

CFA/VISHNO 2016

Développement de transducteurs inter-digités pour la caractérisation ultrasonore de silicium poreux

F. Dubosc, L. Blanc, J. Fortineau et M. Lethiecq
GREMAN UMR 7347, rue de la chocolaterie, 41034 Blois, France
fabrice.dubosc@univ-tours.fr



LE MANS

L'objectif de cette étude est la modélisation et le développement de transducteurs pour la caractérisation ultrasonore d'une couche de silicium poreux (SiP). Cette caractérisation ultrasonore repose sur l'interaction entre une onde de surface et la couche poreuse.

Le dispositif de caractérisation est dimensionné de manière à ce que l'épaisseur de la couche poreuse soit égale à une longueur d'onde. Ainsi, la fréquence de fonctionnement du dispositif est choisie à 100 MHz avec une profondeur de gravure de 50 μm . Le logiciel COMSOL a été utilisé pour modéliser différentes géométries d'électrodes (nombre de doigts, distance inter-électrodes, ouverture acoustique) afin d'optimiser la transduction, pour compenser l'atténuation de l'onde de surface qui devrait être importante dans la zone poreuse.

Le nitrure d'aluminium (AlN), orienté (002), a été choisi comme matériau piézoélectrique pour sa compatibilité avec les procédés de micro-fabrication. L'AlN est déposé par pulvérisation (DC magnetron sputtering) sur un substrat de silicium (100). Les paramètres influençant l'orientation lors du dépôt sont étudiés ici. La caractérisation de l'orientation est effectuée par diffractométrie aux rayons X (DRX).

1 Introduction

Cette étude porte sur le développement d'un dispositif de caractérisation ultrasonore du silicium poreux. Depuis sa découverte en 1956 par Uhler [1], le silicium poreux (SiP) a été utilisé pour sa luminescence à température ambiante [2], comme isolant électrique [3], pour des applications RF [4], puis aussi dans les capteurs chimiques [5] et biologiques [6].

Pour déterminer les caractéristiques de ce matériau, tels que la porosité ou la profondeur des pores, les méthodes utilisées sont le plus souvent destructives. Une technique de caractérisation non destructive en volume du SiP a été développée au sein du laboratoire [7]. L'objectif est de mettre en place une nouvelle méthode de caractérisation non destructive utilisant des ondes de surface permettant la concentration de l'énergie acoustique dans la couche poreuse uniquement. L'intérêt est de pouvoir caractériser des films de quelques dizaines de micromètres.

Une des solutions pour générer des ondes de surface est la fabrication de transducteurs inter-digités. Ces transducteurs sont présents dans les capteurs à onde de surface (Surface Acoustic Wave, SAW). Ils peuvent générer plusieurs types d'ondes (onde de Rayleigh, de Love, de Lamb).

Dans ce travail, la modélisation des transducteurs inter-digités, ainsi que la fabrication de la couche piézoélectrique en nitrure d'aluminium sont présentées.

2 Principe du dispositif

Un transducteur inter-digité (Interdigital Transducer, IDT) est constitué de deux électrodes métalliques en forme de peignes et déposé sur une couche piézoélectrique (figure 1). λ est la longueur d'onde, a la largeur des doigts et p leur périodicité. L'ouverture acoustique (W), la distance inter-électrodes (L) et la distance centre à centre des électrodes (L_{cc}) sont choisies dans le but d'avoir une distance entre les transducteurs correspondant à la limite de la zone de Fresnel et Fraunhofer. L'onde générée par les IDTs se propage en surface de la couche piézoélectrique.

Dans ces travaux, l'objectif est de caractériser du SiP, pour cela le film piézoélectrique sera déposé sur un wafer de silicium puis gravé entre les IDTs par électrochimie. L'onde de surface générée se propagera dans cette zone mésoporeuse (pores de 20 nm de diamètre en moyenne).

