

## Caractérisation électromagnétique des matériaux pour des applications industrielles jusqu'à 110 GHz

Oumy Ndiaye<sup>1,2,a</sup>, Michaël Charles<sup>2</sup>, Djamel Allal<sup>2</sup> et Bertrand Bocquet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Lille 1- Sciences et Technologies, Cité Scientifique 59655 Villeneuve d'Ascq cedex

<sup>2</sup>Laboratoire National de métrologie et d'Essais, 29 avenue Roger Hennequin, 78197 Trappes cedex

**Abstract.** The microelectronics industry through its development turns towards the miniaturization of devices in monolithic microwave circuits using broad frequency ranges. In order to perform these devices knowledge of the intrinsic properties of materials (permeability, permittivity) is required in most applications. There are different techniques for the extraction of these properties; The resonant methods: they exploit modes of a cavity loaded by a sample; and the non-resonant methods: They exploit a broadband characterization used for transmission lines.

In this paper we introduce a broadband characterization method based on the extraction of the coplanar waveguide (CPW) electromagnetic parameters (characteristic impedance, propagation constant, wafer permittivity, wafer permeability, ...) from the measurement of a kit composed by 5 CPWs with known dimensions. Our analytic process allows too to get the uncertainty budget for each wafer electromagnetic parameters to ensure metrological traceability up to 110 GHz.

### 1 Modèle analytique et définition des longueurs du kit

La ligne coplanaire est très utilisée comme ligne de transmission dans les circuits intégrés micro-ondes monolithiques (MMICs) du fait de ses propriétés électromagnétiques et technologiques. Ainsi avec la miniaturisation des circuits et leur montée en fréquence, l'utilisation des dispositifs MMICs s'avère être pertinente. Dans le cadre de techniques de caractérisations notamment pour les méthodes en lignes de transmission, la ligne coplanaire suscite un réel intérêt car elle représente elle-même une cellule de mesure. En effet, la ligne coplanaire permet l'exécution d'une méthode simple de caractérisation électromagnétique pour les matériaux couche mince car la ligne devient une cellule de mesure intégrant directement l'échantillon.

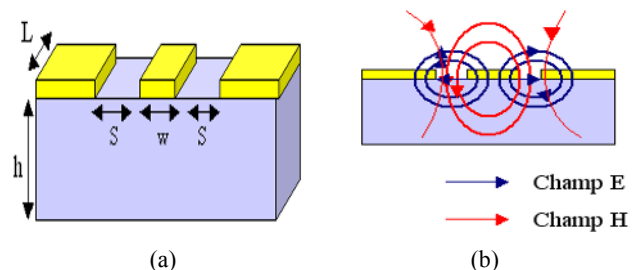
Afin d'établir le comportement électromagnétique de la ligne coplanaire, nous déterminons ses paramètres S (paramètres de réflexion S11 et S22 ; paramètres de transmission S12 et S21) dans la bande de fréquence souhaitée (jusqu'à 110 GHz). La mesure de ces paramètres se fait à l'analyseur de réseau vectoriel, nous permettant ainsi de déterminer à partir de relations analytiques la constante de propagation et l'impédance caractéristique de la ligne coplanaire et donc les propriétés électromagnétiques du substrat ou d'un matériau couche mince placé entre le substrat et la ligne coplanaire. L'avantage de ce type de ligne est qu'elle

offre une caractérisation large bande, elle est adaptée aux mesures en couches minces. Enfin la ligne coplanaire est un guide d'ondes qui est facilement réalisable, qui induit de faibles coûts technologiques et fonctionne sous un mode quasi-TEM peu dispersif malgré la non-homogénéité du milieu (air + substrat) : c'est-à-dire que les champs électrique et magnétique peuvent être considérés comme perpendiculaires à l'axe de la ligne selon lequel s'effectue la propagation.

Il est possible d'optimiser les dimensions de la ligne afin de propager le mode dominant (Quasi-TEM) [1] et d'obtenir une meilleure exactitude des paramètres S mesurés (Figure 1).

Afin de valider notre modèle analytique d'extraction des propriétés électromagnétiques, nous avons choisi de réaliser des lignes coplanaires sur substrat d'Alumine dont les caractéristiques sont données dans [2].

