



**HAL**  
open science

## **Imagerie passive de couches sur substrats par corrélation de champ acoustique haute fréquence**

Nada Ben Jafela, Lynda Chehami, Marc Duquennoy, Emmanuel Moulin, Nikolay Smagin, Dame Fall, Zakariae Oumekloul

### ► **To cite this version:**

Nada Ben Jafela, Lynda Chehami, Marc Duquennoy, Emmanuel Moulin, Nikolay Smagin, et al.. Imagerie passive de couches sur substrats par corrélation de champ acoustique haute fréquence. CFA 2025 - 17e Congrès Français d'Acoustique, Société Française d'Acoustique (SFA), Apr 2025, Paris, France. <hal-05365912>

**HAL Id: hal-05365912**

**<https://inria.hal.science/hal-05365912v1>**

Submitted on 14 Nov 2025

**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.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License



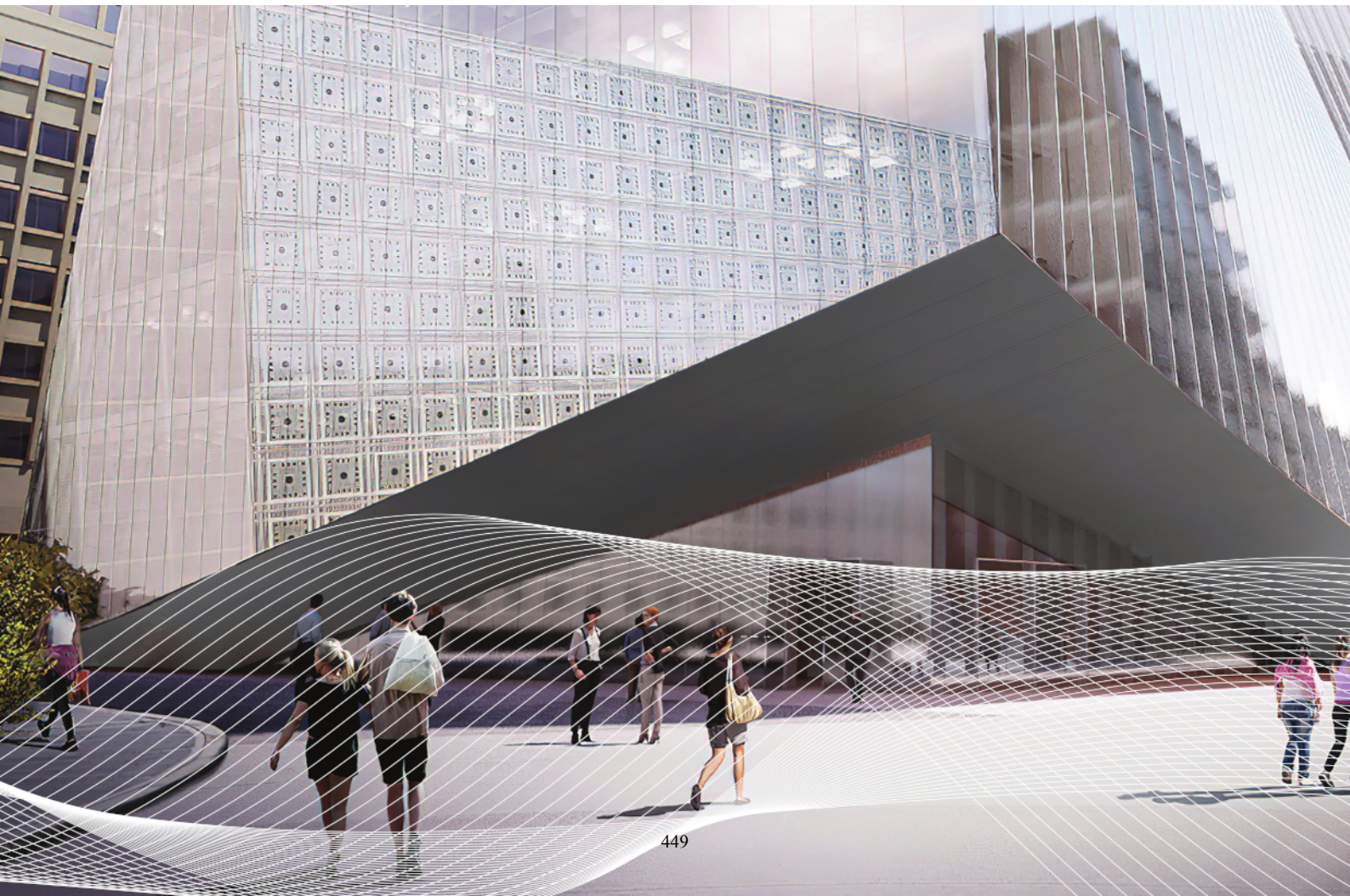
17<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique  
27-30 avril 2025, Paris

