

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Développement de capteurs interdigités pour la caractérisation de couches sur substrat

Julien Deboucq, Marc Duquennoy, Mohammadi Ouafitoh, Frédéric Jenot, Julien Carlier, Mohamed Ourak

Institut d'Electronique de Microelectronique et de Nanotechnologie
Département d'Opto-Acousto-Electronique (UMR CNRS 8520)
Université de Valenciennes, Le Mont Houy, F-59313 Valenciennes Cedex 09
{julien.deboucq, marc.duquennoy}@univ-valenciennes.fr

Les ondes acoustiques de surface (SAW), dont l'utilisation n'est pas récente et les applications variées, sont un candidat idéal pour la caractérisation de structures de type plaque ou couche sur substrat et le contrôle non destructif de celles-ci. Cependant, les transducteurs à coin habituellement employés pour ce genre d'étude ne peuvent être utilisés de manière optimale que jusqu'à 10 MHz compte-tenu des problèmes d'atténuation. C'est pourquoi, afin d'utiliser les SAW sur les couches minces, il est nécessaire de s'orienter vers d'autres transducteurs pour générer ces ondes. Les transducteurs interdigités (IDT) utilisés classiquement pour la réalisation de filtres à ondes de surface ont été ici privilégiés. Sachant que pour le filtrage électronique notamment, ces capteurs travaillent aux alentours du giga-hertz, nous les avons adaptés à notre gamme de fréquences allant de 10 à 100 MHz. Les IDT ont été déposés par le procédé *lift-off* sur des substrats piézoélectriques en niobate de lithium, puis ont été caractérisés électriquement par analyseur de réseau. Afin de balayer un intervalle de fréquences jusqu'à 100 MHz, plusieurs IDT ont été réalisés. Ces capteurs ont ensuite été testés sur différents échantillons de type couche sur substrat.

1 Introduction

Les progrès de ces 20 dernières années en termes de besoin et de technologies tendent vers la miniaturisation et le développement de capteurs innovants. Cette avancée dépend directement de l'étude approfondie des couches minces telles qu'on les trouve dans les matériaux dits « multicouches » ou dans les matériaux de type couche sur substrat mince ou épais. Ce type de matériaux concerne aussi bien l'optique que l'électronique ou la microélectronique.

La caractérisation de ces matériaux afin d'en déterminer leurs propriétés telles que l'épaisseur de couche, le module d'élasticité E , et le coefficient de Poisson ν entre autres, est déterminant dans le contrôle santé des pièces et le fonctionnement optimal de celles-ci durant leur utilisation.

Le contrôle non destructif de ces matériaux peut s'effectuer via différentes méthodes ultrasonores. Les ondes acoustiques de surface (SAW) de type Rayleigh, se propagent à la surface d'un matériau et l'énergie véhiculée par ces ondes est confinée sous la surface dans une couche d'épaisseur de l'ordre d'une longueur d'onde. Elles constituent donc un candidat intéressant pour la caractérisation de structures de type plaque ou couche sur substrat. Afin de contrôler la profondeur d'inspection, nous travaillons à différentes fréquences d'excitation pour obtenir les longueurs d'onde nécessaires ($\lambda = V/f$).

Plusieurs techniques permettent de générer les ondes de surface de type Rayleigh. Les capteurs à coin notamment permettent de générer ce type d'onde entre 500 kHz et 10 MHz au maximum. Toutefois, au delà de cette gamme de fréquences les atténuations deviennent très importantes. D'autres capteurs travaillent à plus haute fréquence, il s'agit des transducteurs interdigités (IDT) appelés également capteurs à peignes à cause de leur forme caractéristique,

telle deux peignes venant s'entrecroiser. Classiquement les IDT sont utilisés dans des dispositifs acousto-électroniques de traitement de signal tels que les filtres à ondes de surface, les oscillateurs, les résonateurs... Aujourd'hui, la plupart des applications des dispositifs à IDT sont dans le domaine des télécommunications, et typiquement, les fréquences employées sont très élevées et peuvent atteindre plusieurs gigahertz [1, 2, 3, 4].

