

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Imagerie d'interfaces de matériaux atténuants, en couches, par microscopie acoustique haute fréquence

Carla Mello¹, Raul Da Fonseca², Gilles Despaux¹

¹ Institut d'Electronique du Sud UMR CNRS 5214 Université Montpellier 2, Place E. Bataillon, F-34095 Montpellier, gilles.despaux@univ-montp.fr

² Universidade. Estado Rio de Janeiro, Inst. Fis. Armando Dias Tavares, BR-20550013 Rio De Janeiro, RJ Brazil

L'imagerie micro acoustique haute fréquence traditionnelle (10MHz - 1GHz) atteint ses limites lorsqu'il est nécessaire de faire une observation à travers des couches atténuantes ou de fortes épaisseurs en gardant une fréquence élevée pour une bonne résolution. L'objectif de ce papier est de présenter une nouvelle méthode d'acquisition et de traitement du signal afin d'imager avec une grande résolution les défauts d'une interface enterrée et d'en reconstruire sa topographie ainsi que des délaminations éventuelles.

Cette méthode comporte les étapes spécifiques suivantes, ajoutées à celles du microscope acoustique traditionnel : - Assistance à l'optimisation de la focalisation par simulation théorique de la propagation des ondes (du capteur focalisé jusqu'au matériau multicouches). - Numérisation directe du signal ultrasonore jusqu'à des fréquences d'échantillonnage de 8 giga échantillons par seconde. - Détermination par calcul du signal et de son spectre fréquentiel en module et en phase. - Compensation de l'inhomogénéité d'épaisseur de la couche (boursoufflures dues à l'endommagement, défauts de fabrication de la couche...) par recalage temporel des échos. - Réalisation d'images de module et phase avec sélection temporelle du signal acoustique. - Réalisation d'images de reconstruction 3D à partir des informations numériques.

Les objets examinés dans le cadre de cette communication sont d'une part des couches de polymères de plusieurs dizaines de microns d'épaisseur sur substrat polymère et substrat dur et d'autre part des circuits électroniques de puissance avec semelle épaisse en cuivre comportant des empilements de substrats conducteurs ou non avec des circuits microélectroniques en silicium. Deux types de résultats (images de 50 microns par 50 microns et plus ainsi que des images de reconstruction 3D) seront présentés, issus des mesures effectuées à l'aide de capteurs ultrasonores focalisés ayant des fréquences de fonctionnement entre 30 MHz et 600 MHz.

1 Introduction

Dans le domaine de l'imagerie, la microscopie acoustique est très utilisée pour la réalisation d'imagerie acoustique de surface et la visualisation de défauts en profondeur de matériaux opaques. Cette méthode d'imagerie acoustique haute fréquence (10MHz - 1GHz) atteint ses limites lorsqu'il est fondamental de faire une observation à travers des couches atténuantes [1] ou de fortes épaisseurs, en conservant une fréquence élevée pour une bonne résolution, que ce soit avec une excitation impulsionnelle ou train d'onde.

L'observation de matériaux atténuants et/ou en couches pour en déterminer des propriétés d'adhésion [2], la visualisation de défauts ou la structure des interfaces présentent de grands intérêts tant industriels que scientifiques.

2 Objectif

L'idée développée dans cet article, consiste en la présentation d'une nouvelle méthode d'acquisition d'images acoustiques, pour des matériaux atténuants pouvant être en couches / multicouches ou pour l'observation d'interfaces sous une grande épaisseur de substrat généralement ayant une vitesse de propagation des ondes ultrasonores importante.

La microscopie acoustique utilise des capteurs focalisants qui assurent une bonne résolution latérale. A moyenne fréquence, l'atténuation est compensée par le gain des amplificateurs. L'atténuation augmente généralement avec le carré de la fréquence [3] qui noie le signal dans le bruit en très haute fréquence (particulièrement au dessus de 100MHz) lorsque l'on souhaite insonifier le matériau sur de grandes distances pour observer des défauts en profondeur.

Si d'un côté, nous voulons l'augmentation de la fréquence de fonctionnement du microscope acoustique, pour obtenir une meilleure résolution, de l'autre côté, nous accroissons l'atténuation. Ainsi, il faut trouver un équilibre entre la fréquence et l'atténuation.