## Imagerie passive de couches sur substrats par corrélation de champ acoustique haute fréquence

N. Ben Jafela <sup>a</sup>, L. Chehami <sup>a</sup>, M. Duquennoy <sup>a,b</sup>, E. Moulin <sup>a,b</sup>, N. Smagin <sup>a</sup>, D. Fall <sup>a</sup> et Z. Oumekloul <sup>a</sup>

<sup>a</sup> IEMN (UMR CNRS 8520), Université Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, Université Lille, F-59313 Valenciennes, France

<sup>b</sup> INSA Hauts-de-France



Les structures couche sur substrat sont généralement sujettes à divers types de défauts, en particulier ceux liés au processus de fabrication lors de la croissance de films minces. Actuellement, une possibilité pour inspecter ces structures consiste à utiliser des transducteurs IDTs en émission et de la vibrométrie laser en réception. Les travaux présentés ici proposent une méthode complémentaire et s'inspirent des méthodes d'imagerie passive par corrélation de bruit appliquées, initialement, en géophysique. Cette approche est utilisée ici pour imager des structures couche-sur-substrat. En effet, la mise en œuvre de la corrélation des ondes acoustiques diffuses et du principe associé de la reconstruction de la fonction de Green passive devrait permettre de détecter et d'imager des défauts. L'analyse a été menée ici sur des simulations numériques et ça été tenté expérimentalement sur des wafers de silicium nus de 3 mm d'épaisseur. Les ondes de surfaces ont été générées par des IDTs large bande (10, 25) MHz, et le champ de déplacement généré est capturé par un vibromètre laser. Les simulations ont été réalisées sur des cas avec et sans défaut. Les matrices de corrélations avec et sans défaut sont calculées en mode FMC (Full Matrix Capture). Enfin, l'algorithme de beamforming est utilisé pour localiser les défauts, avec, à priori, la connaissance des positions des points de mesures et les courbes de lenteur des ondes de surface, estimées numériquement.

## 1 Introduction

Les structures couche sur substrat sont le siège de nombreuses dégradations liées à : des défauts de fabrication lors de la croissance de couches minces (gradient d'épaisseur), la qualité d'adhésion de la couche au substrat (rugosité de surface), allant même à des cas extrêmes comme la déformation du wafer, apparition de fissures et de délaminages. Pour ces raisons, les industries de la microélectronique s'intéressent de plus en plus à des méthodes d'évaluation non destructive notamment dans le cadre de la caractérisation de la qualité de collage dans des assemblages de wafers.

Le travail présenté ici propose une méthode alternative basée sur la corrélation des ondes acoustiques de surface diffuses générées par des transducteurs interdigités (IDT) opérant dans la bande fréquentielle comprise entre 10 et 25 MHz. Ceci est dans l'objectif d'imager des défauts de surface. Grâce à l'approche globale de l'analyse, la surface entière de la structure pourrait être testée, ce qui permettrait un gain de temps considérable.

Généralement, la caractérisation de couche sur substrat à l'aide d'IDT s'effectue en émettant une impulsion courte (large bande) sur l'échantillon à inspecter, dont les amplitudes de déplacement vibratoire sont ensuite mesurées par un vibromètre laser. À hautes fréquences, cette procédure doit être réalisée avec une grande précision, et son automatisation représente donc un défi. Cette méthode dite active a donné de résultats très prometteurs pour la caractérisation de couches minces comme les sol-gel [1, 2]. Parallèlement, l'approche par corrélation de champ acoustique, initialement utilisée dans les applications géophysiques [3, 4, 5, 6] ou en acoustique sous-marine [7, 8, 9], constitue une base théorique pertinente pour la reconstruction passive des FG du milieu.

De manière générale, l'estimation des FG par corrélation de bruit repose sur le principe selon lequel les ondes émises par des sources de bruit aléatoire, lorsqu'elles sont enregistrées sur deux points du milieu, peuvent être utilisées pour remonter à la réponse impulsionnelle du milieu entre ces capteurs. En d'autres termes, la corrélation croisée  $C_{AB}(t)$  des signaux enregistrés en ces deux points  $A$  et  $B$  permet de reconstruire la réponse impulsionnelle du milieu

dite fonction de Green (FG) :

$$\frac{\partial}{\partial t} C_{AB}(t) = K [G_{AB}(t) - G_{AB}(-t)] + n_{AB}(t) \quad (1)$$

où  $C_{AB}$  est la corrélation croisée entre les points  $A$  et  $B$  du milieu,  $G_{AB}$  est la FG entre les mêmes points,  $K$  est une constante dépendant des propriétés du milieu et de la source de bruit, et  $n_{AB}$  est l'erreur résiduelle de reconstruction de la GF.