Pour notre étude, l'idée est d'utiliser ce type de capteurs en les adaptant aux fréquences de travail afin de pouvoir caractériser les couches à étudier, c'est-à-dire entre 10 et 100 MHz. L'idée est de générer l'onde de surface grâce au transducteur puis de la transmettre dans l'échantillon à caractériser. La réception quant à elle se fait soit par interférométrie, soit avec un deuxième transducteur interdigité.

2 Caractérisation de structure couche sur substrat

L'onde de Rayleigh se propage sur une surface d'un matériau. Au passage de l'onde le déplacement des particules s'effectue dans le plan sagittal. L'énergie de cette onde est confinée en surface dans une couche de l'ordre de la longueur d'onde de l'onde de Rayleigh. Dans les milieux constitués d'une couche sur un substrat, l'onde de surface de type Rayleigh devient dispersive [5]. La vitesse de propagation de cette onde dépend en partie des caractéristiques de la couche. Ainsi sa mesure permet, par méthode inverse, de remonter aux caractéristiques de la couche.

Dans cette étude les courbes théoriques de dispersion sont tracées sous Matlab via un programme de calcul des

modes acoustiques propres dans les substrats semi-infinis multicouches à l'aide d'une méthode polynomiale [6]. Cette méthode a été développée et validée au laboratoire pour la caractérisation des composants semi-conducteurs quantiques utilisant les interactions opto-acousto-électroniques, mais également pour le contrôle non destructif. Afin de calculer les vitesses de phase et de groupe des modes de Rayleigh dans les structures à couches, chaque couche est définie par sa densité et ses constantes élastiques du second ordre.

Sur la figure 1 sont reportées les vitesses de phase et de groupe du premier mode de Rayleigh se propageant sur un substrat de verre recouvert d'une couche d'or. Les paramètres de la couche (1 μm) et du substrat sont reportés dans la table 1, on notera V_L' , V_T' , ρ' les paramètres vitesses des ondes longitudinale, transversale et densité de la couche et V_L , V_T , ρ ceux du substrat.

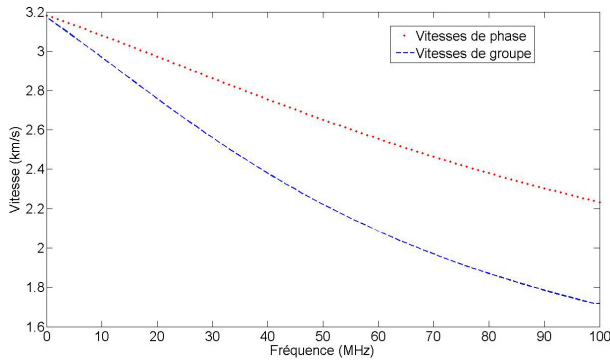


Figure 1 : Vitesses de phase et de groupe pour une couche d'Or de 1 μm sur substrat de verre

Nous sommes dans le cas où $V_T(\text{Verre}) > V_T(\text{Or})$:

$$\frac{V_T'}{V_T} = 0.34 < \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

La couche est dite « loading » (voir figure 2) car elle charge le substrat. Dans ce cas la vitesse de l'onde de surface sur le substrat seul est diminuée par la présence de la couche [5].

	Couche d'Or	Substrat de Verre
Masse volumique ρ (g/cm^3)	19.3	2,498
Vitesse longitudinale V_L (m/s)	3212	5852
Vitesse transversale V_T (m/s)	1193	3475
Vitesse de Rayleigh V_R (m/s)	1127	3182

Table 1 : Caractéristiques de la couche d'or et du substrat de verre considérés ici comme isotropes

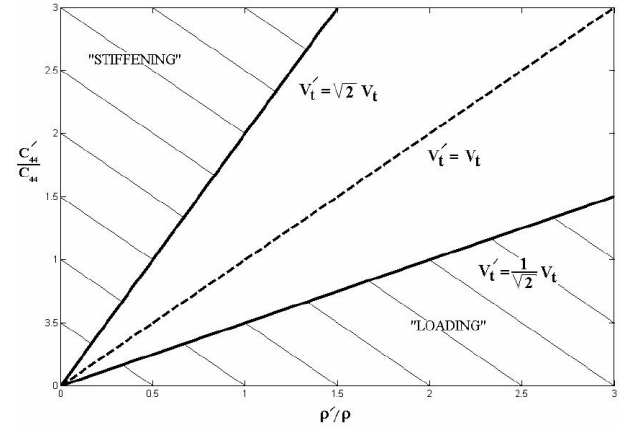


Figure 2 : Conditions sur les rapports des vitesses transversales entre substrat de matériaux isotropes pour les cas « Stiffening » et « Loading ».