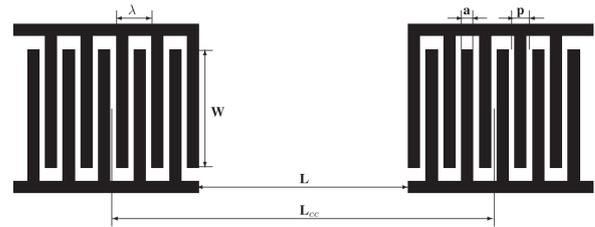


FIGURE 1 – Éléments du dimensionnement des IDTs.

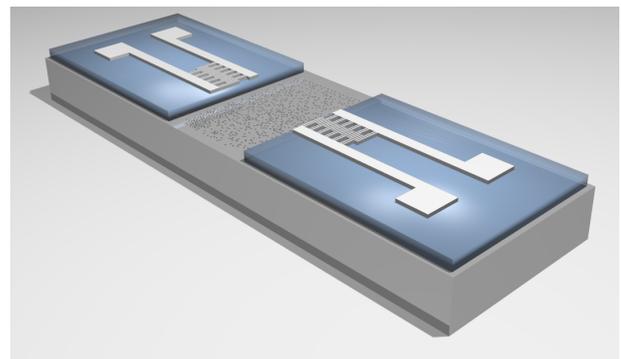


FIGURE 2 – Schéma de principe du dispositif de caractérisation.

3 Modélisation du dispositif

Cette partie traite de la modélisation du dispositif. En effet, la transduction électromécanique est optimisée afin de limiter les effets de l'atténuation de l'onde Rayleigh dans la zone poreuse.

3.1 Détermination de la fréquence de fonctionnement

La majorité de l'énergie de l'onde acoustique de surface est confinée dans une longueur d'onde. Le choix s'est donc porté sur une couche poreuse d'épaisseur d'une longueur d'onde minimum afin d'optimiser la sensibilité du dispositif.

La profondeur de gravure a été fixée à 50 μm [8] et la longueur d'onde est définie par la relation :

$$\lambda = \frac{V_R}{f_0} \quad (1)$$

avec V_R représentant la célérité de l'onde de Rayleigh (5150 m/s dans le silicium [100]). Ainsi, la fréquence de travail

sera de 100 MHz pour une longueur d'onde de $50 \mu\text{m}$. Cette dernière définit la largeur (a) et la période des doigts (p) :

$$a = \frac{p}{2} = \frac{\lambda}{4} \quad (2)$$

ainsi, $a \approx 12 \mu\text{m}$ et $p \approx 24 \mu\text{m}$.

3.2 Détermination de la distance de propagation

L'ouverture acoustique (W) et l'espace inter-transducteurs (L) sont donnés par [9] :

$$F = \frac{\lambda L}{W^2} \quad (3)$$

$F < 1$ correspond à la zone de Fresnel et $F > 1$ à la région de Fraunhofer.

Pour un espace inter-transducteur de 5 mm, $W \approx 500 \mu\text{m}$.

3.3 Détermination des coefficients de rigidité du silicium poreux

Les expressions de la vitesse longitudinale (V_l) et transversale (V_t) en fonction de la porosité du matériau et de la morphologie des pores sont données par [10, 11] :

$$V_l = V_{l0}(1 - \phi)^m \quad (4)$$

$$V_t = V_{t0}(1 - \phi)^s \quad (5)$$

V_{l0} et V_{t0} sont les vitesses longitudinale et transversale dans le silicium cristallin. m et s sont des valeurs empiriques représentant la morphologie des pores qui varient de 0.5 (pore sphérique) à 1.5 (pore cylindrique).

Les coefficients de rigidité (c_{ij}) expriment la relation entre les tenseurs de contraintes (T_{ij}) et de déformations (S_{kl}) :

$$T_{ij} = c_{ij} S_{kl} \quad (6)$$

Le silicium cristallin est anisotrope. Il est donc nécessaire de prendre en compte un facteur d'anisotropie (A) défini par :

$$A = \frac{2c_{44}}{c_{11} - c_{12}} \quad (7)$$

Où $A = 1.56$ pour le silicium.

