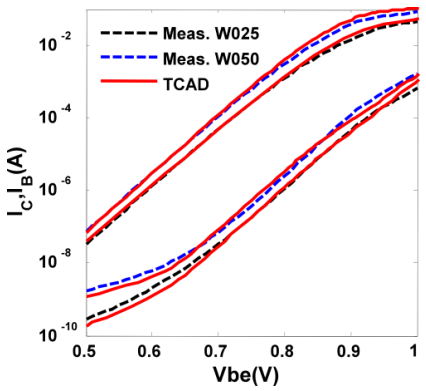
tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

2.5.2 Effet du pourcentage de germanium côte collecteur (GeC)

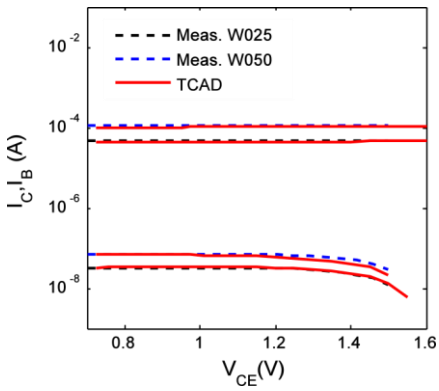
Pour cette étude le pourcentage GeC varie de 25 à 35% avec GeE et GeB maintenus constants respectivement à 20 et 25%. Les meilleurs résultats pour f_{MAX}, f_T et le gain en courant sont obtenus pour GeC=30%, au-delà de cette valeur les caractéristiques électriques sont dégradées.

2.6 Résultats électriques

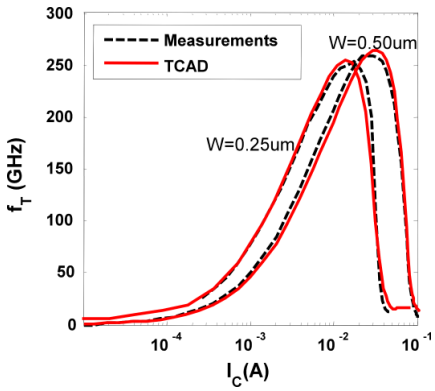
Les caractéristiques électriques du TBH SiGeC simulé sont comparées aux mesures expérimentales sur la **Error! Reference source not found.**. La fenêtre d'émetteur est de 0.5 µm et de 0.25 µm avec une épaisseur de base de 20 nm. L'utilisation des modèles dédiés aux matériaux SiGeC, permettent obtenir un très bon accord entre les caractéristiques électriques mesurées et simulées de la technologie B3T.



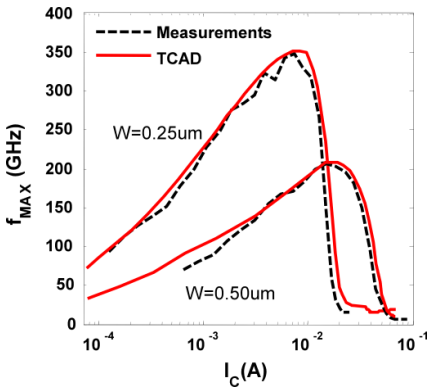
(a)



(b)



(c)



(d)

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

Figure 0.4 Comparaison des résultats électriques TCAD et mesures expérimentales a) Courbes de Gummel; b) BV_{CEO} ;c) f_T ;e) f_{MAX}

3 Optimisation vers f_{MAX} de 500 GHz

Cette section présente trois architectures différentes pour TBH avancés SiGe:C. Dans ces architectures, nous profitons des bons résultats obtenus pour la modélisation de la technologie B3T, utilisé comme point de départ pour étendre le modèle à d'autres architectures.

Les deux premières architectures proposées et investies sont des solutions faibles coûts qui pourraient être utilisées pour des applications avec des exigences en performances limitées. La troisième architecture (B4T) a pour objectif l'amélioration des performances dynamiques, notamment la fréquence maximale d'oscillation pour attendre les 400 GHz.

Nous étudions l'architecture B4T et analysons l'impact des principales étapes de fabrication afin de trouver les paramètres du procédé de fabrication qui permettent d'augmenter f_{MAX} sans dégrader les autres caractéristiques électriques. Les résultats obtenus sont utilisés pour élaborer une plate-forme de simulation TCAD en tenant compte du meilleur compromis des différents paramètres clés du procédé.

3.1 Comparaison des performances

La **Error! Reference source not found.** compare les trois architectures étudiées et les résultats électriques obtenus pour f_{MAX} et f_T. Les trois structures ont la même fenêtre d'émetteur (200 nm) et la même largeur de jonction d'émetteur (110 nm).

