

Caractérisation de Substrats SOI via une Méthode de Résonance

C. Renard¹, D. Lederer¹, C. Craeye¹, J.-P. Raskin¹

¹ICTEAM, UCLouvain, Belgique
colin.renard@uclouvain.be

Résumé —

Une méthode de caractérisation non destructive de substrats SOI basée sur un résonateur rectangulaire est proposée. Un modèle permettant d'extraire la résistivité du substrat sur base de la fréquence de résonance et du facteur de qualité de la cavité après introduction de l'échantillon est établi. La méthode présente des résultats en adéquation avec l'extraction via lignes coplanaires (CPW). En particulier, une grande sensibilité aux fines couches de conduction de surface parasite (PSC) est démontrée.

1. Introduction

Aux fréquences microondes, la structure *Silicon-on-Insulator* (SOI) s'est établie comme la technologie dominante en terme de substrats pour les applications mobiles. L'isolation entre la couche active de silicium (Si) et le substrat via une couche de dioxyde de silicium (SiO_2) offre de nombreux avantages, parmi lesquels on cite une réduction des capacités parasites et des courants de fuite, ainsi qu'une augmentation de la vitesse de commutation [1].

Dans cette gamme de fréquences, les substrats à haute-résistivité (HR) nominale $\rho_{Sub} > 1 \text{ k}\Omega \text{ cm}$ sont largement favorisés, pour limiter les pertes et non-linéarités [2].

Cependant, les substrats HR-SOI souffrent du phénomène de *Conduction de Surface Parasite* (PSC). Des charges positives fixes au niveau de l'interface SiO_2/Si attirent une forte densité d'électrons. Cela induit une couche de l'ordre du micron, très conductrice, baissant la résistivité effective ρ_{eff} ressentie par les circuits. On observe alors des pertes élevées et des non-linéarités, malgré un substrat HR. Il est donc crucial de *passiver* l'interface et la méthode la plus répandue, le *trap-rich* [3], consiste à y introduire une fine couche de polysilicium (PSi) riche en défauts qui capturent les électrons attirés par les charges positives. D'autres méthodes de passivation sont actuellement étudiées, notamment le *Double Buried-Oxide* [4] et la *PN Interface Passivation* [5].

Dans ce contexte, la caractérisation des substrats SOI est cruciale. Les principales méthodes d'extraction de ρ_{eff} se basent sur des mesures de lignes coplanaires (CPW). Bien que précises, ces méthodes sont chronophages et requièrent le retrait de la couche active de Si et la déposition de lignes CPW, rendant le substrat inutilisable par la suite.

À l'inverse, de nombreuses techniques de caractérisation non destructives de diélectriques ont été proposées dans la littérature. Elles se divisent principalement en deux catégories : les mesures en réflexion/transmission,

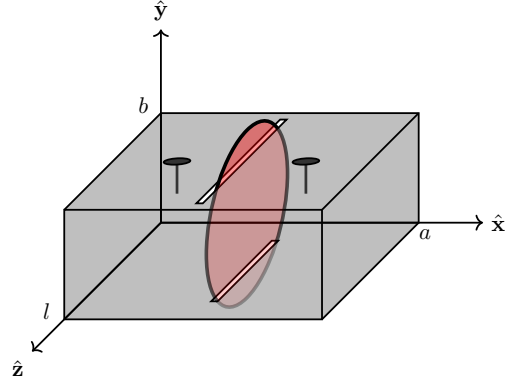


FIGURE 1. Géométrie du résonateur. L'échantillon est représenté en rouge.

et les méthodes de résonance [6]. Ces dernières offrent la meilleure précision pour des matériaux à faibles pertes grâce à la grande sensibilité des résonateurs [7].

Cette communication propose une méthode non destructive de résonance permettant la caractérisation rapide d'échantillons SOI. En particulier, une **très grande sensibilité aux fines couches de PSC** est démontrée. La méthode se base sur une cavité rectangulaire permettant l'insertion rapide d'échantillons.

2. Méthode de Résonance Proposée

La Figure 1 illustre la géométrie du résonateur. L'échantillon est inséré dans la cavité via deux fentes situées au centre des faces supérieures et inférieures.

L'introduction d'un échantillon de permittivité complexe $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r (1 - j \tan \delta)$ perturbe la résonance : la fréquence de résonance f_{res} diminue avec ε_r , et le facteur de qualité Q_0 décroît avec $\tan \delta$. Pour du silicium, $\tan \delta$ est inversement proportionnel à la résistivité, ce qui permet d'obtenir cette dernière à partir de la mesure de Q_0 .