3 Capteur IDT

Un transducteur interdigité, ou IDT pour *Interdigital Transducer*, est constitué de deux électrodes métalliques en forme de peignes qui s'entrecroisent avec une distance de recouvrement des doigts w .

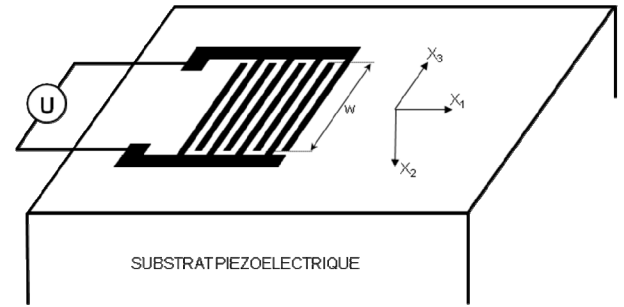


Figure 3 : Schéma d'un transducteur interdigité déposé sur un substrat piézoélectrique

Le transducteur est déposé sur un substrat piézoélectrique qui ici est en niobate de lithium (LiNbO_3) de sorte que lorsque l'on applique une tension électrique U entre ces deux électrodes, il en résulte une accumulation de charges dont les signes s'alternent d'un doigt à l'autre. Cela implique la création d'un champ électrique entre chaque paire de doigts. L'association de l'effet piézoélectrique du substrat et de ce champ entraîne des dilatations et des compressions dans le matériau créant ainsi des déplacements. Ce sont ces déplacements qui créent les ondes de surface dans la direction X_1 perpendiculaire aux doigts (Fig. 3) [7].

Dans cette étude, la réalisation de ces transducteurs est faite via le procédé *lift-off* s'effectuant en 4 étapes. La première étape consiste en la réalisation d'un masque de gravure élaboré à partir d'une plaque de verre recouverte d'une couche mince de chrome ou d'oxyde de fer. Le substrat de verre employé est homogène et d'une grande transparence optique au rayonnement utilisé. La deuxième étape concerne la lithographie optique (Fig. 4). Cette étape permet de réaliser nos motifs dans une résine photosensible

par projection d'un rayonnement UV au travers du masque, réalisé précédemment, en contact avec le wafer. On dépose sur le substrat de la résine photosensible (i), l'ensemble est ensuite placé sur tournette. On aligne le masque sur le substrat, puis on insole avec une lampe UV (ii). Enfin on révèle ; la résine insolée avant est dissoute (iii). La métallisation se déroule durant la troisième étape. Elle est effectuée par évaporation d'une source chauffée par faisceau d'électrons et la condensation à l'état solide de la matière évaporée sur le substrat. C'est durant la dernière étape que s'effectue le lift-off. Il s'agit de la suppression de la résine avec un solvant.

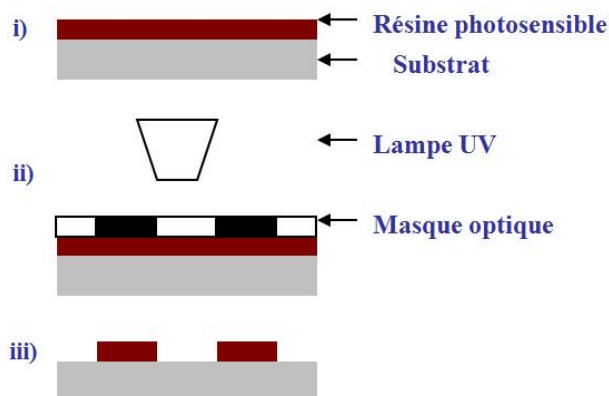


Figure 4 : Schéma des différentes opérations de la lithographie optique

Plusieurs peignes ont été conçus afin de couvrir une gamme de fréquences allant de 10 MHz à 100 MHz. D'autre part, plusieurs configurations de peignes ont été élaborés en faisant varier la largeur de recouvrement des doigts w , et le nombre de paires de doigts N (Fig. 4) afin de déterminer pour notre application, la configuration optimale pour avoir une réponse correcte en termes d'amplitude et de bande passante [2, 8].