Les coefficients de rigidité suivants sont donnés pour la direction [100] [12].

$$c_{11} = \rho V_l^2 \quad (8)$$

$$c_{44} = \rho V_t^2 \quad (9)$$

$$c_{12} = c_{11} - \frac{2c_{44}}{A} \quad (10)$$

Le tableau 1 liste les coefficients de rigidité en fonction des porosités. Les porosités varient de 0 à 50 %, cette gamme assure une tenue mécanique suffisante pour le dispositif. Ces valeurs seront utilisées pour les simulations COMSOL, ultérieurement.

TABLEAU 1 – Coefficients de rigidité en fonction de la porosité du silicium

Porosité (%)	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{44} (GPa)
0	165.6	63.7	79.5
10	121.8	47.4	57.9
20	86.4	34.1	40.7
30	58.6	23.6	27.3
40	37.5	15.5	17.2
50	22.2	9.5	9.9

3.4 Paramètres de simulation

Le logiciel COMSOL est utilisé pour dimensionner le dispositif de caractérisation du silicium poreux. Les modèles utilisés sont en deux dimensions (figure 3). Le maillage est triangulaire, avec une dimension minimale de $\lambda/96$ et maximale de $\lambda/8$. Le signal d'entrée est une impulsion de 1 V appliquée sur les IDTs d'émission. Le signal de sortie est la tension mesurée sur les IDTs de réception.

Les électrodes sont en aluminium. Le substrat simulé est du silicium cristallin, l'objectif étant ici uniquement d'optimiser la transduction. Les paramètres des différents matériaux (densité, coefficients de rigidité et constante diélectrique) sont définis par défaut dans COMSOL.

Plusieurs simulations sont effectuées en faisant varier :

- La géométrie des doigts.
- L'épaisseur d'AlN.
- Le nombre de doigts.
- L'espace inter-électrodes.

La fréquence de fonctionnement est la même pour toutes les simulations (100 MHz).

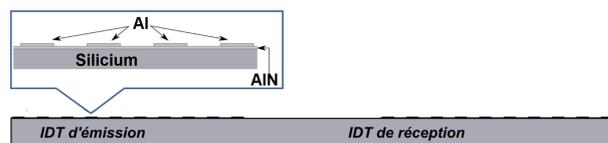


FIGURE 3 – Modèle COMSOL 2D.

3.5 Résultats

3.5.1 Géométries des doigts

Les configurations d'IDTs en simples et doubles doigts ont été comparées (figure 4). La largeur des électrodes simples doigts est de $12 \mu\text{m}$ pour $0.5 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Pour les doubles doigts, la largeur est de $6 \mu\text{m}$ pour $0.5 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Avec les simples doigts, le signal transmis est perturbé par les réflexions sur les doigts de l'IDT de réception (figure 5). La configuration doubles doigts permet de limiter les réflexions entre les différents doigts [13]. L'élimination de ces perturbations permet d'avoir un signal avec une plus grande amplitude (figure 5). Ainsi, le choix

s'est porté sur une configuration en doubles doigts.

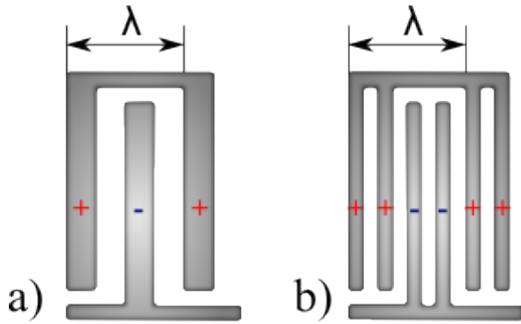


FIGURE 4 – Géométries a) simples et b) doubles doigts.

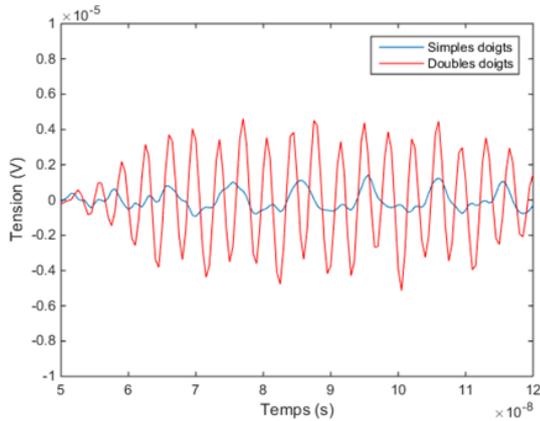


FIGURE 5 – Comparaison des signaux de sorties pour les simples doigts et les doubles doigts.

