

Plus étroites et profondes: Derniers Avancements de la Fabrication de Nano-Structures en Silicium par le projet SAKURA 03-05

Yoshio MITA, Masanori Kubota, Kota Ito, Frédéric Marty*, Tarik Bourouina*, et Tadashi Shibata
VDEC, l'Université de Tokyo, Bunkyo Yoyoi 2-11-16-E10-490

* Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Electronique et Electrotechnique, Paris, France

Tel. : 81-3-5841-6797 Fax.: 81-3-5841-6797

E-mail: mita@ee.t.u-tokyo.ac.jp

Résumé :

Grâce à la collaboration de chercheurs Français et Japonais, une technologie de fabrication de structures multi-dessins en silicium aux dimensions nanométriques a été développée pour l'application dans différents domaines tels que l'optique et la biologie. Multi-dessins (Figure 1) signifie que les dessins de ces structures provenant de plusieurs laboratoires sont transférés sur une même plaquette de silicium, à l'aide d'un appareil d'insolation par faisceau d'électrons, appartenant à VDEC à l'Université de Tokyo (appareil "EB"). Cette plaquette est ensuite gravée en profondeur à l'ESIEE (Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Electronique et Electrotechnique). Le résultat des deux ans qu'ont durés la collaboration a permis d'obtenir des tranches gravées en profondeur, avec des ouvertures de 370 nanomètres de large et de 40,1 micromètres de profondeur. Le rapport d'aspect entre la profondeur et la largeur du trou est de plus de 1:107. Le rapport d'aspect de ces structures avant la collaboration était dix fois plus important (1:9 au lieu de 1:107 maintenant). Cette valeur est, à notre connaissance, la meilleure du monde parmi les laboratoires travaillant dans ce domaine. Les technologies développées grâce à cette collaboration SAKURA sont:

1. Procédé de la gravure extrêmement profonde.
2. Méthode d'insolation-contour pour pouvoir graver des dessins arbitraires sans nécessité de modification du procédé de fabrication.
3. Méthode de mesure électrique de dimensions critiques par intégration de structures de mesure dans le dispositif.

La méthode-contour a obtenu le prix de la meilleure présentation à la conférence Européenne Micro-Mechanique (MME 2005 Best Poster Award).

Abstract :

日仏の研究者が共同し、東京大学VDEC所有電子線描画(EB)装置を利用してナノリソグラフィを行ない、ESIEE所有の深掘りRIE装置でエッチングを行なって、デザイン相乗り型ナノサイズ構造を作製、様々な応用に供する試みを行なった。開口の最小横幅370ナノメートル、深さ40.1 μ m以上(アスペクト比1:107)のトレンチ構造を作製することに成功した。MEMS用サブミクロン開口の深掘り構造は、これまでせいぜいアスペクト比1:10程度であったが、本研究では一桁優れた結果を得られた。一般にEBリソグラフィは時間がかかるとされ、またこれほど微細な構造に最適なエッチング条件を用いると逆に、10 μ m以上の大きな開口部のエッチングに適さないことが問題となっていたが、微細な構造と大きな開口の輪郭のみをEBリソグラフィ及び、ナノエッチング条件であらかじめエッチングした後、大開口部のエッチングを行なう、「輪郭リソグラフィ法」を開発しこの問題を解決した。これらの技術によれば、サブミクロンの微細パターンをリソグラフィのとおり垂直に転写できることになるので、薄膜を水平に積んでリソグラフィするというこれまでのマイクロマシーニングを深化させ、垂直方向に展開できるという「パラダイムシフト」が起こる。このパラダイムシフトの恩恵を受ける一例として、光通信用フィルタをリソグラフィどおりサンプル表面に対し垂直に作製する、「垂直DBRフィルタ」を提唱し作製した。また、これらMEMS構造の性能を決める長さ(Critical Dimension)を電子顕微鏡などの手法ではなく、電氣的測定によって求める簡便な手法を開発し、電子顕微鏡よりも優れた繰り返し精度を得ることができた。

Introduction :

Les progrès de la technologie d'insolation par le Faisceau d'Electrons (EB) et de la gravure profonde par ions réactif (DRIE) a permis la fabrication de structures silicium à la fois tri-dimensionnelle et de taille sub-micronique.

