



**HAL**  
open science

## Développement de capteurs interdigités sur substrat piézoélectrique de type PZT pour la génération des ondes de surface en haute fréquence

Marc Duquennoy, O. Rigo, S. Hocquet, Christian Courtois, J. Deboucq, Mohamed Rguiti, Laurent Seronveaux, Mohammadi Ouafrouh, D. Vandormael, Frédéric Jenot, et al.

### ► To cite this version:

Marc Duquennoy, O. Rigo, S. Hocquet, Christian Courtois, J. Deboucq, et al.. Développement de capteurs interdigités sur substrat piézoélectrique de type PZT pour la génération des ondes de surface en haute fréquence. *Acoustics 2012*, Apr 2012, Nantes, France. paper 000033, 93-99. hal-00803084

**HAL Id: hal-00803084**

**<https://hal.science/hal-00803084>**

Submitted on 21 Mar 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# ACOUSTICS 2012

## Développement de capteurs interdigités sur substrat piézoélectrique de type PZT pour la génération des ondes de surface en haute fréquence

M. Duquennoy<sup>a</sup>, O. Rigo<sup>b</sup>, S. Hocquet<sup>c</sup>, C. Courtois<sup>d</sup>, J. Deboucq<sup>a</sup>, M. Rguiti<sup>d</sup>, L. Seronveaux<sup>b</sup>, M. Ouaftouh<sup>a</sup>, D. Vandormael<sup>b</sup>, F. Jenot<sup>a</sup> and V. Lardot<sup>c</sup>

<sup>a</sup>IEMN-DOAE, Université de Valenciennes, Le Mont Houy, 59313 Valenciennes, France

<sup>b</sup>SIRRIS, Liège Science Park, Rue du Bois Saint-Jean 12, BE-4102 Seraing, Belgium

<sup>c</sup>CRIBC (membre d'EMRA), 4, Avenue Gouverneur Cornez, 7000 Mons, Belgium

<sup>d</sup>LMCPA, Université de Valenciennes, PECMA, Z.I. Champ de l'Abbesse, 59600 Maubeuge, France

marc.duquennoy@univ-valenciennes.fr

Cet article porte sur la réalisation de capteurs interdigités (IDT pour Interdigital Transducer) sur des supports piézoélectriques PZT. L'enjeu est de disposer de capteurs dont la fréquence propre est la plus élevée possible afin de générer des ondes de surface ou de plaque hautes fréquences. Dans la littérature scientifique, les fréquences maximales proposées, pour ce type de capteurs, sont de l'ordre de quelques mégahertz. Or pour analyser des matériaux revêtus avec des couches minces, il est nécessaire de disposer de capteurs travaillant à plus hautes fréquences pour obtenir une meilleure sensibilité des ondes ultrasonores vis-à-vis des paramètres physiques des couches permettant ainsi leur caractérisation. Une partie importante de cet article est consacrée aux techniques permettant de réaliser des électrodes interdigitées, ayant des résolutions importantes, à la surface des substrats PZT. Les techniques testées sont des techniques basées premièrement sur l'ablation et la gravure laser et ensuite sur l'impression d'encre. Les impératifs de réalisation de ces capteurs interdigités imposent premièrement des largeurs d'électrodes extrêmement faibles et deuxièmement de s'adapter aux caractéristiques intrinsèques des PZT avec en particulier une porosité et une rugosité relativement importantes. Les études ont permis d'obtenir des capteurs IDT adaptés à une gamme de fréquences comprises entre 2 et 22,5MHz sur PZT.

## 1 Introduction

Cet article porte sur la réalisation de capteurs interdigités, IDT avec des supports piézoélectriques PZT dans le but de générer les ondes guidées (de surface ou de plaque) en haute fréquence pour le Contrôle Non Destructif. En effet, dans un certain nombre de cas, il est nécessaire de travailler en haute fréquence et en particulier lorsque l'on s'intéresse à la caractérisation de couches ou de revêtements [1,2]. Ces capteurs IDT ont été fabriqués à partir de céramiques PZT dont les propriétés piézoélectriques sont notables et ils ont été adaptés à une gamme de fréquences comprises entre 2 et 22,5MHz. Pour obtenir un capteur IDT, il est nécessaire de réaliser des électrodes sur une lame piézoélectrique dont la périodicité est égale à une demi-longueur d'onde. Cette longueur d'onde est imposée par la fréquence mais également par la vitesse de propagation des ondes dans la structure. Dans le cas des supports PZT, les vitesses de propagation des ondes sont assez lentes. Par exemple, la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh est aux alentours de 2000m/s ce qui est 2,5 fois plus lent que dans une pastille en niobate de lithium. Conséquence, la longueur d'onde est d'autant plus petite et il en est de même pour la largeur des électrodes. Il est donc indispensable de disposer de méthodes capables de réaliser des électrodes avec de très bonnes résolutions. L'objet de cet article est donc d'étudier différentes techniques de dépôts et de réaliser une étude comparative de leurs performances vis-à-vis de la réalisation des capteurs IDT sur des céramiques PZT. Les principales difficultés dans l'optimisation des paramètres des différentes méthodes sont liées premièrement au matériau lui-même puisqu'il faut s'affranchir des difficultés liées à la mouillabilité, à la rugosité et à la porosité de ces supports piézoélectriques PZT. Deuxièmement, il faut être capable de réaliser "N" électrodes ( $10 < N < 20$ ) étroites (jusqu'à 20 $\mu$ m) dont le rapport d'aspect entre la largeur "a" et la longueur "w" est très important ( $200 < w/a < 500$ ) sachant que le moindre contact entre 2 doigts court-circuite le capteur et le rend inutilisable. Les IDT réalisés par les différentes techniques ont été caractérisés électriquement et acoustiquement. Les caractérisations électriques ont concerné la mesure d'impédance électrique qui permet de déterminer la fréquence propre du capteur, son coefficient de qualité et sa bande passante. Les caractérisations acoustiques ont permis de déterminer le niveau et la qualité des déplacements mécaniques générés par les IDT et de mesurer de la vitesse des ondes de surface sur le support piézoélectrique. Les campagnes de mesure ont permis de montrer la qualité et les performances des capteurs réalisés

