Modélisation de surfaces de niobate de lithium perturbées par des ions implantés et utilisées pour propager des ondes élastiques

Gaston Cambon, P. Hartemann

► To cite this version:

Gaston Cambon, P. Hartemann. Modélisation de surfaces de niobate de lithium perturbées par des ions implantés et utilisées pour propager des ondes élastiques. *Revue de Physique Appliquée*, 1978, 13 (5), pp.241-245. 10.1051/rphysap:01978001305024100 . jpa-00244447

HAL Id: jpa-00244447

<https://hal.science/jpa-00244447>

Submitted on 1 Jan 1978

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.

Classification
Physics Abstracts

62.20 Dc-61.80 Pn-62.30 + d.

MODÉLISATION DE SURFACES DE NIOBATE DE LITHIUM PERTURBÉES PAR DES IONS IMPLANTÉS ET UTILISÉES POUR PROPAGER DES ONDES ÉLASTIQUES

G. CAMBON

Centre d'Etudes d'Electronique des Solides (Associé au C. N. R. S.)
Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 34060 Montpellier Cedex, France

et

P. HARTEMANN

Thomson C. S. F., Laboratoire Central de Recherches,
Domaine de Corbeville, 91401 Orsay, France

(Reçu le 3 novembre 1977, révisé le 30 janvier 1978, accepté le 8 février 1978)

Résumé. — Un modèle est proposé pour les lignes à retard à ondes acoustiques de surface dont le substrat de niobate de lithium a été bombardé par des ions He^+ . Les mesures et les calculs théoriques de la variation du coefficient de couplage électromécanique de l'onde de surface permettent de déterminer l'épaisseur de la zone perturbée par implantation ionique. Les résultats des mesures et des calculs de la variation de la vitesse de phase de l'onde mettent en évidence une perturbation du module de cisaillement du substrat.

Abstract. — An acoustic model is proposed for ion-implanted acoustic surface wave delay lines on lithium niobate. Experimental and computed results about the variation of the electromechanical coupling coefficient of the wave give the value of the layer thickness perturbed by ions.

The phase velocity variations show up a change of the shear modulus of the substrate.

1. Introduction. — L'intérêt que présente la technique d'implantation ionique pour réaliser des composants acoustiques à ondes de Rayleigh tels que les lignes à retard, les guides, les résonateurs et les filtres a été démontré dans des articles précédents [1-2]. Diverses méthodes ont été utilisées pour caractériser les couches perturbées par les ions implantés [3] : topographie aux rayons X, mesure de la dénivellation à la limite de la zone bombardée par les ions, attaque chimique sélective, analyse ionique, propagation des ondes élastiques de surface. Dans le cas du quartz monocristallin, la topographie aux rayons X et l'attaque chimique sélective ont montré que la couche perturbée est pratiquement isotrope et uniforme sur une épaisseur H qui a pu être déterminée [4]. Après recuit, cette couche présente les propriétés mécaniques très voisines de celles de la silice fondue. La caractérisation avec les méthodes citées plus haut des couches perturbées obtenues par implantation d'ions dans le niobate de lithium (LiNbO_3) s'est avérée plus difficile. Dans le présent article nous établirons, par simulation avec un ordinateur, un modèle rendant compte des valeurs mesurées de la vitesse des ondes acoustiques de surface se propageant sur des échantillons bombardés de LiNbO_3 coupe Y dans une direction de propagation

parallèle à Z [2]. Nous nous intéressons ici aux échantillons exposés à un faisceau d'ions $^4\text{He}^+$ de 100 keV.

2. Position du problème. — Les mesures de vitesse de propagation des ondes de surface sur ces substrats bombardés mettent en évidence une réduction de la vitesse de phase de l'onde. Les courbes de la variation de la vitesse de phase en fonction de la fréquence de l'onde ont été déterminées pour différentes doses d'ions He^+ [2] et sont montrées sur la figure 1. Parallèlement, le carré du coefficient effectif de couplage électromécanique K^2 de l'onde a été mesuré en fonction de la fréquence (voir figure 1) suivant la méthode préconisée par Campbell et Jones [5]. Cette méthode consiste à déterminer la différence relative des vitesses mesurées sur une surface libre et recouverte d'une mince couche conductrice.

Les observations aux rayons X de la surface implantée montrent qu'il existe une couche rendue amorphe en surface par l'implantation des ions et très caractérisée pour les fortes doses d'ions He^+ ($1,5 \times 10^{16} \text{ He}^+/\text{cm}^2$) [2].

Le modèle simple que nous proposons est inspiré de celui établi pour le quartz. Il est constitué par une couche mince isotrope de LiNbO_3 , donc non piezo-

FIG. 1. — Carré du coefficient de couplage électromécanique et variation de la vitesse de phase pour les ondes élastiques de surface en fonction de la fréquence (LiNbO₃ Y, Z).

