

## CFA/VISHNO 2016

**Optimisation de capteurs interdigités (IDT) destinés au contrôle non destructif de couches minces par ondes de surface HF**

D. Fall, M. Duquennoy, M. Ouaftouh, B. Piwakowski et F. Jenot  
IEMN-DOAE (CNRS UMR 8520), Université de Valenciennes, 59313 Valenciennes  
Cedex 9, France  
dame.fall@univ-valenciennes.fr



LE MANS

Ce travail entre dans le cadre de la caractérisation des couches minces (épaisseur, constantes élastiques, masse volumique). Parmi les méthodes de caractérisation potentielles, les méthodes ultrasonores employant des ondes de surface sont particulièrement intéressantes. En effet, 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. Afin de caractériser ces revêtements minces, il est nécessaire de travailler en haute fréquence. D'autre part, ces couches peuvent être fragiles et transparentes, c'est pourquoi, des transducteurs interdigités (IDT) sont ici envisagés. Afin d'optimiser ce type de transducteurs, et en particulier leur bande passante, il est nécessaire d'étudier différentes configurations sachant qu'il est notamment possible de faire varier le nombre d'électrodes, les dimensions des électrodes, leurs formes et leurs espacements. Différents résultats seront présentés à la fois sur le plan théorique mais aussi expérimentale.

## 1 Introduction

Depuis quelques années, nous étudions la possibilité d'exploiter la dispersion des ondes de surface pour caractériser différentes structures et en particulier des couches minces métalliques, sol gel et des gradients de contraintes [1-3]. Afin de travailler sur une large gamme de fréquences tout en maîtrisant l'excitation des ondes de surface, nous développons des transducteurs interdigités de type SAW. En effet, ce type de transducteurs permet de générer efficacement des ondes de surface sur les structures à caractériser avec des fréquences relativement importantes par rapport à celles classiquement employées en CND [1-3].

Afin de poursuivre nos investigations et améliorer les performances de ces transducteurs dans le cadre des contrôles non destructifs, nous devons réaliser différentes optimisations en modifiant les paramètres dimensionnels de ces derniers. Etant donné qu'il est possible de réaliser de nombreuses configurations sur les schémas des électrodes des IDT, il est nécessaire de disposer d'un outil de modélisation souple et efficace. Parmi les paramètres que nous souhaitons optimiser dans les schémas des électrodes pour adapter les bandes passantes des transducteurs IDT, il y a les espacements, les largeurs, les formes et le nombre d'électrodes. Compte tenu du nombre de configurations important à tester dans le cadre de l'optimisation, nous proposons d'adapter la méthode DREAM (Discrete REpresentation Array Modelling) aux transducteurs IDT. Nous montrons que cette méthode permet de prédire efficacement les champs de déplacements engendrés par ce type de transducteurs sur des temps très courts.

## 2 Transducteurs interdigités pour le CND

### 2.1 Principe de fonctionnement

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  $W_a$ .

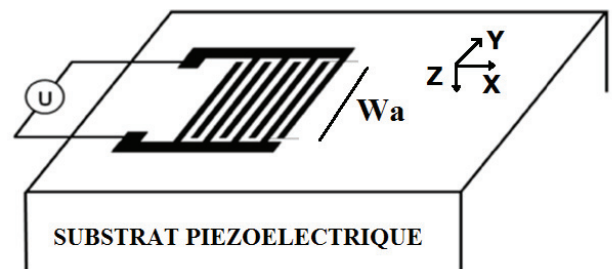


Figure 1 : Schéma d'un transducteur interdigité déposé sur un substrat piézoélectrique

Le transducteur est déposé sur un substrat piézoélectrique qui ici est en niobate de lithium 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" perpendiculaire aux doigts (Figure 1) [4].

### 2.2 Principe de mesure pour le CND

Compte tenu des applications visées, il est nécessaire d'étudier les déplacements des SAW générés par les transducteurs IDT (Figure 2(a)) pour une excitation donnée et d'en évaluer la bande passante. Nous cherchons en effet à caractériser différentes structures en étudiant la dispersion des ondes de surface. Les ondes de surface sont d'abord générées sur le transducteur IDT puis sont transmises vers l'échantillon à tester (Figure 2(b)). Ensuite, les ondes sont détectées à l'aide d'un interféromètre sensible aux déplacements normaux engendrés par ces ondes. Enfin, plusieurs mesures sont réalisées en plusieurs points suivant la direction X afin d'en déduire les courbes de dispersion des ondes des surface et, par inversion, certaines caractéristiques des couches et des substrats comme les épaisseurs, les constantes élastiques et les contraintes [1-3].