puisque des capteurs ayant une fréquence propre de 22,5MHz ont été obtenus.

Dans la littérature scientifique, nous retrouvons assez peu d'articles concernant l'utilisation des capteurs interdigités pour la caractérisation et le CND. Intrinsèquement, les transducteurs interdigités à ondes de surface sont obtenus par le dépôt d'un schéma d'électrodes sur une lame piézoélectrique permettant de générer et de détecter directement les ondes de surface sur cette dernière. Ce concept a très largement été utilisé dans le domaine de l'électronique comme dispositif de traitement du signal [3-5] car les ondes de Rayleigh peuvent être excitées très efficacement [6] sur ce type de structure même pour des fréquences importantes de plusieurs GHz. Cependant, ce type de capteurs associé, sur une même lame piézoélectrique, les électrodes pour la génération des ondes de surface et les électrodes pour leur détection. Il n'est donc pas trivial d'utiliser ce type de capteur IDT pour remplacer les capteurs à coin ou à peigne parce que les ondes de Rayleigh générées se propagent à la surface du substrat piézoélectrique lui-même, et non sur la surface du matériau étudié.

Plusieurs études ont montré l'efficacité des capteurs IDT pour la génération des ondes de Lamb en vue de réaliser des contrôles non destructifs. En 1997, l'équipe de Cawley [7] a montré la possibilité d'utiliser des films PVDF pour générer des ondes de Lamb jusqu'à 4MHz. Ces travaux ont été complétés par la suite, en utilisant de nouveau des films PVDF [8], mais aussi avec l'utilisation de céramiques PZT [9-11]. En particulier, De Cicco et al. [12] ont proposé un schéma d'électrodes imbriquant une troisième électrode entre les paires de doigts classiquement proposées. Les fréquences des ondes de Lamb restaient assez basses puisqu'elles étaient comprises entre 0,37 et 4,4 MHz. D'autres auteurs ont testé l'efficacité des capteurs IDT pour contrôler des fissures dans des plaques métalliques. Jin et al. [10] ont exploité des IDT réalisés à partir de céramiques PZT, pour générer des ondes de Lamb à des fréquences se situant entre 600 et 700 kHz. Seuls Na et al. [11] ont utilisé les ondes de surface générées par des capteurs IDT pour caractériser les fissures. La fréquence des ondes employées était de quelques mégahertz (3,1 Mhz) et les plaques testées étaient en aluminium.

Dans ce travail, nous nous distinguons assez nettement de ces travaux antérieurs puisque nous développons des capteurs IDT compatibles avec le contrôle non destructif de structures, pouvant générer des ondes guidées dans une

gamme spectrale ( $> 10\text{MHz}$ ) assez peu envisagée par les techniques ultrasonores avec contact et sans immersion (capteurs à coin ou à peigne).

## 2 Les capteurs interdigités

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  $w$ . Le transducteur est déposé sur un substrat piézoélectrique 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.1) [13].

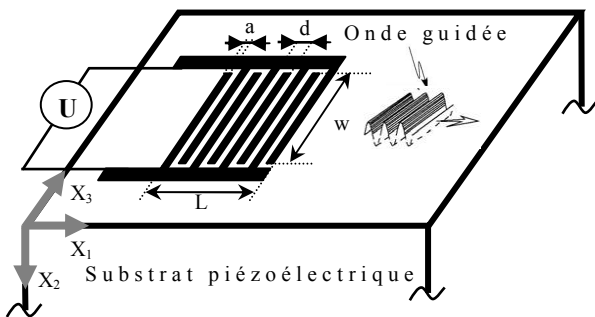


Figure 1 : Schéma d'un transducteur interdigité déposé sur un substrat piézoélectrique