[Squared electromechanical coupling coefficient and variation of the phase velocity for surface acoustic wave *versus* frequency (LiNbO₃ Y, Z).]

électrique, déposée sur un substrat piezoélectrique de LiNbO₃ (voir figure 2). Le problème consiste donc à déterminer l'épaisseur H et les caractéristiques mécaniques de la couche ; sa masse volumique ρ , et les valeurs des constantes mécaniques indépendantes λ et μ (constantes de Lamé). Nous supposons que l'implantation n'introduit qu'une faible perturbation sur les valeurs de ces constantes et une méthode de perturbation est utilisée pour déterminer les valeurs en prenant les constantes isotropes équivalentes comme valeurs initiales de λ et μ .

FIG. 2. — Modèle pour le substrat bombardé par des ions.

[Model of the ion-implanted substrate.]

3. Constantes mécaniques « isotropes » du LiNbO₃.

— Les valeurs des constantes mécaniques *isotropes* équivalentes au LiNbO₃ monocristallin non perturbé ont été déterminées par Li [6]. Par hypothèse, ce milieu isotrope équivalent présente une densité et une vitesse de propagation des ondes de Rayleigh identiques à celles du LiNbO₃ cristallin. Les constantes mécaniques sont choisies pour rendre compte des résultats de mesure du coefficient de réflexion d'une onde de surface sur un réseau périodique de sillons gravés. Dans ce cas :

$$\lambda_p = 1,07 \times 10^{11} \text{ N/m}^2, \quad \mu_p = 0,66 \times 10^{11} \text{ N/m}^2.$$

Ces deux constantes sont les constantes équivalentes *raidies* par l'effet piezoélectrique. On traduit généralement l'effet piezoélectrique global sur la propagation d'une onde dans une direction donnée par un coefficient de couplage K_v tel que :

$$v_p = v_{np} \left(1 + \frac{K_v^2}{2} \right)$$

où v_p est la vitesse de phase de l'onde dans le milieu piezoélectrique et v_{np} la vitesse dans le même milieu où l'on néglige l'effet piezoélectrique.

Nous avons simulé la propagation du mode de surface considéré ici successivement sur le LiNbO₃ piezoélectrique (vitesse v_p) et sur un monocristal de LiNbO₃ hypothétique où la matrice des coefficients de couplage piezoélectrique (e_{ij}) est nulle (vitesse v_{np}). La différence relative des deux vitesses donne la valeur du coefficient de couplage piezoélectrique du mode de surface :

$$K_v^2 = 7 \times 10^{-2}$$

avec $v_p = 3488 \text{ m/s}$ et $v_{np} = 3370 \text{ m/s}$.

Les constantes mécaniques du milieu non piezoélectrique se déduisent de λ_p et μ_p par des relations du type :

$$\begin{aligned} \lambda_{np} &= \lambda_p - d\lambda_p \\ \mu_{np} &= \mu_p - d\mu_p \end{aligned}$$

où $d\lambda_p$ et $d\mu_p$ sont les fonctions de K_v^2 et compte tenu de la faible valeur de K_v^2 , on peut écrire :

$$dv_p = v_p - v_{np} \neq \frac{\partial v_p}{\partial \lambda_p} d\lambda_p + \frac{\partial v_p}{\partial \mu_p} d\mu_p = v_{np} \frac{K_v^2}{2}.$$

Autour des valeurs λ_p et μ_p citées plus haut on calcule pour le LiNbO₃ :

$$\begin{aligned} dv_p &= 64 \times 10^{-11} d\lambda_p + 2570 \times 10^{-11} d\mu_p \neq \\ &\neq 2570 \times 10^{-11} \times d\mu_p = v_{np} \frac{K_v^2}{2}. \end{aligned}$$

On en déduit :

$$\mu_{np} = \mu_p - d\mu_p = 0,61 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

soit :

$$\mu_{np} \neq \mu_p (1 - K_v^2).$$

Nous supposons en outre que :

$$\lambda_{np} \neq \lambda_p (1 - K_v^2) = 0,99 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

μ_{np} et λ_{np} sont les valeurs initiales μ et λ des constantes mécaniques non perturbées.

La figure 3 montre la variation de la vitesse de phase de l'onde de surface sur le LiNbO₃ piezoélectrique recouvert d'une couche de LiNbO₃ isotrope, non piezoélectrique et sans perturbation mécanique. En comparant cette courbe avec celles de la figure 1, on constate que la seule disparition de l'effet piezoélectrique dans la couche perturbée ne peut rendre compte de

FIG. 3. — Variation théorique de la vitesse de phase pour un substrat de LiNbO_3 (Y, Z) piezoélectrique chargé par une couche de LiNbO_3 isotrope en fonction du rapport de l'épaisseur à la longueur d'onde.