Pour un échantillon multicouche tel que du SOI, la méthode de résonance ne permet l'extraction que d'une résistivité effective dite *de résonance*, ρ_{res} . L'extraction de la résistivité du substrat ou de la PSC n'est possible que si les résistivités et épaisseurs des autres couches sont connues ou estimées.

3. Modélisation du Résonateur

L'extraction de la résistivité d'un échantillon nécessite la modélisation du résonateur lorsque celui-ci y est inséré. Cela revient à obtenir f_{res} et Q_0 en fonction du profil de permittivité $\varepsilon(x, y, z)$. Puisque la présence d'une PSC ré-

sulte en des pertes considérables, les méthodes classiques de perturbation ne sont pas applicables. Une méthode alternative basée sur une expansion modale et une méthode de Galerkin est proposée.

On considère un résonateur rectangulaire de dimensions $a \times b \times l$, aux parois parfaitement conductrices. La cavité est supposée totalement fermée : la présence des fentes est négligée. Le champ électrique est exprimé comme une combinaison linéaire des modes TE_{m0p} de la cavité non perturbée, dénotés ψ_{mp} :

$$\mathbf{E}(x, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} C_{mp} \psi_{mp}(x, z) \hat{\mathbf{y}}, \quad (1)$$

avec C_{mp} des coefficients à déterminer. Afin de garantir que le champ électrique satisfait l'équation d'Helmholtz

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu_0 \varepsilon \mathbf{E} = 0, \quad (2)$$

une méthode de Galerkin est employée. Après troncature du nombre de modes dans l'expansion à $M \times P$ et définition du produit scalaire (dénoté $\langle \cdot, \cdot \rangle$), on obtient le système d'équations linéaires

$$\sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P C_{mp} \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l} \right)^2 \right] \langle \psi_{mp}, \psi_{nq} \rangle = \omega^2 \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P C_{mp} \mu_0 \langle \varepsilon \psi_{mp}, \psi_{nq} \rangle. \quad (3)$$

Ce système peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \omega^2 \mathbf{B} \mathbf{x}, \quad (4)$$

avec

$$A_{mp,nq} = \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l} \right)^2 \right] \delta_{mn} \delta_{pq} \quad (5)$$

où δ_{ij} désigne le delta de Kronecker. Afin de prendre en compte la courbure des échantillons et donc la dépendance en y de la permittivité, les éléments de $\mathbf{B}$ sont moyennés sur la hauteur de la cavité :

$$B_{mp,nq} = \mu_0 \frac{1}{b} \int_0^b \langle \varepsilon(y = y') \psi_{mp}, \psi_{nq} \rangle dy'. \quad (6)$$

On obtient un problème aux valeurs propres généralisé avec pour valeurs propres le carré des fréquences de résonance. Puisque $\mathbf{B}$ n'est pas hermitienne, ces fréquences sont complexes :

$$\omega = 2\pi f_{\text{res}} \left(1 + \frac{j}{2Q_0} \right). \quad (7)$$

En pratique, l'extraction de la permittivité se base sur la résolution du problème inverse consistant à trouver $\varepsilon(x, y, z)$ tel que l'Équation (4) fournisse les valeurs propres mesurées.

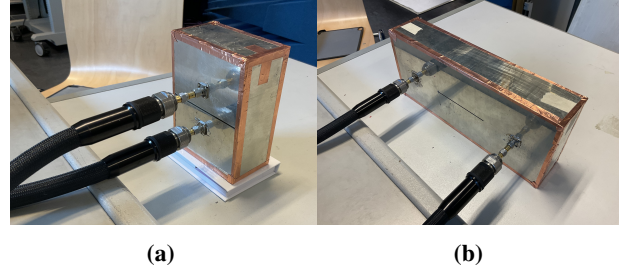


FIGURE 2. (a) Résonateur court. (b) Résonateur long.

4. Résultats

4.a. Protocole Expérimental

Deux résonateurs ont été fabriqués pour valider la méthode proposée. Les parois sont réalisées en acier étamé d'une épaisseur de 2 mm, assemblées à l'aide de ruban de cuivre.

Le résonateur *court* a pour dimensions $12 \times 5 \times 9 \text{ cm}^3$, de telle sorte qu'un substrat 3 pouces occupe la quasi-totalité de sa longueur. Seul le mode TE_{101} est exploité pour cette cavité. Afin d'exciter ce dernier, deux probes sont insérées de part et d'autre de la fente supérieure de la cavité.