Les fréquences de résonance des différents capteurs IDT ont été contrôlées par des mesures électriques en relevant leurs coefficients de réflexion électriques à l'aide d'un dispositif sous pointes et d'un analyseur de réseau (IEMN-DOAE). Les mesures acoustiques ont été réalisées à partir d'un interféromètre qui a permis de détecter les déplacements normaux engendrés par les ondes guidées. Ces ondes générées par les capteurs IDT se propagent perpendiculairement aux doigts le long de la surface du substrat piézoélectrique sur lequel le peigne a été déposé. Les capteurs IDT ont été placés sur une table de déplacement micrométrique et pour plusieurs positions suivant  $X_1$  (direction perpendiculaire aux doigts de l'IDT) les signaux correspondant aux déplacements normaux ont été recueillis sur un oscilloscope. L'ensemble des signaux a été ensuite réceptionné sous Matlab<sup>®</sup> afin d'en faire le traitement et d'en déduire les vitesses de propagation.

## 3 Réalisation des capteurs IDT

### 3.1 Ablation laser

Les techniques basées sur l'ablation laser ont l'avantage d'être des techniques rapides, sans contact et qui offrent la possibilité de réaliser facilement des schémas complexes d'électrodes et de pouvoir les modifier à loisir puisque le spot laser vaporise le métal au fur et à mesure du passage

du spot laser sur les zones où il faut supprimer le métal, sans avoir à recourir à l'utilisation de masques comme en lithographie. Par contre, il est nécessaire de réaliser une première étape de métallisation de la surface. D'autre part, il peut y avoir un léger échauffement local de la structure usiné qui peut être préjudiciable en particulier pour les céramiques PZT (température de Curie). L'idéal étant que la couche soit sublimée sans que le substrat soit échauffé. Ceci dépend de la conduction thermique de la couche et du substrat et de l'absorption électromagnétique de la couche. Enfin, en fonction des caractéristiques de la couche et du substrat et de l'énergie du spot laser, il peut y avoir des effets de bord plus ou moins importants.

### 3.1.1 Laser YAG

Un premier traitement laser est réalisé au LMCPA sur un équipement de la marque Rofin (BAASEL Lasertech) disposant d'une source laser YAG émettant à une longueur d'ondes de 1060 nm et de puissance nominale de 65 W. La gravure utilisée dans ce cas est basée sur un traitement thermique. En effet, la température élevée à la surface provoque des trous dans le matériau par évaporation de la matière à l'endroit où le faisceau laser a touché la surface. La profondeur de la gravure dépend de la puissance du faisceau laser et du temps de gravure.

L'opération a été effectuée sur des échantillons en PZT élaborés par voie solide. Les disques PZT ont été mis en forme par pressage isostatique de la poudre puis frittage. Deux types d'électrodes ont été déposés sur les échantillons. Soit de l'argent déposé par la technique de sérigraphie (l'épaisseur de l'électrode est de l'ordre de quelques micromètres), soit de l'or déposé par évaporation (environ 80nm). Afin d'assurer une bonne accroche de l'or, une couche de chrome (20nm) a été préalablement déposée par évaporation.

Les images sur la figure 2 montrent un exemple de gravure obtenue sur un substrat PZT recouvert d'une couche d'or. Dans cet exemple, le nombre  $N$  de doigts interdigités est de 10 espacés de  $d=1\text{mm}$  ( $a=500\mu\text{m}$  de largeur pour chaque électrode et  $i=500\mu\text{m}$  de zone gravée). Les différents paramètres de gravure qui ont dû être optimisés ont été: la vitesse de lasage, la fréquence et la puissance. La meilleure gravure a été obtenue pour une vitesse de lasage de 100mm/s, une fréquence 3500Hz et une puissance 10% par rapport à la valeur nominale.

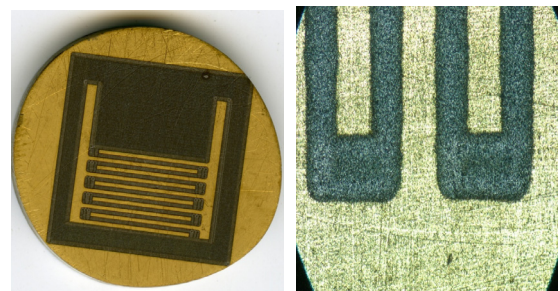


Figure 2 : Gravure réalisée par laser YAG sur une électrode en or déposée sur un substrat en PZT

Les essais réalisés ont montré que la gravure des électrodes d'or donnait des résultats plus intéressants comparés aux électrodes d'argent. Cela est probablement

dû en grande partie à la qualité du métal. En effet, dans le cas de l'argent déposé par sérigraphie, l'électrode n'était pas homogène et elle présentait une épaisseur beaucoup plus élevée que celle obtenue par évaporation d'or. Par conséquent, pour graver correctement et enlever complètement l'argent entre les électrodes, il a fallu réaliser plusieurs passes laser au même endroit. Le passage répété du laser induit des bavures surfaciques. D'autre part, ce passage répété du laser peut également provoquer un échauffement local du matériau, et donc une dépoliarisation et une dégradation des propriétés piézoélectriques de la céramique. Pour la gravure sur la couche d'or, l'optimisation de tous les paramètres a permis de réaliser des électrodes avec une résolution de  $200\mu\text{m}$ . Un tel schéma d'électrode a permis d'obtenir des capteurs IDT ayant une fréquence propre de l'ordre de 2MHz.

