

Dépôt par laser de WSi_x sur du TiN à partir de WF_6 et de SiH_4 ¹

P. DESJARDINS, R. IZQUIERDO ET M. MEUNIER²

Groupe des couches minces et Département de génie physique, École polytechnique de Montréal, C. P. 6079, succursale A, Montréal (Québec), Canada H3C 3A7

Reçu le 11 août 1992

Un système d'écriture directe par laser a été développé pour le dépôt de WSi_x sur TiN à partir de WF_6 et de SiH_4 . Un laser à Ar^+ (488 nm, 1.5 W) et une diode laser (796 nm, 1.0 W) peuvent être utilisés comme source de photons. Les lignes sont déposées à des vitesses allant jusqu'à $100 \mu m s^{-1}$ à partir d'un mélange en débit de WF_6 et SiH_4 dilué dans l'Ar. Des dépôts de 1.5 à 11 μm de largeur et de 20 à 180 nm d'épaisseur sont obtenus à une vitesse de $100 \mu m s^{-1}$ avec un laser à Ar^+ . Les lignes écrites à l'aide de la diode laser ont typiquement de 4 à 12 μm de largeur et de 160 à 860 nm d'épaisseur. Le rapport W/Si dans le dépôt se situe entre 1.5 et 1.8 lorsque l'on utilise un mélange de 1 scem de WF_6 et 3 scem de SiH_4 dilué dans 50 à 150 scem d'Ar.

A direct writing system has been developed for the deposition of WSi_x on TiN from a gas mixture of WF_6 and SiH_4 . An Ar^+ (488 nm, 1.5 W) and a diode laser (796 nm, 1.0 W) are used as the photon source. Lines are written at scan speeds of up to $100 \mu m s^{-1}$ from a flowing gas mixture of WF_6 and SiH_4 diluted in Ar. Deposits of 1.5 to 11 μm wide and 20 to 180 nm thick are obtained at a writing speed of $100 \mu m s^{-1}$ with the Ar^+ laser. Lines written using the diode laser are typically 4 to 12 μm wide and 160 to 860 nm thick. The W/Si ratio in the deposit is between 1.5–1.8 for a mixture of 1 scem WF_6 and 3 scem SiH_4 diluted in 50 to 150 scem Ar.

Can. J. Phys. 70, 898 (1992)

1. Introduction

La réduction des dimensions des circuits intégrés impose d'importantes contraintes sur le budget thermique lors de la fabrication des dispositifs microélectroniques, de là l'intérêt de développer des procédés de fabrication à basses températures. Dans ce but, les procédés laser font actuellement l'objet de nombreuses recherches et constituent une alternative attrayante pour la fabrication et la modification de microstructures (1, 2).

Le dépôt stimulé par laser de métaux réfractaires et de leurs siliciures est particulièrement intéressant pour les applications de microchirurgie des circuits intégrés et de fabrication sur mesure (3–6). Le dépôt chimique en phase vapeur stimulé par laser (LCVD, *laser chemical vapor deposition*) de W à partir de $W(CO)_6$ a été étudié à plusieurs reprises (7–13). Les taux de croissance sont faibles et la résistivité des dépôts est élevée en raison de l'incorporation de carbone et d'oxygène dans la couche mince. Par contre, l'utilisation de l'hexafluorure de tungstène (WF_6) permet généralement d'obtenir des couches de meilleure qualité. Le dépôt de W à partir de WF_6 a été réalisé à l'aide de lasers à ions (Ar^+ et Kr^+) (3–6, 14–22), excimères (23–27) et CO_2 (28, 29). Dans la plupart des cas, le Si contenu dans le substrat ou l'ajout d'hydrogène dans le mélange gazeux ont été utilisés pour réduire le WF_6 . Cependant, certains problèmes sont rencontrés dans ces deux cas car la réduction par l'hydrogène demande des températures aussi élevées que $450^\circ C$ (17) alors que l'épaisseur des dépôts est limitée lors de la réaction avec le Si.

Pour pallier à ces problèmes, l'utilisation du silane comme agent réducteur du WF_6 en procédé laser a été proposée récemment (18). Cette réaction est particulièrement intéressante car elle a lieu à basse température ($175^\circ C$) et, de plus, elle permet le dépôt de W ainsi que de siliciures de tungstène selon les conditions de dépôt. Cependant, la température d'initiation de la réaction varie fortement avec la composition du mélange

