

ETUDE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DE MICROSYSTEMES THERMIQUES A BASE DE SILICIUM POREUX

Amaria OULD-ABBAS*, Mama BOUCHAOUR, Malika MADANI,
Nasr Eddine CHABANE SARI

Unité de Recherche matériaux et énergies Renouvelables (URMER)
Université Abou Bekr BELKAID de Tlemcen, BP 119 Tlemcen 13000

*aouldabbes@yahoo.fr

Résumé :

Le silicium meso-poreux, obtenu par attaque électrochimique du silicium monocristallin, présente une conductivité thermique proche de celle de l'oxyde de silicium. C'est donc un excellent candidat pour assurer l'isolation thermique des micocapteurs sur silicium tout en garantissant la stabilité mécanique de la micro-structure.

Néanmoins, avant de mettre en œuvre le capteur sur silicium poreux, la compréhension du transport thermique dans une telle nano-structure et l'étude expérimentale de sa conductivité thermique, en fonction de ses paramètres caractéristiques, sont nécessaires.

Dans ce travail nous nous intéressons à l'anodisation du silicium pour dégager les principaux facteurs, agissant sur la morphologie en profondeur de la couche. Cette dernière est évaluée par l'analyse de la répartition en surface et en profondeur de la taille des cristallites composant le matériau, au moyen de la spectroscopie micro-Raman. La stabilisation par oxydation de la couche de silicium poreux nécessite un double traitement pour garantir une faible conductivité thermique tout en assurant une bonne tenue mécanique.

Mots clés :

silicium poreux, conductivité thermique, spectroscopie Raman, microsystemes intégrés.

1. INTRODUCTION

L'essor de la microtechnologie silicium ouvre de nouvelles voies pour la réalisation de microsystemes intégrés de faibles dimensions. Il est désormais possible de concevoir des microsystemes complexes intégrant plusieurs fonctions sur le même dispositif. De plus, les capteurs peuvent être associés à l'électronique de traitement du signal, à l'amplification, au conditionnement puis finalement à un ou plusieurs actuateurs, le tout intégré sur une même puce trouve un intérêt technologique pour assurer l'isolation thermique des micro-capteurs sur silicium.

La conductivité thermique du silicium poreux (SiP), qui se forme à la surface du silicium monocristallin par gravure électrochimique au contact d'un bain d'acide fluorhydrique (HF) du substrat dopé p est une centaine de fois plus faible que celle du silicium monocristallin : les valeurs rapportées dans la littérature sont de l'ordre de celle de l'oxyde de silicium, connu pour ses qualités d'isolant thermique. Des dispositifs à base de silicium poreux, utilisés comme isolants thermiques, peuvent donc être développés.

Il existe différentes méthodes de caractérisation thermique du silicium poreux. Nous proposons un nouveau moyen d'investigation de la conductivité thermique des différents types du silicium poreux, direct et sans contact, par spectroscopie micro-Raman.

2. PROCEDURES EXPERIMENTALES

2.1 Réalisation du silicium poreux

Les structures poreuses sont obtenues par traitement anodique de substrat de Si de type p, d'orientation (100) et de résistivité 0,01-0,025 Ω .cm. Cette attaque électrochimique est effectuée dans une solution de HF(48%) : C₂H₅OH de 1 : 1 sous des densités de courant différentes. La densité de courant ainsi que le temps d'attaque choisis permettent de réaliser des couches de porosités et épaisseurs différentes. Le type de dopage influence la nature du SiP tel que pour le type p+, on obtient le silicium mésoporeux qui possède une taille des cristallites variant de 10 à 100 nm tandis que pour le type p des structures de silicium nanoporeux sont obtenus pour des tailles de cristallites de 1 à 5 nm. Après le traitement électrochimique, les échantillons sont rincés à l'eau désionisée et séchés sous flux d'azote.

2.2 La spectroscopie Raman

L'étude de Perichon et al. [1] est centrée autour de l'utilisation de la diffusion micro-Raman pour des mesures de conductivité thermique.

La technique présentée utilise non seulement la mesure de l'intensité du spectre Raman [2,3] mais également la mesure de l'échauffement local créé à la surface de l'échantillon par le faisceau laser et le décalage du pic Raman. La température à la surface de l'échantillon peut être ainsi mesurée.