L'autre paramètre que nous devons considérer est la profondeur de champ, qui est en accord avec l'équation (1) et décroît en fonction de la longueur d'onde [4].

$$P = \frac{2\lambda}{\sin^2 \theta_{\max}} \quad (1)$$

où : P est la profondeur de champ, λ est la longueur d'onde ($\lambda=v/f$), $\theta_{\max}$ est le demi- angle d'ouverture de la lentille.

L'objectif est donc d'acquérir le signal grâce au microscope analogique sans traitement spécifique, puis de lui appliquer un post traitement sur les données brutes numérisées et enregistrées dans un fichier. Ce traitement va nous permettre d'imager avec une grande résolution la surface et l'intérieur des échantillons analysés pour faire la visualisation des défauts des interfaces enterrées et en reconstruire leur topographie [5] ainsi que les possibles délaminations.

3 Description de la Méthode

Nous avons utilisé un microscope acoustique à balayage pour l'analyse des matériaux. Cet instrument est composé d'un transducteur piézoélectrique qui transforme un signal électrique haute fréquence en ondes mécaniques de même fréquence, (les fréquences de fonctionnement pour cette communication sont entre 30 MHz et 600 MHz). Une lentille acoustique permet la focalisation du faisceau acoustique.

L'image acoustique est réalisée à partir de l'émission et de la réception d'ondes ultrasonores (utilisation du microscope en mode réflexion). Chaque point de l'image, situé dans un plan xy, par exemple, est fonction de l'énergie acoustique réfléchi. Le balayage est assuré par le déplacement de platines de précision avec des repositionnements de l'ordre de 100 nanomètres. Le contraste est donc lié à des variations localisées de structures ou de propriétés mécaniques.

Les images acoustiques sont obtenues après le balayage dans le plan xy pour une distance constante en z. Par conséquent, selon cette distance z, les images peuvent être obtenues soit en surface, soit en profondeur. Dans ce travail nous avons utilisé le mode réflexion de façon systématique pour l'obtention des signaux acoustiques.

Cette nouvelle méthode d'acquisition comprend les étapes spécifiques suivantes, ajoutées à celles du microscope acoustique traditionnel déjà décrit précédemment.

Un logiciel a été développé pour aider à positionner le point focal du capteur sur l'interface à examiner. Le déplacement du capteur pour cette focalisation est obtenu par simulation théorique de la propagation des ondes, du capteur focalisé en surface de l'échantillon jusqu'à l'interface du matériau multicouches à examiner. Cela permet une focalisation optimale sans avoir besoin d'identifier l'écho d'interface qui est quelquefois noyé dans le bruit lors d'une visualisation de l'échogramme via un oscilloscope.

Une numérisation directe du signal ultrasonore est effectuée jusqu'à des fréquences d'échantillonnage de 8 giga échantillons par seconde suivie d'un calcul de l'énergie des échos par une reconstruction de ceux-ci dans le plan complexe (figure 1). Cette dernière étape nécessite au préalable la détermination module / phase de chaque échantillon acquis.

Suivant les cas, la détermination par calcul du spectre fréquentiel en module et en phase du signal peut être intégrée au protocole de calcul de l'énergie des échos réfléchis.

Pour une compensation de l'inhomogénéité d'épaisseur de la couche : (boursoufflures dues à l'endommagement, défauts de fabrication de la couche...), un traitement du signal par recalage temporel des échos à l'aide de méthodes d'intercorrélations est réalisé. Ce traitement permet un recalage de la topographie, particulièrement lorsque des couches d'épaisseurs non constantes ont été traversées.

Le choix des échos porteurs d'informations est accompli par une sélection temporelle des échos, avec utilisation ou non du recalage temporel décrit ci-dessus.

La présentation des résultats est assurée par un traitement du signal des échos acoustiques pour réaliser des films acoustiques, en fonction de la fréquence ou du temps. Cela permet en réalisant l'acquisition d'une seule image de reconstruire l'image de l'objet dans la limite de la profondeur de champ de la lentille acoustique. La réalisation d'images de reconstruction 3D à partir des informations numériques est aussi possible mais souvent plus délicate à mettre en œuvre dans le cas de structures multicouches planes.

