

CARACTERISATION MICRO-ONDE DE LA RESINE EPAISSE SU8 UTILISEE DANS UN PROCEDE "ABOVE-IC"

A. GHANNAM^{1,2}, C. VIALLO¹, D. BOURRIER¹, T. PARRA¹

aghannam@laas.fr, cviallon@laas.fr, bourrier@laas.fr, parra@laas.fr

¹ LAAS-CNRS ; Université de Toulouse ; 7 avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

² FREESCALE Semiconductor ; 134 Avenue du Général Eisenhower, F-31023 Toulouse, France

1. RESUME

Une technique large bande pour déterminer les propriétés électriques des matériaux diélectriques est présentée, basée sur des lignes micro-rubans. La permittivité relative et l'angle de perte sont calculés à partir des paramètres-S mesurés et d'équations analytiques. Le calcul analytique est soit direct en utilisant des équations dérivées des formules de Bahl, soit itérative en utilisant les formules de Jensen-Hammerstad couplées à l'algorithme de la sécante. Des lignes micro-rubans ont été fabriquées pour extraire les propriétés électriques de la résine SU-8. Une permittivité relative de 2.85 et un angle de perte de 0.04 ont été déterminés. Ces valeurs ont été utilisées dans un simulateur EM pour la conception d'une inductance à fort coefficient de qualité Q réalisée sur une couche diélectrique de SU-8 elle même déposée sur un substrat de silicium de faible résistivité. Le bon accord entre les mesures et les simulations valide la procédure de caractérisation des diélectriques et confirme la pertinence de la SU8 pour des applications RF jusqu'à 15 GHz.

2. INTRODUCTION

Le développement actuel des télécommunications mobiles s'accompagne d'une demande sans cesse croissante pour de nouvelles technologies de plus en plus performantes, faibles coûts et fiables. Par ailleurs, le raccourcissement nécessaire des délais et la complexité accrue des fonctions impliquent l'utilisation de simulateurs électriques et électromagnétiques pour optimiser les conceptions. Cependant, ce travail nécessite une bonne connaissance des caractéristiques électriques des différents matériaux mis en œuvre (permittivité relative ϵ_r et angle de pertes $\tan\delta$).

Par suite, nous proposons ici deux méthodes de caractérisation de diélectriques simples et efficaces. Ces méthodes s'appliquent sur les paramètres-S mesurés de lignes micro-rubans. La première méthode fait appel à des calculs analytiques directs tandis que la deuxième utilise un algorithme itératif très rapide. Ces méthodes sont extrêmement plus rapides que celles déjà publiées [1] puisqu'elles n'exigent pas la résolution des problèmes direct et inverse ainsi qu'une comparaison entre les paramètres-S calculés et mesurés.

Après validation pour un substrat en alumine, les deux méthodes sont utilisées pour étudier les propriétés électriques de la résine photosensible à base d'époxy SU-8. La SU-8 apparaît un matériau intéressant pour les technologies "Above IC" grâce à une contrainte mécanique modérée et sa capacité de former des couches épaisses. Ce matériau a déjà été caractérisé en utilisant différentes méthodes et techniques. Cependant, soit le résultat affiché était imprécis [2] soit faisant appel à un procédé de fabrication des structures de caractérisation long et complexe [3]. En outre, différents types de SU-8 sont disponibles dont les propriétés électriques sont sensibles aux conditions de traitement. Pour toutes ces raisons, des méthodes efficaces d'extraction des propriétés diélectriques sont nécessaires et sont présentées ici.

Afin de caractériser la SU-8 et de vérifier le domaine de validité des méthodes d'extraction, plusieurs lignes micro-rubans ont été mises en œuvre avec des variations dans les largeurs w , hauteurs de résine h , longueurs l et épaisseurs de métal t . Les potentialités de la SU-8 sont ensuite démontrées à travers la conception, la réalisation et la caractérisation d'une inductance à fort coefficient de qualité Q intégrée sur un substrat de silicium de faible résistivité.

3. METHODES DE CARACTERISATION

L'extraction des caractéristiques diélectriques exige le calcul de la permittivité effective complexe ϵ_{eff} à partir des paramètres-S mesurés pour une ligne implémentée sur le matériau. Dans notre cas, elles sont extraites de mesures sous pointes réalisées sur une ligne micro-ruban. Ensuite, la permittivité relative ϵ'_r (partie réelle de la permittivité complexe $\epsilon_r = \epsilon'_r + j\epsilon''_r$) est calculée en utilisant ϵ_{eff} et les dimensions physiques de la ligne micro-ruban. Enfin, l'angle de perte est déterminé à partir de la permittivité complexe et effective. Nous présentons toutes ces étapes ci-après.