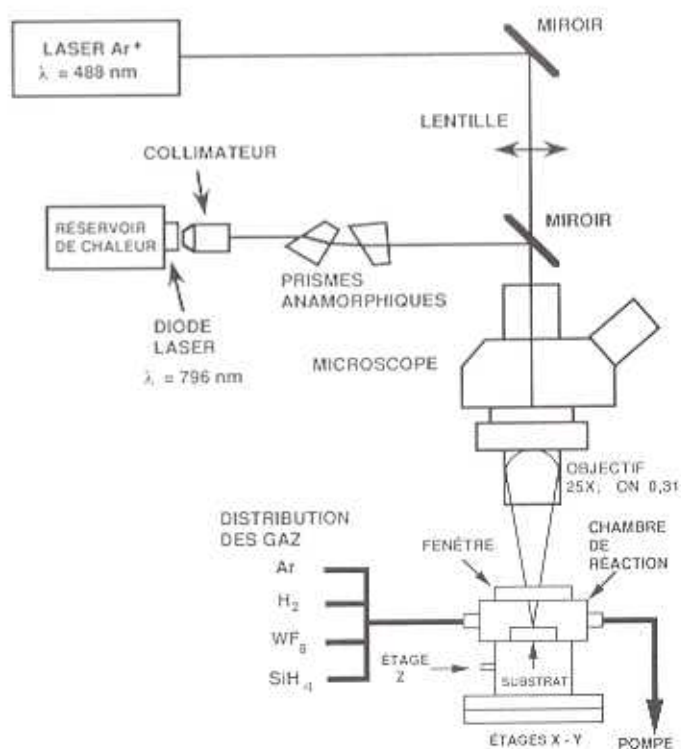


FIG. 1. Schéma du système d'écriture directe par laser.

gazeux (18). Par ailleurs, le mélange de WF_6-SiH_4 est particulièrement réactif et des conditions explosives sont possibles en procédés laser (18).

Nous présentons ici le dépôt de WSi_x sur du nitrure de titane (TiN) à partir d'un mélange WF_6-SiH_4 dilué dans l'Ar. Le TiN est fréquemment utilisé comme couche d'adhérence pour le dépôt de couches métalliques (30, 31) et il s'agit d'une excellente barrière de diffusion (32). Nous avons choisi d'utiliser des lasers continus comme source de chaleur dans un système d'écriture directe. Le laser à Ar^+ permet d'obtenir de grandes densités de puissances à des longueurs d'onde dans le visible

1. Cet article a été présenté à la 6^e conférence canadienne sur la technologie des semiconducteurs, laquelle a eu lieu à Ottawa, Ontario, Canada, du 11 au 13 août 1992, et a été soumis au nouveau processus d'évaluation par les pairs.

2. Auteur correspondant.

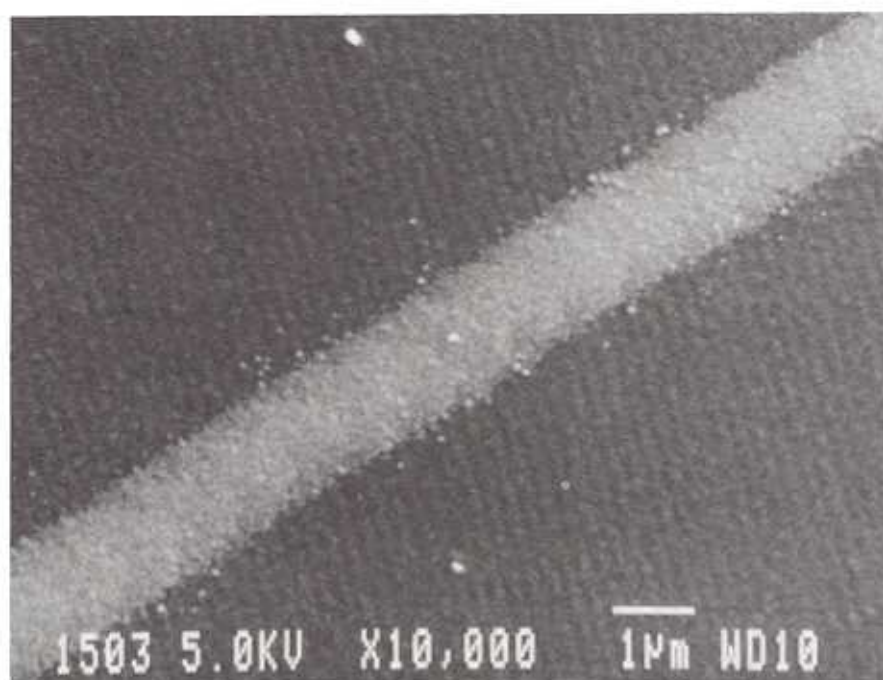


FIG. 2. Photographie au MEB d'une ligne de WSi_2 sur TiN écrite avec un laser à Ar^+ . $f(WF_6) = 1$ sccm, $f(SiH_4) = 3$ sccm, $f(Ar) = 150$ sccm, $P = 16,2$ Torr, $P_L = 95$ mW et $v = 100 \mu m s^{-1}$. f , débit; P , pression; P_L , puissance laser; v , vitesse d'écriture.