Cette méthode est particulièrement intéressante dans des situations où il est difficile de générer des signaux contrôlés, comme en sismologie, aéronautique, etc. Toutefois, la qualité de reconstruction est particulièrement influencée par la façon comment les sources sont réparties (localisées ou pas), le nombre de sources, la nature du milieu (absorption, atténuation, diffusion, réverbération) [10]. En CND/SHM cette méthode a été validée avec succès à basse fréquence (10, 30) kHz (onde de Lamb) sur des plaques en aluminium présentant des défauts localisés (rupture d'impédance acoustique) [11, 12].

Dans ce travail, on propose de translater cette méthode à hautes fréquences (5-25) MHz en exploitant les ondes de surface pour sonder des micro-structures (wafer de silicium). Bien que c'est complexe (du fait de l'anisotropie), on propose d'abord une étude numérique simple pour valider l'approche sur un milieu anisotrope, ensuite cela a été tenté expérimentalement en développant une instrumentation adaptée en utilisant des IDTs. Bien que prometteurs, les IDTs présentent des capacités de réception plutôt faibles; nous proposons donc de les utiliser ici comme source d'ondes acoustiques de surface diffuses. Les IDT sont fabriqués de manière à focaliser l'énergie des ondes acoustiques de surface sur l'ensemble du wafer [13]. Pour tirer pleinement parti de cette méthode, une détection optique est utilisée et les fonctions de corrélation sont calculées. La Figure 1 illustre ce principe.

Le papier est divisé en 3 parties : La section (1) est dédiée à l'estimation analytique des profils de vitesse dans le silicium (100) ainsi que l'algorithme d'imagerie utilisé, la section (2) est consacrée à la validation numérique; la section (3) est dédiée au développement de l'instrumentation & aux essais préliminaires sur la reconstruction de la FG.

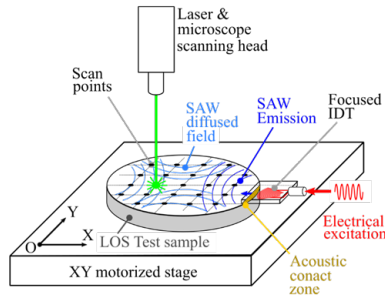


FIGURE 1 – Représentation schématique de la méthode de caractérisation par corrélation d'ondes acoustiques diffuses.

Enfin, une conclusion et perspectives.

## 2 Propagation d'ondes de surface dans le Silicium (100) : profil de vitesse et imagerie

### 2.1 Estimation des profils de vitesse

Les ondes de surface se propagent parallèlement à la surface d'un matériau élastique et leur amplitude décroît rapidement, souvent de manière exponentielle, à travers la profondeur du matériau. La profondeur de pénétration est de l'ordre de la longueur d'onde, ce qui offre une grande sensibilité aux défauts de surface, aux vides, aux fissures, aux revêtements, aux films et aux nano/microparticules adhérant à la surface. Ces ondes suscitent aujourd'hui un intérêt croissant, notamment pour les effets de miniaturisation. Toutefois, la propagation acoustique de ces ondes dans des milieux anisotropes est complexe où les vitesses dépendent de la direction de propagation. Plusieurs travaux théoriques [14, 15] sont consacrés à la détermination d'une formulation analytique des profils de vitesses dans des matériaux anisotropes. Dans ce papier, les vitesses sont calculées numériquement à l'aide de l'équation analytique proposée par Teransako et al. [16].

La loi de Hooke peut être étendue aux matériaux anisotropes grâce à une formulation tensorielle incluant l'orientation :

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl}; \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (2)$$

où  $\sigma$  et  $\epsilon$  sont les tenseurs de contrainte et de déformation.

Le cas général d'un tenseur de quatrième rang nécessite 81 termes. En exploitant les propriétés de symétrie cubique (le silicium (100) admet une structure cristallographique cubique en diamant à faces centrées), les propriétés anisotropes d'un cristal cubique peuvent être décrites avec une matrice  $6 \times 6$  en utilisant une notation tensorielle simplifiée et seules 3 valeurs indépendantes sont requises dans cette matrice :  $c_{11} = 165.7$  GPa,  $c_{12} = 63.9$  GPa,  $c_{44} = 79.56$  GPa. Les propriétés physiques du silicium (100)

sont :  $\nu = \frac{c_{12}}{c_{11} + c_{12}} = 0.278$ ;  $E = c_{11} - 2\nu c_{12} = 130$  GPa,  $\rho = 2330$  kg/m<sup>3</sup>, coefficient Zener =  $\frac{2c_{44}}{c_{11} - c_{12}} = 1.56$ .