A. Extraction de la permittivité effective

La méthode de transmission-réflexion [4] est utilisée pour extraire ϵ_{eff} à partir des mesures. Elle nécessite la valeur de l'impédance caractéristique de la ligne micro-ruban dans l'air (qui est à peu près constante). Cette valeur peut être obtenue en utilisant les formules de Jensen-Hammerstad [5].

La permittivité effective complexe ϵ_{eff} est calculée en utilisant les équations (1) à (4) ci-dessous:

$$P = |P| e^{-j\varphi} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{1}{l} \cdot \ln\left(\frac{1}{|P|}\right) + j \frac{-\varphi}{l} \quad (2)$$

$$\gamma_0 = j \frac{\omega}{c} \quad (3)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\gamma}{\gamma_0} \cdot \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} \cdot \frac{Z_c}{Z_0} = \epsilon'_{eff} + j\epsilon''_{eff} \quad (4)$$

Avec: P facteur de propagation, Γ coefficient de réflexion [4], γ_0 et γ constantes de propagation respectivement en espace libre et avec le matériau, l longueur physique de la ligne micro-ruban, Z_c impédance caractéristique dans l'air, et $Z_0 = 50 \Omega$ impédance de référence.

Une fois ϵ_{eff} extraite, l'utilisateur peut introduire sa valeur dans l'une des deux méthodes suivantes pour calculer la permittivité relative du matériau diélectrique.

B. Méthode de calcul 1

Cette méthode analytique calcule directement la permittivité relative ϵ'_r . Elle utilise des équations dérivées des formules de Bahl (basées sur le model de Schneider) [6]. Le calcul est simple et rapide en utilisant les équations (5) à (7) suivantes :

$$\epsilon'_r = \frac{\epsilon'_{eff} - 0.5 + x/2 - y}{0.5 + x/2 - y} \quad (5)$$

$$\text{et } y = \frac{t}{7.8h\sqrt{w/h}} \quad (7)$$

$$\text{avec } x = \begin{cases} (1 + 12 \frac{h}{w})^{-0.5}, & \frac{w}{h} < 1 \\ (1 + 12 \frac{h}{w})^{-0.5} + 0.04(1 - \frac{w}{h})^2, & \frac{w}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

L'équation (7) est une fonction de correction sur ϵ'_r pour prendre en compte l'épaisseur du métal. Bahl à l'origine a introduit un coefficient de 4.6 dans le dénominateur conduisant à une précision de 2% pour $t/h \leq 0.2$. Toutefois, au cours de nos expériences (voir § II.E), nous avons constaté que ϵ'_r a été systématiquement surestimé pour des valeurs importantes du rapport t/h (structures avec t/h allant de 0.08 à 1 ont été traitées). Avec un coefficient de 7.8 au lieu de 4.6, les résultats ont été bien meilleurs sur tout les rapports t/h traités (voir §II.E).

C. Méthode de calcul 2

Cette deuxième méthode utilise le modèle de Jensen-Hammerstad [5]. En raison de la complexité des formules (comportant des fonctions hyperboliques et logarithme naturel), une méthode itérative est nécessaire pour le calcul. Ce processus est réalisé en utilisant l'algorithme de la sécante [7] (Figure 1). Ce dernier injecte des valeurs arbitraires de ϵ'_r dans les formules de Jensen-Hammerstad et compare la permittivité effective ϵ'_{eff} résultante avec la valeur extraite des mesures. La valeur correcte de ϵ'_r est atteinte après convergence.

D. Calcul de l'angle de perte

Dans les références [2] et [3] l'angle de perte $\tan\delta$ est calculé à partir du modèle RLGC de la ligne micro-ruban. Cependant, cette méthode n'est correcte que si la propagation dans la structure est TEM. Cette condition satisfaite dans [2] ne l'est pas dans [3] qui donne plutôt une valeur effective de $\tan\delta$. L'équation suivante [8] permet de résoudre ce problème.

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''_{eff}}{\epsilon'_{eff}} \cdot \frac{1 - 1/\epsilon'_r}{1 - 1/\epsilon'_{eff}} \quad (8)$$

E. Précision et domaine de validité des méthodes

Afin d'estimer la précision et le domaine de validité des méthodes, nous avons simulé des structures micro-ruban de différentes dimensions physiques et avec des permittivités relatives et angles de pertes prédéfinis. Des simulations électromagnétiques, sont ensuite extraites les propriétés diélectriques qui sont au final comparées aux valeurs prédéfinies.

La Figure 2 montre que la première méthode d'extraction présente un taux d'erreur inférieur à 1% pour un rapport $t/h < 1.2$ et augmente jusqu'à 35% pour des rapports t/h plus élevés. Ceci est dû aux limitations du modèle de Bahl. La deuxième méthode, basée sur le modèle de Jensen-Hammerstad, présente un taux d'erreur moyen inférieur à 2% sur de larges plages des dimensions. En conclusion, la première méthode peut être utilisée pour sa simplicité tant que $t/h < 1.2$, au-delà, la deuxième méthode sera plus appropriée.