### 3.1.2. Laser Vanadate

Une deuxième série d'essais ont été réalisés sur un équipement commercial Trumark Station Trumpf 5000 (fournisseur VAC Machine, équipement faisant partie de la plateforme Hainolase du centre EMRA, dédié aux traitements de surface par technique laser) disposant d'une source laser Nd:YVO<sub>4</sub> émettant à une longueur d'onde à 1064nm et de puissance nominale de 20W. Une tête galvanométrique permet de scanner le faisceau laser à la surface de l'échantillon à traiter. La taille du faisceau laser focalisé à la surface est de  $45\mu\text{m}$  environ.

Les pastilles de PZT ont été recouvertes d'une couche d'or par pulvérisation cathodique, après un léger polissage manuel pour réduire la rugosité de surface du substrat PZT. Le faisceau laser réalise l'ablation de la couche conductrice en se déplaçant à la surface de l'échantillon et en suivant un trajet programmé à partir du schéma de l'électrode à fabriquer. L'influence des paramètres de lasage, tels que : la puissance laser (P), la fréquence de pulsation ( $\nu$ ), la vitesse de balayage du faisceau à la surface ( $\mu$ ) et la vectorisation ( $\nu$ ) (c'est-à-dire le déplacement du faisceau laser entre deux segments balayés successifs), ont d'abord dû être ajustés pour permettre l'ablation nécessaire et suffisante de la couche d'or.

La figure 3 montre un résultat correspondant à des électrodes d'une largeur  $a=100\mu\text{m}$  (espacement  $i=100\mu\text{m}$ ). Un tel schéma d'électrode a permis de réaliser des capteurs IDT ayant une fréquence propre de l'ordre de 4MHz.

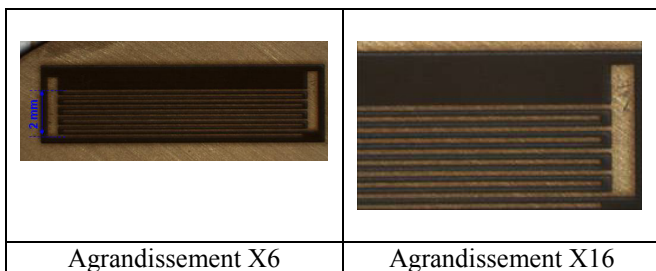


Figure 3 : Capteur IDT ( $a=100\mu\text{m}$ ) obtenue par ablation laser Vanadate (1064nm)

L'or entre les doigts interdigités a été complètement éliminé, aucune conduction entre les parties gauche et droite des électrodes n'a été mesurée. Ce schéma

d'électrode a été réalisé dans un laps de temps de l'ordre de la vingtaine de secondes.

### 3.1.3 Laser Excimère

Un troisième équipement laser a été testé pour la fabrication de capteur à IDT (BCRC). Il s'agit d'un système de photoablation équipé d'un laser de type excimère (fournisseur : Optec, équipement faisant également partie de la plateforme Hainolase), dont le faisceau laser de longueur d'ondes 248nm est généré par un pompage photonique à travers un mélange gazeux (Kr + F). La taille du faisceau en sortie est de  $3\times 3\text{cm}^2$ . La puissance maximale pour un pulse de 6ns est de 3MW. Le faisceau laser peut être focalisé ( $\sim 10\times$ ) par un jeu de lentilles optiques et l'utilisation de masques sur le trajet du faisceau permet d'atteindre des résolutions inférieures à  $30\mu\text{m}$ .

La technique permet de produire des électrodes interdigitées de largeur plus faible que dans le cas des ablations précédentes. Pour les premiers essais, des capteurs permettant théoriquement d'émettre à des fréquences aux alentours de 10MHz ont été réalisés (vitesse de balayage = 20mm/s et fréquence = 200Hz).