[Computed variation of the phase velocity for a piezoelectric substrate of LiNbO_3 (Y, Z) loaded by an isotropic layer of LiNbO_3 versus relative thickness.]

la dispersion de la vitesse. On doit tenir compte des variations des constantes mécaniques dans le milieu perturbé.

4. Épaisseur de la couche perturbée. — La figure 1 met en évidence une grande variation du coefficient K^2 en fonction de la dose d'ions implantés.

Cette variation peut être due à trois facteurs :

- une variation de la constante diélectrique ϵ_c de la couche,
- une variation de λ et μ ,
- une variation de l'épaisseur H de la couche.

A partir d'une théorie de perturbation [7], on calcule qu'une variation de 10 % de ϵ_c entraîne un écart de seulement 3 % sur la valeur de K^2 , pour une épaisseur H de l'ordre du dixième de la longueur d'onde acoustique (c'est-à-dire à 350 MHz pour $H = 1 \mu\text{m}$). La variation de ϵ_c est ici inférieure à 10 % d'après les mesures des capacités des transducteurs interdigités déposés sur des zones implantées [2]. La variation de la constante diélectrique ϵ_c ne peut donc pas introduire la forte variation de K^2 mesurée pour différentes doses d'implantation.

Par simulation sur ordinateur on trouve qu'une variation de 10 % de μ et λ entraîne une variation de moins de 1 % de K^2 pour une épaisseur $H \neq 0,1 \lambda$. L'influence des variations des constantes mécaniques sur la valeur de K^2 peut donc être négligée.

L'épaisseur de la couche est donc le paramètre qui joue le rôle le plus important dans la variation de K^2 avec la dose. Les courbes calculées relatives à la variation de K^2 sont montrées pour différentes épaisseurs de la couche sur la figure 4. Les résultats théoriques sont obtenus à l'aide d'un programme de simulation de la propagation d'ondes de surface dans des struc-

FIG. 4. — Carré du coefficient effectif de couplage K^2 en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche perturbée par les ions (courbes théoriques et points expérimentaux).

[Squared coupling coefficient K^2 versus the frequency for different values of the perturbed layer thickness (calculated and experimental results).]

tures multicouches avec possibilité d'introduire des conditions électriques aux limites. En comparant les positions des points expérimentaux par rapport aux courbes théoriques on déduit les valeurs des épaisseurs des couches perturbées pour les deux doses d'ions hélium.

$$\begin{aligned} H &= 9\,000 \pm 1\,000 \text{ \AA} \quad \text{pour } 3 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2 \\ H &= 15\,000 \pm 1\,000 \text{ \AA} \quad \text{pour } 1,5 \times 10^{16} \text{ ions/cm}^2. \end{aligned}$$

L'étude de la variation de K^2 en fonction de H pour différentes doses d'implantation nous permet donc de déterminer un paramètre important : l'épaisseur H de la couche implantée.

5. Constantes mécaniques. — On suppose que l'implantation ionique avec une dose déterminée d'ions introduit une perturbation des constantes mécaniques de la couche λ , μ et de sa masse volumique ρ . Pour une valeur donnée de l'épaisseur relative de la couche H/λ la valeur de la vitesse v est une fonction de ces constantes et des caractéristiques mécaniques du substrat non perturbé. En faisant une approximation au 1^{er} ordre on écrit que la variation dv de la vitesse est donnée par la relation suivante :

$$dv = \frac{\partial v}{\partial \mu} d\mu + \frac{\partial v}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial v}{\partial \rho} d\rho.$$

Des mesures de topographie du substrat bombardé à l'aide d'une sonde *Talystep* ne font pas apparaître de variation de volume du substrat après l'implantation. On peut donc considérer que la masse volumique ρ n'est pas altérée par l'implantation.

La figure 5 représente les variations calculées par simulation sur ordinateur de v en fonction de λ et μ pour deux valeurs de H/λ : 0,1 et 0,15. Le tableau I

FIG. 5. — Variations théoriques de la vitesse de l'onde de surface en fonction des valeurs des constantes élastiques de la couche pour deux valeurs du rapport épaisseur de la couche H sur longueur d'onde acoustique.

[Computed variations of the surface wave *versus* elastic modulus of the layer for two values of the ratio : layer thickness on acoustic wavelength.]