**Figure 1.** Ligne coplanaire (a) et répartition des lignes de champs électrique et magnétique (b)

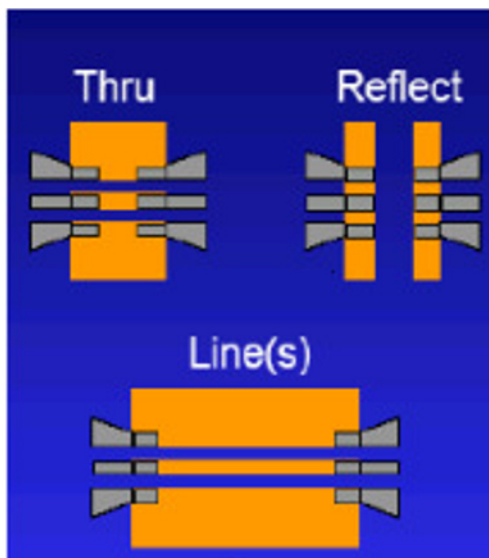


<sup>a</sup> oumy.ndiaye@lne.fr

Avant la mise en œuvre de la fabrication technologique, il s'avère nécessaire de faire une modélisation de la ligne coplanaire étudiée afin de définir ses dimensions géométriques permettant une adaptation à 50 Ω et un fonctionnement optimal sur la bande de fréquence considérée. Ainsi nous avons modélisé sur notre substrat d'Alumine un jeu de cinq lignes aux longueurs compatibles TRL selon la méthode de R. Doerner et al. [3].

La méthode TRL (Thru Reflect Line) est la technique d'étalonnage la mieux adaptée pour la caractérisation de composants pour les mesures sous pointes. Cette technique est basée sur la mesure de trois éléments :

Figure 2. Etalons TRL



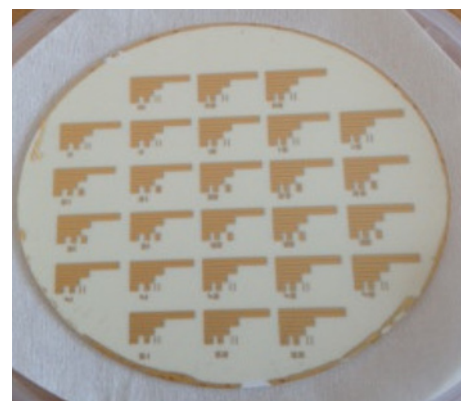
Le **Thru** qui est la connexion directe entre les deux ports de l'analyseur de réseau, sa matrice S ( $S_{11}=S_{22}=0$  ;  $S_{12}=S_{21}=1$ ) étant connue si l'impédance caractéristique des deux ports est identique. Le **Reflect** est un quadripôle virtuel à fort coefficient de réflexion constitué de deux charges identiques mais inconnues (CC ou CO). Quant au **Line** il s'agit d'une ligne de transmission adaptée avec une matrice S partiellement connue ( $S_{11}=S_{22}=0$ ) et un facteur de transmission inconnu déterminé lors de l'étalonnage.

La longueur de la ligne **Line** doit être de telle sorte qu'elle soit différente de la connexion **Thru** ; la longueur doit correspondre à un déphasage compris entre 20° et 160°. L'idéal étant un déphasage de 90° car cette valeur permet un meilleur étalonnage.

Figure 3. Topologie des kits TRL sur substrat d'Alumine



Figure 4. Substrat d'Alumine avec lignes coplanaires



## 2 Caractérisation des lignes coplanaires par méthode analytique

L'extraction des propriétés électromagnétiques requiert la connaissance des paramètres S aux accès de la ligne coplanaire. Pour ce faire, nous définissons algébriquement les paramètres S à partir des paramètres R, L, G et C de la ligne coplanaire puis, à partir de ces valeurs, notre algorithme développé sous MATLAB détermine les propriétés électromagnétiques du substrat d'Alumine.