La Figure 2 montre le système de coordonnées cartésiennes global ( $x_1, x_2, x_3$ ) du wafer de silicium, où les ondes de surface se propagent selon la direction  $x_1$ .

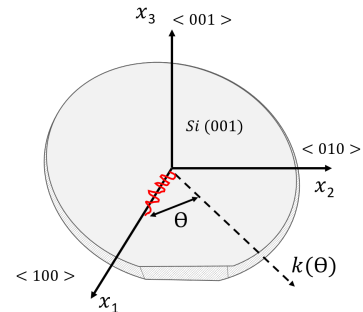


FIGURE 2 – Représentation schématique de la structure considérée.

Dans notre cas, le matériau testé est considéré comme un volume semi-infini. En combinant les équations de mouvement avec la loi générale de Hooke, les équations élastodynamiques des matériaux anisotropes homogènes donnent :

$$\rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_l}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (3)$$

où  $c_{ijkl}$  est le tenseur élastique d'ordre 4.

Considérons ici une solution d'ondes planes telle que :

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = \vec{a} \exp[j\vec{k}\vec{r} + jk(a x_3 - vt)], \quad (4)$$

où  $\vec{a}$  est le vecteur propre des amplitudes de déplacement,  $k \rightarrow$  est le nombre d'onde et  $v = \omega/k$  est la vitesse de phase.

Cela conduit au système d'équations de Christoffel :  $(\Gamma - \rho v^2 I) \cdot \vec{a} = 0$ , avec 3 inconnues  $\vec{a}$ ,  $a$  et  $v$  [14, 15]. La résolution de ce dernier permet d'obtenir un polynôme d'ordre 6 sur l'inconnue "a" :

$$A_3 a^6 + A_2 a^4 + A_1 a^2 + A_0 = 0, \quad (5)$$

où  $A_i$ ,  $i(1, 2, 3)$  dépendent explicitement de  $v$ .

En considérant l'équation cubique contractée, on obtient  $a^2 = z - \frac{A_2}{3A_3}$  :

$$z^3 + pz + q = 0, \quad (6)$$

où  $p, q$  sont des nombres réels et dépendent de  $A_i$  (voir [16]). Les racines carrées sont ensuite obtenues par la méthode de Cardan [17] :  $a_n = \pm \sqrt{z_j - \frac{A_2}{3A_3}}$ . ( $j = 1, 2, 3; n = 1, 2, \dots, 6$ ).

On ne retient ici que 3 solutions satisfaisant les conditions d'une onde de surface (décroissance dans la substrat)  $\Im(a_n) < 0$ .

La solution générale est une combinaison linéaire sur toutes les ondes partielles (pour  $a_n$  et  $\vec{a}_n$  donnés) :

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = \exp[j(\vec{k}\vec{r} - \omega t)] \sum_{n=1}^3 C_n \vec{a}_n \exp(jk a_n x_3) \quad (7)$$

Ensuite, les vecteurs propres  $\vec{a}_n$  sont calculés à partir des  $a_n$ .

Considérant les conditions aux limites (surface libre) :

$$T_{3j} = c_{3jkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} = 0, x_3 = 0 ; j = 1, 2, 3 \quad (8)$$

Le remplacement de l'Eq. (4) dans l'Eq. (8) conduit à trois équations homogènes qui devraient satisfaire le déterminant égal à zéro. Pour chaque  $\theta$ , nous calculons alors le déterminant sur toute la plage de vitesses en utilisant la méthode numérique du nombre d'or [18]. La valeur de la vitesse retenue est celle qui minimise le déterminant.

La Figure 3 montre le profil de vitesses estimées comparé aux résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de la thèse de T. Kadi [19] (points rouges sur la figure). Le fond de l'image représente le déterminant calculé pour chaque paire d'angle d'incidence et de vitesse de l'onde ( $\theta_i, c_i$ ) en échelle logarithmique.