(488 et 514 nm). De plus, nous avons également utilisé une diode laser dans le but de développer un système économique de petites dimensions.

2. Système d'écriture directe par laser

Le système expérimental est représenté schématiquement à la figure 1. Il s'agit d'un système d'écriture directe où le laser agit comme source de chaleur pour induire un procédé pyrolytique local. Deux types de lasers peuvent être utilisés dans ce système. Dans le premier cas, le faisceau d'un laser à Ar^+ (488 nm, 1,5 W) est focalisé sur le substrat à l'aide d'un objectif $25\times$ à longue distance de travail, d'ouverture numérique (ON) = 0,31. Le faisceau est focalisé sur environ $2 \mu m$ de diamètre. Dans le but de développer un système compact et peu coûteux, nous avons également employé une diode laser à AlGaAs (796 nm, 1 W). La divergence est de 10° et 40° , respectivement, dans les directions parallèle et perpendiculaire à la propagation du faisceau. Dans ce cas-ci, le faisceau est collimé avec un objectif ON de 0,5 et son ellipticité est réduite à l'aide d'une paire de prismes anamorphiques de ratio 4 : 1. Le faisceau est alors dirigé vers le microscope et focalisé à l'aide de l'objectif à longue distance de travail. Dans le cas de la diode laser, le faisceau est une ellipse dont les axes mesurent 12 et $93 \mu m$ au niveau du substrat.

Le substrat de TiN (100 nm TiN - 800 nm $SiO_2 - Si$) est dégraissé et placé dans une chambre de réaction en acier inoxydable fermée par une fenêtre en silice fondue. Des étages de déplacement XY contrôlés électroniquement permettent de déplacer la chambre de réaction et de définir les motifs souhaités. Les lignes sont déposées à partir d'un mélange de WF_6 , SiH_4 et Ar. Le système peut être opéré dans un mode statique ou dynamique. Dans le premier cas, la chambre de dépôt est remplie à la pression désirée puis elle est isolée lors du dépôt. Dans un mode dynamique, le débit des différents gaz est maintenu à une valeur prédéterminée tout au long du dépôt. Dans le cas de la diode laser, les lignes sont écrites dans la direction

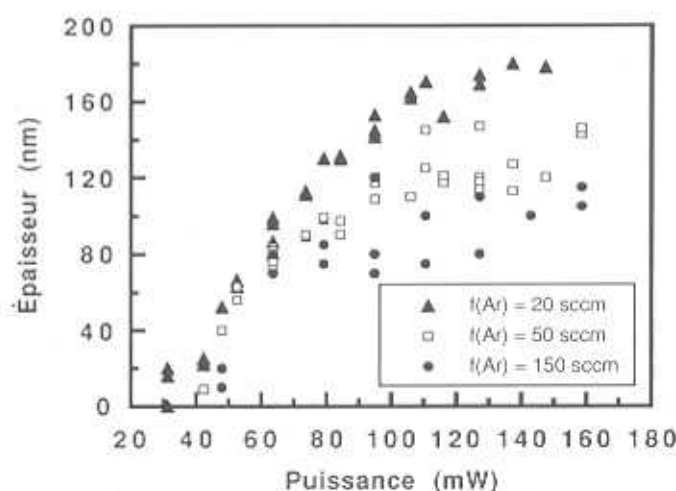


FIG. 3. Épaisseur des lignes en fonction de la puissance du laser à Ar^+ pour différents débits d'Ar. $f(WF_6) = 1$ sccm, $f(SiH_4) = 3$ sccm, $f(Ar) = 20, 50$ et 150 sccm, $P = 5,6, 8,9$ et $16,2$ Torr et $v = 100 \mu m s^{-1}$.

parallèle au grand axe de l'ellipse à des vitesses allant jusqu'à $100 \mu m s^{-1}$. Le substrat est à la température de la pièce durant le dépôt.

3. Écriture directe de WSi_2 sur TiN

Le dépôt stimulé par diode laser dans un mode statique a déjà été présenté (33, 34). Des dépôts de WSi_2 de 4 à $15 \mu m$ de largeur et de 110 à 950 nm d'épaisseur sont obtenus de manière reproductible à une vitesse d'écriture de $5 \mu m s^{-1}$. Pour un mélange gazeux de 1 Torr (1 Torr = 133,3 Pa) de WF_6 et 3 Torr de SiH_4 , le rapport W/Si dans le dépôt est de 1,1 à 1,4. On a observé que la puissance laser nécessaire pour induire la réaction dépendait fortement de la composition du mélange gazeux et que ce mélange pouvait être extrêmement réactif.