Le mode de propagation Quasi-TEM (composantes longitudinales des champs électriques et magnétiques quasi nulles) ainsi que le caractère peu dispersif des lignes nous permettent d'écrire les relations suivantes [1]:

$$\epsilon_{\text{reff}} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K(k1)}{K(k'1)} \frac{K(k'0)}{K(k0)} \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \frac{C}{2\epsilon_0} - F_{up} \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \frac{C}{Flow}$$

avec :  $\epsilon_r$  permittivité relative du substrat ;  $K(k_0)$  et  $K(k_1)$  intégrales elliptiques du premier ordre ;  $K(k'_0)$  et  $K(k'_1)$  intégrales elliptiques du second ordre ;  $k_0, k_1, k'_0$  et  $k'_1$  coefficients qui dépendent des propriétés géométriques de la ligne coplanaire ;  $C$  composante capacitive de la ligne coplanaire ;  $F_{up}$  et  $F_{low}$  plus amplement détaillées dans [1].

$$\mu_r = -j \frac{1}{\omega L \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \left( \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \right) \left( \frac{Z_0}{Z'_0} \right) \ln(T) \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{Z_0 - Z_c}{Z_0 + Z_c} \quad (4)$$

avec :  $\Gamma$  coefficient de réflexion à l'entrée de la cellule coplanaire ;  $T$  coefficient de transmission le long de la ligne coplanaire ;  $Z_0$  impédance caractéristique de la ligne coplanaire sous test ;  $Z'_0$  impédance caractéristique de cette dernière lorsque  $\epsilon_r=1, \mu_r=1$  [4].

Les résultats des simulations de la permittivité et de la perméabilité de lignes coplanaires sur substrat d'Alumine sont présentés ci-dessous.

Les figures 5(a) et 5(b) montrent une constance des résultats de mesures de la permittivité effective et de la perméabilité sur toute la bande de fréquence.

La courbe de la permittivité effective de la Figure 5(a) obtenue à partir de l'équation (1) peut être comparée et validée à partir de la formule suivante dans le cas de l'Alumine :

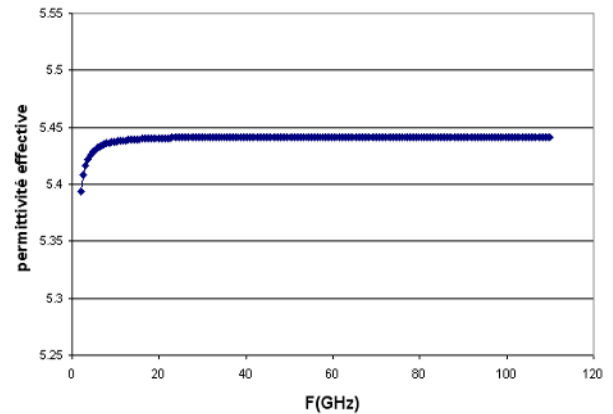
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} = 5,45 \quad (6)$$

L'observation de la Figure 5(b) illustre également que la perméabilité obtenue avoisine la valeur de l'état de l'art ( $\mu_r=1$ ).

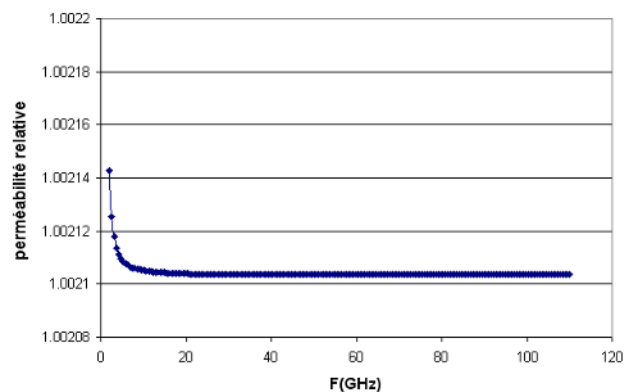
La valeur fabricant de la permittivité relative ( $\epsilon_r=9,9$ ) est aussi retrouvée sur toute la bande de fréquence à partir de l'algorithme développé sous MATLAB [2].

Les résultats obtenus nous permettent donc de valider notre algorithme.