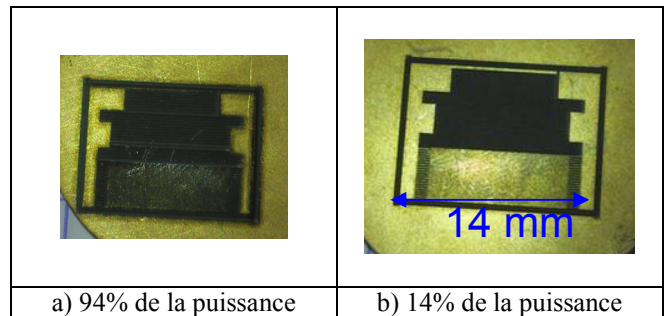


Figure 4 : Influence de la puissance nominale sur la qualité de l'ablation

Les deux photos de la figure 4 montrent l'influence des paramètres de lasage pour la réalisation des capteurs IDT. Puisque la longueur d'ondes du laser excimère (248nm) est bien absorbée par les métaux et les oxydes, il est nécessaire de doser parfaitement la quantité d'énergie envoyée sur les échantillons revêtus. Dans le 1<sup>er</sup> cas, la puissance était de 94% et le temps nécessaire à la réalisation du capteur (20 tirs laser) a été de l'ordre de 5 à 6 minutes. L'ablation réalisée a été trop profonde, les détails au niveau des « doigts » interdigités ont été perdus. Dans le 2<sup>ème</sup> cas présenté, la puissance a été réduite à 14% afin de limiter l'ablation ce qui a permis d'ablater correctement la couche d'or et d'obtenir des électrodes parfaitement séparées. Figure 5, il est possible d'observer sur les agrandissements la qualité des gravures avec un profil net des bords des électrodes. Le dessin informatique initial prévoyait des électrodes ayant une largeur "a" et un espacement "i" identiques de  $48\mu\text{m}$ . Les électrodes finales avaient une largeur de  $45.17 \pm 0.75\mu\text{m}$  et un espacement de  $50.80 \pm 0.83\mu\text{m}$ .

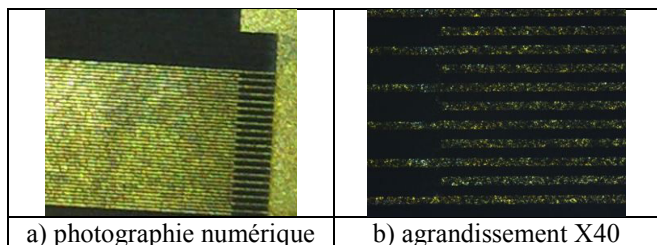


Figure 5 : Agrandissement du capteur IDT ( $a=50\mu\text{m}$ )

Un deuxième type de capteurs a été reproduit en utilisant le masque disponible de plus petit diamètre ( $250\mu\text{m}$  en sortie de faisceau ;  $25\mu\text{m}$  de taille de spot laser à la surface de l'échantillon). Pour réaliser ces capteurs, les paramètres suivants ont été employés :  $P=6\text{mJ}$  (30%),  $v=200\text{Hz}$ ,  $\mu=20\text{mm/s}$ .

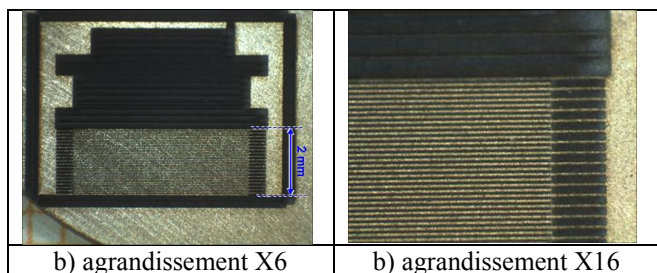


Figure 6 : Capteur IDT avec 25 paires de doigts ( $a=25\mu\text{m}$ )

Sur la figure 6, il est possible d'observer la qualité des graves des électrodes. Sur la figure 7 est reporté un des coefficients de réflexion électrique  $S_{11}$  des capteurs IDT ( $a=25\mu\text{m}$ ) obtenus par laser excimère. Sa fréquence de résonance est de  $20,7\text{MHz}$ . Ainsi, cette technique présente l'avantage d'afficher un profil d'ablation net au niveau des bords du motif. Par contre, tout comme l'ablation à partir du laser Vanadate, la technique soustrait de la matière et une perte du dépôt de couche conductrice autour du schéma du capteur est inévitable.

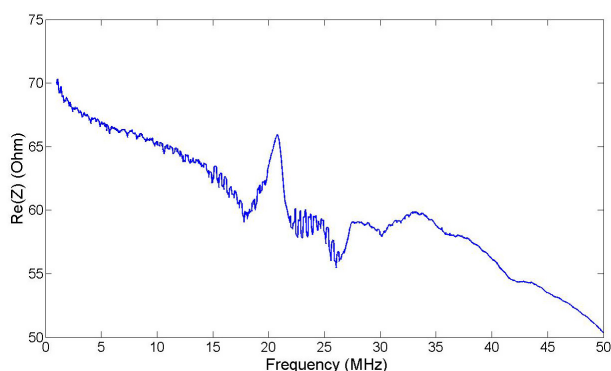


Figure 7 : Coefficient de réflexion électrique  $S_{11}$  du capteur IDT ( $a=25\mu\text{m}$ ) obtenu par laser excimère. Fréquence de résonance  $f=20,7\text{MHz}$ .

