

Master MIR, semestre 4, examen Microsystèmes Acoustiques

Transducteurs à ondes élastiques

mercredi 14 février 2018

- Durée : 2 heures
- Tous documents autorisés, pas de communication ni téléphones portables

1 Ondes de volume dans le nitrure d'aluminium (AlN)

Le nitrure d'aluminium (AlN) peut être déposé sous forme de couches minces cristallines. Le système cristallin est **hexagonal**, la symétrie est **6mm**. On donne les valeurs suivantes :

- $c_{11} = 345$ GPa, $c_{33} = 395$ GPa, $c_{12} = 125$ GPa, $c_{13} = 120$ GPa, $c_{44} = 118$ GPa,
- $e_{31} = -0.58$ C/m², $e_{33} = 1.55$ C/m², $e_{15} = -0.48$ C/m²,
- $\epsilon_{11} = 8.0 \cdot 10^{-11}$ F/m, $\epsilon_{33} = 9.5 \cdot 10^{-11}$ F/m,
- $\rho = 3260$ kg/m³.

On considère les ondes de volume se propageant suivant l'axe Z (ou direction (0,0,1)).

1. Représenter graphiquement les tenseurs élastique, piézoélectrique et diélectrique en notation contractée.
cf. planche 24 du cours 'Cristaux, tenseurs, élasticité & piézoélasticité'.
2. On néglige dans un premier temps la piézoélectricité. Donner l'expression du tenseur de Cristoffel. Donner l'expression des trois vitesses des ondes de volume et identifier leur nature (onde longitudinale ou de cisaillement). Donner la polarisation de chacune des 3 ondes de volume.
Le tenseur de 3*3 est diagonal : $\text{diag}(c_{55}, c_{44}, c_{33})$ avec $c_{55} = c_{44}$. Il y a deux ondes de cisaillement de vitesse $\sqrt{c_{44}/\rho} = 6016$ m/s, de polarisation (1,0,0) et (0,1,0), soit les axes X et Y. Il y a une onde longitudinale de vitesse $\sqrt{c_{33}/\rho} = 11007$ m/s et de polarisation (0,0,1) qui est bien suivant l'axe Z.
3. Application numérique : donner les valeurs de la vitesse des ondes de cisaillement et de l'onde longitudinale.
6016 m/s et 11007 m/s.
4. On considère maintenant la piézoélectricité. Donner la nouvelle forme de tenseur de Cristoffel. Quelles sont les ondes de volume sensibles à la piézoélectricité et celles qui ne le sont pas ?
On a $\epsilon = \epsilon_{33}$, $\gamma_1 = e_{35} = 0$, $\gamma_2 = e_{34} = 0$, $\gamma_3 = e_{33}$ non nul. Seul γ_{33} est changé en $c_{33} + e_{33}^2/\epsilon_{33}$. Seule l'onde longitudinale est couplée (et donc sensible à la piézoélectricité).
5. Donner la nouvelle valeur de la vitesse longitudinale [Nota : on doit trouver 11354 m/s]. Quelle est l'expression du coefficient de couplage électromécanique ? Vérifier qu'il vaut 6.3%.
On trouve $\sqrt{(c_{33} + e_{33}^2/\epsilon_{33})/\rho} = 11354$ m/s. $K^2 = 2(\Delta v)/v$ d'après la planche 14 du cours 'Ondes planes dans les solides'. $K^2 = 0,063$ ou 6,3%.

2 Exploitation de l'AlN pour réaliser un capteur à onde de volume

Le matériau décrit ci-dessus permet de réaliser des dispositifs, par exemple des résonateurs à onde de volume pour la mesure gravimétrique et pour l'interrogation sans fil de capteurs passifs. Les normes d'émission radiofréquences nous interdisent cependant d'émettre à n'importe quelle fréquence, et nous devons nous contenter de travailler dans la bande 2400-2480 MHz.

6. Quelle serait l'épaisseur d'un dispositif à onde de volume fonctionnant à 2400 MHz et utilisant une membrane d'AlN suspendue ? La réalisation pratique d'un tel dispositif est-elle technologiquement faisable à votre avis ?
 $h = \lambda/2 = c/(2f)$ donc 2,36 μm . Une telle épaisseur est relativement grande mais réalisable par dépôt sous vide. La difficulté est de libérer une membrane.
7. Si l'on ne souhaite pas réaliser une membrane suspendue, quelles autres solutions pratiques permettraient d'obtenir un résonateur à ondes de volume ?
SMR (couche mince sur miroir acoustique sur substrat rigide) ou HBAR : membrane reposant sur un substrat rigide.