La technique EB permet de dessiner des structures sub-microniques et la DRIE permet de réaliser des structures tri-dimensionnelles. C'est une nouvelle aube dans le domaine de la micro-technologie (de taille micro-métrique) puisqu'elle va tendre de plus en plus vers des objets de taille sub-micronique. Par conséquent, il est donc devenu possible de fabriquer des Nano Structures à Haut Rapport d'Aspect (HARNs). Grâce au projet SAKURA, notre groupe franco-japonais a essayé d'établir un procédé standard qui pourra être rendu accessible aux chercheurs intéressés. Les intérêts scientifiques et technologiques de ce projet étaient: (1) de connaître la limite de la gravure nanométrique profonde (jusqu'à quelle profondeur peut-on aller. Voir Figure 2), (2) d'établir un procédé standard qui permet d'accueillir des motifs arbitraires, et (3) de pouvoir analyser ces structures fabriquées. L'appareil de DRIE (Deep Reactive Ion Etching) utilisé pour la gravure est l'AMS100 et la 601E d'Alcatel, France. L'appareil d'insolation est le F5112+VD01 d'ADVANTEST, Japon.

Gravure extrêmement profonde:

La technologie de base des DRIE est le procédé "Bosch". Ce procédé est un standard dans le domaine des microsystèmes tri-dimensionnels. Il consiste en l'alternance de deux types de plasma, l'un permettant une gravure rapide du substrat (plus de 1 micron à une vingtaine de microns par minute) et l'autre (la passivation) créant un dépôt qui protégera les murs des parties gravées, empêchant ainsi la sous-gravure. Le temps d'alternance (temps de chaque étape), la valeur des flux des gaz, la pression dans le réacteur, et les puissances radio-fréquence qui créent les plasmas sont les paramètres à régler. Auparavant les paramètres connus dans le monde des microsystèmes étaient tous optimisés pour des motifs qui ont des ouvertures de plus d'un micron. En général, plus l'ouverture est petite, plus il est difficile de graver profond. En 2003, au début de ce projet le facteur d'aspect des ouvertures sub-microniques atteignait une valeur autour de 1:10 (Figure 3 gauche). En optimisant les paramètres précédents et en connaissant bien l'appareil et la physique, il a été possible d'obtenir un procédé optimal (procédé SAKURA) qui emmène le facteur d'aspect jusqu'à 1:107[1].

Pour obtenir un rapport d'aspect important, il faut que les ions dans le plasma aient une énergie cinétique plus importante. Cette augmentation d'énergie risque de détériorer la sélectivité du matériau du masque. La solution employée contre la gravure du masque est d'utiliser un matériau plus dur: l'Aluminium. L'aluminium peut résister aux bombardements d'ions plus importants et il a très haute sélectivité contre la gravure Bosch. Tous ces paramètres s'influencent les uns les autres. Il faut donc bien connaître les facteurs d'influence. Le changement d'un paramètre, puis la gravure, l'observation et enfin l'évaluation sont la méthode classique, mais qui reste la plus efficace.

Méthode lithographie contour:

Généralement parlant, le paramètre d'un procédé de gravure n'est pas parfait. La condition optimale est dépendante de la taille de l'ouverture. C'est aussi le cas dans notre procédé qui est optimisé pour des ouvertures nanométriques: pour des ouvertures plus grandes que 10 μ m, on voit plein d'aiguilles au fond des tranches (Figure 4). Il est donc impossible de graver plus de 10 μ m avec cette condition. Par contre, les microsystèmes ont par nature besoin d'avoir des ouvertures larges à certains endroits. Il faut alors trouver une méthode pour graver les ouvertures larges et petites sans pénaliser les unes ou les autres. Pour se faire, on utilise le procédé SAKURA qui est très intéressant pour sa capacité de nano-ouvertures dont aucun procédé équivalent n'existait avant.

La méthode trouvée est la lithographie-contour. On peut imaginer facilement de graver en deux temps. En pensant naïvement il est possible de graver d'abord les ouvertures nano, et ensuite les grandes ouvertures. Cette méthode a un inconvénient critique: l'alignement entre les grandes et les petites structures n'est pas simple. Notre solution est de graver les nano-ouvertures et le contour des grandes ouvertures en un premier temps, et ensuite de graver le reste comme on voit en Figure 5. Grâce à cette division, l'alignement entre les grandes et les petites est toujours assurée en précision nanométrique. La taille des grandes ouvertures est aussi assurée, ce qui n'est pas toujours évident puisqu'on doit souvent graver des grandes ouvertures ayant des tailles différentes. Comme SAKURA est optimisé pour les ouvertures du nano à 5 μ m, la largeur du contour peut être simplement de 5 μ m.