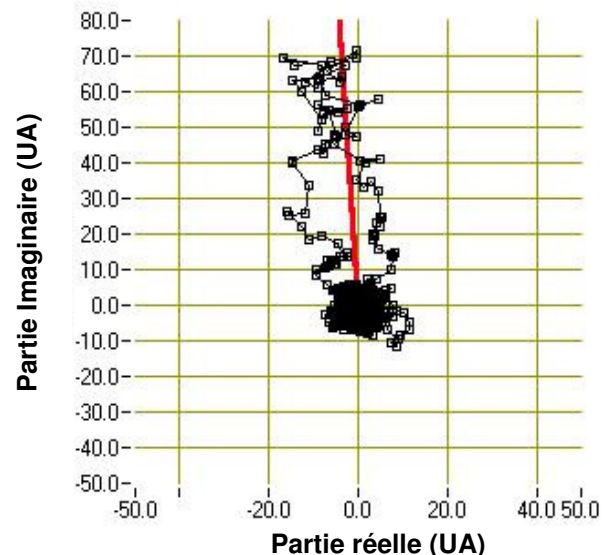


Figure 1 : Echo représenté dans le plan complexe

4 Exemples d'échantillons

Nous proposons à titre d'exemple, trois échantillons. Les deux premiers (Figure 2 et Figure 3) ont des caractéristiques semblables par l'atténuation, car ils sont constitués de couches de polymères [6] de plusieurs centaines de microns d'épaisseur : l'un sur polymère et l'autre sur substrat dur. Si l'on souhaite imager une interface enterrée avec une résolution latérale de l'ordre de la dizaine de microns, l'utilisation d'une fréquence supérieure à 100MHz est obligatoire. L'atténuation sera donc importante et les signaux réfléchis seront donc très faibles. Le premier échantillon est une carte d'accès standard, type carte de crédit avec un circuit intégré et un réseau de connexions conductrices inclus dans plusieurs couches de polymères. L'interface à observer est le collage des deux couches de polymères partiellement

fonctionnalisées par le circuit et les interconnexions. L'écho ultrasonore sera naturellement atténué par l'épaisse couche de polymère et sera faiblement réfléchi de part la faible désadaptation d'impédance acoustique entre les milieux, empêchant toute imagerie en microscopie acoustique traditionnelle du fait de très mauvais rapports signal sur bruit.

Le second échantillon est constitué d'une couche de peinture épaisse sur un substrat dur de type dural. La dimension de la plaque est de quelques centimètres de côté mais l'épaisseur importante de la couche de peinture, rend là encore l'imagerie de l'interface très difficile du fait de l'atténuation. Il est cependant intéressant de pouvoir imager de tels échantillons sur des dimensions latérales de plusieurs centimètres en pouvant faire des zooms allant jusqu'à la réalisation d'images de 50 microns de côté.

Le troisième échantillon est de type multi couches avec une couche épaisse mais moins atténuante que dans le cas des deux premiers échantillons. La difficulté réside là encore par l'extraction de faibles signaux qui ont traversés de nombreuses interfaces. La figure 4 présente un module électronique [7] de puissance avec semelle épaisse en cuivre et de nombreux empilements de substrats conducteurs ou non avec des circuits microélectroniques en silicium (dimension du module : 120 millimètres par 40 millimètres et 10 millimètres de hauteur). C'est l'élément essentiel des chaînes de conversion d'énergie ; l'électronique de puissance en constitue également le maillon faible, en particulier du fait des composants à semi-conducteurs.