8. La référence [1] propose une architecture de dispositif assemblé non pas par dépôt d'une couche mince mais par amincissement d'un substrat monocristallin. Quel est l'intérêt d'une telle approche ?

La polarisation de l'onde peut être plus facilement choisie par la coupe du cristal. Le facteur de qualité est plus élevé car les pertes élastiques sont plus faibles.

8. Un extrait de [2] est fourni dans la figure ci-contre, pour un dispositif susceptible d'être interrogé sans fil puisque proche de la bande de 2,45 GHz : quel est (à peu près) le coefficient de couplage électromécanique de ce dispositif ? Quel est son facteur de qualité à la résonance ?

On mesure sur la figure $f_s = 2,44$ GHz (résonance) et $f_p = 2,51$ GHz (antirésonance). $K^2 = \frac{\pi^2}{4} \frac{(f_p - f_s)}{f_p}$ donne 6,88%.

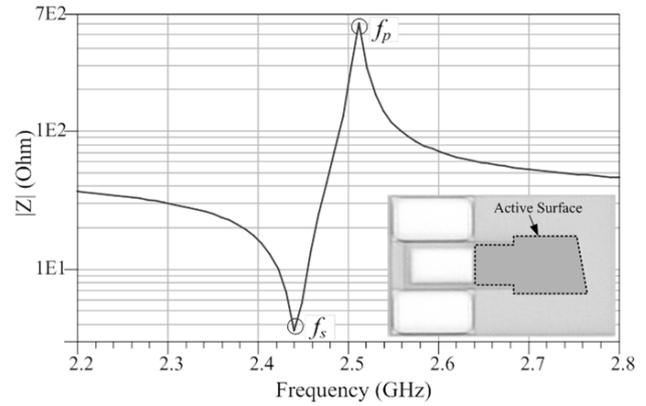
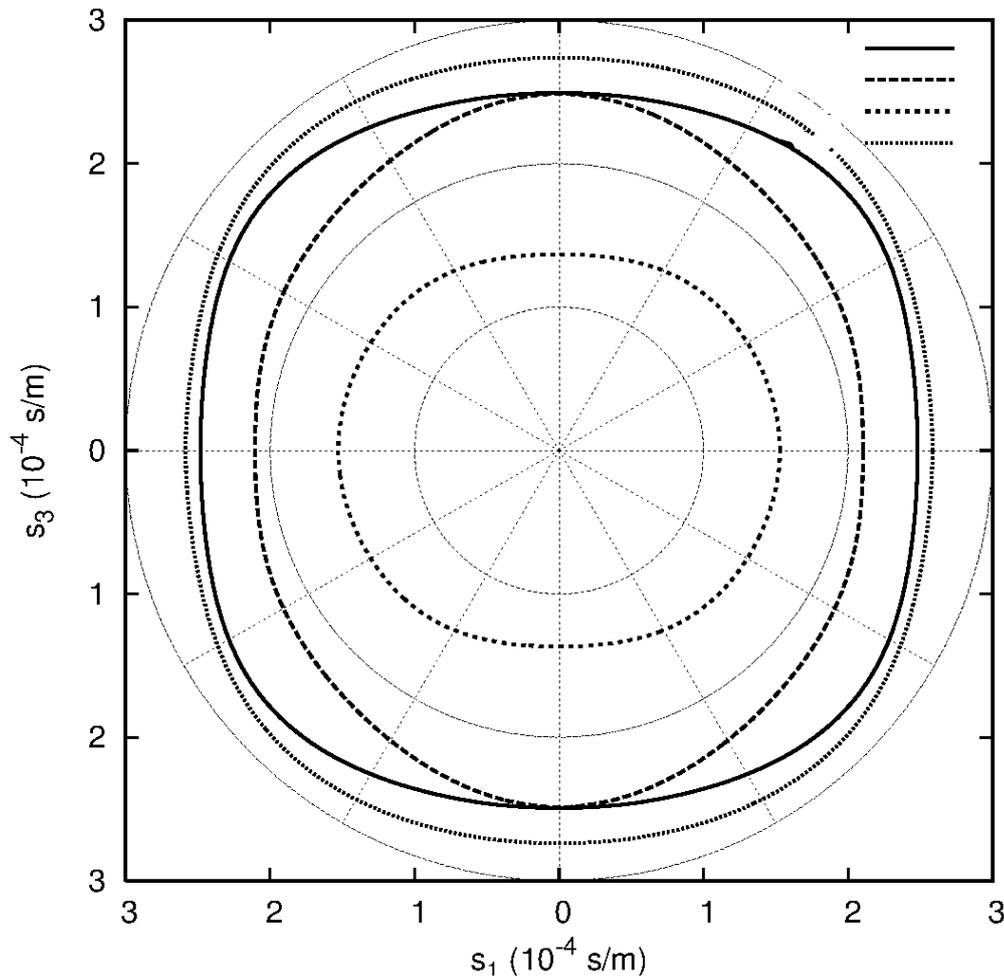