3.5.2 Epaisseur d'AlN

L'augmentation de l'épaisseur d'AlN améliore ses propriétés piézoélectrique, mais les contraintes technologiques (temps de dépôts, stress de la couche) limitent l'augmentation de l'épaisseur de la couche piézoélectrique. De plus, le coefficient piézoélectrique (d_{33}) chute pour des épaisseurs inférieures à $0.5 \mu\text{m}$ [14]. Il sera donc nécessaire d'optimiser le dépôt d'AlN afin d'assurer un compromis entre l'épaisseur (coefficient piézoélectrique) et les contraintes technologiques.

La figure 6 représente la tension sur le transducteur de réception pour les épaisseurs d'AlN de $0.25 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$ et $1 \mu\text{m}$. L'amplitude est plus importante pour une épaisseur d'AlN de $1 \mu\text{m}$. L'objectif pour la fabrication du nitrure d'aluminium est d'atteindre une épaisseur de $1 \mu\text{m}$ minimum.

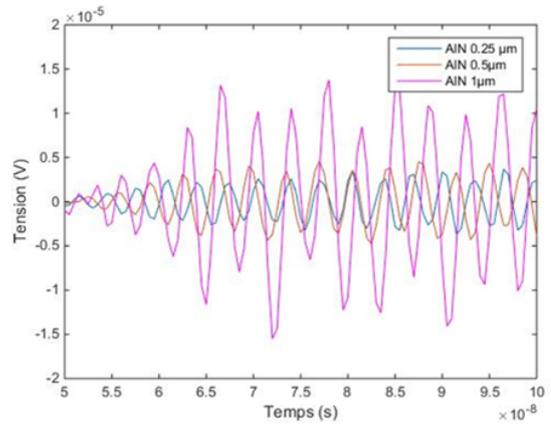


FIGURE 6 – Variation de l'épaisseur du nitrure d'aluminium pour $0.25, 0.5$ et $1 \mu\text{m}$.

3.5.3 Nombre de doigts et espace inter-transducteurs

La figure 7 est composée de deux courbes qui montrent l'influence du nombre de doigts sur l'évolution du gain (V_s/V_e) avec la fréquence du dispositif. Pour ce faire, des dispositifs dont les IDTs sont composés de 40 et 80 doigts ont été simulés. Δp correspond à la différence entre le gain de la bande passante et la valeur moyenne hors bande passante. Il y a une nette augmentation du Δp à 80 doigts.

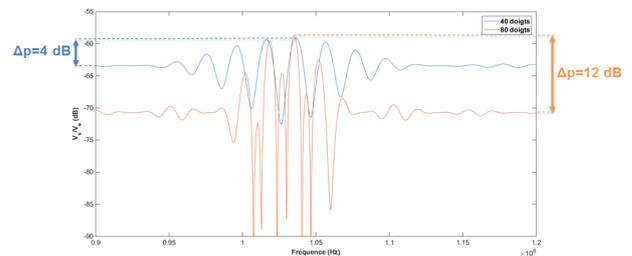


FIGURE 7 – Gains en fonction du nombre de doigts des transducteurs.

Ensuite, la distance inter-électrodes et le nombre de doigts varient simultanément.

Deux configurations sont comparées :

- 2 transducteurs de 80 doigts et espacés de 4 mm.
- 2 transducteurs de 100 doigts, espacés de 5 mm.

L'ajout de doigts permet d'obtenir un Δp suffisant même avec une distance inter-transducteurs plus importante (figure 8).

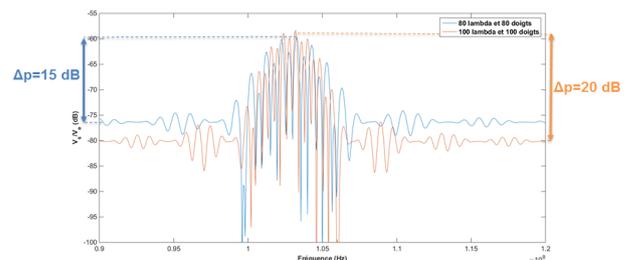


FIGURE 8 – Modifications du nombre de doigts et de la distance inter-électrodes.

