

RECUIT À L'HYDROGÈNE POUR LA RÉDUCTION DE LA RUGOSITÉ DES PAROIS DANS UN CONTEXTE INDUSTRIEL DE MICROFABRICATION DE MEMS

*Irina Stateikina, Ph.D.
Centre de Collaboration MiQro Innovation – C2MI
45 boulevard de l'Aéroport
Bromont (QC) Canada J2L 1S8*

Résumé

L'objectif de cet article est d'illustrer une capacité de recuit à l'hydrogène (H_2) dans le but de réduire la rugosité de la surface du Si lors de la microfabrication de MEMS. Cette technique a été mise en œuvre avec succès et est maintenant proposée par le C2MI dans une fournaise verticale sous-atmosphérique sur tranches 200 mm.

Introduction

Le procédé de gravure plasma (Deep Reactive Ion Etch - DRIE), également appelé gravure Bosch, est l'une des techniques les plus couramment utilisées dans la microfabrication de systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS). Cette technique crée des structures avec des parois verticales et un rapport d'aspect hauteur / largeur élevé, souvent essentiel dans les MEMS. L'inconvénient notable de cette technique est la rugosité de la paroi, causée par les cycles de gravure et de dépôt, spécifiques au procédé de gravure Bosch. Les "scallop" créées au cours du procédé de gravure DRIE deviennent un problème important dans certaines applications, par exemple en créant une perte par diffusion dans les guides d'ondes optiques. Plus petites sont les dimensions du guide d'onde, plus significatif est l'impact de la rugosité des parois sur la perte par diffusion [1].

Définition du problème

L'un des procédés permettant d'améliorer le profil de rugosité de la paroi consiste à faire une oxydation thermique sacrificielle. Ayant de nombreux avantages, cette technique présente cependant des limites notables, c'est-à-dire que dépendamment de la taille des "scallop" et des dimensions des guides d'ondes, il peut être impossible de faire l'oxydation thermique. Puisque l'oxyde thermique consomme le silicium structurel, son effet sur les dimensions globales ainsi que sur les contraintes résiduelles dans certaines structures pourrait être préjudiciable.

La migration des atomes de Si, qui se produit dans l'hydrogène (H_2) ambiant à haute température, offre une excellente alternative à l'oxydation thermique [2]-[5]. La surface du Si subit une transformation minimale d'énergie de surface sous l'influence de la basse pression et de la température élevée dans l'hydrogène ambiant. Selon les exigences et les paramètres du procédé, la migration des atomes de Si peut conduire non seulement au lissage de la rugosité, mais également à un certain degré de contrôle de forme dans les structures en silicium [6]-[8]. Bien que le succès de la technique du recuit à l'hydrogène soit bien documenté, cette méthode de fabrication n'est pas encore couramment utilisée dans la fabrication de MEMS. Le principal inconvénient mentionné est que ce recuit est effectué dans des équipements ne permettant de traiter qu'une seule tranche à la fois [2]-[8].

La solution proposée par le C2MI

Le C2MI a développé une technique de lissage de la rugosité dans une fournaise verticale permettant le traitement de plusieurs lots à la fois et une reproductibilité contrôlée.

Pour ce procédé, une fournaise verticale RVP-9200 de SPT Microtechnologies a été adaptée pour fonctionner dans une atmosphère d'hydrogène. Les essais ont été réalisés dans la fournaise en évaluant les paramètres suivants: température, pression, débit de gaz, temps de traitement et paramètres de montée en température. Ces évaluations ont abouti à un ensemble de paramètres permettant de lisser avec succès les structures de test sur des tranches de 200 mm avec un remplissage maximal de la fournaise, permettant le traitement de 100 tranches à la fois.