Une dizaine de minutes a été nécessaire pour fabriquer des capteurs avec l'utilisation de plusieurs masques (de tailles différentes en fonction de la surface des zones à ablater). La fabrication d'un masque à l'effigie du capteur à "imprimer" et placé en sortie de faisceau permettrait un gain de temps substantiel, étant donné que quelques "shots" laser seraient suffisants pour créer le capteur.

### 3.2 Impression jet d'encre (Aerosol Jet printing)

L'Aerosol Jet printing (AJP) est une technologie d'impression haute résolution par formation d'un aérosol composé d'encre chargée en nanoparticules. Cette technologie permet notamment de réaliser des capteurs IDT sans avoir à recourir à l'utilisation de masques. Les autres avantages liés à cette technique sont d'avoir la possibilité de réaliser des schémas en 3D, de faire des frittages in-situ et d'utiliser une très large gamme d'encre (Ag, Or, semis conductrice, diélectrique, etc.). D'autre part, il est possible d'augmenter l'épaisseur des électrodes en effectuant plusieurs passes au même endroit. Ceci peut être réalisé ponctuellement, par exemple à des zones où il faut réaliser la connexion. Cette possibilité est également réalisable en lithographie mais cela suppose de réaliser plusieurs masques et de faire plusieurs fois le processus du lift off, ce qui est long et demande beaucoup de soin dans la réalisation et en particulier dans l'alignement. Par contre, la sensibilité et la stabilité du système dépendent de l'environnement d'impression et la qualité du dépôt est affectée par l'état de surface et la porosité du substrat. Enfin, les électrodes sont réalisées au fur et à mesure et les risques d'éclaboussures ne sont pas négligeables ce qui est particulièrement le cas pour la réalisation des IDT (grand nombre d'électrodes) sachant que le moindre court-circuit annihile le capteur. Les capteurs IDT obtenus par AJP au SIRRIS ont été réalisés sur la base d'un équipement commercial OPTOMECC® AJP300CE. Ce système est capable d'imprimer des lignes aussi fines que  $10\mu\text{m}$  de large et  $150\text{nm}$  d'épaisseur en un seul passage (pour des conditions parfaitement contrôlées).

Le principe de fonctionnement de cette technique consiste à nébuliser de l'encre conductrice contenue dans un réservoir à l'aide d'un actuateur ultrasonique ou par un système pneumatique (Fig.8①). Puis, l'aérosol formé est transféré vers les buses d'impression (Fig.8②) où il est mis en forme et collimaté par un gaz de chemisage pour être finalement déposé sur le substrat sous-jacent (Fig.8③). Une 2<sup>ème</sup> passe peut ensuite être réalisée avec un laser IR de manière à fritter la piste qui vient d'être déposée. Cette étape n'est pas systématique et peut en effet être évitée lorsque l'on travaille avec des températures de substrats suffisamment hautes (frittage possible à basse température ( $130^\circ\text{C}$  grâce à la présence de nano particules)).

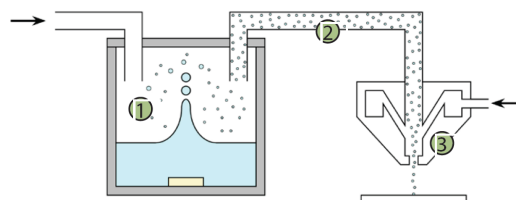


Figure 8 : Schéma de principe de fonctionnement de l'Aerosol Jet Printing

Afin d'obtenir un capteur IDT fonctionnel haute fréquence il fallait que cette technologie puisse fournir sur PZT des électrodes avec de fines résolutions ( $a<25\mu\text{m}$ ) tout en ne présentant pas de discontinuité pour assurer la conduction électrique. Enfin, il a fallu également s'assurer

que la polarisation du substrat n'était pas altérée par le processus de frittage.

La première étape de cette étude a consisté à réaliser une batterie de tests afin de pouvoir déterminer les paramètres à utiliser (type de buse, température, pressions) et cerner les limites éventuelles que l'utilisation de cette technologie pouvait connaître lors de la fabrication d'IDT sur PZT. En effet, l'ensemble des paramètres doit être adapté pour chaque substrat car ils seront conditionnés par leur état de surface, par la mouillabilité de l'encre sur celui-ci ...etc. Pour ces essais, nous avons choisi de déposer de l'encre chargée de nanoparticules d'argent, bien connue pour sa facilité d'utilisation tout en donnant des résultats honorables en termes de résolution et de conductivité. Il est rapidement apparu que les écueils en relation avec la réalisation de tels capteurs étaient principalement liés à la rugosité et à la porosité des supports piézoélectriques en PZT.

Nous avons ensuite réalisé une impression sur des plaques de PZT brutes ( $R_a$  de  $1,5\mu\text{m}$ ) en imposant 3 couches successives de  $2,5\mu\text{m}$ . L'analyse de l'épaisseur de dépôt a révélé que la première couche d'encre était, en grande partie, absorbée par le substrat, comme lors des premiers tests, mais qu'il n'en était pas de même pour les 2 couches suivantes et qu'ainsi la continuité était assurée. Il est toutefois à noter que l'augmentation du nombre de passes augmente également les risques de défauts liés à la triple impression. En effet, les électrodes sont imprimées au fur et à mesure et le moindre défaut (éclaboussure) peut court-circuiter le capteur sachant qu'il faut généralement entre 10 et 20 électrodes de plusieurs millimètres de long.