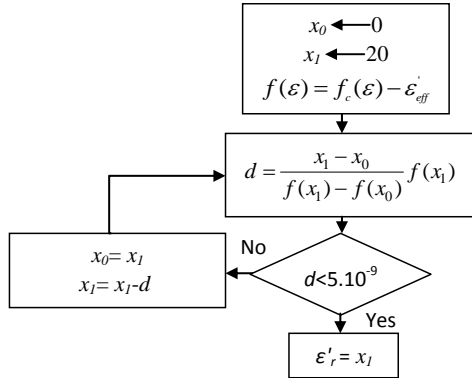


Figure 1: Organigramme de l'algorithme de la sécante

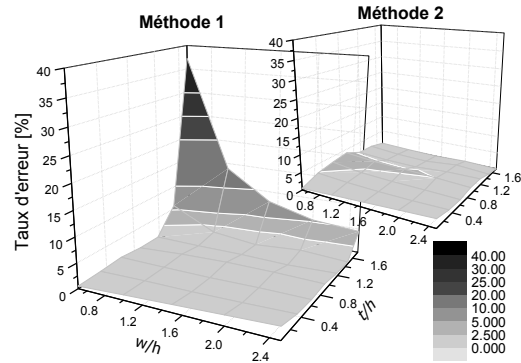


Figure 2: Evaluation du taux d'erreur des deux méthodes d'extraction

4. VALIDATIONS EXPERIMENTALES

Pour valider expérimentalement les méthodes, des mesures ont été effectuées sur une ligne micro-ruban de 0.2 cm de longueur implémentée sur de l'alumine. Un calibrage TRL valide entre 2 et 18 GHz a été appliqué. Pour cette ligne, un ϵ'_r de 9.96 et 10.1 ainsi qu'un $\tan\delta$ de 0.00025 ont été extraits à 10 GHz en utilisant les méthodes 1 and 2 respectivement (Figure 3). Ces valeurs sont très proches de celles annoncées par le constructeur ($\epsilon'_r = 9.96$ à 10 GHz et $\tan\delta = 0.0002$).

A. Caractéristiques de la SU-8

Après avoir validé les deux méthodes, un ensemble de lignes micro-rubans a été fabriqué sur SU-8 dans le but de caractériser ce matériau et vérifier d'avantage la précision des méthodes. Différentes largeurs w (30, 60, 90 et 120 μm), longueurs l (1000, 2000 et 3000 μm), épaisseurs de SU-8 h (30 et 60 μm) et de métallisation t (5 et 30 μm) ont été implémentées (Figure 4a). Ces structures intègrent des trous métallisés pour les transitions entre la ligne micro-ruban et les accès coplanaires nécessaires à la caractérisation sous pointe.

Les mesures des paramètres-S ont été effectuées avec un analyseur de réseau vectoriel (Anritsu 37397C). Un calibrage SOLT a été appliqué pour amener les plans de référence du signal RF au bout des pointes coplanaires, puis à l'aide d'accès en court-circuit et en circuit ouvert les mesures sont corrigées pour ramener ces plans au niveau de la ligne micro-ruban. Des mesures paramètres-S un ϵ'_r de 2.85 et un $\tan\delta$ de 0.04 à 25 GHz ont été extraites pour la SU-8; des valeurs comparables à celles de la littérature [2] [3] (Figure 5). En outre, ces valeurs sont constantes sur toute la bande de fréquence et indépendantes des dimensions physiques des lignes.

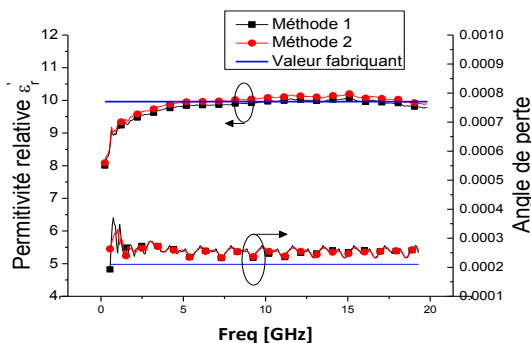


Figure 3: Validation expérimentale sur Alumine

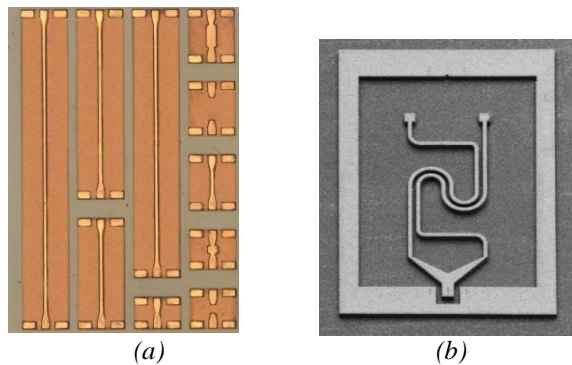


Figure 4: (a) Structures micro-rubans réalisées sur substrat SU8. (b) Inductance intégrée sur de la SU8