TABLEAU I

Variations relatives de vitesse par rapport à μ et λ pour différentes épaisseurs de couches perturbées

H/Λ	$(\partial v/\partial \mu) \times 10^{11}$ (m ³ /N.S)	$(\partial v/\partial \lambda) \times 10^{11}$ (m ³ /N.S)
0,05	188	23
0,1	320	40
0,15	450	53

donne les valeurs des dérivées partielles $\partial v/\partial \mu$ et $\partial v/\partial \lambda$ autour de $\lambda = 0,99 \times 10^{11}$ N/m² et $\mu = 0,61 \times 10^{11}$ N/m². Par suite de la faible valeur de $\partial v/\partial \lambda$ devant celle de $\partial v/\partial \mu$, on peut donc supposer que pour une faible perturbation des constantes mécaniques la variation de v est seulement affectée par la variation de μ et dans notre modèle, la valeur de λ sera supposée constante :

$$dv \neq \frac{\partial v}{\partial \mu} d\mu.$$

La variation de μ est déterminée pour 3 valeurs de H/Λ par approximations successives à partir de la variation v en utilisant comme valeurs initiales des constantes de la couche celles du niobate *isotrope*. D'abord les valeurs de μ et λ sont calculées pour une dose d'implantation de 3×10^{15} He⁺/cm² à partir de ce résultat, pour une dose de $1,5 \times 10^{16}$ He⁺/cm².

Les résultats sont donnés dans le tableau II. Les valeurs reportées dans le tableau II sont la moyenne des trois valeurs trouvées pour les trois rapports H/Λ .

TABLEAU II

Module μ en fonction de la dose d'implantation

Dose (He ⁺ /cm ²) 100 keV	$\mu \times 10^{-11}$ (N/m ²)
3×10^{15}	0,54
$1,5 \times 10^{16}$	0,48

Ces valeurs ne diffèrent que de 3 % de la valeur moyenne.

La figure 6 montre la comparaison entre les courbes

FIG. 6. — Comparaison entre les variations calculées et expérimentales de la vitesse de phase en fonction de la fréquence.

[Comparison between computed and experimental variations of the phase velocity.]

expérimentales et les courbes théoriques calculées à partir des valeurs portées dans le tableau II. L'accord entre les deux séries de courbes est bon, dans le domaine de fréquences et de doses d'implantation considérées.

6. Conclusion. — Dans le modèle proposé du LiNbO₃ bombardé par des ions, l'épaisseur H de la couche perturbée dépend de la dose d'ions (pour une énergie donnée des ions). Ici nous disposons seulement de deux doses différentes d'ions ce qui ne nous permet pas d'établir une loi de variation de H avec la dose dans le domaine étudié. La vitesse de propagation dépend du module de cisaillement μ tandis que l'influence de λ est négligeable. En effet, le mode de surface considéré (mode de Rayleigh) n'est pas *sensible* aux variations de λ ; car d'après les valeurs portées dans le tableau I, il y a un rapport d'environ dix entre les variations de μ et λ qui produisent la même variation relative de vitesse $\Delta v/v$. Des mesures du coefficient de réflexion d'ondes de volume sur la zone implantée

devraient permettre de mettre en évidence la variation de λ . Nous nous proposons de mettre en œuvre un montage expérimental permettant de faire ces mesures.

Le modèle théorique constitué d'une couche mince isotrope non piezoélectrique produite par les ions implantés à la surface d'un substrat piezoélectrique de LiNbO_3 nous a permis de retrouver analytiquement les résultats expérimentaux et de mettre en évidence

l'importance relative des perturbations induites par les ions des différents paramètres.

Remerciements. — Les auteurs remercient M. le Professeur E. L. Adler de l'Université Mac-Gill de Montréal pour leur avoir permis l'utilisation du programme de simulation de la propagation d'ondes acoustiques de surface dans les structures multi-couches.

Bibliographie

- [1] HARTEMANN, P. and MORIZOT, M., *Ultrasonics Symposium Proc. IEEE Cat 74*, (1974) CHO 896 lsu.
 - [2] HARTEMANN, P., *Appl. Phys. Lett.* **27** (1975) 263-265.
 - [3] HARTEMANN, P., *Rev. Phys. Appl.* **12** (1977) 843.
 - [4] HARTEMANN, P., Rapport interne Thomson CSF.
 - [5] CAMPBELL and JONES, W. R., *Transactions on sonics and ultrasonics* **15** (1968) 200.
 - [6] LI, R. C. M., *Ultrasonics Symposium, IEEE 72*, (1974), CHO 708-8, p. 263-266.
 - [7] AULD, B. A., *Acoustic fields and waves in Solids* (J. Wiley and Sons N. Y.) Vol. II, p. 290.
 - [8] FAHMY and ADLER, E. L., *Proc. IEEE*, **122** (1975) 470.
-