Un capteur IDT avec des électrodes de largeur  $a=40\mu\text{m}$  a pu alors être imprimé avec succès sur une plaque de PZT et validé au niveau de ses propriétés électriques (fig.9).

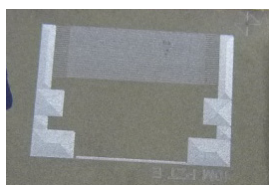


Figure 9 : Capteur IDT ( $a=40\mu\text{m}$ ) sur plaque PZT réalisé avec une triple impression de Nano Ag

D'autre part, les exigences de non détérioration de la polarisation du substrat par le post frittage laser ont été étudiées. Des électrodes ont été imprimées et frittées par le laser sur un substrat PZT polarisé (doux) de manière à analyser si la chaleur apportée par le laser risquait de dépolariser le substrat. Il est apparu d'après les analyses électriques que la polarisation n'avait pas été affectée par le passage du laser sur la piste. Afin d'analyser l'influence du frittage laser sur la qualité d'impression, 2 électrodes ont été réalisées avec les mêmes paramètres d'impression sur une plaque portée à une température de  $100^\circ\text{C}$ . Cependant seule une des deux électrodes a subi un post-frittage au laser (Fig. 10).

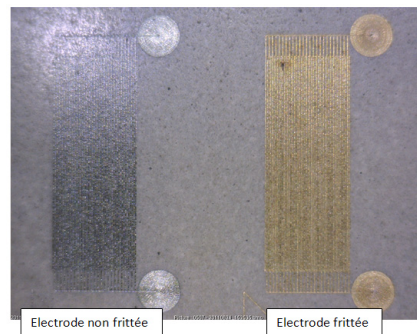


Figure 10 : Influence du frittage laser sur la qualité d'impression, observation binoculaire

On remarque que le frittage au laser après impression sur plaque à  $100^\circ\text{C}$  provoque un retrait au niveau de l'épaisseur et de la largeur des électrodes. En effet, l'épaisseur de dépôt diminue de 30% après le passage du laser sur plaque chaude. La maîtrise de ce retrait est importante pour augmenter la précision dimensionnelle lors de la réalisation du capteur. De plus, la qualité d'adhésion des électrodes sur le substrat dépend fortement des paramètres de frittage (problème de décalcomanie).

Les résultats obtenus, grâce à cette technique Aerosol Jet printing, ont donc permis premièrement de sélectionner la buse d'impression la plus adaptée pour ce type de capteur (TIP150) et de prouver que l'AJP est capable de réaliser des capteurs fonctionnels avec des électrodes de  $20\mu\text{m}$  de largeur sur des plaques de PZT brutes. A partir du coefficient de réflexion électrique  $S_{11}$  du capteur IDT ( $a=20,8\mu\text{m}$ ) correspondant au capteur IDT présenté figure 10, nous avons obtenu une fréquence de résonance de  $22,58\text{MHz}$ . D'autre part, les mesures acoustiques ont également données de bons résultats avec des déplacements engendrés par les ondes présentant des niveaux significatifs et de bons rapports signal sur bruit. La figure 11 donne un exemple de signal détecté avec l'interféromètre pour le capteur IDT fonctionnant à  $22,58\text{MHz}$ . Le capteur a été excité avec une impulsion électrique de 50 volts crête-crête et d'une durée égale à 10 sinusoïdes. Dans cet exemple, les niveaux de détections sont de  $700\text{mV}$  crête-crête ce qui correspond à des déplacements détectés sur la surface de  $7\text{nm}$  compte tenu de la conversion tension/déplacement de l'interféromètre ( $10\text{mV}/\text{\AA}$ ). En mesurant le déplacement engendré par l'onde de surface en plusieurs points, il a été possible de retrouver la vitesse de propagation des ondes de surface. La vitesse mesurée était de  $2013\text{m/s}$  ce qui est tout à fait en accord avec les prévisions théoriques. Ces mesures confirment la bonne conversion électromécanique de ces capteurs et démontrent qu'il est tout à fait possible de réaliser des capteurs IDT pour la génération d'ondes de surface HF en vue de réaliser des contrôles non destructifs à partir de ces capteurs.

