

Dopage laser pour la microélectronique du futur

J. Boulmer, D. Débarre, A. Grouillet¹ et D. Lenoble¹

*Institut d'Électronique Fondamentale, UMR 8622, Université Paris Sud, bâtiment 220,
91405 Orsay, France*

¹ *France Télécom R&D, 28 chemin du Vieux Chêne, BP. 98, 38243 Meylan, France*

Résumé: La microélectronique sur silicium continuera à évoluer, dans les 10 à 15 ans qui viennent, vers des degrés d'intégration et de complexité de plus en plus importants. Cette évolution implique une réduction continue des dimensions du transistor MOSFET, dont la largeur de grille ne sera plus, dans une dizaine d'années, que de 50 nm. Pour suivre cette évolution, il faut être capable de réaliser des jonctions de plus en plus minces (jusqu'à ≈ 10 nm pour une largeur de grille de 50 nm), avec des concentrations en dopants actifs de plus en plus élevées et des profils de plus en plus abrupts. Les techniques de dopage habituelles, basées sur une implantation ionique suivie d'un recuit thermique, rencontrent de grandes difficultés pour atteindre ces performances. Nos expériences montrent que la technique de dopage laser offre une solution très intéressante à la réalisation de jonctions ultra-fines.

1. EVOLUTION DE LA MICROELECTRONIQUE SILICIUM ET DOPAGE ULTRA-MINCE

La progression exponentielle des performances de la microélectronique sur silicium suit la loi de Moore depuis une trentaine d'années: réduction des dimensions des composants élémentaires, augmentation du nombre de transistors par circuit, accroissement de la complexité et de la rapidité des systèmes intégrés. L'International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) [1] prévoit que cette progression persistera encore dans les 10 à 15 ans à venir. Cette évolution entraîne inéluctablement la microélectronique vers le monde des nanotechnologies et implique l'avènement de nouveaux concepts, matériaux, dispositifs et technologies. Cependant, l'élément de base de la microélectronique restera encore pendant des années le transistor MOSFET dont les dimensions continueront à diminuer inexorablement. La largeur de grille du MOSFET, qui sert de référence pour qualifier le niveau atteint par la technologie dans la réduction des dimensions, est aujourd'hui de ≈ 180 nm. Selon les prévisions de l'ITRS, elle ne sera plus que de ≈ 100 nm en 2005, et de 35 nm en 2014. Pour qu'un tel transistor puisse fonctionner avec les performances attendues, il reste une somme énorme de problèmes physiques et technologiques à résoudre.

L'un des verrous technologiques soulignés par l'ITRS est la formation de jonctions ultra-fines correspondant aux extensions de la source et du drain du MOSFET. Ces extensions jouent un rôle capital sur le fonctionnement du transistor. En effet, la réduction des effets dus au raccourcissement du canal de conduction, la minimisation des résistances série ou parasites ainsi que des courants de fuite, imposent des contraintes drastiques sur le dopage de la source et du drain, et, tout particulièrement, de leurs extensions [1,2].

Selon les projections de l'ITRS pour 2014, les épaisseurs de ces extensions devront diminuer jusqu'à ≈ 10 nm, leur résistivité superficielle devra être inférieure à $400 \Omega/\square$, avec des profils aussi carrés et abrupts que possible et des gradients qui devront devenir inférieurs au nm/décade. Ces caractéristiques impliquent des concentrations en dopant dépassant $10^{21}/\text{cm}^3$, donc bien supérieures aux solubilités limites des dopants de type p dans le silicium solide à l'équilibre thermodynamique. A l'heure actuelle aucune des solutions technologiques pratiquées dans le monde industriel pour le dopage ultra-mince ne répond aux spécifications de l'ITRS pour les générations CMOS sub - $0.1 \mu\text{m}$.

Les techniques de dopage utilisées aujourd'hui en microélectronique silicium sont basées sur l'implantation ionique des dopants, une technologie parfaitement maîtrisée. Mais l'implantation ionique provoque des désordres dans le réseau cristallin du silicium (parfois jusqu'à l'amorphisation), et place une partie des dopants en sites interstitiels. C'est pourquoi elle est toujours suivie d'un recuit thermique dont le

but est de guérir les défauts cristallins induits par l'implantation et d'activer électriquement les dopants implantés.