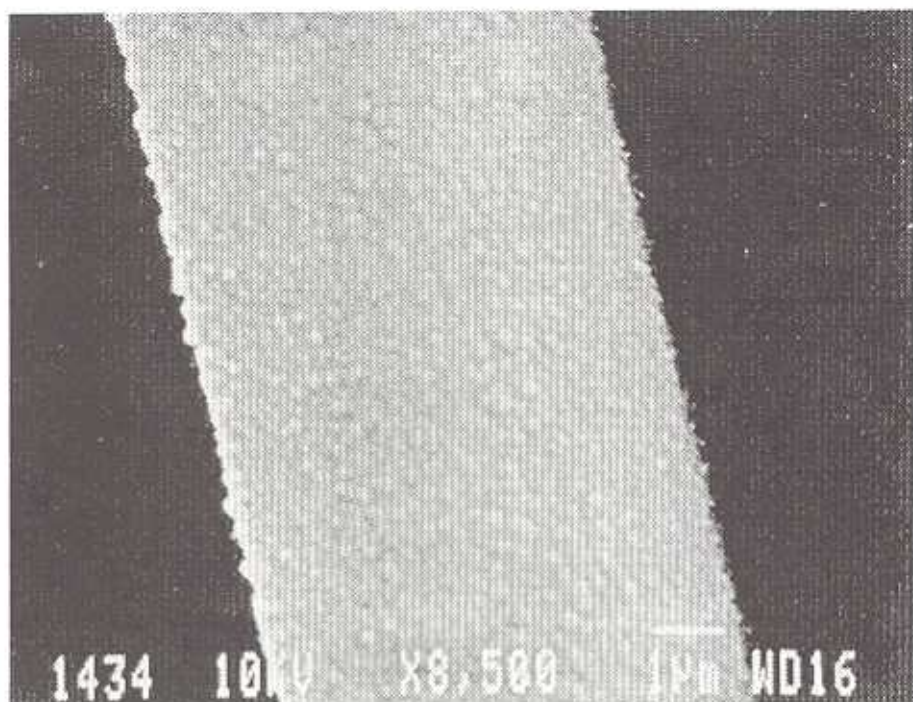


FIG. 4. Photographie au MEB d'une ligne de WSi, sur TiN écrite avec une diode laser. $f(\text{WF}_6) = 1$ sccm, $f(\text{SiH}_4) = 3$ sccm, $f(\text{Ar}) = 50$ sccm, $P = 8,9$ Torr, $P_L = 360$ mW et $v = 100 \mu\text{m s}^{-1}$.

Pour éviter les situations explosives, nous avons limité la pression partielle des gaz réactifs (WF_6 et SiH_4) à 15 Torr.

Nous nous concentrons ici sur le dépôt dans un mode dynamique lorsque les gaz circulent continuellement dans la chambre de réaction. Pour des raisons de sécurité, nous avons décidé d'utiliser de faibles débits de WF_6 et de SiH_4 . L'Ar sert de gaz tampon et pour diluer le mélange réactif. La figure 2 présente une photographie prise au microscope électronique à balayage (MEB) d'une ligne de WSi, écrite sur du TiN avec le laser à Ar^+ . Cette ligne très uniforme de $1,5 \mu\text{m}$ de largeur est écrite à une vitesse de $100 \mu\text{m s}^{-1}$ et une puissance laser incidente sur le substrat, P_L , de 95 mW. Notons que cette vitesse d'écriture correspond à la vitesse maximale des étages de déplacement dans notre système. La pression totale dans la chambre de réaction, P , est de 16,2 Torr et les débits de WF_6 , SiH_4 et Ar sont respectivement $f(\text{WF}_6) = 1$ sccm, $f(\text{SiH}_4) = 3$ sccm et $f(\text{Ar}) = 150$ sccm. La figure 3 montre l'épaisseur des dépôts en fonction de la puissance laser et du débit d'Ar pour des lignes écrites avec le laser à Ar^+ . L'épaisseur est évaluée à partir de mesures de profil (Dektak) et de photographies au MEB de vues en coupe des dépôts. Les débits de WF_6 et SiH_4 sont fixés à 1 et 3 sccm respectivement alors que le débit d'Ar est de 20, 50 et 150 sccm. Lorsque le débit d'Ar augmente, on remarque que l'épaisseur des dépôts diminue. Des lignes de 20 à 180 nm d'épaisseur sont obtenues à une vitesse d'écriture de $100 \mu\text{m s}^{-1}$. Ceci correspond à un taux de croissance de 1 à $9 \mu\text{m s}^{-1}$ lorsque l'on considère les dimensions du faisceau et la vitesse d'écriture. Ces lignes ont typiquement de 1,5 à $11 \mu\text{m}$ de largeur.