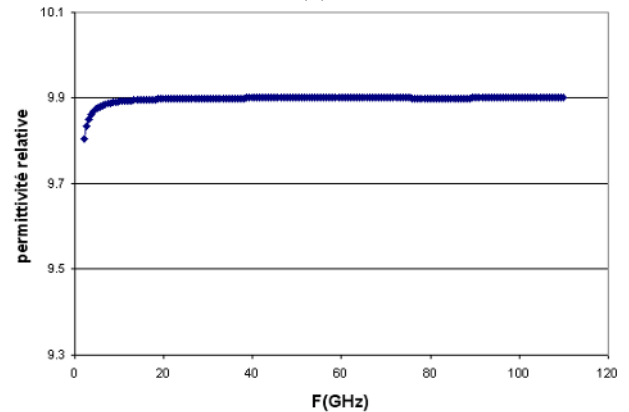
**Figure 5.** Résultats des simulations issues de notre algorithme : permittivité effective (a) , perméabilité relative (b) , et permittivité relative (c) d'une ligne coplanaire sur substrat d'Alumine ( $\epsilon_r=9,9$ ,  $W=60 \mu\text{m}$ ,  $S=28 \mu\text{m}$ ,  $h=635 \mu\text{m}$ ).



(a)



(b)



(c)

### 3 Caractérisation des lignes coplanaires à l'analyseur de réseau vectoriel

L'extraction des propriétés électromagnétiques de nos lignes coplanaires en large bande se fait via l'analyseur de réseau vectoriel. Nous effectuons des mesures brutes des paramètres S sur les lignes coplanaires (5 lignes au total), ce qui nous permet de définir la matrice de mesure M suivante [5] :

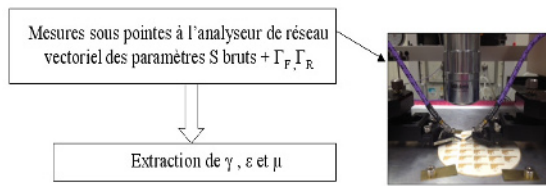
$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_{11} = \frac{S_{21m}S_{12m} - S_{11m}S_{22m}}{S_{21m}(1 - S_{22m}\Gamma_F)} & M_{12} = \frac{S_{11m} - S_{12m}S_{21m}\Gamma_F}{S_{21m}(1 - S_{22m}\Gamma_F)} \\ M_{21} = \frac{-S_{22m} + S_{12m}S_{21m}\Gamma_R}{S_{21m}(1 - S_{22m}\Gamma_F)} & M_{22} = \frac{1 - S_{12m}S_{21m}\Gamma_F\Gamma_R}{S_{21m}(1 - S_{22m}\Gamma_F)} \end{pmatrix} \quad (7)$$

où  $\Gamma_R$  et  $\Gamma_F$  correspondent respectivement aux facteurs de réflexion des ports 1 et 2 de l'analyseur de réseau.

Ainsi nous utilisons la méthode TL (Thru -Line) appliqué à notre algorithme Matlab pour la caractérisation des lignes coplanaires. Cette méthode consiste à faire une analyse de la constante de phase ainsi que de la constante d'atténuation sur les différents couples de lignes de notre substrat (10 couples dans notre cas) afin de prendre par la suite les résultats les plus probants sur toute la bande de fréquence. Nous arrivons ainsi à extraire la constante de propagation qui nous permettra par la suite d'obtenir la permittivité et la perméabilité du matériau.

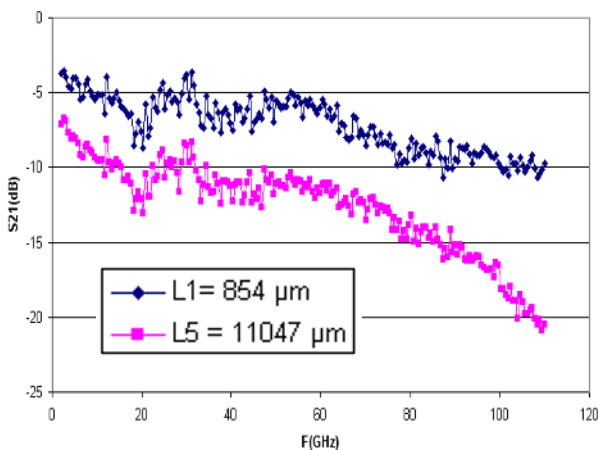
La figure 6 schématise le processus d'extraction des paramètres électromagnétiques de notre matériau :

**Figure 6.** Synoptique de l'extraction des propriétés électromagnétiques



Nous présentons ci-dessous les résultats expérimentaux de l'amplitude ainsi que de la phase du facteur de transmission de deux lignes de notre substrat d'Alumine.

