



HAL
open science

Méthode de caractérisation large bande de fréquence de matériaux isolants par contact direct “ sonde de mesure / échantillon ”

Thierry Lacrevez, David Auchère, Grégory Houzet, Philippe Artillan, Bernard Flechet, Cédric Bermond, Benjamin Blampey

► To cite this version:

Thierry Lacrevez, David Auchère, Grégory Houzet, Philippe Artillan, Bernard Flechet, et al.. Méthode de caractérisation large bande de fréquence de matériaux isolants par contact direct “ sonde de mesure / échantillon ”. Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux (JCMM), Mar 2018, Paris, France. hal-01939115

HAL Id: hal-01939115

<https://hal.science/hal-01939115>

Submitted on 29 Nov 2018

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.

Méthode de caractérisation large bande de fréquence de matériaux isolants par contact direct « sonde de mesure / échantillon »

Thierry Lacrevaz¹, David Auchère², Grégory Houzet¹, Philippe Artillan¹, Bernard Flechet¹, Cedric Bermond¹, Benjamin Blampey¹

¹ IMEP-LAHC, 73376 Le Bourget du Lac Cedex, France

² STMicroelectronics, 12 rue Jules Horowitz, F-38019 Grenoble Cedex, France

thierry.lacrevaz@univ-smb.fr

Résumé — Nous proposons une technique de caractérisation à hautes fréquences (1 GHz à 67 GHz) de matériaux diélectriques très simple à mettre en œuvre et très bien adaptée à l'extraction de tangentes de pertes inférieures à 10^{-2} . La méthode repose sur deux mesures en réflexion réalisées avec une sonde coplanaire (GSG microprobe), très couramment utilisée en instrumentation hyperfréquence, à l'aide d'un analyseur de réseau préalablement calibré avec un substrat dédié. Une mesure est effectuée avec la sonde directement posée sur le matériau sous test, ce dernier ne nécessitant pas de préparation particulière, l'autre mesure est faite avec la sonde baignant dans l'air. Un calcul rapide permet alors d'extraire la permittivité complexe du matériau sous test.

Mots clés — Permittivité, pertes, tangente de pertes, matériaux isolants, technique de caractérisation, haute fréquence, circuits intégrés, microélectronique.

I- INTRODUCTION

Des performances élevées pour les systèmes électroniques, composés de circuits intégrés (C.I.), de leur boîtier et des cartes qui les accueillent, sont désormais nécessaires sur des gammes de fréquences toujours plus hautes, désormais bien au-delà de la dizaine de GHz. En particulier, les dernières technologies d'appareils électroniques, comme les smartphones, proposent des applications multimédia qui requièrent l'implémentation de C.I. dont les vitesses de fonctionnement doivent sans cesse décroître [1]. Dans un contexte où la concurrence entre les différents fabricants de C.I. repose sur le fait de proposer des circuits de conception fiable [2], des coûts limités et des délais de mise sur le marché réduits, les concepteurs doivent avoir à disposition les outils et les données nécessaires pour asseoir des développements efficaces. Ils ont, entre autres, l'impératif de connaître avec précision les propriétés électriques des matériaux isolants déposés en couche qui composeront ces C.I. (Fig. 1) et les cartes électroniques.

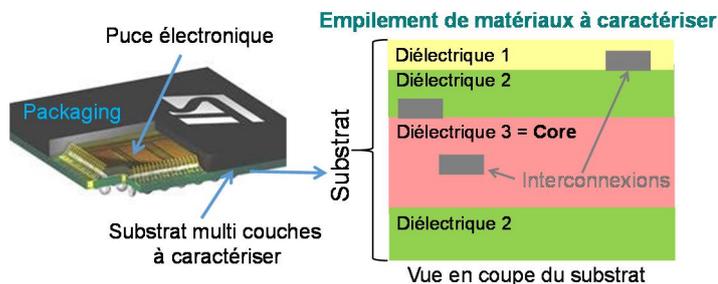


Figure 1 : Matériaux isolants d'un substrat recevant une puce dans C.I. à caractériser.