La figure 4 présente une photographie au MEB d'une ligne écrite avec la diode laser. Cette ligne, très uniforme, est déposée à partir d'un mélange de 1 sccm de WF_6 , 3 sccm de SiH_4 et 50 sccm d'Ar. La vitesse d'écriture est de $100 \mu\text{m s}^{-1}$ et P_L de 360 mW. L'effet de la puissance laser et du débit d'Ar est illustré à la figure 5. Les débits de WF_6 et SiH_4 sont fixés à 1 et 3 sccm, respectivement, alors que le débit d'Ar est de 50 et

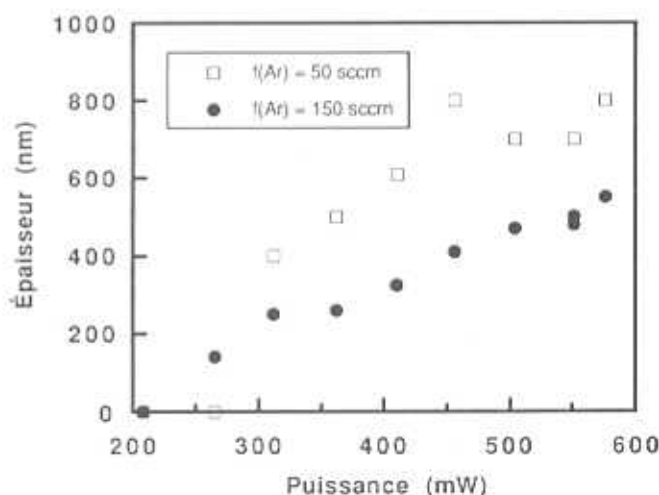


FIG. 5. Épaisseur des lignes en fonction de la puissance de la diode laser pour différents débits d'Ar. $f(\text{WF}_6) = 1$ sccm, $f(\text{SiH}_4) = 3$ sccm, $f(\text{Ar}) = 50$ et 150 sccm, $P = 8,9$ et 16,2 Torr et $v = 100 \mu\text{m s}^{-1}$.

150 sccm. Tout comme dans le cas du laser à Ar^+ , on remarque que l'augmentation du débit d'Ar occasionne une diminution de l'épaisseur des dépôts. Les lignes ont typiquement de 150 à 800 nm d'épaisseur et de 4 à $12 \mu\text{m}$ de largeur. Dans ces conditions, on déduit un taux de croissance de 160 à 860 nm s^{-1} . On remarque donc que le taux de croissance est d'un ordre de grandeur plus élevé dans le cas des lignes écrites avec le laser à Ar^+ , même si l'épaisseur totale est plus faible. On remarquera que pour des lignes écrites à la même vitesse, le temps total de croissance est directement proportionnel à la longueur du faisceau.

On observe aussi qu'une augmentation du débit d'Ar a pour effet de diminuer le taux de croissance moyen (fig. 3 et 5). Ceci

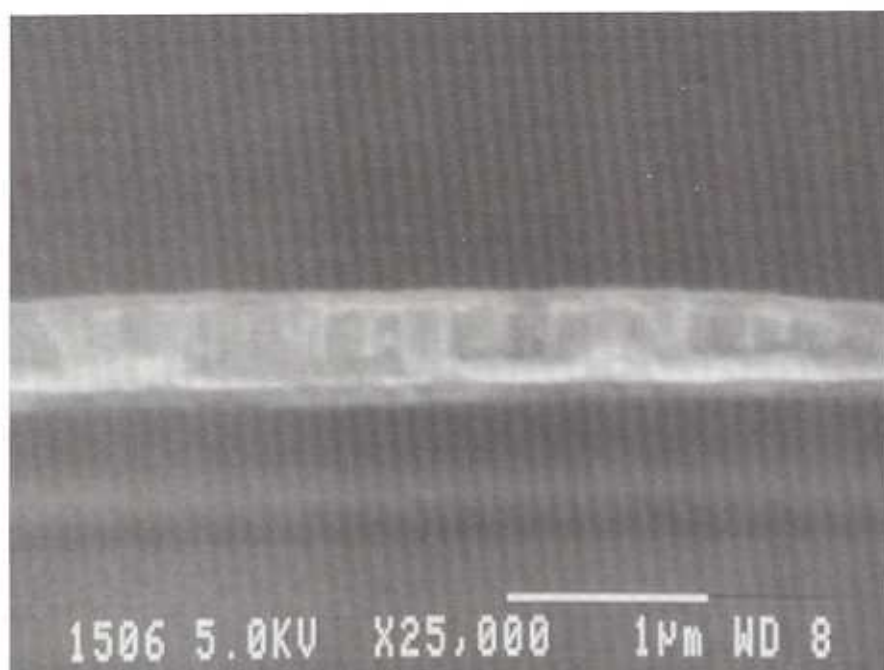


FIG. 6. Photographie au MEB d'une vue en coupe d'une ligne de WSi, écrite sur TiN avec un laser à Ar^+ . $f(\text{WF}_6) = 1 \text{ sccm}$, $f(\text{SiH}_4) = 3 \text{ sccm}$, $f(\text{Ar}) = 150 \text{ sccm}$, $P = 16,2 \text{ Torr}$, $P_L = 250 \text{ mW}$ et $v = 100 \mu\text{m s}^{-1}$.