La configuration retenue est celle d'IDTs doubles doigts avec une largeur d'électrode de $6 \mu\text{m}$, d'ouverture acoustique de $510 \mu\text{m}$, de distance inter-électrodes de 5 mm et d'épaisseur d'AlN de $1 \mu\text{m}$ minimum.

4 Dépôt du nitrure d'aluminium

Le nitrure d'aluminium est un semi-conducteur III-V, de structure cristalline hexagonale. L'orientation (002) est choisie pour optimiser la transduction qui visuellement se traduit par des colonnes hexagonales perpendiculaires au substrat.

L'orientation cristalline est influencée par les paramètres de dépôts [15] et l'épaisseur de la couche [14]. Les paramètres de dépôts étudiés sont la température du substrat et le débit des gaz (pression et concentration).

4.1 Orientations et épaisseurs

La couche de nitrure d'aluminium est déposée par DC magnetron sputtering à 500 W . La cible utilisée est en aluminium. Le mélange de gaz pour le dépôt est un mélange d'argon (Ar) et d'azote (N^2). Les échantillons utilisés sont en silicium (100), 6 pouces, dopé N et de résistivité $26.1\text{-}33.9 \Omega\cdot\text{cm}$. La température du substrat est constante tout le long du dépôt.

Pour déterminer les meilleurs paramètres de dépôts pour la croissance de l'orientation (002), des variations de la température du substrat, des débits d'argon et d'azote ont été testées. Les modifications des paramètres sont présentées dans le tableau (2). Le temps de dépôts est de 20 min pour tous les échantillons.

TABLEAU 2 – Paramètres des dépôts

Echantillons	Températures ($200 \text{ }^\circ\text{C}$)	Débits Ar : N^2 (sccm)	Epaisseurs (nm)
I	200	10.4 : 19.6	268
II	300	10.4 : 19.6	195
III	300	13 : 13	250
IV	350	10.4 : 19.6	200

Ces premiers dépôts obtenus ont permis de fixer les paramètres adéquats pour l'orientation (002) pour de faibles épaisseurs. L'échantillon I est le seul à présenter une orientation en (002), comme illustré par la figure (9). Ainsi, les dépôts suivants gardent les mêmes paramètres, seul change le temps de dépôts pour avoir des épaisseurs différentes. En augmentant l'épaisseur du nitrure les orientations (102) et (103) apparaissent (figure 10). Au delà de $1,5 \mu\text{m}$, l'orientation (002) devient préférentielle (figure 11).

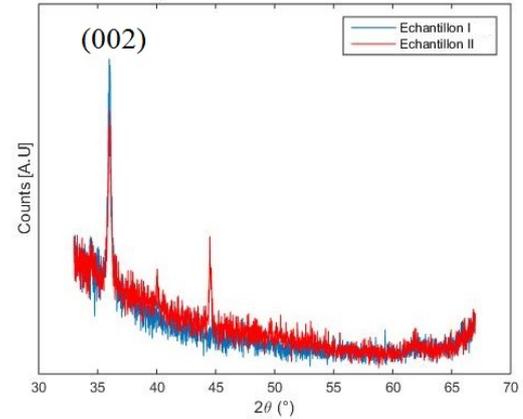


FIGURE 9 – DRX des échantillons I et II, seul l'échantillon I a une seule orientation en (002).

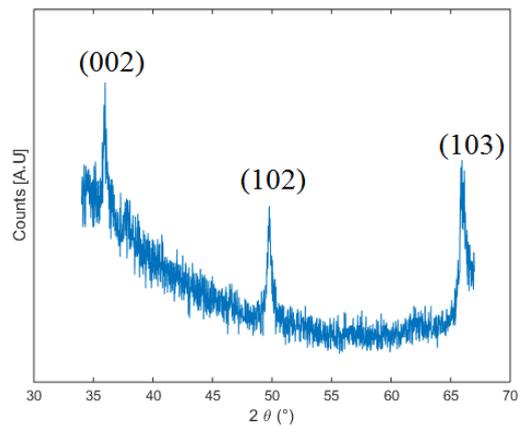


FIGURE 10 – DRX de la plaque IV ($1.5 \mu\text{m}$ d'épaisseur).