En particulier, la connaissance du comportement de la permittivité complexe sur des gammes de fréquences allant jusqu'à 70 GHz est essentielle pour opérer les optimisations souhaitées.

II- OBJECTIFS

Dans le cas où sont réunies les contraintes de travail aux fréquences élevées (au-delà de 40 GHz) et un environnement technologique d'intégration poussée, il s'avère alors toujours

très délicat d'extraire les caractéristiques électriques d'un matériau à faibles pertes ($\tan\delta < 10^{-2}$). Les méthodes de caractérisation en cavité sont peu compatibles avec une caractérisation du matériau dans son environnement réel d'utilisation. D'autre part, pour le cas de techniques en ligne de transmission, le paramètre G (conductance linéique de la ligne) témoignant entre autres des pertes du matériau sous test, devient très peu influant sur les grandeurs (paramètres S) mesurées dès que la fréquence s'élève. Ceci est de nature à favoriser les erreurs et les incertitudes durant le processus d'extraction des pertes.

Outre l'extraction de la partie réelle de la permittivité, nous proposons une technique de caractérisation de couches de matériaux diélectriques isolants qui s'avère très bien adaptée à l'analyse des pertes d'un matériau au regard de la gamme de fréquence visée (1 GHz - 67 GHz). Cette technique, simple à mettre en œuvre, repose sur la mise en contact d'une sonde de mesure hyperfréquence (micro-probe), de type GSG (Ground Signal Ground), directement sur le matériau sous test. Nous déversons l'usage habituel de ces sondes puisqu'elles sont fabriquées pour être mises en contact avec les métallisations d'accès aux dispositifs microondes et guider électriquement un signal hyperfréquence. D'autre part cette technique de caractérisation ne nécessite pas la réalisation de métallisations, ni de dispositifs d'épluchage (de-embedding), et les étapes de calcul ou de retro-simulation sont très légères. Ces trois aspects permettent de minimiser l'introduction d'erreurs systématiques ou aléatoires dans le processus d'extraction.

III- PRINCIPES DE LA TECHNIQUE DE CARACTERISATION

La technique qui est mise en œuvre s'appuie sur deux mesures hyperfréquences. Elles sont réalisées au moyen d'un analyseur vectoriel de réseau (VNA) Agilent PNA-X N5247A préalablement calibré à l'aide d'un substrat de calibrage du commerce, sur la gamme 1 GHz - 67 GHz. La première mesure est opérée en posant la sonde de mesure hyperfréquence GSG directement sur le matériau à caractériser. L'autre mesure s'effectue avec cette sonde relevée : la sonde se trouve dans l'air (Fig. 2). Deux jeux de paramètres S en réflexion sont donc obtenus. Au préalable le calibrage du VNA, de type LRRM à 50 Ohms, a permis de positionner le plan de référence des mesures au niveau des extrémités des pointes de la sonde (Fig. 2). Pour les deux mesures (sonde posée et relevée), les modèles électriques considérés sont ceux décrits en figure 2. Ces modèles sont établis en prenant l'hypothèse d'un mur magnétique situé sur le plan de référence de la mesure [3]. Cette hypothèse a été vérifiée au moyen d'une modélisation électromagnétique 3D et full-wave. Y_{top} constitue l'admittance qui englobe les erreurs (très faibles mais à prendre absolument en compte pour extraire ensuite avec précision les pertes du matériau sous test) résiduelles systématiques du calibrage LRRM du VNA. Y_{air} et Y_{mat} représentent les admittances dues respectivement à l'air situé sous le plan de référence et au matériau à caractériser.