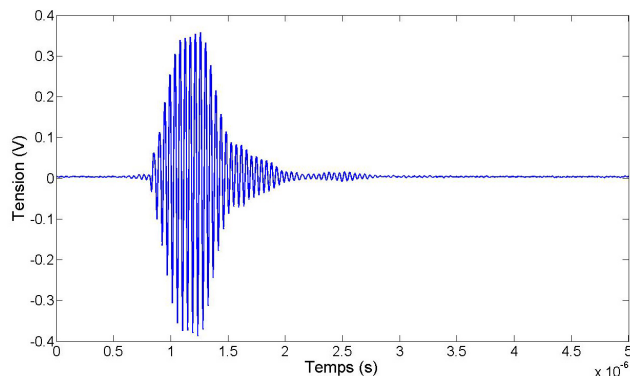


Figure 11 : Déplacement normal engendré par l'onde de surface générée par un capteur IDT fonctionnant à 22,58MHz

## 4 Conclusion

Dans cet article, des capteurs IDT ont été fabriqués à partir de PZT et nous avons réussi à obtenir une gamme de fréquences importantes allant de 2 à 22,5MHz. Nous avons cherché des solutions alternatives à la lithographie optique pour le dépôt d'électrodes car cette technique bien que très performante sur Niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ) [1], souffre également de quelques inconvénients. En particulier, elle n'est pas facilement utilisable sur des supports piézoélectriques PZT qui présentent une rugosité et une porosité importantes. Ensuite, son coût assez élevé (utilisation de salles blanches) est justifié lorsque l'application impose une résolution très élevée mais dans un certain nombre de cas, la technique est "disproportionnée" en termes de résolution pour des capteurs fonctionnant à des fréquences de quelques mégahertz à quelques dizaines de mégahertz. Nous avons donc testé des solutions alternatives basées sur l'ablation laser et sur l'impression à jet d'encre conductrice. Plusieurs campagnes d'essais ont été nécessaires pour optimiser les différents paramètres afin d'obtenir les résolutions nécessaires et les accroches des électrodes sur les supports PZT. Les différentes campagnes d'essais ont montré que les caractéristiques des matériaux (mouillabilité, rugosité, ...) sont des paramètres extrêmement sensibles et dont il faut tenir compte pour la qualité des dépôts. Enfin, les tests électriques et acoustiques ont montré qu'il était possible de réaliser des capteurs IDT fonctionnant à plus de 22MHz pour des résolutions d'électrodes aux alentours de 20 $\mu\text{m}$ .

## Remerciements

Les auteurs remercient pour leurs soutiens à nos recherches, la région Nord-Pas-de-Calais et l'Union Européenne (fonds FEDER) via le programme Interreg IV "PRISTIMAT".

## References

- [1] J. Deboucq, M. Duquennoy, M. Ouafitouh, F. Jenot, J. Carlier, M. Ourak, "Development of interdigital transducer sensors for non-destructive characterization of thin films using high frequency Rayleigh waves", *Rev. Sci. Instrum.*, 82, 6 (2011)
- [2] J. Deboucq, M. Duquennoy, M. Ouafitouh, F. Jenot, "Développement de capteurs ultrasonores interdigités HF pour le CND des couches et des revêtements", *Actes des Journées COFREND*, 24-27 mai Dunkerque, France, (2011)
- [3] R.H. Tancrèll, R.C. Williamson, "Wavefront distortion of acoustic surface waves from apodized interdigital transducers", *Appl. Phys. Lett.*, 19, 456-459 (1971)
- [4] M.G. Holland, L.T. Claiborne, "Practical surface acoustic wave devices", *Proc. IEEE*, 582-611 (1974)
- [5] D. P. Morgan, "Surface-wave devices for signal processing", *Studies in electrical and electronic engineering*, 19, Ed. Elsevier (1991)
- [6] D.C. Hurley, "Nonlinear propagation of narrow-band Rayleigh waves excited by a comb transducer", *J. Acoust. Soc. Am.*, 106, 1782-1788 (1999).
- [7] R.S.C. Monkhouse, P.D. Wilcox, P. Cawley, "Flexible interdigital PVDF transducers for the generation of Lamb waves in structures", *Ultrasonics*, 35, 489-498 (1997)
- [8] M. Castaings, R. S. C. Monkhouse, M. J. S. Lowe, P. Cawley, "The Performance of Flexible Interdigital PVDF Lamb Wave Transducers", *Acta Acustica united with Acustica*, 85, 842-849 (1999)
- [9] G. Feuillard, M. Lethiecq, Y. Amazit, D. Certon, C. Millar, et F. Patat, "Experimental determination of the surface acoustic wave properties of new fine grain piezoelectric ceramics", *J. Appl. Phys.*, 74, 6523-6529 (1993)
- [10] J. Jin, S.T. Quek, Q. Wang, "Design of interdigital transducers for crack detection in plates", *Ultrasonics*, 43, 481-493 (2005)
- [11] J.K. Na, J.L. Blackshire, "Interaction of Rayleigh surface waves with a tightly closed fatigue crack", *NDT&E International*, 43, 432-439 (2010)
- [12] G. De Cicco, B. Morten, "New approach to the excitation of plate waves for piezoelectric thick-film devices", *Ultrasonics*, 48, 697-706 (2008)
- [13] D.Royer, E. Dieulesaint, "Ondes élastiques dans les solides", Tome 2, Génération, interaction acousto-optique, applications, Ed. Masson, (1999)