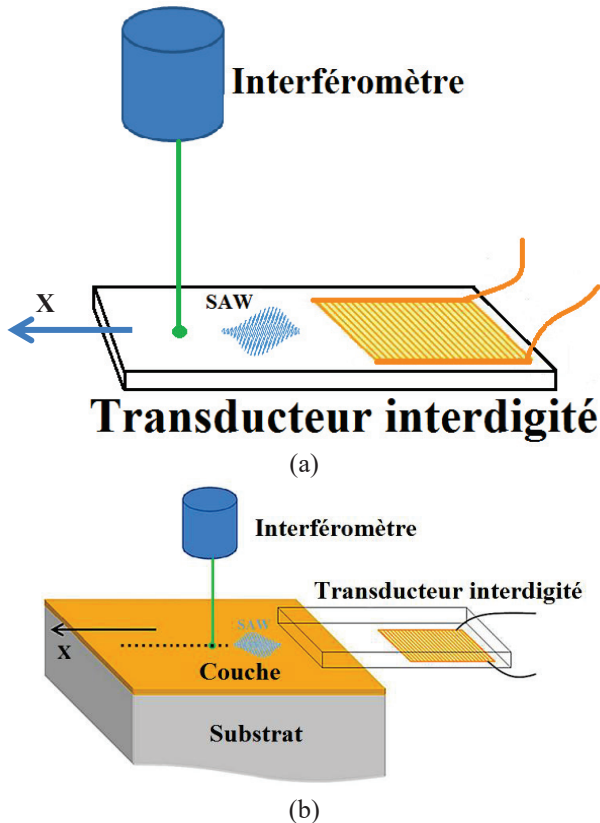


Figure 2 : Schéma du montage de génération des ondes acoustiques de surface par IDT et la réception par interférométrie laser : (a) sur le transducteur (b) sur l'échantillon

Il est donc nécessaire d'étudier les amplitudes de déplacement et les spectres des ondes acoustiques de surface générées par les transducteurs IDT.

### 3 Modélisation électromécanique des transducteurs interdigités

La modélisation du comportement électromécanique des transducteurs IDT a pour but ici de déterminer l'amplitude et le spectre des champs de déplacement des ondes de surface engendrées par les capteurs IDT. Les caractéristiques que nous exploitons ensuite, dans le cadre du contrôle non destructif, sont obtenues à partir de la dispersion des ondes de surface. Par conséquent, il est essentiel de connaître les caractéristiques des ondes qui pourront être générées par ces capteurs. Pour cette étude, il est nécessaire de tenir compte à la fois du comportement piézoélectrique du substrat, de la contribution des électrodes métalliques mais aussi de l'excitation électrique du capteur. Nous avons étudié deux méthodes de modélisation et nous avons comparé leurs résultats et les temps de calculs pour différents types d'excitations. Nous avons testé et comparé deux méthodes numériques, l'une basée sur les éléments finis (*Comsol Multiphysics*) et l'autre basée sur la réponse impulsionnelle spatiale (DREAM).

#### 3.1 Modélisation éléments finis

Les programmes ou codes basés sur la modélisation par éléments finis sont nombreux. Dans le cadre de la modélisation éléments finis, nous avons privilégié le

logiciel *Comsol Multiphysics* qui permet d'étudier le comportement électroacoustique et mécanique en tenant compte des équations de propagation des ondes (Figure 3). Des études ont permis d'optimiser le choix des différents paramètres des IDT pour assurer des bandes passantes, amplitude de déplacement et niveaux d'énergie compatibles avec les mesures expérimentales [1].

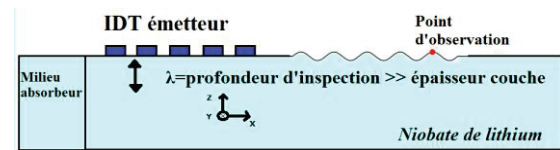


Figure 3 : Représentation schématique de simulation avec Comsol de la génération des ondes acoustiques de surface par IDT.