suggère que le taux de croissance est limité par le transport des réactifs, plutôt que par la cinétique de surface, au moins pour une portion de la croissance. Contrairement au dépôt chimique en phase vapeur (CVD) conventionnel, en écriture directe assistée par laser, on a un taux de croissance différent en tout point du dépôt car les hausses de température sont déterminées par le profil du faisceau laser et les propriétés de la couche chauffée. Ainsi, à un instant donné, il est possible que le taux de croissance soit contrôlé par la diffusion des réactifs au centre du dépôt et par la cinétique en bordure. La cinétique, la diffusion et le profil du faisceau laser contribuent donc à déterminer le profil final du dépôt. Dans un cas extrême, on obtiendrait des lignes aplaties lorsque l'apport de réactifs contrôle le taux de croissance.

Ce cas est illustré à la figure 6 qui montre une photographie au MEB de vue en coupe d'une ligne écrite à forte puissance (250 mW) avec le laser à Ar^+ . On remarque que la ligne est pratiquement plate. De plus, la figure 3 indique que l'épaisseur des dépôts sature à forte puissance laser et que la proportion d'Ar a un effet marqué sur le taux de croissance moyen. Ceci suggère qu'à forte puissance, la croissance soit grandement limitée par le transport des réactifs. Cette croissance limitée par l'apport des réactifs a aussi été observée par Black *et al.* (18), lesquels ont également obtenu des lignes plates. Bien que l'on observe également un effet du débit d'Ar sur l'épaisseur des dépôts obtenus avec la diode laser (fig. 5), il ne semble pas y avoir de phénomène de saturation du taux de croissance moyen. Ceci n'est pas surprenant, étant donné que le taux de croissance est environ 10 fois inférieur à celui obtenu avec le laser à Ar^+ . De plus, le profil quasi gaussien (montré à la fig. 7) des dépôts effectués avec la diode laser suggère que les effets de limitation du taux de croissance par le transport des réactifs ne sont pas dominants.

Les figures 6 et 7 montrent que le profil des dépôts est très régulier. Comme Black *et al.* (18), nous observons une croissance colonnaire lors du dépôt laser à partir de $\text{WF}_6\text{-SiH}_4$. Le

dessus des colonnes est arrondi, en forme de dôme. La surface des dépôts est moins rugueuse que dans le cas de la réduction par l'hydrogène (21).

La composition des lignes déposées est mesurée à l'aide de la spectroscopie des électrons Auger à haute résolution spatiale. Nous n'observons pas de différences significatives de composition entre les lignes écrites avec le laser Ar^+ ou la diode laser. Dans aucun des cas, on ne détecte de fluor dans le dépôt (<1%). De plus, outre une contamination de surface attribuable à l'exposition à l'atmosphère avant la mesure, pas de carbone, d'oxygène ou d'azote ne sont détectés dans le volume du dépôt. Le rapport W/Si est estimé entre 1,5 et 1,8 à partir des pics Si KLL (1620 eV) et W MNN (1736 eV). Les mesures effectuées à différentes profondeurs après pulvérisation indiquent un manque de Si à la surface du dépôt sur quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur. Ce manque de Si a déjà été signalé dans le cas du dépôt en mode statique avec la diode laser (33). Il faut souligner qu'il ne s'agit pas d'un effet de mesure attribuable à des différences entre les efficacités de pulvérisation du Si et du W car le rendement de pulvérisation est plus élevé pour le Si que pour le W (35). Cet appauvrissement en Si provient directement de la nature de la méthode de dépôt utilisée. En effet, d'après Lo (36), plusieurs réactions compétitives ont lieu entre les différentes espèces gazeuses et les matériaux déposés, et ce, même à la température de la pièce. En écriture directe par laser, seulement une portion du substrat est chauffée à un instant donné. Si on considère un endroit particulier, celui-ci subit la montée et la descente de température alors que les gaz sont toujours présents. Des réactions à la température de la pièce peuvent donc se poursuivre après le passage du faisceau laser. D'ailleurs, la réduction du WF_6 par le Si est favorisée à la température de la pièce et elle consomme le Si pour produire du W (36). Cette réaction sera limitée à quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur par la diffusion du Si à travers la couche de W (16). Ceci pourrait expliquer le manque de Si à la surface du dépôt.