Les peignes ont été testés électriquement ; les mesures sous pointes de l'impédance ont permis de vérifier les caractéristiques des peignes aux différentes fréquences et des tests acoustiques en émission-réception ont été également réalisés.

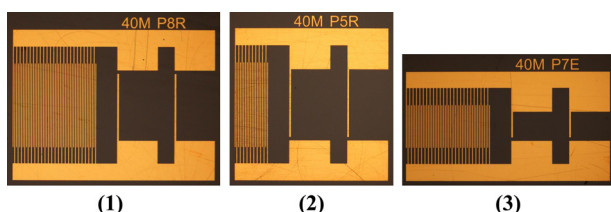


Figure 5 : Exemples de peignes de 40 MHz.

(1) : $N = 25$, $w = 2.5$ mm ; (2) : $N = 10$, $w = 2.5$ mm ; (3) : $N = 25$, $w = 1.25$ mm ;

La figure 6 montre le dispositif de mesure d'impédance sous pointes sur un transducteur de 40 MHz et sur la figure 7, nous pouvons observer la partie réelle de l'impédance correspondante. Dans cet exemple, un pic aux alentours de 39.4 MHz peut être observé. D'autre part, nous avons

vérifié la qualité de l'électrode en effectuant une mesure avec un profilomètre. Les doigts du peignes sont légèrement plus larges au niveau de leur base, cela est dû au procédé *lift-off* lui-même où lors de l'insolation aux UV, bien que le masque soit en contact avec le wafer il existe un léger effet de diffraction qui se répercute sur la largeur des doigts qui devient un peu plus large à la base. Cet aspect est mis en évidence à partir de mesures au profilomètre le long des électrodes. Sur la figure 8, nous pouvons constater que la largeur des doigts pour un peigne fonctionnant à 40 MHz, qui théoriquement devraient avoir une largeur constante de 25 μ m, est agrandie à la base de 1 μ m donnant une forme en trapèze aux doigts de l'IDT. Toutefois la périodicité restant constante cela n'influe pas sur nos mesures

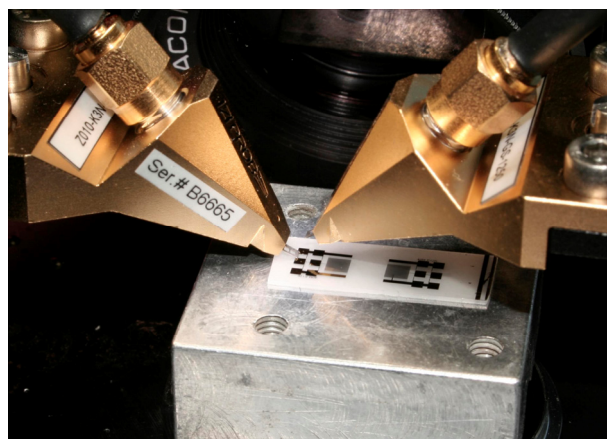


Figure 6 : Mesure sous pointes de l'impédance d'un transducteur interdigité de 40 MHz

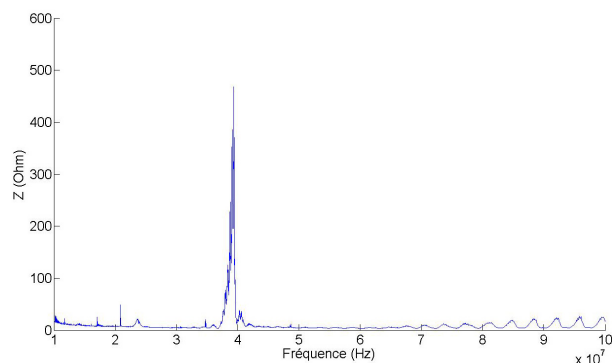


Figure 7 : Représentation graphique de l'impédance réelle Z d'un peigne conçu pour fonctionner à 40 MHz