Ce modèle a montré son efficacité en termes de résultats. Il offre l'avantage de modéliser des structures complexes mais avec des temps de calcul assez longs [1] ou nécessitant plus de mémoire notamment pour FEM/BIM [5]. Quant à notre étude, elle consiste à optimiser les IDT, en particulier leur bande passante, en étudiant différentes configurations sachant qu'il est notamment possible de faire varier le nombre d'électrodes, les dimensions des électrodes, leurs formes et leurs espacements. Compte tenu des temps de calcul assez long, notre objectif est de mettre en œuvre une autre technique de modélisation efficace et surtout rapide (quelques secondes). Pour atteindre ce but, nous avons adapté des outils de simulation semi-analytique basés sur le modèle de la Réponse Impulsionnelle Spatiale.

#### 3.2 Modélisation DREAM

La notion de la réponse impulsionnelle spatiale a été introduite par Stepanishen [6]. Elle est basée sur l'intégrale de Rayleigh [7] exprimée dans le domaine temporelle. Cette intégrale permet de calculer le potentiel acoustique rayonné en un point M par une surface S plane vibrante (Figure 4) :

$$\Phi(M, t) = \int_S v_n(P) \frac{\delta\left(t - \frac{R}{c}\right)}{2\pi R} dS(P) \quad (1)$$

Chaque point P de la surface S est excité par l'impulsion de Dirac  $v_n(P) \cdot \delta(t)$ ,  $v_n(P)$  et R sont respectivement la vitesse normale associée au point P et la distance entre la source (P) et le point d'observation (M). Notons que l'intégrale (1) traduit directement le principe de Huygens : le potentiel au point d'observation M est obtenu en faisant la somme (l'intégration) des ondes élémentaires de forme  $\left(v_n \cdot \frac{\delta(t)}{2\pi R}\right)$  rayonnées par tous les éléments de surface dS et retardées de temps de propagation R/c (c indique la vitesse de propagation).

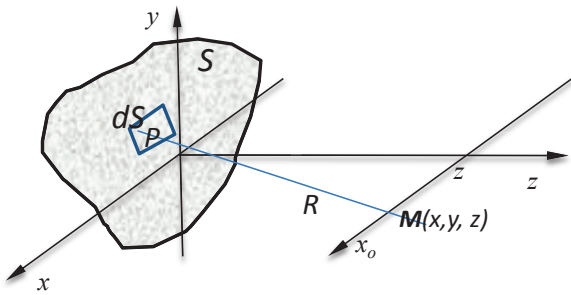


Figure 4 : Rayonnement d'une source de type disque

L'approche DREAM (Discrete REpresentation Array Modelling), introduite par Piwakowski et Delannoy [8] et décrite en détail par Sbai et Piwakowski [9] propose un calcul purement numérique de la réponse impulsionnelle spatiale  $h_\phi$  à l'aide du concept de représentation discrète (DR) (Figure 5). Elle permet de simuler le champ acoustique rayonné par un transducteur ultrasonore plan ayant une forme arbitraire avec une distribution d'excitation arbitraire.

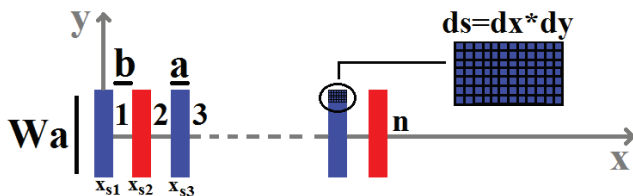


Figure 5 : Modélisation d'un IDT avec DREAM

Dans le cas de la modélisation DREAM, on fait l'hypothèse que le déplacement tangentiel en un point M situé dans le plan (x,y) est à l'image du déplacement tangentiel de l'onde de Rayleigh. La réponse impulsionnelle spatiale en termes de potentiel de déplacement est donc calculée à l'aide de la relation ci-dessous :

$$h_U(M, t) = \int_S v_n(P) \frac{\delta(t - \frac{R}{c})}{2\pi R} dS(P) \quad (2)$$

Le champ de déplacement U induit pour une excitation donnée (s(t)) est obtenu par convolution :

$$U(M, t) = C * h_U(M, t) * s(t) \quad (3)$$

Pour déterminer la vitesse normale (vitesse particulière) à l'aide de DREAM il est nécessaire de renseigner les paramètres du milieu (densité  $\rho$ , la vitesse de propagation des ondes c et le coefficient d'atténuation des ondes  $\alpha$ ). Ensuite, nous devons prendre en compte la répartition spatiale de toutes les électrodes ainsi que leurs dimensions.