Pour la première architecture à faible coût sans tranchée d'isolation STI (**Error! Reference source not found.**a) f_{MAX} vaut environ 220 GHz et la valeur maximale de f_T est de 190 GHz. Pour la deuxième architecture à faible coût (**Error! Reference source not found.**b) f_{MAX} est de 280 GHz et f_T de 210 GHz. Les meilleures performances ont été obtenues pour l'architecture B4T avec le couple f_T/f_{MAX} de l'ordre de 260/400 GHz.

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

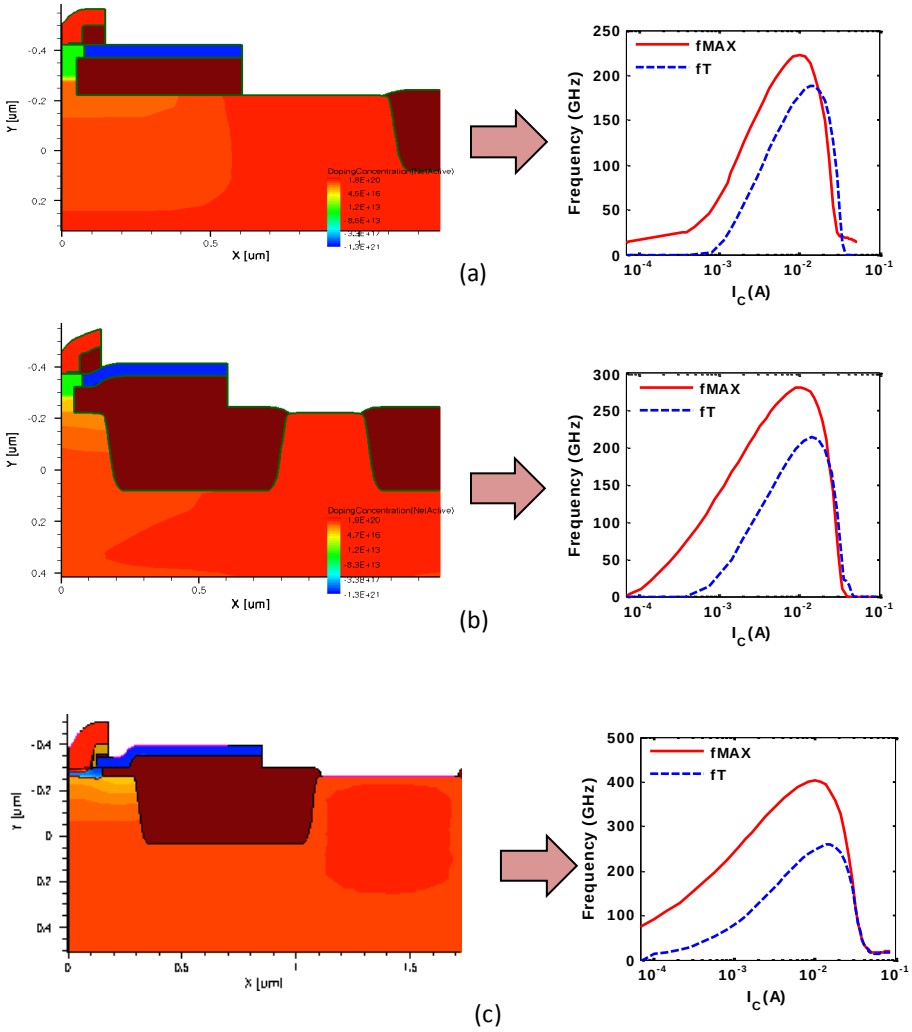


Figure 0.5 Comparaison des performances dynamiques pour les trois architectures développées ; a) et b) Architectures à faible coût; c) B4T.

3.2 Architecture B4T

Comparé aux structures à faible coût, l'architecture B4T a de meilleures performances et est choisie pour développer un dispositif capable d'atteindre une valeur de f_{MAX} excédant 400 GHz. Ce projet de simulation utilise les mêmes modèles physiques développés pour la technologie B3T et prend en compte toutes les étapes de procédé de fabrication de la technologie B4T développé à STMicroelectronics [Chantre 10]. Cette technologie est le résultat d'une analyse détaillée des compromis entre les principaux paramètres du procédé de fabrication.