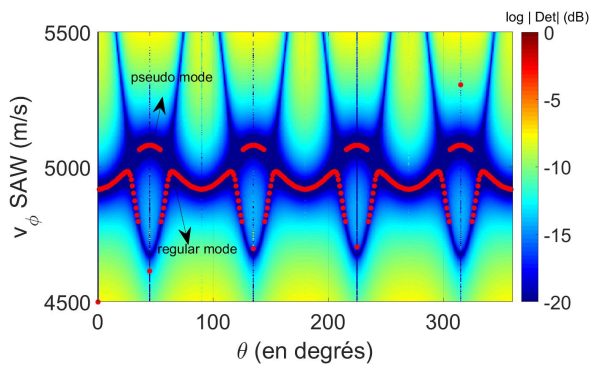


FIGURE 3 – Profil de vitesses théoriques (fond de l'image) et expérimentales (points rouges).

On observe une bonne concordance entre la théorie et l'expérimental avec deux modes pour les ondes de surface (mode régulier et le pseudo-mode) sur une plage de vitesses allant de 4500 à 5500 m/s.

Dans la section suivante, pour réaliser l'imagerie de défaut, une interpolation a été effectuée sur les deux modes observés.

## 2.2 Imagerie en milieu anisotrope

Considérons deux récepteurs  $R_i$  et  $R_j$ , l'intercorrélation sur  $N_s$  sources de bruit, des signaux enregistrés, peut être exprimée comme suit :

$$C_{ijN_s}(\omega) = N_s D_{ij}(\omega) + n_{ijN_s}(\omega), \quad (9)$$

où  $D_{ij}$  représente un terme déterministe contenant les parties causale et anti-causale de la fonction de Green entre

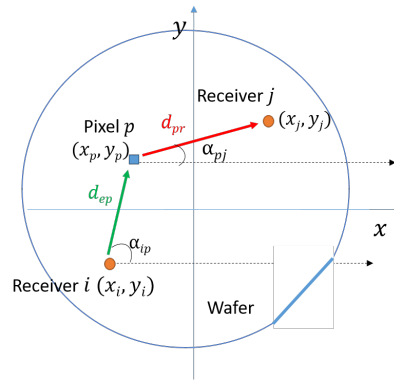


FIGURE 4 – Illustration de l'algorithme de beamforming en milieu anisotrope (rétropropagation).

les deux positions du récepteur, et  $n_{ijN_s}$  est un terme lié au bruit résiduel de reconstruction de la FG.

Comme dans [20], nous adoptons ici l'algorithme du beamforming en mode différentiel afin d'extraire la signature des défauts, c'est-à-dire  $\Delta C = C^{def} - C^{ref}$  où "def" et "ref" réfèrent aux cas avec et sans défaut respectivement.

Le principe consiste à prendre l'élément d'indices  $(i, j)$  de la matrice

$$\Delta \varphi$$

et à le rétropropager en fonction de la position courante du pixel  $(x_p, y_p)$  et pour chaque direction de propagation (cf. Figure 4). Concrètement, cela consiste à multiplier la matrice différentielle par une fonction de phase faisant intervenir le nombre d'onde  $k$  dépendant de la direction des ondes de surface, i.e ;

$$bpf_i(x_p, y_p)(\omega) = \sum_{i=1, j=1}^{N_s, N_s} \Delta C_{ij}(\omega) e^{[+jk(\omega, \alpha_{ip}) d_{ip} + k(\omega, \alpha_{pj}) d_{pj}]} \quad (10)$$

avec  $\alpha_{ip} = \text{atan} \left| \frac{y_p - y_i}{x_p - x_i} \right|$  et  $\alpha_{pj} = \text{atan} \left| \frac{y_j - y_p}{x_j - x_p} \right|$ . Les termes  $d_{ip}$  et  $d_{pj}$  sont respectivement les distances du récepteur  $i$  au pixel et du pixel au récepteur  $j$ .

Après un retour au domaine temporel par transformée de Fourier inverse, l'intensité du pixel est obtenue en sommant les formes d'onde résultantes pour chaque valeur des indices  $(i, j)$  et en calculant l'énergie de cette somme sur une fenêtre temporelle  $T_0$  (typiquement l'inverse de la bande passante) :

$$I(x, y) = \int_0^{T_0} [sbp_{(x,y)}(t)]^2 dt, \quad (11)$$

où  $bpf(t)$  est la TF de  $bpf(\omega)$ .

Pour les pixels situés sur le défaut, ceci revient à une somme constructive et donc à un maximum d'intensité sur la position de défaut.

Dans la section 3, une validation numérique a été proposée.

### 3 Validation numérique

Afin de valider l'algorithme d'imagerie conçu pour les milieux anisotropes, une simulation numérique simplifiée est proposée.