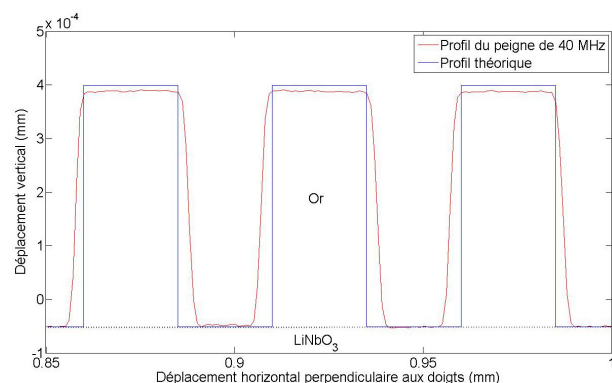


Figure 8 : Mesure au profilomètre d'un transducteur interdigité de 40 MHz au niveau des doigts.

4 Principe de la mesure

Le schéma du montage est reporté sur la figure 9. L'IDT est posé et maintenu sur l'échantillon de sorte que les doigts soient du côté de l'échantillon à étudier. L'onde de surface générée par l'IDT se propage perpendiculairement aux doigts le long de la surface du substrat piézoélectrique en LiNbO_3 sur lequel le peigne à été déposé. Arrivée au niveau de l'échantillon, l'onde est transmise dans la couche d'or et se propage ensuite dans l'échantillon. Afin de transmettre un maximum d'énergie acoustique dans l'échantillon, un couplant est utilisé au niveau de la surface de contact entre l'IDT et l'échantillon. Au niveau de la détection, un interféromètre hétérodyne (SH-140) est utilisé. Compte tenu du fait que l'interféromètre a une bande passante limitée à 45 MHz, nous mettons actuellement en place un autre dispositif optique basé sur la méthode de la lame de couteau [9] pour couvrir la détection entre 40 MHz et 100 MHz.

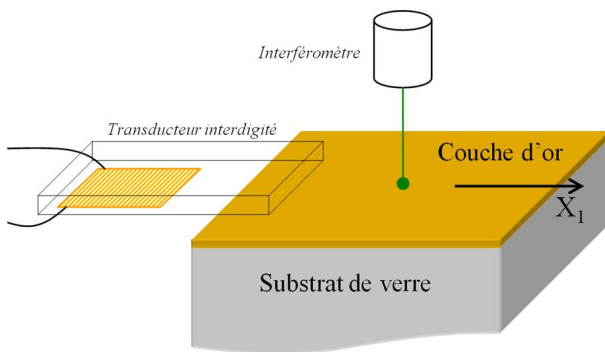


Figure 9 : Schéma du montage de génération des ondes acoustiques de surface par transducteur interdigité et leur réception par interférométrie laser

L'ensemble échantillon-IDT est posé sur une table de déplacement micrométrique dans les trois dimensions. A chaque déplacement ($50\ \mu\text{m}$) suivant X_1 la direction perpendiculaire aux doigts de l'IDT, le signal est recueilli sur l'oscilloscope. L'ensemble des signaux est ensuite réceptionné sous Matlab[®] afin d'en faire le traitement. Une méthode d'intercorrrelation (Figure 10) permet ensuite de déterminer le décalage temporel et d'en déduire les vitesses de groupe. A partir de ces dernières, sont obtenues les vitesses de phase.

5 Conclusion

Dans cette étude, l'utilisation de transducteurs interdigités a été privilégiée pour générer des ondes acoustiques de surface sur des échantillons composés d'une couche d'or déposée sur un substrat de verre. Différents IDT ont été réalisés afin de couvrir une gamme de fréquences allant de 10 à 100 MHz, et ont été testés afin de mettre en évidence les potentialités de cette technique pour caractériser les couches minces.