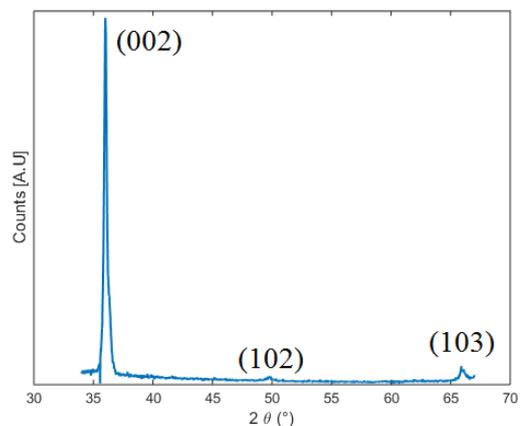


FIGURE 11 – DRX de la plaque V ($2.2 \mu\text{m}$ d'épaisseur).

4.2 Morphologie

La figure 12 montre la morphologie de la surface de l'AlN (plaque IV), où les grains ne sont pas réguliers. Deux phénomènes interviennent, les dislocations et les "twists".

En effet, lors de la croissance de la couche piézoélectrique, des imperfections dans le cristal apparaissent. Ces dislocations se traduisent par des espaces entre les colonnes (figure 13). L'aspect aléatoire de la surface du nitrure d'aluminium est dû aux torsions des colonnes du nitrure d'aluminium. Avec l'accroissement de l'épaisseur d'AlN, les contraintes sur la couche augmentent. Pour libérer ces contraintes, les colonnes d'AlN font une rotation sur

elle-même, phénomène appelé "twist" (figure 14). Ceci est possible grâce aux dislocations qui laissent assez d'espace entre les colonnes pour effectuer une rotation et libérer les contraintes.

Ces défauts peuvent avoir un impact sur l'activité piézoélectrique du nitrure d'aluminium. De prochaines études porteront sur l'AlN pour déterminer la portée des imperfections sur la capacité piézoélectrique de celui-ci.

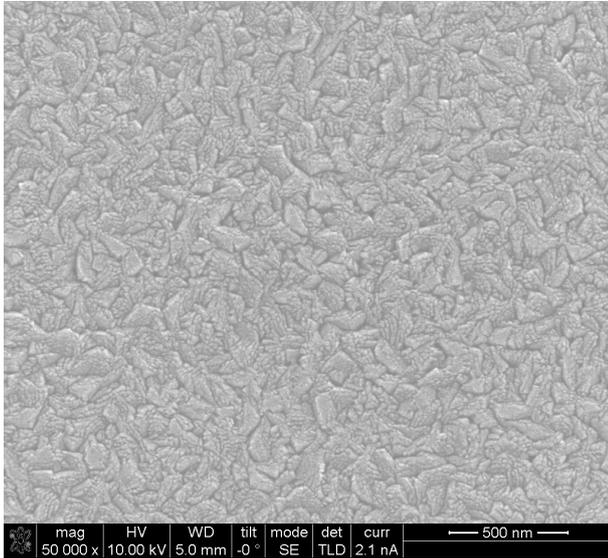


FIGURE 12 – Surface d'une couche d'AlN déposée par DC magnétron sputtering à 500 W et une pression 5.7 mTorr (Plaque IV).

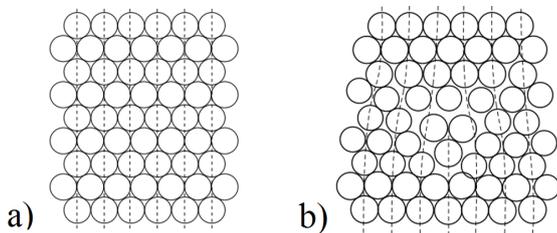


FIGURE 13 – a) Réseau cristallin parfait. b) Réseau cristallin avec des dislocations.