Nous considérons la propagation d'ondes de surface dans une plaque infinie sans absorption. Dans le domaine fréquentiel, cette propagation entre une source et un récepteur  $R_i$  aux positions  $\vec{r}_s$  et  $\vec{r}_i$ , respectivement, peut être modélisée en champ lointain grâce à la fonction de propagation définie comme suit :

$$P(\vec{r}_s, \vec{r}_i, \omega) = \frac{1}{\sqrt{(\vec{r}_s - \vec{r}_i)}} e^{[-jk(\omega, \alpha_{ip})d_{ip} + k(\omega, \alpha_{pj})d_{pj}]} \quad (12)$$

Par conséquent, le signal reçu en  $R_i$  peut être exprimé comme suit :

$$u(\vec{r}_s, \vec{r}_i, \omega) = P(\vec{r}_s, \vec{r}_i, \omega) u_e(\omega), \quad (13)$$

avec  $u_e(\omega)$  est la transformée de Fourier du signal d'émission.

En présence d'un défaut, le signal reçu en  $R_i$  peut être écrit comme suit :

$$u_d(\vec{r}_s, \vec{r}_i, \omega) = u(\vec{r}_s, \vec{r}_i, \omega) + \Delta u(\vec{r}_s, \vec{r}_i, \omega), \quad (14)$$

avec  $\Delta u(\vec{r}_s, \vec{r}_i, \omega) = f_d(\vec{r}_s, \vec{r}_i, \omega) P(\vec{r}_s, \vec{r}_i, \omega) u(\vec{r}_s, \vec{r}_i, \omega)$ . Ici  $f_d$  représente l'amplitude de diffusion du défaut et  $\vec{r}_d$  est la position du défaut.

En utilisant la transformée de Fourier inverse, nous revenons dans le domaine temporel pour obtenir les signaux  $u_d(t)$  et  $u(t)$  reçus par  $R_i$  dans les deux cas : avec et sans défaut, respectivement.

La configuration testée consiste en un wafer de silicium infini dont les propriétés sont implicitement introduites dans les courbes de dispersion estimée précédemment. Des récepteurs, au nombre de 12 (croix), sont placés à des positions connues sur sa surface. L'origine est prise à l'angle bas à gauche du wafer. A la position (0.11, 4.5) cm, un défaut est modélisé par un diffuseur ponctuel de constante  $f_d$  (diffuseur isotrope). Un ensemble de 361 sources (points rouges) sont réparties aléatoirement autour des récepteurs.

Le signal d'émission est un cycle de sinusoïde pondéré par une fenêtre de Hanning à une fréquence centrale de 7 MHz. La fréquence d'échantillonnage est de 300 M.échantillons/s. Les signaux sont acquis pour 28  $\mu$ s. Pour chaque paire de récepteurs, la corrélation croisée additionnée sur toutes les sources est calculée. L'algorithme d'imagerie basé sur la rétro-propagation évoqué plus haut est ensuite appliqué sur les parties temps positifs des corrélations croisées différentielles préalablement calculées. L'image de localisation obtenue pour une zone de (45  $\times$  45) cm<sup>2</sup> autour du défaut est présentée sur la Figure 5.

Les intensités des pixels sont normalisées par rapport à l'intensité maximale. Comme observé, l'emplacement du défaut est correctement localisé.

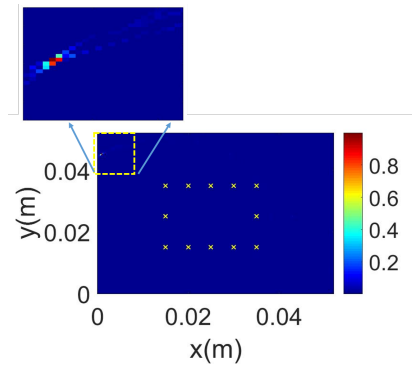


FIGURE 5 – Image de localisation de défaut.

Dans ce qui suit, nous proposons une instrumentation adaptée pour valider ces résultats numériques.

### 4 Validation expérimentale : estimation des fonctions de Green

Nous nous sommes intéressés ici dans un premier temps à l'étude des fonctions de corrélation sur un cas "sans défaut". Les expériences sont réalisées sur un wafer de silicium de 7 cm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur. Les ondes acoustiques de surface sont générées à l'aide d'un transducteur IDT de 7 à 25 MHz conçu pour cette étude [13], orienté à 45 degrés afin de privilégier le rayonnement des ondes de Rayleigh et de minimiser leur conversion en ondes de volume irradiant dans le substrat (cf. Figure 6). L'ouverture du transducteur étant d'environ 2 mm, les points de mesure sont choisis dans la zone de rayonnement de l'IDT. Le pas de mesure est d'environ 10 mm, et une grille de mesure de  $N=25$  points est réalisée. Chaque Ascan est moyenné 350 fois et enregistrés sur 2 ms. Cela correspond à environ 1000 fois le temps de réverbération dans le wafer.