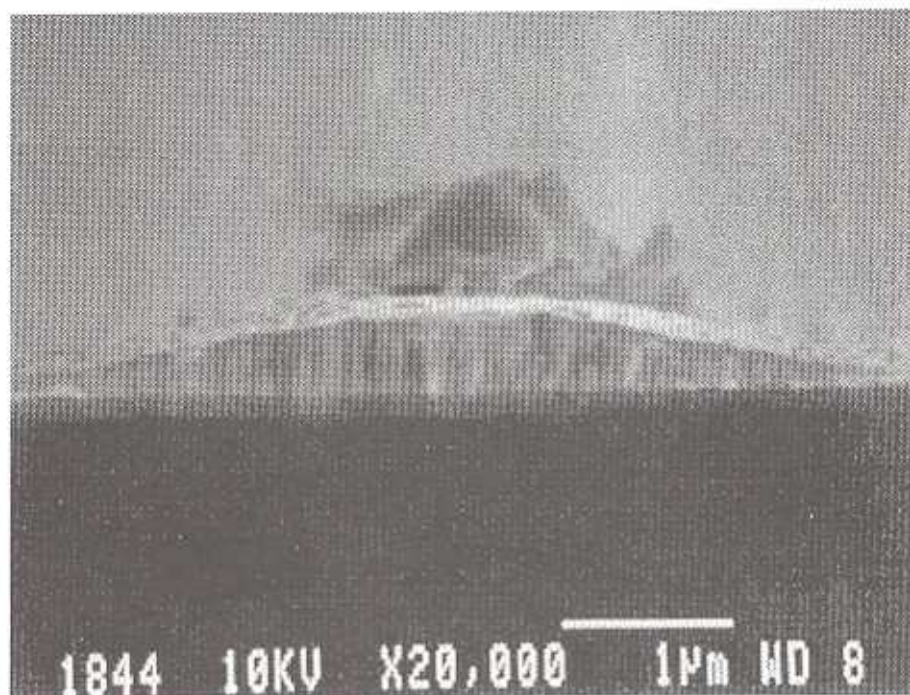


FIG. 7. Photographie au MEB d'une vue en coupe d'une ligne de WSi, écrite sur TiN avec une diode laser. $f(\text{WF}_6) = 1 \text{ sccm}$, $f(\text{SiH}_4) = 3 \text{ sccm}$, $f(\text{Ar}) = 150 \text{ sccm}$, $P = 16.2 \text{ Torr}$, $P_L = 455 \text{ mW}$ et $v = 100 \mu\text{m s}^{-1}$.

4. Conclusion

Nous avons étudié l'écriture directe par laser de lignes de WSi_x sur du TiN à partir de WF₆ et de SiH₄. Deux types de lasers sont utilisés dans le système de dépôt. Le premier est un laser à Ar⁺ qui permet d'atteindre des taux de croissance élevés et de déposer des lignes ayant des caractéristiques prédéterminées de manière très reproductible. Des dépôts de 1,5 à 11 µm de largeur et de 20 à 180 nm d'épaisseur sont réalisés à une vitesse d'écriture de 100 µm s⁻¹. Dans le second cas, une diode laser a été utilisée pour développer un système peu coûteux et de petites dimensions. Les lignes déposées à l'aide de ce système à une vitesse d'écriture de 100 µm s⁻¹ ont typiquement de 4 à 12 µm de largeur et de 160 à 860 nm d'épaisseur. Étant donné que la puissance est limitée et que le faisceau est difficile à focaliser, les taux de croissance sont plus faibles que dans le cas du laser à Ar⁺, et les lignes ont un profil quasi gaussien.

En résumé, nous avons développé le dépôt pyrolytique de WSi_x pour la fabrication d'interconnexions microélectroniques. Ces lignes métalliques peuvent être utilisées pour la réparation, le développement et la mise au point des circuits. Cette réaction ayant lieu à basse température, elle pourrait être utilisée pour le dépôt sur les diélectriques organiques comme le polyimide.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le professeur Arthur Yelon, ainsi que Messieurs Edward Sacher et Maleck Tabbal de l'École polytechnique de Montréal pour leurs discussions enrichissantes. Ils remercient également Madame Martine Simard-Normandin et Monsieur Swandi Hambali de Northern Telecom Electronics pour les échantillons de TiN. Les photographies de MEB ainsi que les analyses Auger ont été réalisées au Centre de caractérisation microscopique des matériaux de l'École polytechnique de Montréal par Monsieur Mario Caron. Les auteurs reconnaissent également le support technique de Mon-

sieur Jean-Paul Lévesque. Ce projet est réalisé grâce au support financier du Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche du Québec et du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada.