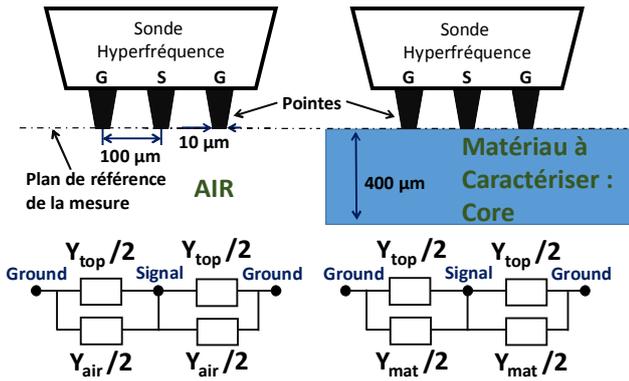


Figure 2 : Descriptif des deux configurations de mesure et des modèles électriques associés.

A partir des paramètres S_{11} mesurés, on peut en déduire les deux admittances globales $Y_{\text{mesu_posée}}$ et $Y_{\text{mesu_levée}}$. Ces deux dernières sont liées à Y_{top} , Y_{air} et Y_{mat} par les relations suivantes :

$$Y_{\text{mesu_levée}} = Y_{\text{top}} + Y_{\text{air}} \quad \text{et} \quad Y_{\text{mesu_posée}} = Y_{\text{top}} + Y_{\text{mat}} \quad (1)$$

Nous tirons parti d'un processus différentiel par le lequel nous pouvons éliminer les erreurs de calibrage associées à Y_{top} . Une soustraction entre $Y_{\text{mes_posée}}$ et $Y_{\text{mes_levée}}$ conduit à obtenir les relations équivalentes suivantes :

$$\Delta Y_{\text{mesu}} = Y_{\text{mesu_posée}} - Y_{\text{mesu_levée}} = Y_{\text{mat}} - Y_{\text{air}} \quad (2)$$

Les admittances Y_{mat} et Y_{air} s'expriment en fonction des propriétés électriques respectives du matériau à caractériser et de l'air telles que :

$$Y_{\text{mat}} = G_{\text{mat}} + j C_{\text{mat}} \omega = \sigma_{\text{mat}} \text{fact}_{\text{Dim}} + j \epsilon_{\text{mat}} \epsilon_0 \text{fact}_{\text{Dim}} \omega \quad (3)$$

$$Y_{\text{air}} = j C_{\text{air}} \omega = j \epsilon_0 \omega \text{fact}_{\text{Dim}} \quad (4)$$

Avec :

- σ_{mat} et ϵ_{mat} , la conductivité et la permittivité relative du matériau à caractériser.
- fact_{Dim} , facteur homogène à des mètres qui est lié à la géométrie et aux dimensions des pointes de la sonde (distance entre les pointes et surface de leurs extrémités)

En reportant (3) et (4) dans (2), nous obtenons la relation suivante :

$$\Delta G_{\text{mesu}} + j \Delta C_{\text{mesu}} \omega = \sigma_{\text{mat}} \text{fact}_{\text{Dim}} + j \omega (\epsilon_{\text{mat}} \epsilon_0 - \epsilon_0) \text{fact}_{\text{Dim}} \quad (5)$$

On note que le terme fact_{Dim} restera le même quel que soit le matériau sous test si l'on prend l'hypothèse (vérifiée par modélisation électromagnétique) d'un comportement quasi-statique des champs électromagnétiques [3].

Avec la relation (5) on remarque que si le facteur fact_{Dim} est connu, alors on peut déduire la permittivité relative ϵ_{mat} et la conductivité σ_{mat} du matériau sous test, les termes restants de (5) étant tous connus.

Trois solutions peuvent être envisagées pour déterminer fact_{Dim} : soit appliquer la technique présentée à un matériau étalon dont on connaît avec une bonne précision la permittivité réelle, soit utiliser une modélisation électromagnétique (HFSS Ansys), soit utiliser conjointement la méthode proposée et une technique en ligne de transmission pour caractériser le substrat ISS 101-190C dédié au calibrage du VNA. Pour ce résumé nous avons opéré selon la troisième solution qui repose sur le processus décrit ci-après. Un technique en ligne de transmission [4] nous permet d'extraire la permittivité réelle du substrat de calibrage en mesurant les lignes disponibles sur l'ISS 101-190C. La permittivité réelle extraite est alors injectée dans la relation (5) afin d'en déduire le terme fact_{Dim} . Préalablement, une mesure du

substrat par contact direct de la sonde est réalisée afin de pouvoir appliquer la relation (5). L'intérêt d'utiliser le substrat de calibrage est double : déterminer le terme fact_{Dim} et ne pas avoir besoin de concevoir des lignes de transmission sur le matériau qui est à caractériser.