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

3.2.1 Résultats électriques

Les résultats obtenus sont validés par comparaison avec les données expérimentales de la technologie B4T. Les caractéristiques électriques pour la technologie B4T sont présentés sur la **Error! Reference source not found.**, notamment les courbes de Gummel et gain en courant (**Error! Reference source not found.**a), et les fréquences f_T et f_{MAX} (**Error! Reference source not found.**b). Le gain en courant maximal est d'environ 2000 à V_{BE}=0,72 V. Les caractéristiques AC montrent une nette amélioration par rapport à B3T avec f_{MAX}= 400 GHz et f_T = 260 GHz. Un très bon accord a été atteint entre les mesures et les simulations.

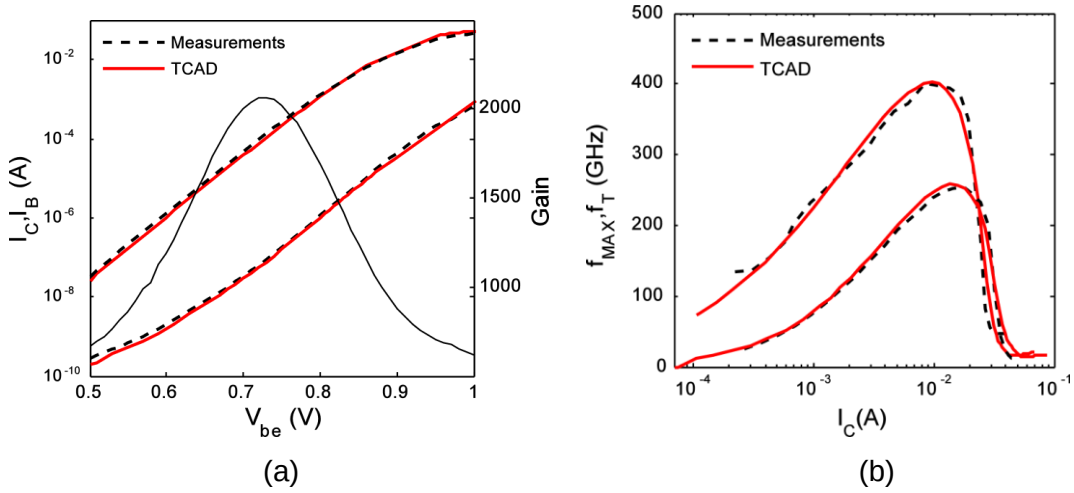


Figure 0.6 Comparaison des résultats électriques TCAD et mesures expérimentales a) Courbes de Gummel et gain en courant; b) f_T et f_{MAX}.

3.3 Influence des paramètres technologiques et optimisation vers f_{MAX} de 500 GHz.

Cette section étudie les paramètres clés des procédés de fabrication pour atteindre une valeur de 500 GHz pour f_{MAX}.

La **Error! Reference source not found.** montre l'impact de différents paramètres technologiques sur la fréquence maximale d'oscillation dans la technologie B4T. La **Error! Reference source not found.**a montre l'effet du carbone et du bore, la **Error! Reference source not found.**b l'effet des teneurs en germanium GeE et GeC, la **Error! Reference source not found.**c l'effet de la largeur de liaison entre la base intrinsèque et extrinsèque, la **Error! Reference source not found.**e l'effet de la dose et l'énergie d'implantation du collecteur implanté sélectivement (SIC en anglais). Les meilleures compromis entre les

paramètres étudies furent obtenues pour un valeur de teneur en carbone de 0.5 et de bore de 9.10^{19} cm^{-3}. Dans le ca des pourcentages de germanium le meilleur compromis fut de 20% pour GeE et 35% pour GeC. Les meilleurs valeurs pour la largeur de liaison entre la base intrinsèque-extrinsèque fut de 40 nm et de 170 nm pour la fenêtre d'émetteur (W). Pour le SIC le meilleur compromis fut obtenu pour une dose d'environ 4.10^{13} cm^{-2} l'énergie tenant un faible impact.