Le dopage par implantation ionique se heurte à de grandes difficultés quand il s'agit de réaliser les dopages ultra-minces requis pour les technologies sub-0.1 μm [2]. La réduction de la profondeur de dopage peut se faire par diminution de l'énergie d'implantation, et/ou en implantant des ions plus lourds, notamment moléculaires. Mais cette réduction d'énergie s'accompagne d'une réduction du courant d'ions implantés, donc du rendement de production. De plus, les effets de canalisation d'ions dans le réseau cristallin, qui élargit considérablement le profil d'implantation final, deviennent d'autant plus importants que l'énergie d'implantation diminue. C'est pourquoi on pratique souvent une pré-implantation d'ions non dopants, comme le germanium, afin de pré-amorphiser le silicium pour limiter la canalisation des ions dopants. Après implantation, le recuit thermique permet de reconstruire une structure cristalline, mais la densité de dopant reste inférieure à sa solubilité limite dans le silicium (désactivation des dopants à haute température $>800-900^\circ\text{C}$), typiquement de quelques $10^{20}/\text{cm}^3$. Ce recuit, même très rapide, provoque une diffusion anormale des dopants, dite Transient Enhanced Diffusion (TED) [3], c'est à dire très amplifiée (notamment dans le cas particulier du bore), donc une augmentation de la profondeur de la couche dopée. Enfin le profil de dopage obtenu est très loin des profils carrés et abrupts qui sont réclamés pour les générations futures.

Certains de ces problèmes peuvent être résolus par la technique de dopage plasma, actuellement en cours de développement [4]. Elle consiste à placer la tranche de silicium à proximité d'un plasma créé à partir d'un gaz dopant. Par application à la plaque d'impulsions de tension négative, les ions de dopants du plasma sont accélérés vers le silicium. Cette technique permet de réaliser des implantations à très faible énergie, avec des courants, donc des rendements de production, compatibles avec la demande de l'industrie. Le dopage plasma apporte donc une solution élégante qui pourra être introduite à court terme, sa compatibilité avec la technologie CMOS ayant récemment été démontrée. Néanmoins elle conserve les limitations inhérentes aux processus d'implantation ionique: canalisation, diffusion en cours de recuit, (profils carrés irréalisables), densités limitées par la solubilité limite.

A l'heure actuelle, aucune des solutions connues dans le monde industriel pour le dopage ultra-mince ne répond aux spécifications de l'ITRS pour les générations CMOS de 70 nm et au delà.

2. LE PROCÉDE DE DOPAGE LASER

Ce procédé repose sur des principes physiques radicalement différents de l'implantation ionique [5] : une impulsion laser excimère UV induit, pendant un temps très court (≈ 10 ns), un cycle de fusion / solidification sur une épaisseur très faible de silicium (≈ 10 nm), qui est répété si nécessaire. Le dopant est apporté à la surface du silicium par un précurseur gazeux chimisorbé en surface avant l'insolation laser. Le rôle de l'impulsion laser est d'incorporer une partie des dopants chimisorbés dans la zone fondue et d'effectuer un recuit simultané. Pendant la phase de fusion, les dopants diffusent rapidement dans le silicium liquide, alors qu'en phase solide leur diffusion est négligeable à cette échelle de temps. Les dopants sont donc confinés dans la zone fondue, dont l'extension est contrôlée principalement par le flux laser. Pendant la phase de solidification, le silicium est ré-épitaxié à partir du silicium solide sous-jacent. Un matériau monocristallin est reconstruit et les atomes de dopant sont mis en site substitutionnel. L'extrême rapidité du front de solidification (≈ 6 m/s) gomme les effets de ségrégation, ce qui favorise la formation de profils carrés, et permet d'atteindre des densités de dopants supérieures aux solubilités limite atteintes avec les techniques classiques.

A la suite du traitement laser, les dopants sont électriquement actifs, le profil de dopage est quasi carré, avec des flancs très abrupts et les doses de dopant peuvent être très élevées, si nécessaire. En outre, ce procédé laser bénéficie d'un très faible budget thermique, en raison de la très courte durée des impulsions laser, et permet la localisation du dopage, soit par projection, soit par masquage.

Il a été montré expérimentalement [1, 5-11] que le dopage laser est capable d'apporter des solutions très attractives aux problèmes de dopage ultra-mince soulignés par l'ITRS. Le procédé laser peut aussi se limiter au traitement par fusion /solidification de zones préalablement dopées par implantation basse énergie: dans ce cas, l'expérience est faite sous vide. Hormis le processus d'apport de dopant, les processus en jeu sont identiques à ceux du dopage laser direct décrit ci-dessus. Des expériences récentes

réalisées dans cette configuration ont permis de montrer que ces traitements laser semblent compatibles avec une technologie CMOS sub-0.1 μm [12-14].