La constante de calibration C est utilisée afin de prendre en compte toutes les contributions non considérées dans notre modèle pour rendre les résultats comparables quantitativement avec ceux obtenus expérimentalement.

## 4 Comparaison des résultats de modélisations et de mesures

Nous présentons un premier exemple d'un IDT mono fréquentiel de fréquence de résonance  $f_0$  ( $f_0 = 40\text{MHz}$ ) (Figure 5). Il comporte 40 électrodes, de largeur a ( $a = 25\mu\text{m}$ ), de longueur d'onde  $\lambda$  ( $\lambda = 4a = 100\mu\text{m}$ ), de largeur de recouvrement Wa ( $Wa = 2,5\text{mm}$ ). Les paramètres utilisés pour la discrétisation sont :  $dx = dy = \lambda / 20$  et le pas temporel  $\Delta t = 1/20 * f_0$ .

Nous avons imposé une excitation de type « burst » de fréquence 40 MHz comportant 20 sinusoïdes pour une valeur d'amplitude de tension crête à crête de 40 V. Ensuite, nous avons comparé les résultats des déplacements normaux de l'onde de surface générée par IDT à la fois par éléments finis et expérimentalement (mesure interférométrique) mais aussi les déplacements obtenus avec la méthode DREAM. Les figures 6 et 7 donnent l'allure respectivement de l'amplitude et du spectre des déplacements obtenus

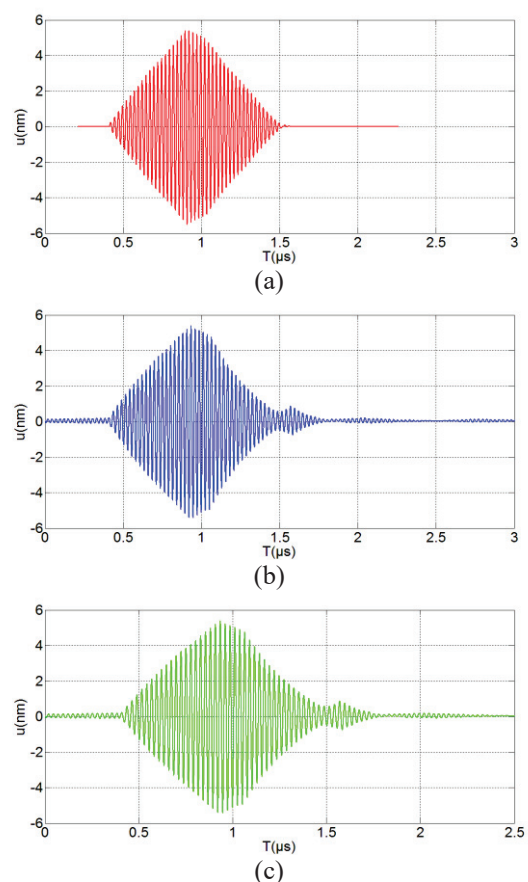


Figure 5 : Réponse temporelle en déplacement du IDTN 40 MHz pour une excitation de type «burst» (40 MHz-20 sinusoïdes) a) DREAM b) Comsol c) Mesure

Notons que le phénomène d'écho observé sur les résultats avec Comsol et les mesures est lié aux réflexions inter-électrodes. Il est possible de les intégrer dans la modélisation avec DREAM mais pour l'exploitation des mesures pour le CND nous ne nous intéressons pas à cet artefact car nous avons vérifié que celui-ci n'a pas d'effets significatifs sur l'estimation des vitesses de phase