IV- RESULTATS

La figure 3 présente un résultat de caractérisation à titre d'illustration. Il concerne deux extractions successives de la tangente de pertes du matériau nommé « Core » utilisé en microélectronique. Ce dernier entre dans la fabrication de substrats (Fig.1) sur lesquels des puces électroniques sont montées avant le « packaging » du circuit intégré.

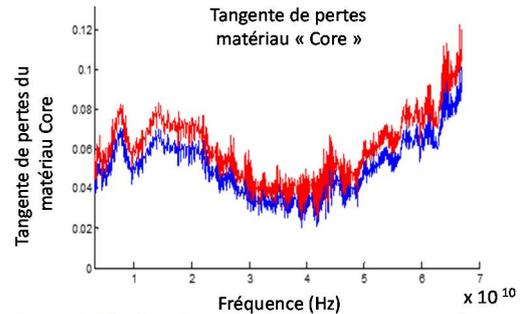


Figure 3 : Résultat de deux extractions successives de la Tangente de pertes du matériau Core.

Le fabricant a fourni peu de données sur la permittivité et les pertes du matériau « Core » : une permittivité relative de l'ordre de 5 jusqu'à 40 GHz et une tangente de pertes de 0.02 à 8 GHz. Sur la bande de fréquence 1 GHz à 67 GHz, la conductivité du matériau Core extraite par la technique proposée conduit à une tangente de pertes (Fig.3) centrée autour d'une valeur moyenne de 0.05. En ce qui concerne la permittivité relative du Core, nous avons obtenu une valeur relativement stable située autour de 5.7.

V- CONCLUSION ET PERSPECTIVES.

Nous avons mis en œuvre une technique de caractérisation large bande de fréquence (1GHz - 67GHz) de matériaux par contact direct « sonde de mesures / matériau ». Elle présente l'avantage d'une grande facilité de mise en œuvre technique et de calcul pour l'extraction de la permittivité complexe d'un matériau diélectrique. Une très bonne précision est obtenue pour des tangentes de pertes inférieures à 10^{-2} . Elle permet d'analyser des matériaux dédiés à la microélectronique mais aussi ceux se présentant sous forme plus massive.

En termes de perspectives, plusieurs travaux sont en cours. En particulier, des travaux qui concernent la détermination du terme fact_{Dim} (relation (5)) par des mesures supplémentaires effectuées sur le matériau par contact direct.

RÉFÉRENCES

- [1] International Technology Roadmap for Semiconductors 2.0 - 2015 Edition - Executive Report. [Online] Available : <https://www.semiconductors.org>.
- [2] Thèse de doctorat de M. Garci, « Simulation multi-physiques de circuits intégrés pour la fiabilité », Université de Strasbourg, 20 Mai 2016,
- [3] S. Gevorgian, H. Berg, H. Jacobson, T. Lewin, « Basic Parameters of Coplanar-Strip Waveguides on Multilayer Dielectric/Semiconductor Substrates Part 2: Low permittivity Substrates », Application Notes, IEEE Microwave magazine, Volume: 4, Issue: 3, Sept. 2003.
- [4] T. Lacrevez, C. Bermond, O. El Bouayadi, G. Houzet, P. Artillan, Y.Lamy, K. Dieng, B. Fléchet, « Electrical Broadband Characterization Method of Dielectric Molding in 3-D IC and Results », IEEE Transactions On Components, Packaging And Manufacturing Technology, Vol. 4, No. 9, Sept. 2014.