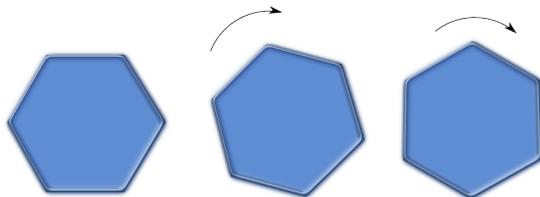


FIGURE 14 – Rotation des colonnes composant l'AlN (twist).

5 Conclusions et perspectives

Dans cette étude, le dimensionnement du dispositif a été fixé, avec des transducteurs inter-digités à doubles doigts, où la largeur des doigts est de $6 \mu\text{m}$ pour une périodicité de $12 \mu\text{m}$ et une ouverture acoustique de $510 \mu\text{m}$. La limite de la zone de Fresnel et Fraunhofer, avec cette configuration, est de 5 mm.

Les différents dépôts de nitrure d'aluminium ont permis de définir les paramètres donnant l'orientation avec les propriétés piézoélectriques les plus importantes. Même avec de multiples orientations, en augmentant l'épaisseur à $2.2 \mu\text{m}$, l'orientation (002) devient préférentielle. Par contre, il est observé une structure cristalline avec des dislocations et des twists qui peuvent influencer les caractéristiques piézoélectriques de l'AlN.

Ainsi, les prochaines études se porteront sur la capacité piézoélectrique de l'AlN, en étudiant l'impact des défauts sur la génération des ondes dans le silicium poreux.

Références

- [1] A. Uhler, Electrolytic shaping of germanium and silicon, *Bell System Technical Journal* **35**, 333-347 (1956).
- [2] L. T. Canham, Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers, *Applied Physics Letters* **57**, 1046-1048 (1990).
- [3] K. Imai, Y. Yoriome, Application of IPOS technique to MOS ICs, *Japanese Journal of Applied Physics* **18**, 281-285 (1979).
- [4] M. Capelle, J. Billoué, P. Poveda, G. Gauthier, N-type porous silicon substrates for integrated RF inductors, *IEEE Transactions on Electron Devices* **33**, 4111-4114 (2011).
- [5] M. Archer, M. Christophersen, P. M. Fauchet, Electrical porous silicon chemical sensor for detection of organic solvents, *Sensors and Actuators B: Chemical* **106**, 347-357 (2005).
- [6] A. M. Rossi, L. Wang, V. Reipa, T. E. Murphy, Porous silicon biosensor for detection of viruses, *Biosensors and Bioelectronics* **23**, 741-745 (2007).
- [7] J. Bustillo, J. Fortineau, G. Gauthier, M. Lethiecq, Ultrasonic characterization of electrochemically etched porous silicon, *Japanese Journal of Applied Physics* **53**, 060308 (2014).
- [8] V. Lehmann, R. Stengl, and A. Luigart, On the morphology and the electrochemical formation mechanism of mesoporous silicon, *Materials Science and Engineering: B* **69-70**, 11-22 (2000).
- [9] C. Campbell, *Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications*, Academic Press (1998).
- [10] K. K. Phani, A. K. Maitra, Strength and elastic modulus of a porous brittle solid : an acousto-ultrasonic study, *Journal of materials science* **21**, 4335-4341 (1986).

- [11] A. K. Maitra, K. K. Phani, Ultrasonic evaluation of elastic parameters of sintered powder compacts, *Journal of materials science* **29**, 4415–4419 (1994).
- [12] D. Royer, E. Dieulesaint, *Ondes élastiques dans les solides : Tome 1*, Masson (1999).
- [13] D. Royer, E. Dieulesaint, *Ondes élastiques dans les solides : Tome 2*, Masson (1999).
- [14] Martin, Thickness dependence of the properties of highly c-axis textured AlN thin films, *Journal of Vacuum Science & Technology A : Vacuum* **22**, 361-365 (2004).
- [15] H. Cheng, Y. Sun, P. Hing, The influence of deposition conditions on structure and morphology of aluminum nitride films deposited by radio frequency reactive sputtering, *Thin Solid Films* **434**, 112-120 (2003).