Le résonateur *long* a pour dimensions $12 \times 5 \times 27 \text{ cm}^3$. Il permet l'utilisation de plus de modes (TE_{101} à TE_{104}), excités cette fois-ci via des probes situées dans le prolongement de la fente supérieure. La Figure 2 montre les deux résonateurs.

Huit échantillons sont caractérisés. Il s'agit de tranches SOI de 3 pouces dont la couche active de Si a été retirée. Cinq échantillons sont passivés via introduction d'une couche de PSi sous l'oxyde, donc ne contiennent pas de PSC. Ils sont dénotés de S à XXL , en fonction de leur résistivité nominale théorique¹. Les trois autres échantillons sont similaires aux échantillons XL et XXL , mais n'ont pas été passivés. Ils contiennent par conséquent une couche parasite de PSC.

Avant chaque mesure, une calibration Short-Open-Load-Through est effectuée sur le VNA. Le facteur de qualité est extrait du paramètre de transmission S_{21} en utilisant l'algorithme NLQFIT [8]. La contribution des pertes liées à la cavité est exclue via une mesure du facteur de qualité du résonateur à vide Q_e :

$$Q_s = (Q_0^{-1} - Q_e^{-1})^{-1}, \quad (8)$$

avec Q_s le facteur de qualité lié aux pertes dans l'échantillon et Q_0 le facteur de qualité total. Sur base de Q_s , l'expansion modale permet de retrouver la résistivité de l'échantillon.

4.b. Résultats Expérimentaux et Discussion

La Figure 3a présente la résistivité des échantillons passivés. Les courbes en traits pleins indiquent une extraction CPW, et les marqueurs correspondent aux différents modes des résonateurs. Dans le cas sans PSC,

¹. S : $10 \Omega \text{ cm}$, M : $100 \Omega \text{ cm}$, L : $750 \Omega \text{ cm}$, XL : $>4000 \Omega \text{ cm}$, XXL : $>10\,000 \Omega \text{ cm}$.

$\rho_{\text{res}} = \rho_{\text{eff}} = \rho_{\text{Sub}}$. On observe un bon accord entre les deux approches. L'absence de résultats pour les modes TE_{101} et TE_{102} pour des échantillons HR est due au faible Q_e de ces modes. L'écart entre la méthode par résonance et l'extraction CPW provient de pertes radiatives au niveau des fentes des résonateurs. Ces dernières n'étant pas prises en compte dans le modèle théorique, elles s'ajoutent aux pertes dans l'échantillon et diminuent ρ_{res} .

La Figure 3b montre la résistivité effective de résonance des échantillons non passivés. Ils présentent un ρ_{res} inférieur de plus d'un ordre de grandeur comparé au ρ_{Sub} des échantillons passivés correspondants. La présence d'une PSC est évidente, et la méthode de résonance y démontre une très grande sensibilité. Il faut noter que, à l'inverse du cas sans PSC, $\rho_{\text{res}} \neq \rho_{\text{eff}}$ extrait par extraction CPW. En effet, en toute généralité, la PSC a un impact différent sur un résonateur que sur une ligne coplanaire (c'est pourquoi ρ_{eff} n'est pas montré sur la Figure 3b).

Il est aussi possible d'extraire directement la résistivité de la couche de PSC ρ_{PSC} , comme illustré sur la Figure 3c. Pour cela, la résistivité du substrat est estimée sur base des échantillons passivés correspondants. En outre, on suppose une épaisseur de PSC de $1 \mu\text{m}$. Les valeurs de ρ_{PSC} obtenues sont proches de $450 \text{ m}\Omega \text{ cm}$, correspondant aux valeurs de l'ordre de $1 \Omega \text{ cm}$ reportées dans la littérature [5]. Ces valeurs très faibles expliquent la faible résistivité effective de résonance. Il faut noter que les modes d'ordre pair sont moins sensibles aux échantillons, car ces derniers sont alors centrés dans un zéro de champ électrique. Ils sont donc moins fiables et plus sensibles à des erreurs d'alignement dans la cavité, ce qui explique les écarts avec les modes d'ordre impair.

5. Conclusion

Cet article décrit pour la première fois une méthode de caractérisation non destructive de substrats SOI, basée sur un résonateur rectangulaire pourvu de fentes permettant l'insertion rapide des échantillons. La méthode propose des résultats en bon accord avec l'extraction CPW. En particulier, il est démontré qu'elle présente une grande sensibilité aux couches de PSC, dont la détection est cruciale.

L'amélioration de la qualité de fabrication des résonateurs et la limitation des pertes radiatives permettrait d'augmenter la précision de l'approche proposée.