Remerciements

Nous remercions pour leurs soutiens à nos recherches, la région Nord-Pas-de-Calais et l'Union Européenne (fonds FEDER) via les programmes CISIT et Interreg IV « PRISTIMAT ». Enfin, nous remercions Marc Slachciak et Lucie Dupont pour leur implication aux dispositifs expérimentaux.

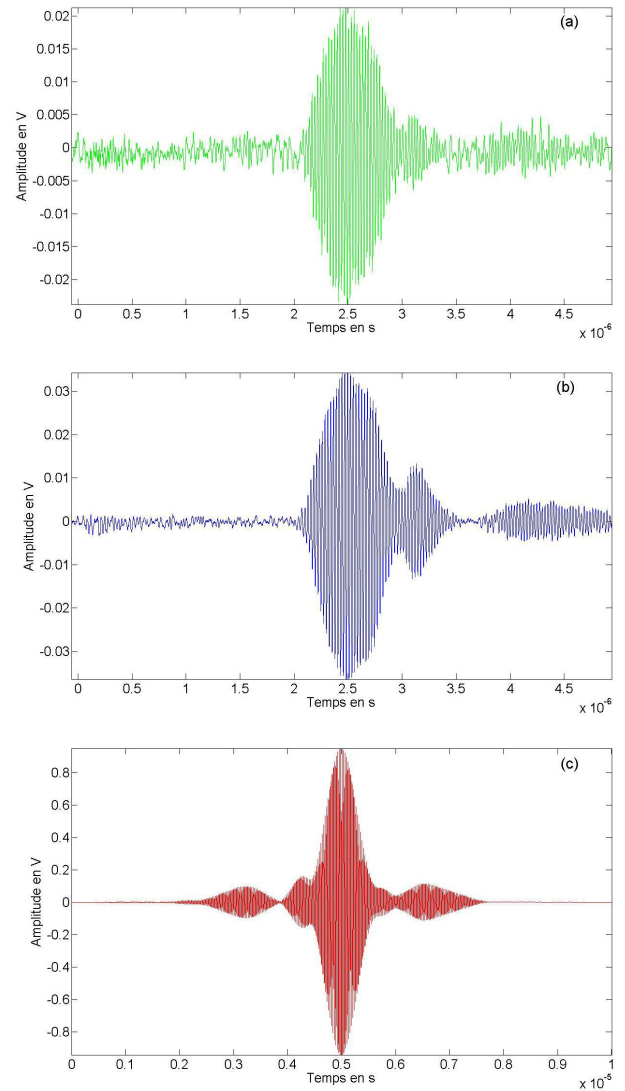


Figure 10 : Représentation graphique de l'intercorrrelation (c) des signaux (a) et (b) obtenus en deux points séparés de $50\ \mu\text{m}$ sur l'échantillon à 40 MHz.

Références

- [1] Wang W., Keekeun Lee., "Optimal design on SAW sensor for wireless pressure measurement based on reflective delay line", *Sensor and Actuators A Physical*, 139, 2-6 (2007).
- [2] Datta S. "Surface acoustic wave devices», Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632 (1986).
- [3] Wei C., Chen Y. "Highly sensitive ultraviolet detector using a ZnO/Si layered SAW oscillator", *Thin Solid Films*, (2009).
- [4] Viens M., David J., Cheeke N. "Highly sensitive temperature sensor using SAW resonator oscillator", *Sensors and Actuators A*, 24, 209-211 (1990).
- [5] Farnell G. W., Adler E. L., "Elastic wave propagation in thin layers", Department of Electrical Engineering, McGill University, Montreal Canada (1971).
- [6] LEFEBVRE J-E., "Méthode polynômiale appliquée à l'étude des modes acoustiques propres de structures multicouches", HDR, IEMN-DOAE, UVHC (2000).
- [7] Royer D., Dieulesaint E. "Ondes élastiques dans les solides, Tome 2: Génération, interaction acousto-optique, applications », *Masson Paris*, (1999).
- [8] Renaudin A. "SAW nanopump for handling droplets in view of biological applications", *Sensors and Actuators B Chemical*, 113, 389-397 (2006).
- [9] Aharoni A. "Near-field analysis of the knife-edge technique", *Applied Optics*. Vol. 24, N°18 (1985).