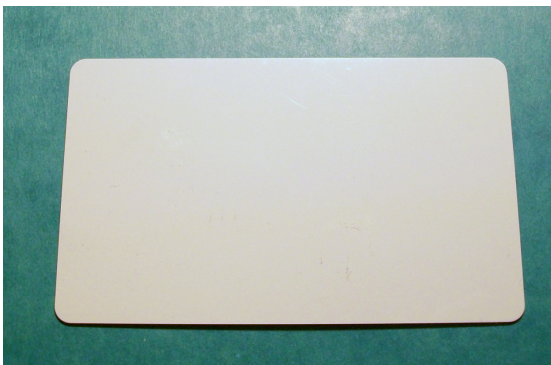


Figure 2: Premier échantillon : carte multi couches



Figure 3: Deuxième échantillon : revêtement de peinture sur dural

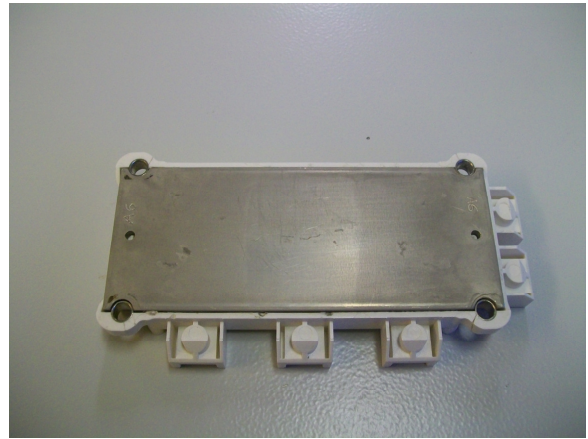


Figure 4: Troisième échantillon : module électronique de puissance

5. Résultats et conclusions

Nous allons présenter deux types de résultats : les premiers pour les échantillons des figures 2 et 3 pour lesquels la difficulté majeure est d'obtenir à des fréquences de 150MHz et plus une image acoustique interprétable. Les seconds concerneront le module électronique de la figure 4 où l'objectif est de pouvoir séparer les différentes interfaces pour faire une reconstruction 3D tout en d'obtenant une image de qualité correcte des interfaces éloignées de la surface.

5.1-Etude du premier échantillon :

Epaisseur 800 microns, fréquence acoustique 150MHz, demi angle d'ouverture du capteur supérieur à 30 degrés.

La première image (Figure 5) (2,5mm par 2,5mm), a été réalisée avec le microscope en mode analogique en ayant pris soin d'optimiser les réglages (gain des amplificateurs, filtre passe bande et fenêtre temporelle captant la zone utile du signal acoustique). Cette image obtenue est difficile à interpréter, puisque les informations sont noyées par le bruit et aucun traitement de signal n'est capable d'extraire l'information. On peut cependant uniquement deviner la présence d'un matériau de nature différente. Si on applique la méthode décrite précédemment avec un réglage optimisé et une sélection adaptée d'échos porteurs d'informations, l'image que nous avons obtenue est de bonne qualité et riche en détails, (Figure 6). Nous pouvons facilement voir une image d'une piste enterrée avec des défauts (fissures et micro- fissures).

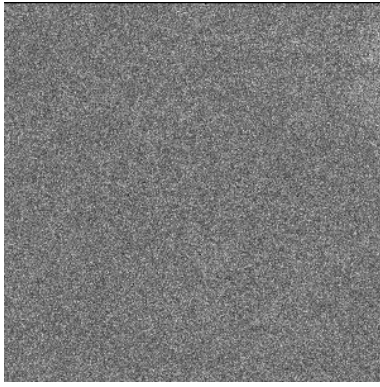


Figure 5 : Echantillon 1, réglage optimisé du microscope sans traitement spécifique (2,5mm par 2,5mm)

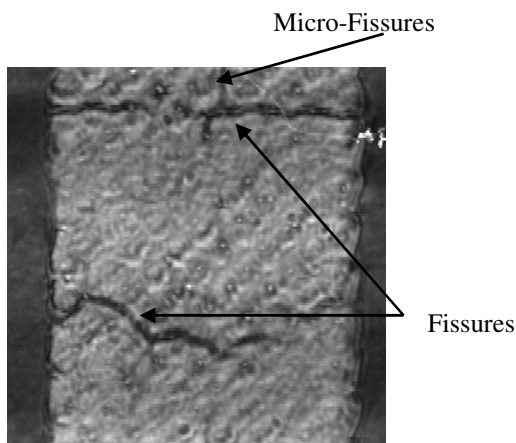


Figure 6 : Echantillon 1, réglage optimisé, traitement et sélection vectoriel des échos (2,5mm par 2,5mm)

5.2- Etude du deuxième échantillon :

Fréquence acoustique 150MHz, demi angle d'ouverture du capteur supérieur à 30 degrés.