Les corrélations temporelles sont ensuite calculées et nous avons obtenu  $N \times N$  réponses impulsionnelles. La Figure 7 présente un sismogramme de corrélations croisées entre le point de mesure 1 de la grille et les autres points sur la même ligne.

Comme on peut le voir, les fonctions de corrélation ne sont pas symétriques en temps zéro. Ce qui démontre une mauvaise reconstruction de la fonction de Green (généralement la fonction de corrélation est symétrique entre les temps positifs et négatifs, ce qui constitue un bon indicateur de la convergence vers les FG). Ceci peut être expliqué par le fait que les ondes de surface ne sont pas suffisamment réverbérantes à ces fréquences d'opération. Un autre phénomène peut aussi avoir lieu comme la conversion de modes ondes de surface en ondes de volume et des composantes hors plan qu'on ne mesure pas par le laser. Ces travaux sont en cours de progression.

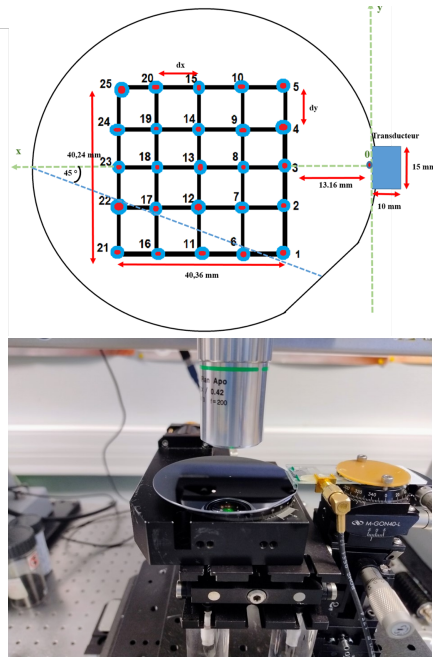


FIGURE 6 – Configuration expérimentale testée.

## 5 Conclusion

En conclusion, cette étude a montré l'intérêt de l'approche passive par corrélation d'ondes diffuses pour imager des wafers de silicium. Les résultats obtenus par la simulation numérique sont prometteurs et ont permis de valider l'algorithme d'imagerie en milieu anisotrope. Une étude expérimentale a été aussi menée où on a proposé une instrumentation adaptée pour générer un champs diffus hautes fréquences par des transducteurs interdigités. Une étude préliminaire a été effectuée d'abord sur l'estimation des fonctions de Green sur un wafer sain (sans défaut). Les premiers résultats montrent clairement que les ondes de surfaces sont peu réverbérantes à ces gammes de fréquences. Pour imager des micro-structures il faut baisser en fréquence tout en restant à l'échelle des MHz, ce qui peut être particulièrement intéressant notamment pour imager des défauts de collage dans les wafers. Cette approche présente certainement un fort potentiel dans le domaine de la microélectronique.

## Remerciements

Ce projet est financé par l'Agence Nationale de la Recherche ANR : DACLOS N<sup>0</sup> :ANR-21-CE42-0002-01.

## Références

[1] Dame Fall, Marc Duquennoy, Mohammadi Ouaftouh, Nikolay Smagin, Bogdan Piwakowski, and Frederic Jenot. Non-destructive characterization of surfaces and thin coatings using a large-bandwidth interdigital

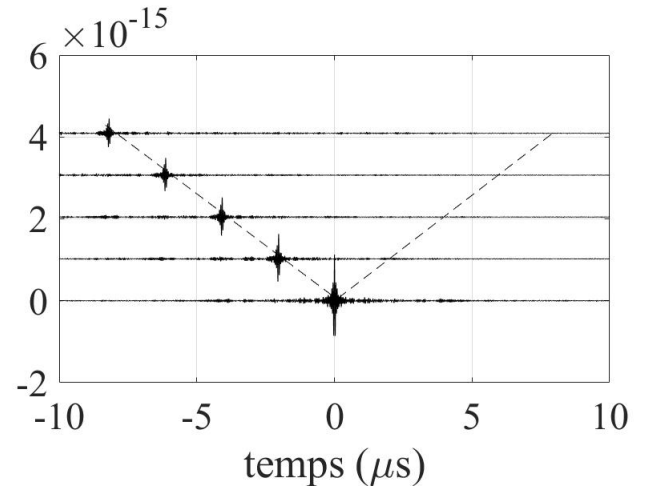


FIGURE 7 – Sismogramme de corrélations croisées entre le point de mesure 1 et les autres points sur la même ligne (cf. Figure 6).

transducer. *Review of Scientific Instruments*, 89(12), December 2018.