Figure 3. Impedance characteristic of a measured BAW-SMR.

3 Alternative au dispositif à onde de volume pour une mesure sans fil

Nous considérons maintenant une alternative : les dispositifs à ondes élastiques de surface. Un substrat classique est le niobate de lithium, et en particulier sa coupe YXl/128°.

10. La fréquence de fonctionnement impose l'épaisseur dans un résonateur à ondes de volume. Quelle est la dimension qu'elle impose dans un dispositif à onde de surface ?
la période p , par la relation $fp = v/2$ avec f la fréquence et v la vitesse.
11. A l'aide des surfaces de lenteurs de la figure, estimer la vitesse de l'onde de Rayleigh se propageant sur une surface libre de niobate de lithium YXl/128° suivant l'axe X (ou direction (1,0,0)) ? Quelle est la polarisation de cette onde ?



(Nota : la légende de la figure a été intentionnellement effacée. Les 4 courbes de lenteur sont pour 3 ondes de volume et une onde de Rayleigh.)

L'onde de Rayleigh est plus lente que toutes les ondes de volume, c'est donc la courbe extérieure. Sur l'axe X (ou s_1) on trouve $s_1 \approx 2,6 \cdot 10^{-4}$ s/m, soit $v = 3846$ m/s (la planche 14 de 'Ondes élastiques guidées' donne 3870 m/s). La polarisation est sagittale (mixant déplacements longitudinaux et de cisaillement vertical).

12. Compte-tenu des caractéristiques du substrat monocristallin, quelles sont les dimensions des électrodes qu'il faut déposer sur le wafer pour exciter des ondes à 2400 MHz, sachant que le ratio de métallisation est de 50%. Est-ce technologiquement réalisable ? Si oui, proposer une méthode de fabrication.

$p = \lambda/2$ et doigts de $\lambda/4$ de large, séparés de $\lambda/4$. On trouve $\lambda = 800$ nm. La plus petite distance est donc de 200 nm, ce qui en limite de résolution de la lithographie UV. Un procédé de lift-off est préférable.

13. On donne $K^2 = 5\%$ pour l'onde considérée. Donner une valeur approchée de la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh sur une surface métallisée.

La vitesse métallisée est $v_m = v(1 + K^2/2) = 3942$ m/s.

14. Pour une mesure par liaison radiofréquence, ce dispositif à ondes élastiques doit être fixé à une antenne. Quelle est la dimension caractéristique de l'antenne ? Comment cette dimension se compare à la taille du dispositif à ondes élastiques ? Commenter.

La dimension caractéristique de l'antenne est $\lambda/4$, pour la longueur d'onde électromagnétique dans le vide, soit environ 0.125 m à 2400 MHz. Cette dimension est bien plus grande que celle du dispositif acoustique, dans le rapport des longueurs d'onde respectives, typiquement.

Références

- [1] S. Ballandras *et al.*, *High overtone Bulk Acoustic Resonators : application to resonators, filters and sensors*, Acoustics 2012, disponible à <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00811239/document>
- [2] M. El Hassan, E. Kerherve, Y. Deval, K. Baraka, J.B. David and D. Belot, *Techniques for Tuning BAW-SMR Resonators for the 4th Generation of Mobile Communications*, dans *Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices* Ed M.G. Beghi (2013)