Grâce à son caractère non destructif, cette méthode pourrait notamment permettre la caractérisation rapide de tranches SOI tout au long de la chaîne de production. Elle permet aussi la caractérisation préalable d'un substrat avant l'intégration de dispositifs.

6. Remerciements

C. Renard est Aspirant du Fonds de la Recherche Scientifique - FNRS.

Références

- [1] M. Rack, "Modelling of Advanced Silicon-Based Substrates for RF and mm-Wave Applications," Ph.D. dissertation, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, 2021.

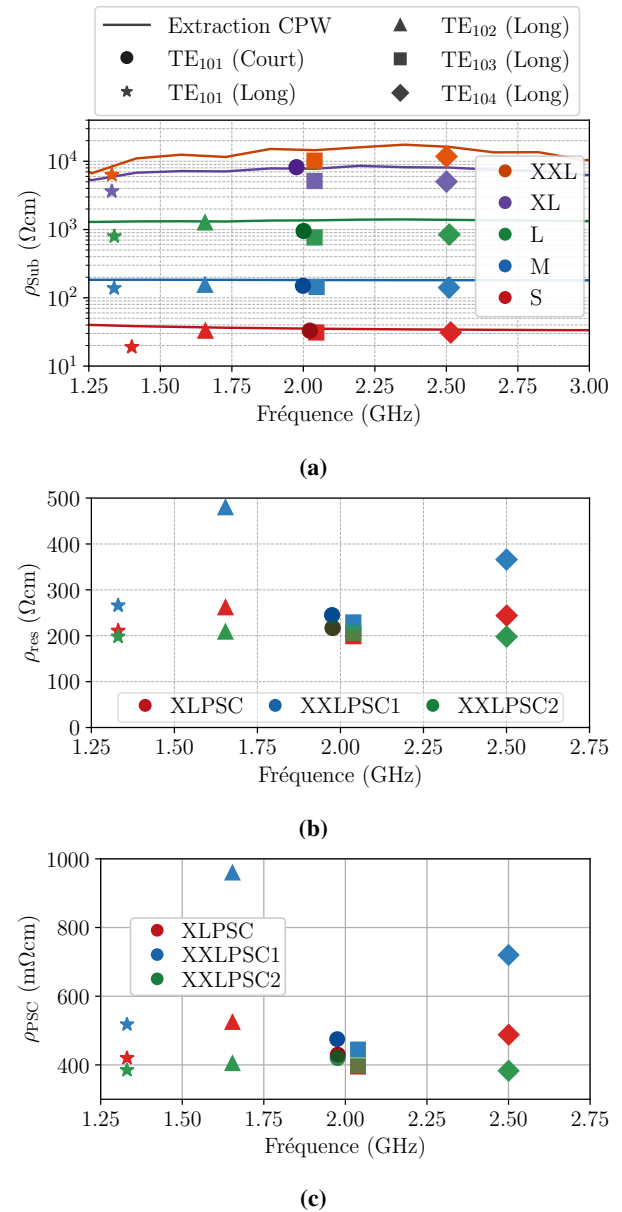


FIGURE 3. Résultats expérimentaux. (a) ρ_{Sub} des échantillons passivés. (b) ρ_{res} des échantillons non passivés. (c) ρ_{PSC} des échantillons non passivés.

- [2] D. Lederer *et al.*, "High resistivity SOI substrates : how high should we go?" in *2003 IEEE International Conference on SOI*, 2003, pp. 50–51.
- [3] D. Lederer and J.-P. Raskin, "New substrate passivation method dedicated to HR SOI wafer fabrication with increased substrate resistivity," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 26, no. 11, pp. 805–807, 2005.
- [4] M. Nabet *et al.*, "Double Buried Oxide Trap-Rich Substrates for High Frequency Applications," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 44, no. 4, pp. 570–573, 2023.
- [5] M. Rack *et al.*, "High-Resistivity Substrates in 22-nm FD-SOI—Part I: Wideband Modeling and Impact on RF Losses," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 72, no. 9, pp. 5229–5235, 2025.
- [6] R. N. Clarke *et al.*, *A guide to the characterisation of dielectric materials at RF and microwave frequencies*. Institute of Measurement and Control / National Physical Laboratory, 2003. [Online]. Available : <http://eprintspublications.npl.co.uk/2905/>
- [7] J. Baker-Jarvis *et al.*, "Dielectric characterization of low-loss materials a comparison of techniques," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 5, no. 4, pp. 571–577, 1998.
- [8] A. P. Gregory *et al.*, "Robust Algorithms for Fitting Q-Factor in the Complex Domain," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 188 336–188 348, 2024.