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Des expériences de dopage laser au bore ont été faites à l'IEF dans le cadre d'une convention CNET-IEF. L'expérience a été réalisée sur du Si(100) faiblement dopé au bore ($\rho = 60$ à $90 \Omega \cdot \text{cm}$). L'échantillon est disposé dans une enceinte à vide. Le gaz dopant (BCl_3) est injecté à la surface du silicium avant chaque tir laser par une vanne pulsée. La dose de gaz injectée à chaque tir sature la surface en adsorbats de dopant. Le pompage de l'enceinte est maintenu en permanence, et la pression statique de BCl_3 dans l'enceinte est d'environ 10^{-4} mbar lorsque l'injection de gaz est active, alors que le vide résiduel est de 10^{-6} mbar.

Le faisceau d'un laser excimère XeCl ($\lambda=308\text{nm}$, impulsions de ≈ 25 ns) est mis en forme par un dispositif homogénéiseur. La densité d'énergie laser est réglable, par atténuation optique, de 300 à 800 mJ/cm^2 . Alignement et homogénéité sont contrôlés par deux caméras CCD conjuguées optiquement avec l'échantillon. La fusion superficielle du silicium est contrôlée en temps réel en mesurant, à chaque tir, la réflectivité transitoire, à 675 nm, de la zone traitée de l'échantillon par le laser. Les impulsions laser incidentes et réfléchies sur l'échantillon, sont mesurées à chaque tir laser. Les 3 signaux transitoires (laser UV incident et réfléchi, réflectivité à 675 nm) sont enregistrés tir à tir par un oscilloscope numérique 1GHz.

Après traitement laser, les zones dopées ont été caractérisées notamment par la méthode des 4 pointes (résistivité surfacique), diffraction X (contraintes, paramètres de maille), SIMS (concentration et profil de dopage), AFM (rugosité). Profondeur de fusion et concentration de dopant sont évaluées également à partir des mesures optiques faites en temps réel. Les résultats obtenus par les différentes méthodes sont en accord raisonnable, compte tenu des moyens utilisés dans ces expériences.

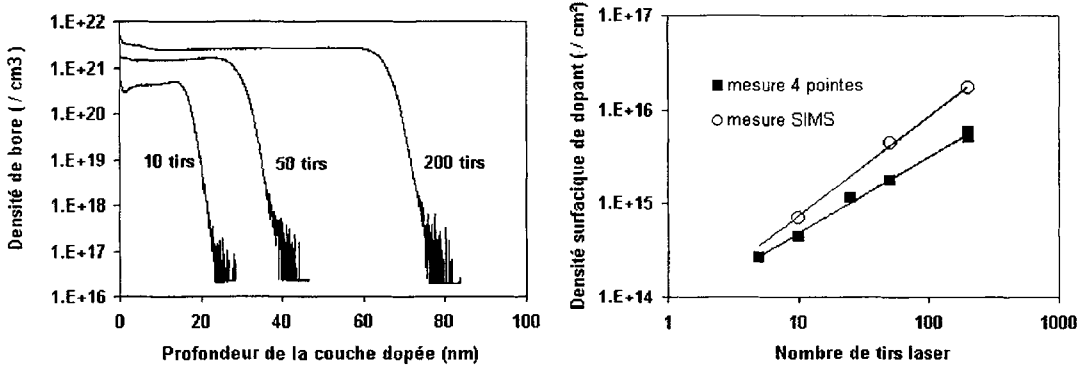


Figure 1 (gauche): profils SIMS des couches obtenues par dopage laser au bore. Le gaz dopant est BCl_3 ; le nombre de tirs laser varie de 10 à 200, et la densité d'énergie laser reste constante.

Figure 2 (droite): densité surfacique de bore après dopage laser déduite de mesures de conductivité électrique (méthode des 4 pointes), ou des profils SIMS. Le nombre de tirs laser varie de 5 à 200, et la densité d'énergie laser est maintenue constante.

La figure 1 donne 3 exemples de profils SIMS (réalisés par Charles Evans & Associates, dans le cadre de la convention CNET-IEF) obtenus en faisant varier le nombre de tirs laser, toutes choses égales par ailleurs. On remarquera qu'il s'agit de profils "quasi-carrés" et très abrupts, d'épaisseurs allant de ≈ 20 à 70 nm (en fait on peut obtenir des épaisseurs de 14 nm à flux laser plus faible). La pente en queue de profil est identique dans tous les cas: elle est liée à un artefact de la technique SIMS (atome de recul) limitant la résolution en profondeur. On voit aussi que la solubilité limite du bore dans le silicium ($\approx 6 \times 10^{20} / \text{cm}^3$) est atteinte pratiquement dès le dixième tir, et largement dépassée après 200 tirs. Il est à souligner que les résistivités surfaciques de ces mêmes couches sont très faibles: $220 \Omega/\square$ pour 10 tirs, $57 \Omega/\square$ pour 50 tirs, et $20 \Omega/\square$ pour 200 tirs. Ces très faibles résistivités résultent de l'excellente efficacité de

l'activation électrique des dopants par le traitement laser, bien que la concentration en dopant dépasse la solubilité limite à l'équilibre thermodynamique.