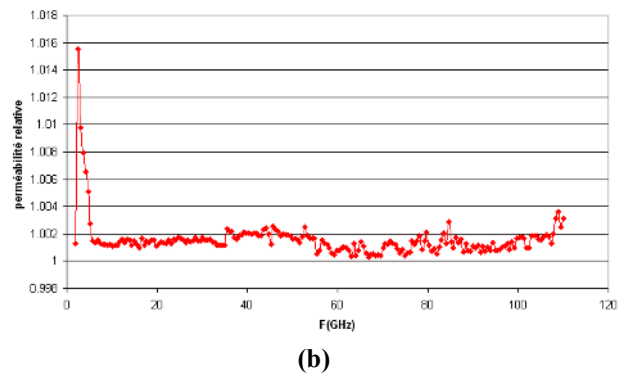
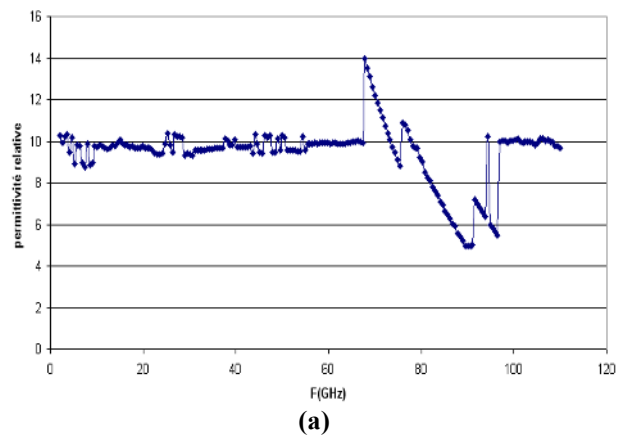
**Figure 7.** Résultats expérimentaux de l'amplitude du facteur de transmission pour 2 lignes coplanaires de longueurs différentes sur substrat d'Alumine



Les résultats de la figure 7 nous montrent une tendance similaire de l'amplitude en fonction de la fréquence pour les deux différentes longueurs. Nous constatons une atténuation plus prononcée pour la ligne la plus longue (L5=11047μm), ce qui correspond à un comportement normal dû à l'augmentation des pertes le long d'une ligne.

Les résultats des paramètres électromagnétiques du substrat d'Alumine jusqu'à 110 GHz sont présentés en figure 8.

**Figure 8.** Résultats expérimentaux de la permittivité (a) et de la perméabilité (b) d'une ligne coplaire sur substrat d'Alumine



Les résultats des paramètres électromagnétiques du substrat d'Alumine présentés en Figure 8 montrent qu'il y a concordance entre simulation et mesure jusqu'à 67 GHz en ce qui concerne la permittivité (Figure 7 (a)). Entre 67 GHz et 97 GHz nous constatons des sauts de phase générés par le manque d'une ligne supplémentaire dans notre kit afin de couvrir la différence de phase à  $90^\circ + k \times 180^\circ$  ( $k \in \mathbb{Z}$ ). Au delà de 97 GHz nous retrouvons à nouveau des résultats satisfaisants qui concordent avec la théorie.

De manière générale nous constatons aussi des résultats probants pour la perméabilité qui oscille autour de 1 sur toute notre bande de fréquence.

Le tableau ci-dessous est un comparatif des résultats entre simulation et mesure à 50 GHz.