Les résultats de l'un de ces tests sont visibles sur les images de la Figure 1, illustrant la structure sur la tranche de référence avant le recuit (Fig. 1a-b) et sur la tranche de test après le recuit avec un remplissage complet de la fournaise (Fig. 1c-d). Le lissage des "scallops" a été une réussite aussi bien pour les tests portant sur le traitement d'une seule tranche que d'une fournaise entièrement remplie et ce pour des tailles de "scallops" de l'ordre de 10-50 nm jusqu'à des tailles d'environ 400 nm et même 1,0 μm .

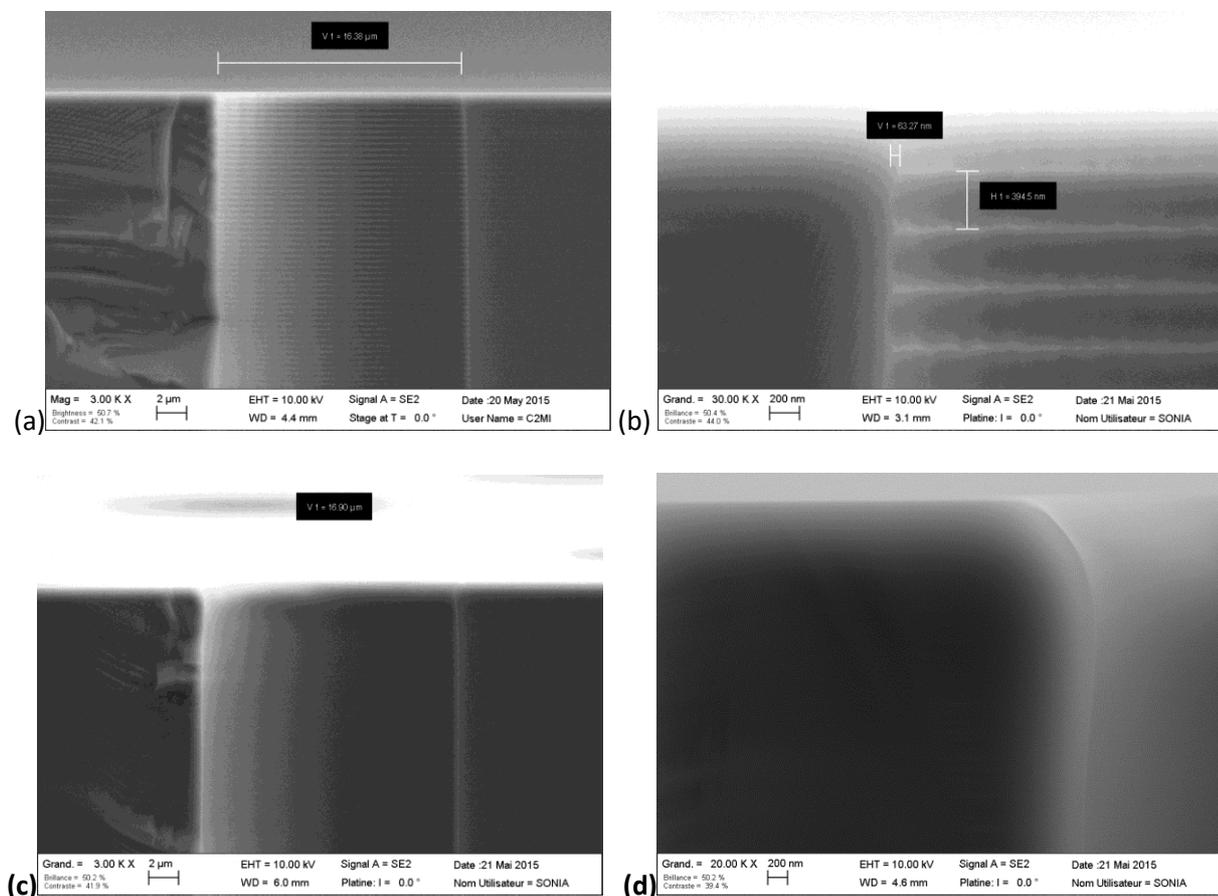


Figure 1: Image d'une vue en coupe au MEB de la paroi d'un via illustrant (a) une tranche de référence après DRIE, (b) un via d'une tranche de référence avec un gros plan sur la taille des "scallops", (c) une vue en coupe d'un via après le recuit H_2 et (d) gros plan sur le via après le recuit H_2 dans la fournaise verticale.