La figure 2 montre l'évolution de la densité surfacique de dopants en fonction du nombre de tirs laser, mesurée par SIMS et par la méthode des 4 pointes: à chaque tir laser, dans ces conditions, la dose de bore incorporé est estimée à $\approx 6 \times 10^{13}/\text{cm}^2$. Le désaccord entre résultats électriques et SIMS sont attribuables en grande partie à l'absence de correction adéquate de la mesure de résistivité pour tenir compte des faibles dimensions de la zone dopée dans ces expériences ($2 \times 2.8 \text{ mm}^2$) et à la très faible profondeur des couches mesurées.

Ces expériences nous ont montré qu'un contrôle de l'évolution du processus par des mesures in situ est indispensable. En effet, au cours du processus de dopage, les propriétés thermodynamiques, optiques et électroniques de la zone traitée par le laser évoluent, puisque la couche superficielle se charge en dopants. Le processus de dopage induit, en retour, une évolution de la réponse du silicium à l'impulsion laser, donc de la profondeur de fusion, c'est à dire de l'épaisseur de la couche dopée. La solution qui a été adoptée, pour contrôler le processus de dopage en temps réel, est un suivi de la réflectivité transitoire qui renseigne directement sur le processus de fusion [15,16].

Ces résultats expérimentaux montrent que le dopage laser est capable d'atteindre, voire de dépasser, les spécifications de l'ITRS pour les générations sub - $0.1 \mu\text{m}$. Les caractéristiques des couches dopées par laser ne sont atteintes par aucune autre technique connue actuellement : épaisseurs des couches dopées allant de 14 à 70 nm, résistances surfaciques aussi faibles que $20 \Omega/\square$, concentrations de dopant allant jusqu'à $2.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, profils de dopage « quasi-carrés » et très abrupts (gradients de $\approx 2 \text{ nm/décade}$, correspondant à la limite de résolution en profondeur du SIMS.

4. CONCLUSION

A notre connaissance, le dopage laser n'est pas encore entré dans la fabrication des circuits silicium. Pour les générations CMOS des toutes prochaines années, le dopage ultra-mince pourra sans doute se faire par les techniques actuellement connues (implantation basse énergie) ou déjà très avancées, comme le dopage plasma. A plus long terme, le dopage laser apparaît presque incontournable car il permet de s'affranchir de la principale limitation des techniques d'activations classiques de dopants: la TED. Il permettra donc de réaliser des dopages ultra-minces répondant aux spécifications prévues par l'ITRS pour le CMOS sub- $0.05 \mu\text{m}$.

Références

1. E. C. Jones, E. Ishida, *Mat. Sci. Eng.*, **R24**, 1 (1998)
2. International Technology Roadmap for Semiconductors: <http://notes.sematech.org/ntrs/PubINTRS.nsf>
3. D.A. Antoniadis and I. Moskowitz, *J. Appl. Phys.*, 53 (10), 6788, 1982)
4. M.J. Goeckner, S. B. Felch, Z. Fang, D. Lenoble, J. Galvier, A. Grouillet; G. C. F. Yeap, D. Bang, M. R. Lin, *J. Vac. Sci. Technol. B* **17**, 2290 (1999)
5. F. Foulon, in *Photochemical Processing of Electronic Materials*, Academic Press, 257 (1992)
6. A. Slaoui, F. Foulon, R. Stuck, P. Siffert, *Appl. Phys.* **A50**, 479 (1990)
7. T. Akane *et al*, *Jpn. J. Appl. Phys, Part-1*, **31**, 4437 (1992)
8. K. Toyoda, K. Sugioka, *Microelectronic-Engineering*, **20**, 131 (1993)
9. E. Ishida *et al*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**, 399 (1994)
10. K-J. Kramer *et al*, *IEEE-EDL*, **17**, 461 (1996)
11. K-J. Kramer *et al*, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2320 (1996)
12. B. Yu *et al*, *IEDM'99 proceedings*, **51** (1999)
13. K.-I. Goto *et al*, *IEDM'99 proceedings*, **931** (1999)
14. H. Tsukamoto, H. Hiroshi, Yamamoto, T. Noguchi, H. Masuya, T. Suzuki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, 3810 (1996)
15. J. Boulmer, D. Dragnea, C. Guedj, Débarre D., A. Bosseboeuf, E. Finkman, B. Bourguignon, *SPIE Proceedings*, **3404**, 149 (1998)
16. B. Dragnea, J. Boulmer, J.-P. Budin, D. Débarre, B. Bourguignon, *Phys. Rev. B* **55**, 13904 (1997)