**Tableau 1.** Comparatif entre simulation et mesure à 50 GHz

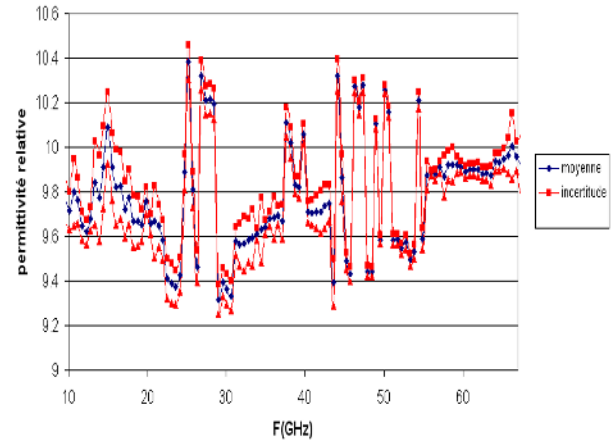
Longueurs des lignes coplanaires ( $\mu\text{m}$ )	Simulation		Mesure	
	$\epsilon_r$	$\mu_r$	$\epsilon_r$	$\mu_r$
L1 = 854 $\mu\text{m}$ L2 = 1416 $\mu\text{m}$ L3 = 4169 $\mu\text{m}$ L4 = 5822 $\mu\text{m}$ L5 = 11047 $\mu\text{m}$	9,9	1,002	10,26	1,002

Ce tableau comparatif montre que l'on obtient des résultats probants en ce qui concerne les propriétés électromagnétiques. A ce stade nous sommes en mesure de pouvoir extraire la permittivité et la perméabilité de substrats dont les propriétés sont connues. La seconde étape consiste à insérer un matériau dont les propriétés nous sont totalement inconnues entre les plans de métallisations de la ligne coplanaire et le substrat afin d'en extraire les propriétés électromagnétiques.

#### 4 Calcul d'incertitudes

L'analyse de l'ensemble des composantes d'incertitudes de notre système nous a permis d'évaluer les principales sources d'erreurs propagées sur la valeur mesurée. De manière générale le calcul s'appuie sur la loi de propagation des incertitudes qui elle est basée sur un développement de Taylor appliqué aux équations du système. Compte tenu de la complexité de nos équations analytiques, la simulation de Monte Carlo s'avère être une alternative pour l'évaluation de l'incertitude de mesure. En effet par cette méthode il ne s'agit plus de propager l'incertitude mais la densité de probabilité des grandeurs d'entrées afin de d'obtenir la densité de probabilité associée au mesurande [6]. Nous présentons à la figure 9 les résultats avec les incertitudes associées jusqu'à 67 GHz pour la permittivité relative. On observe que entre 10 GHz et 67 GHz la valeur de la permittivité relative varie entre 9,32 et 10,38.

**Figure 9.** Modélisation graphique de la permittivité et de son incertitude associée ( $k=2$ )



#### 5 Conclusion et Perspectives

Une technique permettant d'obtenir les propriétés électromagnétiques d'une ligne coplanaire sur une bande de fréquence allant jusqu'à 110 GHz a été développée dans cet article. Les résultats obtenus en simulation puis en mesure nous permettent de valider notre algorithme développé sous MATLAB et de nous projeter sur la caractérisation des propriétés électromagnétiques de topologies coplanaires plus complexes à l'image de films minces (ferroélectriques, multiferroïques, piézo-électriques) intégrés entre la ligne coplanaire et le substrat.

#### References

- 1 W.Heinrich, "Quasi-TEM description of MMIC coplanar lines including conductor loss effect", IEEE transaction on microwave theory and techniques, vol.41.N0.1, January 1993.
- 2 Caractéristiques fabricant: Alumine: Impak ([www.impaklaser.com](http://www.impaklaser.com))
- 3 R.Doerner, A.Rumianstev, "Verification of the wafer-level LRM+Calibration technique for GaAs applications up to 110 GHz", 65<sup>th</sup> ARFTG Conference, Spring 2005
- 4 J.Hinojosa, "S-parameter broadband Measurements on-coplanar and Fast extraction of the substrate intrinsic properties", IEEE microwave and wireless letters, vol.11,N0.2, February 2001.
- 5 D.Allal, "Raccordement des mesures de DAS",Rapport d'étude LNE, Février 2012
- 6 M.Desenfant et al., "Evaluation de l'incertitude en utilisant les simulations de Monte Carlo",13<sup>ème</sup> congrès international de métrologie,2007.