L'ensemble du modèle thermique s'appuie sur les travaux de Nonnenmacher [4] et permet d'estimer la valeur de la conductivité thermique du matériau.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Variation de la taille des cristallites en fonction des conditions de formation

L'effet Raman consiste en l'existence d'un spectre décalé en fréquence soumis à une illumination monochromatique. Ce spectre de très faible intensité est difficile à observer à côté de la lumière diffusée sans changement de fréquence. Il est caractéristique de l'échantillon étudié aux vibrations des édifices atomiques constituant l'échantillon observé. Cette technique est utilisée dans notre cas afin de déterminer la taille des cristallites de la couche poreuse. Nous avons réussi à avoir des spectres pour les échantillons, élaborés avec différentes densités de courant, avant et après recuit thermique à l'aide de l'appareillage qui se trouve à l'université Claude Bernard de Lyon. Les résultats de ces spectres montrent une légère diminution de la taille des cristallites après traitement thermique. Notons toutefois que l'atmosphère du recuit n'influe pas sur ce paramètre ; en effet la taille des cristallites des échantillons (A et E) et (B et F), pris séparément, ont les mêmes valeurs (voir tableau 2).

Le silicium poreux se divise en trois grandes catégories selon le diamètre des pores (tableau 1)

Type de substrat	a (nm)	Type de silicium poreux
P ou n sous éclaircissement	≤ 2	Microporeux
p ⁺ ou n ⁺	2 à 100	Mésoporeux
n sous obscurité	$> 0,1.10^3$	Macroporeux

Tableau 1 : différents types de silicium poreux

Echantillons	J (mA/cm ²)	t _f (min)	Atmosphère de recuit	T _r (°C)	tr (h)	r (nm)
A	5	10	-	-	-	9,5
A	5	10	H ₂	950	2	7,4
B	75	10	-	-	-	8,7
B	75	10	H ₂	950	2	5,5
E	5	10	-	-	-	9,5
E	5	10	N ₂	950	2	7,3
F	75	10	-	-	-	8,7
F	75	10	N ₂	950	2	5,5

Tableau 2 : Tailles des cristallites obtenues à partir des analyses Raman.

3.2 Etude de la conductivité thermique du silicium poreux en fonction des paramètres caractéristiques

La conductivité thermique du silicium macro-poreux, obtenu par anodisation dans le noir d'un substrat de silicium de type n, n'est que deux ou trois fois plus faible que celle du silicium monocristallin [5]. Ceci peut s'expliquer par la taille « importante » des cristallites (100 nm à 1 µm) limitant l'effet de confinement des phonons dans le squelette de silicium, facilitant ainsi la conduction thermique dans le réseau cristallin.

La conductivité thermique du silicium nano-poreux, obtenu à partir de substrats très résistifs ($\geq 1 \Omega \cdot \text{cm}$) est plus faible que celle du silicium meso-poreux formé à partir de substrats résistifs ($\approx 10 \text{m}\Omega \cdot \text{cm}$) en effet Gesele et al. [6] ont comparé la conductivité thermique de deux échantillons de silicium (nano et meso-) poreux de même porosité (64%). $k_{\text{nano}} = 0,2 \text{ W/m.K} < k_{\text{meso}} = 0,8 \text{ W/m.K}$ ceci met en évidence le rôle de la taille des cristallites et leur distribution dans la couche : l'effet de confinement des phonons est accentué pour la nano-structure induisant une conductivité thermique effective de la couche est encore plus faible.

La conductivité thermique du silicium meso-poreux varie de 0,1 W/m.K à quelques W/m.K, est anecdotique et ne correspond pas aux autres investigation

3.3 Influence de l'oxydation sur la conductivité thermique du silicium poreux

Les variations de la conductivité thermique avec la température d'oxydation du silicium poreux sont présentées sur la figure 1 pour trois porosités. Chaque échantillon a une épaisseur de 50 µm. leur conductivité thermique est mesuré après anodisation puis après chacune des trois oxydation d'une heure, sous O₂ sec à 150°C, 300°C puis 450°C.

Quelle que soit leur porosité, la conductivité thermique des échantillons suit la même évolution. La conductivité décroît dans un premier temps jusqu'à atteindre un minimum puis augmente légèrement.