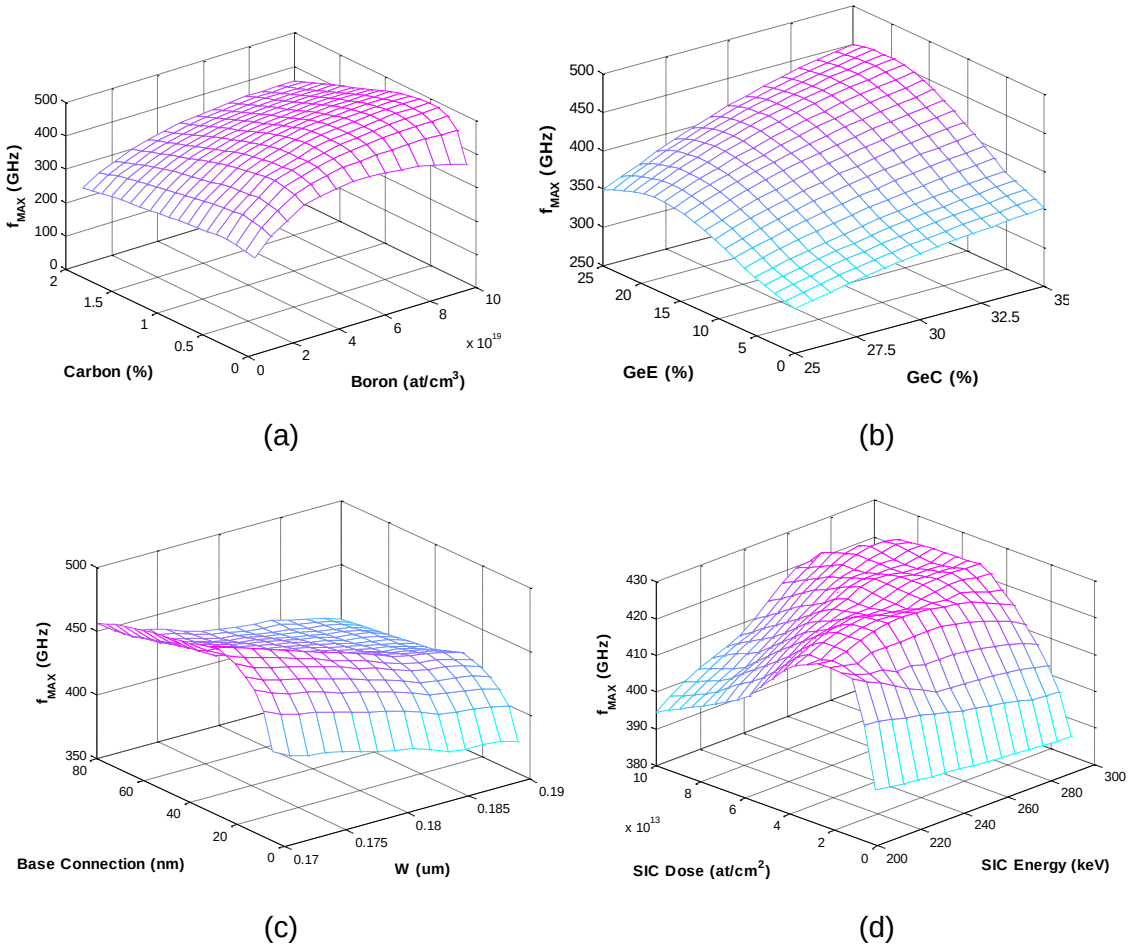


Figure 0.7 Influence des paramètres technologiques sur la fréquence maximale d'oscillation dans la technologie B4T.

3.4 Un transistor bipolaire SiGeC avec f_{MAX} de 500 GHz

A partir des résultats obtenus dans les études précédentes, nous développons une plateforme de simulation pour la technologie B5T qui prend compte des meilleurs compromis des différents paramètres testés. Cela permet d'atteindre une valeur de f_{MAX}

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

supérieure à 500 GHz, accomplissant ainsi l'objectif principal de l'étude et démontrant la faisabilité du projet.

Les premiers paramètres à prendre en compte sont le niveau de dopage de bore et la teneur en carbone. D'après les résultats analysés dans les études précédentes, pour le bore, le niveau de dopage est établi à 8,5 × 10^{19} at/cm^3, pour le carbone le pourcentage est fixé à 0,5%.

Dans le cas de la teneur en germanium, le meilleur compromis trouvé est une composition avec trois marches d'épaisseurs différentes: 15%, 26% et 30% pour GeE, GeB et GeC, respectivement. D'autres paramètres optimaux sont une largeur d'émetteur de 170 nm, une largeur de liaison entre la base intrinsèque et extrinsèque de 25 nm, une température de recuit final de 1080°C et une gravure de 200 nm du poly-silicium amorphe. Avec cette configuration nous avons obtenu un pic de f_T de 295 GHz et un pic de 554 GHz pour f_{MAX}.

Les performances en f_T et f_{MAX} des dispositifs B5T sont comparés avec les technologies B3T et B4T sur la **Error! Reference source not found.**. Alors que l'amélioration de f_T est modérée entre les trois technologies avec une valeur maximale de ~260 GHz pour B3T et B4T et ~280 GHz pour B5T, f_{MAX} s'est améliorée considérablement avec 17% entre B3T et B4T et 18% entre B4T et B5T.