[2] D. Fall, F. Compoint, M. Duquennoy, H. Piombini, M. Ouaftouh, F. Jenot, B. Piwakowski, P. Belleville, and C. Ambard. Surface acoustic wave characterization of optical sol-gel thin layers. *Ultrasonics*, 68 :102–107, may 2016.

[3] N. Shapiro, M. Campillo, L. Stehly, and M. Ritzwoller. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 29 :1615–1617, 2005.

[4] Y. Zheng. Retrieving the exact Green's function by wavefield crosscorrelation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(3) :EL93–EL98, mar 2010.

[5] K. Wapenaar, D. Draganov, R. Snieder, X. Campman, and A. Verdel. Tutorial on seismic interferometry : Part 1 — basic principles and applications. *GEOPHYSICS*, 75(5) :75A195–75A209, sep 2010.

[6] Yunfeng Chen and Erdinc Saygin. Green's function retrieval from deterministic seismic wavefield using higher-order cross-correlation. *ASEG Extended Abstracts*, 2019(1) :1–5, nov 2019.

[7] P. Roux and M. Fink. Green's function estimation using secondary sources in a shallow water environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(3) :1406–1416, mar 2003.

[8] V. V. Goncharov, Yu. A. Chepurin, and O. A. Godin. Passive acoustic tomography of the ocean using arrays of unknown shape. *Acoustical Physics*, 59(2) :170–178, mar 2013.

[9] Michael G. Brown, Oleg A. Godin, Neil J. Williams, Nikolay A. Zabotin, Liudmila Zabotina, and Geoffrey J. Banker. Acoustic Green's function extraction from ambient noise in a coastal ocean environment.

- Geophysical Research Letters*, 41(15) :5555–5562, aug 2014.
- [10] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, and C. Prada. Accuracy of green's function estimation from correlation of diffuse elastic waves on thin plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(5) :3505–3511, nov 2019.
- [11] L. Chehami, J. de Rosny, C. Prada, E. Moulin, and J. Assaad. Experimental study of passive defect localization in plates using ambient noise. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 62(8) :1544–1553, aug 2015.
- [12] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, C. Prada, E. Chatelet, G. Lacerra, K. Gryllias, and F. Massi. Nonlinear secondary noise sources for passive defect detection using ultrasound sensors. *Journal of Sound and Vibration*, 386 :283–294, jan 2017.
- [13] Marc Duquennoy, Dame Fall, Nada Ben Jafela, Nikolay Smagin, Zakariae Oumekloul, Lynda Chehami, Emmanuel Moulin, and Mohammadi Ouafrouh. A comparative study of divergent surface acoustic wave beams' generation on an y128 lithium niobate using various types of interdigital transducers. *Sensors*, 25(4) :1067, February 2025.
- [14] G.W. Farnell. *Properties of elastic surface waves*. McGille University, 1969.
- [15] Yan Lu Yuyang Xu Dengqian Qin Bin Wu Cunfu He Guorong Song, Guangfu Hong. Inversion of elastic constants of anisotropic (100) silicon based on surfacewave velocity by acoustic microscopy using particle swarm-based-simulated annealing optimization. *J Nondestruct Eval*, page 34 :43, 2015.
- [16] Alexander Tarasenko; Radim Ctvrtlk; and Radim Kudelka. Theoretical and experimental revision of surface acoustic waves on the (100) plane of silicon. *Scientific Reports*, 11(1) :2845, 2021.
- [17] Karunia E. Lestari, Udjianna S. Pasaribu, Sapto W. Indratno, and Hanni Garminia. Generating roots of cubic polynomials by cardano's approach on correspondence analysis. *Heliyon*, 6(6) :e03998, 2020.
- [18] C.H. Tsai, Joseph Kolibal, and Ming Li. The golden section search algorithm for finding a good shape parameter for meshless collocation methods. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 34(8) :738–746, 2010.
- [19] T. Kadi. *Contribution au développement d'une méthode à ondes acoustiques de surface hautes fréquences dédiée à la caractérisation ultrasonore des structures à couches minces et au silicium mésoporeux*. PhD thesis, Université polytechnique des Hauts de France, 2021.
- [20] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, C. Prada, O. Bou Matar, F. Benmeddour, and J. Assaad. Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation. *Journal of Applied Physics*, 115(10) :104901, mar 2014.