La Figure 6 montre un exemple d'application. Tout d'abord la partie nano et les contours sont gravés. Après la protection des structures par un procédé d'oxydation (LOCOS), la partie grande est gravée. Grâce à la protection entière parfaite du mur des nano et des contours, il est possible d'utiliser une condition de gravure isotrope, autrement dit "nettoyant". Avec la gravure isotrope aucune structure d'aiguille ne peut rester dans la partie grande. Finalement l'échantillon avec des ouvertures de dimensions nano jusqu'au millimètres a été obtenu.

Conclusion et l'Impact sur le plan de micro-système

Avec l'aide de SAKURA, un procédé et une méthode universellement applicable pour des systèmes sub-microniques ont été développés. Traditionnellement parlant, comme on le voit dans la Figure 7, le

microsystème est fabriqué horizontalement; les couches fines (du nanomètre au micromètre) sont déposées parallèles au plan du silicium. Pour rendre ce système fonctionnel, comme par exemple pour un système de filtrage, il faut tourner l'échantillon à 90 degrés. La technologie développée par SAKURA, en revanche, permet de fabriquer des nanostructures perpendiculaires au plan du silicium. Il est donc possible de fabriquer un système qui est "prêt à utiliser" dès la fin de sa fabrication. Ceci est un changement essentiel pour le monde des microsystèmes. Pas seulement pour des applications optiques en télécommunication, comme on le voit figure 6, puisque cette méthode générale peut rendre beaucoup de nouveaux types d'applications réalisables. Le groupe des auteurs est à la recherche de plusieurs applications plus concrètes comme des nano-outils pour un système de mesure et des capteurs pour un système d'analyse d'image.

Références :

- [1] Frédéric Marty, Lionel Rousseau, Bassam Saadany, Bruno Mercier, Olivier Français, Yoshio Mita, and Tarik Bourouina, "Advanced Etching of Silicon Based On Deep Reactive Ion Etching For Silicon High Aspect Ratio Micro Structures And Three-Dimensional Micro- And Nano-Structures", *Microelectronics Journal, Circuits and Systems* section, Vol. 36, p. 673-677 June (2005)
- [2] Masanori Kubota, Yoshio Mita, Kota Ito, Frederic Marty, Tarik Bourouina, and Tadashi Shibata, "A Contour-Lithography Technology for Rapid and Precise Deep-Etched Nano-MEMS Structure Fabrication", *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '05)*, June 5-9, Seoul, Korea, Vol.2, pp.1449-1452 (2005).
- [3] Masanori Kubota, Yoshio Mita, Frédéric Marty, Tarik Bourouina, and Tadashi Shibata, "An improved locos-contour-lithography method for fabricating nanometer-and-millimeter-scale coexisting structures", *MicroMechanics Europe Workshop (MME '05)*, Göteborg, Sweden, September 4-6, pp. 107-110 (2005).
- [4] Kota Ito, Yoshio Mita, Masanori Kubota, Frédéric Marty, Tarik Bourouina, and Tadashi Shibata, "Electrical Critical Dimension Measurement Method by Integration of Test Structure into MEMS Devices", *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '05)*, June 5-9, Seoul, Korea, Vol.2, pp. 2031-2034 (2005).

Remerciements

Part de ce projet était financée par JSPS-Ministère d'Affaires Etrangères de France (SAKURA 2003-2005), et JSPS Kakenhis #15760236, #17760274, et Programme 21^e siècle Centre de l'Excellence.