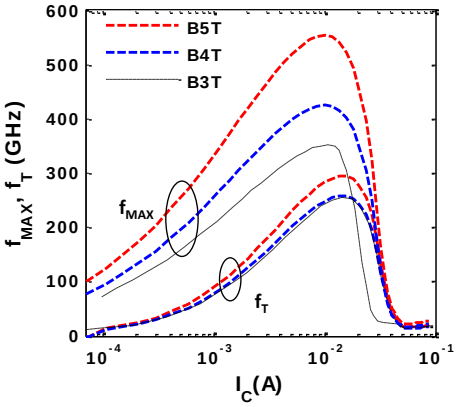


Figure 0.8 Comparaison des résultats f_T et f_{MAX} pour les technologies B3T, B4T et B5T pour V_{CB} = 0.5V à 300 K.

4 Conclusion

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

Le travail mené permet d'obtenir des simulations plus précises en concordance avec les dispositifs réalisables par la filière avancées BiCMOS de STMicroelectronics, facilitant le développement et l'optimisation des TBH à base SiGe ou SiGeC.
Les modèles physiques utilisés ont été amélioré, permettant une meilleure description du transport de charge dans la structure. Pour l'environnement de simulation TCAD, il a été mis en place les modèles physiques adaptées aux alliages SiGeC contraints sur Si. Nous avons proposé de nouveaux modèles analytiques pour la densité effective d'états pour la base SiGeC. Nous avons montré l'influence des modèles, en particulier ceux liés à la réduction de bande interdite en fonction du dopage, qui peuvent conduire à de mauvais résultats s'ils sont mal utilisés.

Dans cette étude, différentes architectures de TBH avancés ont été proposées pour objectif d'accroitre les performances en fréquence. Par exemple, une architecture haute performance faible coût a été étudiée profitant de la réduction de la capacité collecteur-base (CB). Avec une augmentation de l'épaisseur de l'oxyde collecteur-base de 50 à 150 nm, la capacité CB est réduite de 40%.

Le développement et de la validation des différents scripts de l'environnement de simulation étaient au cœur du travail à accomplir. Nous avons élaboré des kits de simulation pour les technologies avancés de TBH, pour permettre de simuler les caractéristiques statiques et dynamiques et d'extraire les figures de mérite et les paramètres usuels du transistor. Les techniques d'extraction de f_{MAX} et de f_T ont été exposé, techniques sur lesquelles ont été élaboré les scripts en langage TCL pour l'environnement de simulation. Ces simulations sont les premières qui prennent en compte l'impact de la contrainte liée au taux de germanium et au taux de carbone dans la base, non seulement pour la simulation des procédés de fabrication, mais aussi pour la simulation électrique. Tous les résultats de simulation ont été validés avec des mesures expérimentales.

Chaque étape du procédé de fabrication est simulé conduisant à une prédiction précise de la distribution des dopants actifs, de la distribution de la contrainte et de la géométrie du dispositif.
Les modèles de diffusion utilisés pour la distribution des dopants dans les alliages SiGeC ont été expliqués, montrant l'importance du carbone pour réduire leur diffusion. Sur la base de travaux antérieurs, un important travail de synthèse a été accompli pour les modèles adaptés aux alliages SiGeC contraints, et leur mise en œuvre pour le simulateur de type hydrodynamique. Cela concerne la bande interdite, les masses effectives de densité d'état, les mobilités et les temps de relaxation en énergie des porteurs.

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014

Dans cette thèse nous avons étudié les principaux paramètres des procédés de fabrication et leur impact sur les performances du TBH. Nous avons identifié les paramètres qui jouent le rôle le plus important dans l'amélioration de f_{MAX}, et un jeu de valeurs a été dégager pour atteindre de très grandes valeurs pour f_{MAX} sans nuire aux autres caractéristiques électriques du dispositif.

Parmi l'ensemble des paramètres étudiés, l'étude s'est focalisée sur l'influence du niveau de dopage en bore dans la base, du taux de carbone et de germanium sur les caractéristiques électriques du TBH. Ces trois paramètres sont très importants pour l'amélioration des performances du transistor, ainsi que les limites que l'on peut leur donner sans que cela entraine des dégradations importantes du comportement électrique. Ainsi, concernant le pourcentage de carbone sur l'obtention de bonnes performances pour le transistor, on peut conclure qu'il doit rester inférieur à 1%, avec un optimum d'environ 0,5% pour les valeurs maximales possibles de f_T et f_{MAX}.

En finissant par le développement d'une architecture de TBH désignée B5T, l'étude a montré comment obtenir une valeur de f_{MAX} supérieure à 500 GHz, remplissant les objectifs du contrat porteur financier de la thèse.

tel-00938619, version 1 - 29 Jan 2014