1. D. J. Ehrlich et J. Y. Tsao (éditeurs). Laser microfabrication: thin film processes and lithography. Academic Press, Boston, 1989.
2. I. W. Boyd et R. B. Jackman (éditeurs). Photochemical processing of electronic materials. Academic Press, London, 1992.
3. J. G. Black, D. J. Ehrlich, M. Rothschild, S. P. Doran et J. H. C. Sedlacek. *J. Vac. Sci. Technol.* **B5**, 419 (1987).
4. J. G. Black, S. P. Doran, M. Rothschild et D. J. Ehrlich. *Appl. Phys. Lett.* **50**, 1016 (1987).
5. C. L. Chen, J. G. Black, S. P. Doran, L. J. Mahoney, R. A. Murphy et D. J. Ehrlich. *Electron. Lett.* **24**, 1396 (1988).
6. R. F. Miracky. *Dans Tungsten and other refractory metals for VLSI Applications*. Vol. IV. Éditeurs: R. S. Blewer et C. M. McConica. Materials Research Society, Pittsburgh, 1989, p. 299.
7. D. K. Flynn, J. I. Steinfeld et D. S. Sethi. *J. Appl. Phys.* **59**, 3914 (1986).
8. N. S. Gluck, G. J. Wolga, C. E. Bartosch, W. Ho et Z. Ying. *J. Appl. Phys.* **61**, 998 (1987).
9. B. Rager et F. Bachmann. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **158**, 161 (1990).
10. J. R. Swanson, F. A. Flitsch et C. M. Friend. *Surf. Sci.* **226**, 147 (1990).
11. W. Radloff, E. Below, H. Dürr et V. Stert. *Appl. Phys. A* **50**, 223 (1990).
12. F. A. Flitsch, J. R. Swanson et C. M. Friend. *Surf. Sci.* **245**, 85 (1991).
13. L. Xuebiao, Z. Jie et Q. Mingxin. *Thin Solid Films*, **196**, 95 (1991).
14. Y. S. Liu, C. P. Yakymyshyn, H. R. Philipp, H. S. Cole et L. M. Levinson. *J. Vac. Sci. Technol.* **B3**, 1441 (1985).
15. Y. S. Liu. *Dans Tungsten and other refractory metals for VLSI applications*. Éditeur: R. S. Blewer. Materials Research Society, Pittsburgh, 1990, p. 43.
16. J. Y. Lin et S. D. Allen. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **158**, 85 (1990).

17. G. Auvert, Y. Pauleau et D. Tonneau. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **158**, 155 (1990).
18. J. G. Black, S. P. Doran, M. Rothschild et D. J. Ehrlich. *Appl. Phys. Lett.* **56**, 1072 (1990).
19. G. Q. Zhang, T. Szörényi et D. Bäuerle. *J. Appl. Phys.* **62**, 673 (1987).
20. A. Lecours, M. Meunier et R. Izquierdo. *Appl. Surf. Sci.* **54**, 60 (1992).
21. R. Izquierdo, A. Lecours et M. Meunier. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **236**, 111 (1992).
22. G. Auvert, Y. Pauleau et D. Tonneau. *J. Appl. Phys.* **71**, 4533 (1992).
23. T. F. Deutsch et D. D. Rathman. *Appl. Phys. Lett.* **45**, 623 (1984).
24. A. Shintani, T. Tsuzuku, E. Nishitani et M. Nakatani. *J. Appl. Phys.* **61**, 2365 (1987).
25. A. J. P. van Maaren, R. L. Krams, E. De Haas et W. C. Sinke. *Appl. Surf. Sci.* **38**, 386 (1989).
26. R. L. Krams, C. Brands et W. C. Sinke. *Appl. Surf. Sci.* **54**, 117 (1992).
27. P. Mogyorosi, J. O. Carlsson et M. Moradi. *Appl. Surf. Sci.* **54**, 46 (1992).
28. S. D. Allen, A. B. Trigubo et R. Y. Jan. *Mater. Res. Soc.* **17**, 207 (1983).
29. S. D. Allen et A. B. Trigubo. *J. Appl. Phys.* **54**, 1641 (1983).
30. Y. Nakasaki, K. Suguro, S. Shima et M. Kashiwagi. *J. Appl. Phys.* **64**, 3263 (1988).
31. M. Iwasaki, H. Itoh, T. Katayama, K. Tsukamoto et Y. Akasaka. *Dans Tungsten and other advanced metals for VLSI/ULSI Applications. Éditeurs : S. S. Wong et S. Furukawa. V. Materials Research Society, Pittsburgh, 1990. p. 187.*
32. *J. Hems. Semicond. Int.* **13**(12), 100 (1990).
33. P. Desjardins, R. Izquierdo et M. Meunier. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **236**, 127 (1992).
34. M. Meunier, R. Izquierdo, P. Desjardins, M. Tabbal, A. Lecours et A. Yelon. *Thin Solid Films*, **218**, 137 (1992).
35. G. E. McGuire. *Surf. Sci.* **76**, 130 (1978).
36. J. S. Lo. Preparation of CVD WSi₂ and tungsten-silicon alloys. Thèse de doctorat, University of Utah, Salt Lake City, 1973.