Une partie importante du lissage de la rugosité de surface est la préparation de la tranche. Les tranches test sont traitées dans une série de bassins humide Akrion en utilisant une chimie adaptée à la préparation de la surface avant le recuit à l'hydrogène. Cette étape s'est avérée cruciale pour le recuit du four en H_2 .

Un nombre important de tests menés au cours des années d'exploitation de l'installation C2MI ont permis d'acquérir une expertise dans les détails du recuit H_2 . Le succès du processus dépend de forme des structures, des dimensions de la structure, de la rugosité, de la quantité de Si nécessitant une planarisation de la surface. Des recettes personnalisées pour recuit H_2 peuvent être créées en fonction des spécificités du produit.

Sommaire

Ayant analysé des années de données expérimentales, le C2MI peut offrir en toute confiance et pour la première fois, au meilleur de la connaissance des auteurs, un lissage réussi de la rugosité de parois de structures sur des tranches 200 mm dans une fournaise verticale avec des paramètres bien définis et applicables pour la fabrication à grande échelle. Le même niveau de lissage des "scalops" est obtenu aussi bien avec une seule tranche que dans un remplissage complet de la fournaise pour les structures spécifiées dans les tranches d'essai. Ceci prouve que le lissage de parois avec recuit à l'hydrogène peut être mis en œuvre en tant qu'étape de traitement par lots dans la fabrication de MEMS.

REFERENCES:

- [1] F. Grillot, L. Vivien, S. Laval, D. Pascal, and E. Cassan, "Size Influence on the Propagation Loss Induced by Parois Roughness in Ultrasmall SOI Waveguides", *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(7), 1661-1663, July 2004
- [2] T. Sato et al., "Trench transformation technology using hydrogen annealing for realizing highly reliable device structure with thin dielectric films", *VLSI Tech. Digest*, pp. 206-207, 1998
- [3] H. Kuribayashi, et al., "Shape transformation of silicon trenches during hydrogen annealing", *J. Vac. Sci. Technol. A*21(4), pp. 1279-1283, 2003
- [4] S. Matsuda, et al., "Novel Corner Rounding Process for Shallow Trench Isolation utilizing MSTS (Micro-Structure Transformation of Silicon)", *IEEE, IEDM 98*, pp. 137-140, 1998
- [5] M.-C. M. Lee and M. C. Wu, "Thermal Annealing in Hydrogen for 3-D Profile Transformation on Silicon-on-Insulator and Parois Roughness Reduction", *Journal of microelectromechanical system*, vol.15(2), pp. 338-343, April 2006
- [6] Koji Araki, Ryuji Takeda, Haruo Sudo, Koji Izunome, Xinwei Zhao, "Dependence of atomic-Scale Si (110) surface roughness on hydrogen introduction temperature after high temperature Ar Annealing", *Journal of surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 4, 249-256, January 2014
- [7] M.-C. M. Lee and M. C. Wu, "3D silicon transformation using Hydrogen Annealing", *Solid State Sensor, Actuator and Microsystems workshop*, June 2004.
- [8] T. Hartsfield, "Characterization and Modeling of silicon migration by hydrogen annealing", *Physics, Applied Mathematics, New College of Florida*, pp. 78-79, 2008

Remerciements

L'auteure souhaite exprimer une profonde gratitude à Khaled-Amir Belarbi, qui a mis au point la recette de recuit sous H₂ dans la fournaise, ce qui a permis au C2MI de proposer ce procédé. Nous souhaitons également remercier le professeur Ming C. Wu de l'Université de Berkeley et le professeur Ming-Chang M. Lee de l'Université de Taiwan pour les discussions sur les détails du recuit sous hydrogène et l'échange de courriers électroniques qui ont permis de rendre ce processus fonctionnel.