L'application de la méthode d'aide à la focalisation décrite ci-dessus, associée à un traitement vectoriel sélectif des échos, conduit à l'image de la Figure 7. Il s'agit de l'interface entre la couche de la peinture et le substrat. L'analyse d'images acoustiques est alors possible et permet une vérification facile de l'adhésion de la peinture sur le substrat. La principale source du contraste correspond à la rugosité du substrat, mais il est possible de distinguer quelques rayures sur le substrat ainsi qu'une bulle d'air.

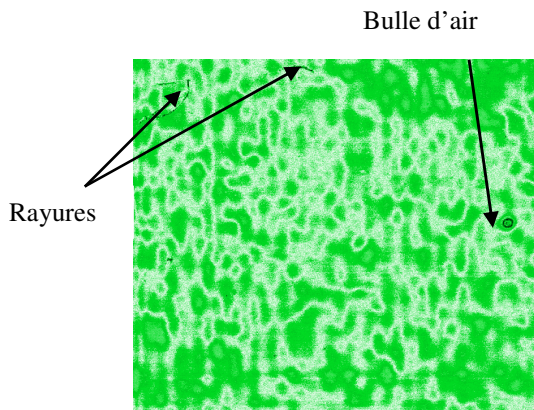


Figure 7 : Echantillon 2 : interface peinture – substrat (5mm par 5 mm)

5.3- Etude du troisième échantillon :

Epaisseur: première couche 4mm, puis 6 couches de quelques centaines de microns.

Cet échantillon est plus complexe, parce qu'il est constitué de plusieurs couches qui nécessitent une aide à la focalisation, afin d'obtenir le maximum de résolution à l'interface à observer. D'autre part, pour compenser la non planéité de la semelle, un recalage temporel a été effectué, en prenant comme référence l'écho de la surface. La première image obtenue (4cm par 4cm) figure 8, correspond à l'intégralité des données recueillies dans la fenêtre temporelle qui inclue l'ensemble des échos d'interfaces jusqu'à la dernière interface. Cette image, dévoile que cette plaque a des délaminations dans les coins indiqués par la couleur blanche. Quelques défauts sont aussi visibles au centre de l'image. Les figures 9, 10, 11 et 12 ont été réalisées, à partir des données brutes, avec le même traitement de signal que l'image de la figure 8, mais avec en plus, une découpe temporelle de l'échogramme. Ces images sont normalement présentées sous forme de film qui visualise l'intérieur du matériau en fonction de son avancée. La figure 9 correspond à la surface de l'échantillon qui met en évidence une non homogénéité de la surface. Cette image est légèrement floue car elle n'est pas dans la profondeur de champ. La figure 10 correspond à l'interface suivante de l'échantillon qui est la brasure entre la semelle et le reste du circuit. Elle est localisée à 4 mm de profondeur. Quelques défauts de la brasure sont visibles au centre l'image ainsi que des délaminations dans les angles. La figure 11 met en évidence un réseau de pistes après l'interface suivante et la figure 12 présente les brasures des circuits silicium. Il est donc possible de caractériser ces dernières brasures en réalisant les traitements de signaux précédemment décrits. L'information était présente au niveau des échogrammes mais leur extraction était jusque là impossible et non visible en imagerie classique (figure 8).

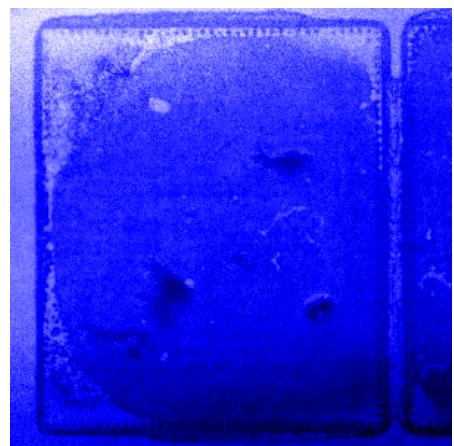


Figure 8 : Echantillon 3 : sans traitement (4 cm par 4 cm)