Au cours du procédé d'oxydation, une partie du silicium monocristallin est consommée pour former la gaine d'oxyde de silicium réduisant davantage le cœur de silicium. L'effet de confinement est alors accentué et la conductivité thermique diminuée. Lorsque la température d'oxydation augmente au delà de 300°C, deux phénomènes se concurrencent : l'oxydation du silicium se poursuit réduisant encore le noyau de silicium mais s'accompagne d'une augmentation du volume du squelette de Si/SiO₂ remplissant alors progressivement les pores jusque là emplis d'air.

Pour les couches dont la porosité faible, le minimum de conductivité est atteint après une oxydation à 300°C, ce qui correspond à un taux d'oxydation d'environ 30%. Ensuite la conductivité thermique augmente avec le taux d'oxydation car le transport thermique se produit essentiellement à travers l'oxyde de silicium mélangé au silicium.

Pour les couches de forte porosité, l'influence de l'oxydation est moins significative. La conductivité thermique de telles couches est très faible (figure1).

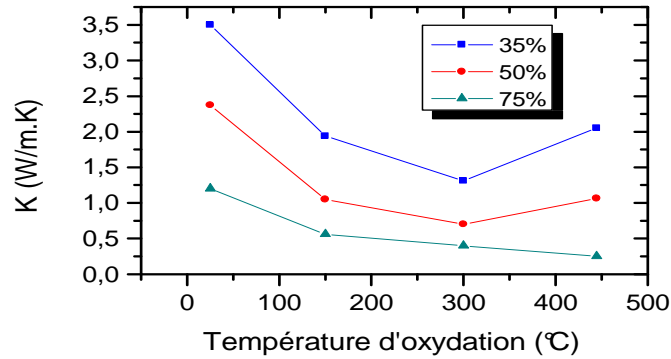


Figure 1 : conductivité thermique de silicium mésoporeux en fonction de la température d'oxydation : 150, 300 et 450°C

CONCLUSION

La conductivité thermique du silicium poreux est bien inférieure à celle du silicium monocristallin, utilisé comme dissipateur thermique. Le transport thermique dans les couches de silicium poreux est limité par sa nature poreuse et le blocage thermique dans le squelette de silicium.

La spectroscopie micro-Raman nous a permis de développer un moyen d'investigation systématique de la morphologie et de la conductivité thermique du silicium poreux.

D'après les résultats présentés, nous constatons que la conductivité thermique du silicium poreux dépend de ses paramètres caractéristiques et des traitements de post-anodisation que supporte la couche de ce matériau. On retiendra les principales tendances suivantes:

- la conductivité thermique décroît fortement lorsque la porosité de la couche augmente,
- l'oxydation du silicium poreux induit une décroissance de la conductivité thermique.

Nomenclature

T	température d'oxydation, °C
K	conductivité thermique, W/mK
J	densité de courant de formation, mA/cm ²
t _f	temps de formation de silicium poreux, min
t _r	temps de recuit des échantillons, h
r	taille des cristallites, nm
a	diamètre des pores, nm

T_r température de recuit, °C

Références

- [1] S. Périchon et V. Lysenko et Ph. Roussel et B. Remaki et B. Champagnon et D. Barbier, Technology and micro-Raman Characterization of thick meso-porous silicon layers for thermal effect microsystems. The Hague, pp199-200, 1999.
- [3] M. Reichling et T. Klozbücher et Hertmannn, Local variation of room temperature thermal conductivity in high-quality polycrystalline diamond, Appl. Phys. Lett., Vol 73, pp 756-758, 1998.
- [4] M. Nonnenmacher et H.K. Wickramasigne, scanning probe microscopy of thermal conductivity and surface properties, Appl. Phys. Lett., Vol 61, pp168-170, 1992.
- [5] G. Amato et V. Bullara et N. Brunetto et L. Boarino Drying of porous silicon, a Raman electron microscopy, and photoluminescence study, Thin Solid Films, Vol 276, pp204-207, 1996.
- [6] C. Pickering et L.T. Canham et D. Brumhead, Spectroscopic ellipsometry characterization of light-emitting porous silicon structure, Appl. Surf. Sci., Vol 63, pp22-26, 1993