B. Inductance Above-IC à fort coefficient de qualité

Compte tenu des caractéristiques obtenues et de ses propriétés mécaniques, nous avons entrepris d'utiliser cette résine épaisse pour la réalisation d'inductances de puissance RF à fort coefficient de surtension sur substrat silicium très faible résistivité (Figure 4b). Ces inductances ont été conçues par simulations électromagnétiques, sur la base des caractéristiques précédemment extraites pour la résine SU8. L'inductance intègre un plan de masse, une couche de 60 μm de SU-8 et 'une métallisation d'épaisseur 30 μm .

Les performances mesurées pour une inductance de 1nH (Figure 6) démontrent les potentialités de ce matériau. De plus, le très bon accord entre simulations et mesures observé sur cette figure valide l'ensemble de notre démarche.

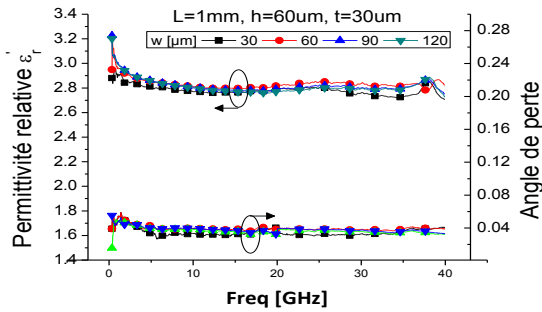


Figure 5: Permittivité relative et angle de perte de la SU8

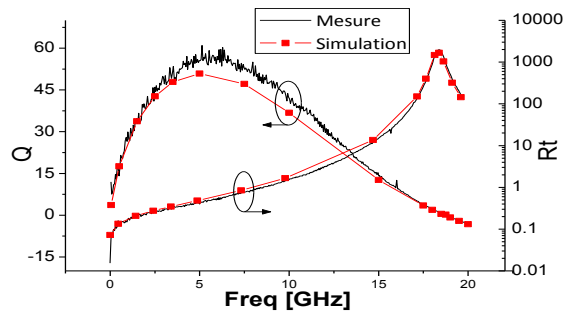


Figure 6: Comparaison entre simulations et mesures de la valeur du coefficient de surtension et de la résistance totale

5. CONCLUSION

Nous avons introduit deux méthodes simples et efficaces de caractérisation large bande de matériaux diélectriques, basées sur l'utilisation de lignes micro-rubans. Leur bonne précision sur une large gamme des dimensions des lignes a été démontrée et ces méthodes ont été ensuite appliquées avec succès pour caractériser la SU-8. La permittivité relative ϵ_r , de 2.85 à 25 GHz et l'angle de perte $\tan\delta$ de 0.04 confère à cette résine un certain intérêt pour les technologies Above-IC pour les fréquences RF. Cette résine a ainsi été utilisée pour l'intégration d'inductances de puissance RF à fort coefficient de qualité Q sur un substrat de silicium très faible résistivité. Les mesures conduisent à un coefficient Q_{\max} de 55 à 5 GHz et démontrent en outre la validité des procédures de caractérisation présentées.+.

6. REFERENCES

- [1] J. Hinojosa, "S-parameter Broad-band Measurements On-microstrip and fast extraction of the substrate Intrinsic Properties". IEEE Microwave and wireless Components letters Vol.11, N°7, July 2001.
- [2] F. D. Mbairi, H. Hesselbom "High Frequency Design and Characterization of SU-8 base Conductor Backed Coplanar Waveguide Transmission Lines", in Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces, 2005. Proceedings. International Symposium on. 2005.
- [3] R. Osorio, M. Klein, H. Massler, J.G. Korvink "Micromachined Strip Line with SU-8 as the Dielectric", 11th GAAS Symposium – Munich 2003.
- [4] W. B. Weir, "Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies" Proceedings of the IEEE, 1974. 62(1): pp. 33-36.
- [5] E. Hammerstad and O. Jensen, "Accurate Models for Microstrip Computer-Aided Design", 1980 IEEE catalog #80CH1545-3MTT, pp 407-409
- [6] I.J. Bahl, R. Garg, "Simple and Accurate formulas for a Microstrip with Finite Strip Thickness" Proceedings of the IEEE, 1977. 65(11): pp. 1611-1612.
- [7] C.G. Boryden, "Quasi-Newton Methods and their Application to Function Minimization" Mathematics of Computation, vol. 21, no. 99. (1967), pp. 368-381.
- [8] Biran C. Wadell, "Transmission line design handbook", Norwood MA: Artech House, 1991.