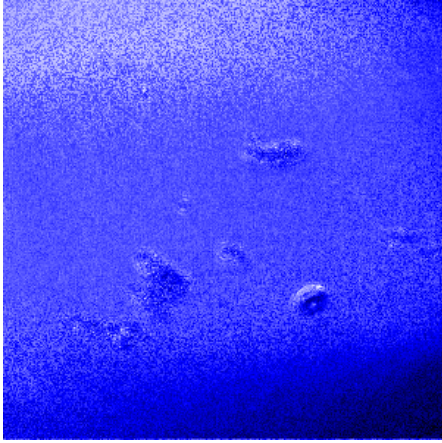


Figure 9 : Echantillon 3 : surface (4 cm par 4 cm)

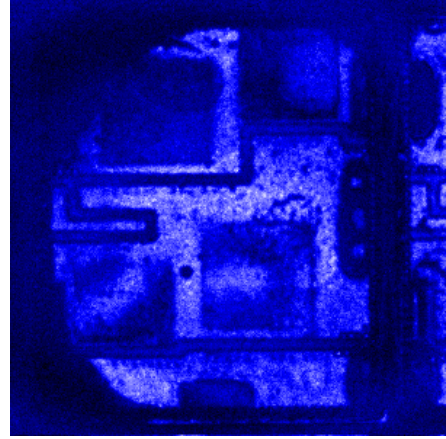


Figure 12 : Echantillon 3 : interface circuit électronique (4 cm par 4 cm)

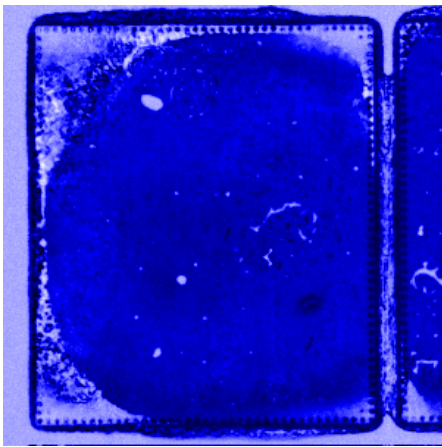


Figure 10 : Echantillon 3 : première brasure (4 cm par 4 cm)

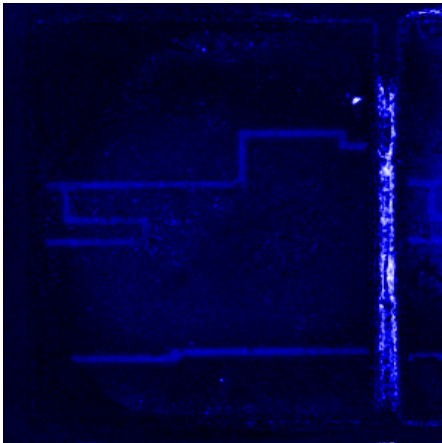


Figure 11 : Echantillon 3 : interface pistes (4 cm par 4 cm)

Remerciements

Au Groupe Énergie et Matériaux (GEM) de l'Institut d'Electronique du Sud IES Montpellier pour la mise à disposition des échantillons « module de puissance » et spécialement à F. Forest, J.J. Huselstein et V. Smet.

Références

- [1] D.E.Goertz , M.E. Frijlink, Voormolen MM, et al. "High frequency attenuation measurements of lipid encapsulated contrast agents " Ultrasonics 44 (2006), 131–134.
- [2] B.Cros, M.F.Vallat, G.Despaux, "Characterization by acoustic microscopy of adhesion in poly(ethylene terephthalate) films coated by aluminium" APPLIED SURFACE SCIENCE, 126 (1998) , 159-168 .
- [3] Briggs, A., Acoustic Microscopy, (1992), 82.
- [4] SAID, A. "Conception et réalisation d'un nouveau type de lentille pour améliorer la résolution en profondeur d'un microscope acoustique " Thèse de l'Université Montpellier 2 (1985).
- [5] Grill W., Hillmann K., Kim T.J., Lenkeit O., et al "Scanning acoustic microscopy with vector contrast" Physica B 263–264 (1999) 553–558.
- [6] W. Ngwa, R. Wannemacher, W. Grill, "Phase-sensitive acoustic microscopy of polymer thin films" Ultrasonics International 2003 Meeting, 42 (2004), 983-987.
- [7] F. Forest, J.J. Huselstein, Faucher S, et al. "Using the multilevel imbricated cells topologies in the design of low-power power-factor-corrector converters" IEEE- Transactions on Industrial Electronics , 53 (2005), 530-541.