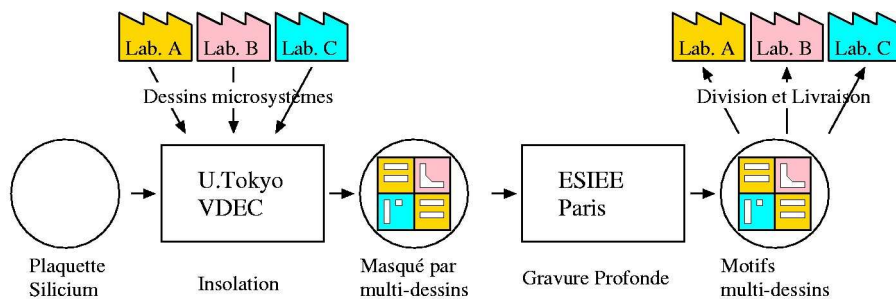


Figure 1 : L'idée de microsysteme multi-projets

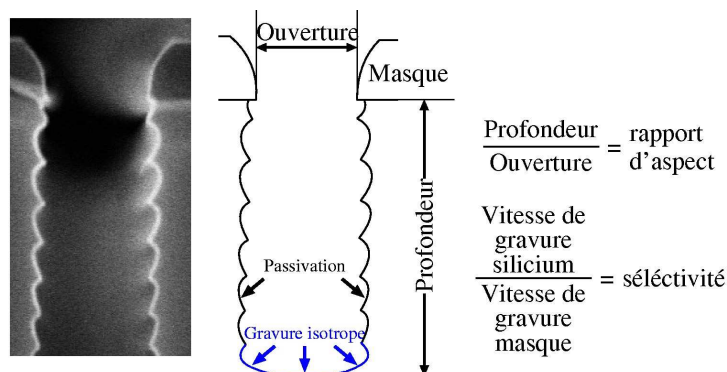
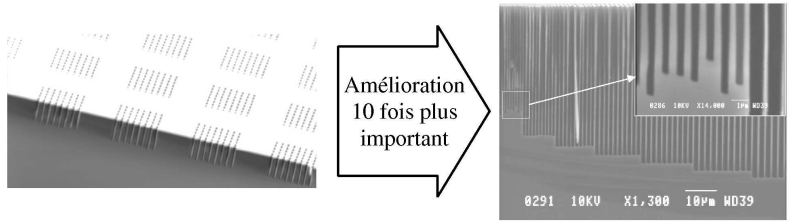


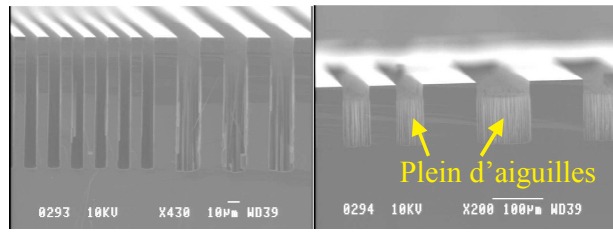
Figure 2 : Chiffres clés en gravure profonde



An 2003: Rapport 1:9

An 2005: Rapport 1:107

Figure 3 : L'amélioration du rapport d'aspect est obtenue.



10 à 20µm

50 à 100µm

Figure 4 : La limite du procédé SAKURA est du nanomètre jusqu'à 10µm

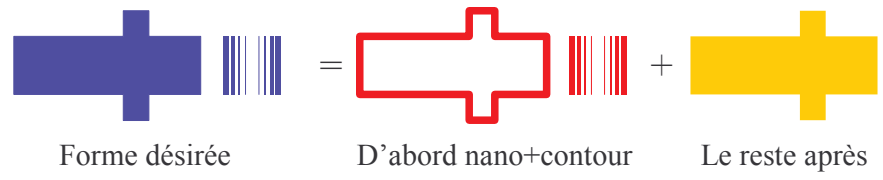
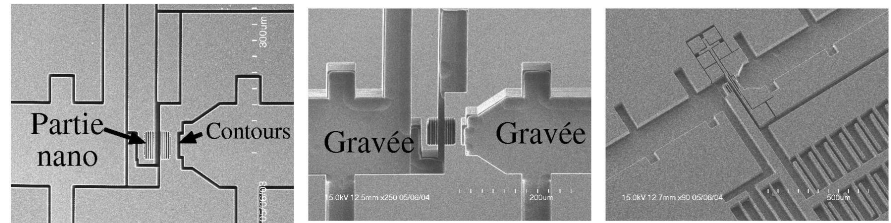


Figure 5 : Méthode Lithographie-contour = diviser les motifs entre motifs larges et motifs petits

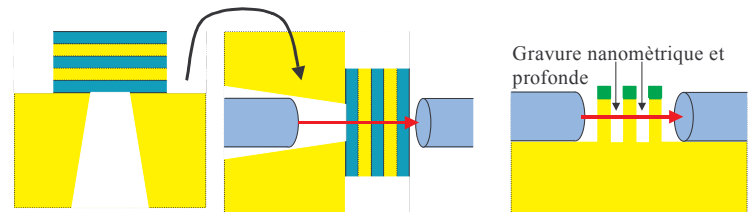


Gravure contour

Gravure du reste

Système entier

Figure 6 : Photo Microscope EB du système de filtre pour la télécommunication optique



Technologie classique:
Il faut tourner avant l'utilisation

Cette technologie:
Fabrication = prêt à utiliser

Figure 7 : Révolution des Microsystems est prévue