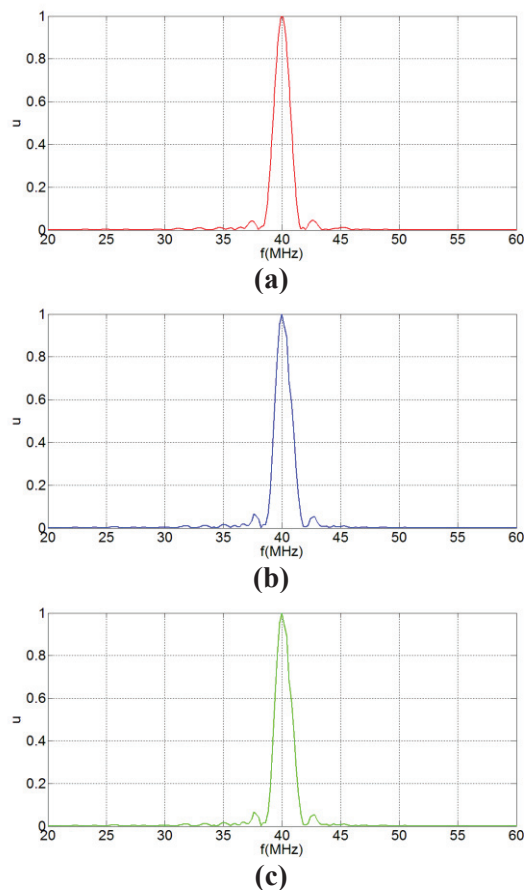


Figure 5 : Réponse fréquentielle en déplacement du IDT 40 MHz pour une excitation de type «burst» (40 MHz-20 sinusoïdes) a) DREAM b) Comsol c) Mesure

Nous observons que l'enveloppe des signaux est la même, les amplitudes des champs de déplacement obtenus sont d'environ 5 nm et la bande passante à -3dB est égale à 1,1 MHz. Les résultats obtenus avec les deux méthodes de modélisations concordent avec les mesures. De plus, nous avons comparé les temps de calcul, ils sont de 92 Heures et 20 Secondes pour respectivement Comsol et DREAM.

## 5 Conclusion

Dans cette étude nous nous sommes intéressés à l'adaptation d'un outil de simulation, basé sur le modèle de la réponse impulsionnelle spatiale, aux IDT. Différentes configurations d'IDT et de types d'excitations ont été étudiés. Nous avons montré qu'il est possible de réduire considérablement les temps de calcul par rapport aux méthodes des éléments finis. Les analyses des déplacements dans les domaines temporel et fréquentiel montrent une assez bonne concordance et confirment la pertinence de la méthode proposée. Pour le cas des ondes de surface de type Rayleigh générées par un transducteur interdigité, DREAM constitue un bon outil de simulation rapide et peu complexe par rapport à Comsol et qui permet d'avoir un aperçu des caractéristiques des ondes générées par les transducteurs.

[1] J. Deboucq, M. Duquennoy, M. Ouaftouh, F. Jenot, J. Carlier, M. Ourak, *Development of interdigital transducer sensors for non-destructive characterization of thin films using high frequency*

*Rayleigh waves*, Review of Scientific Instruments, 82, 064905-1-7 (2011).

- [2] M. Duquennoy, M. Ouaftouh, J. Deboucq, J.E. Lefebvre, F. Jenot, M. Ourak, *Characterization of micrometric and superficial residual stresses using high frequency surface acoustic waves generated by interdigital transducers*, J. Acoust. Soc. Am. 134, 6, 4360-4371 (2013).
- [3] D. Fall, F. Compoin, M. Duquennoy, H. Piombini, M. Ouaftouh, F. Jenot, B. Piwakowski, P. Belleville, C. Ambard, *Surface acoustic wave characterization of optical sol-gel thin layers*, Ultrasonics, Volume 68, 102-107 (2016).
- [4] D. Royer, E. Dieulesaint, *Ondes élastiques dans les solides, Tome 2: Génération, interaction acousto-optique, applications*, Masson Paris (1999).
- [5] T. Tsukamoto, Y. Kanai, K. Koyama, K. Yoshida, Y. Uehara, K. Shimizu, S. Greaves, H. Muraoka, *Micromagnetic Simulation of Recording Write Heads a Comparison of Various Micromagnetic Software*, Magnetics, IEEE Transactions on, vol.48, no.2, pp.311, 314 (2012).
- [6] P. R. Stepanishen, *Transient Radiation from Pistons in an Infinite Planar Baffle*, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 49, pp. 1629 : 1638 (1971).
- [7] L. Rayleigh, *On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid*, Proc. London Math. Soc. s1-17 (1): 4-11 doi:10.1112/plms/s1-17.1.4 (1885).
- [8] B. Piwakowski, B. Delannoy, *Method for computing spatial pulse response: Time-domain approach*, J. Acoust. Soc. America 86, 2422-32 (1989).
- [9] B. Piwakowski, K. Sbai, *A new approach to calculate the field radiated from arbitrarily structured transducer arrays*, IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control (1999).