

RE-ENTRANT CAVITY FOR MATERIALS CHARACTERISATION

APEDJINOU Anoumou¹, PASSERIEUX Damien¹, MADRANGEAS Valérie¹, CROS Dominique¹

¹ Univ. Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France

Abstract: The re-entrant cavity, or klystron cavity, is used in this application to determine the dielectric permittivity of materials. One of the advantages of this structure is that it allows a characterization at low frequencies for small sample sizes. The other important point is that this device associated with an original coupling system, leads to information that can determine both the permittivity and the thickness of the sample under test.

Keywords: Klystron cavity, material characterization, complex permittivity.

1. INTRODUCTION

Aux hautes fréquences ($f > 1\text{GHz}$), les méthodes de caractérisation des paramètres électriques des matériaux ont pour la plupart deux inconvénients majeurs. En effet, il est en général nécessaire d'une part de disposer d'échantillons de larges dimensions et d'autres part de connaître avec précision leurs épaisseurs. Nous proposons donc dans cette étude, une nouvelle méthode de caractérisation de matériaux qui permet à partir de mesures de déterminer simultanément l'épaisseur et la permittivité de l'échantillon. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation d'une cavité résonante de géométrie particulière et d'un système de couplage adapté. Comme pour toute méthode résonante, le principe nécessite une mesure à vide et une en charge en présence de l'échantillon. Par contre, contrairement aux méthodes traditionnelles, la procédure s'appuie sur une étude en oscillations forcées.

L'analyse des paramètres "S" devient donc le cœur de la résolution. Pour s'affranchir de méthodes numériques lourdes, nécessitant des temps de calculs importants, nous avons dans un premier temps mis en place un système de couplage de la cavité original, qui conserve la symétrie de révolution de la structure. Cela permet d'obtenir des résultats de simulations quasiment en temps "réel". Nous avons également mis au point un schéma équivalent global de la structure couplée qui nous permet de reproduire fidèlement la réponse en transmission du dispositif. Cela permet d'identifier les pertes de la structure, de les supprimer par simulation et donc de revenir à une réponse sans pertes qui est beaucoup plus facile à analyser et à optimiser.

Au final, la méthode permet de déterminer d'une part les propriétés diélectriques à basses fréquences d'échantillons de faibles dimensions latérales et d'autre part leurs épaisseurs.

2. ANALYSE EN OSCILLATIONS LIBRES, FREQUENCES DE RESONANCES

La structure analysée est présentée sur la figure 1a. Elle est composée de deux tronçons de lignes coaxiales cylindriques court-circuitées de longueurs h placées en vis à vis pour créer un gap g entre les deux âmes centrales.

L'analyse des fréquences de résonances de la structure a été réalisée à l'aide d'un outil de simulation électromagnétique basé sur la méthode des lignes. La cavité possède un rayon $R_c = 10\text{ mm}$ et des plots de hauteur $h = 2\text{ mm}$ et de rayon $R_p = 3\text{ mm}$. En faisant varier l'épaisseur du gap g , nous avons relevé les deux premières fréquences de résonances de la structure. Sur les courbes de la figure 1(b) on peut observer que lorsque g devient très supérieur à h , les deux modes convergent respectivement vers les modes TM_{011} et TM_{010} de la cavité. A l'inverse, lorsque g devient très faible, le deuxième mode s'assimile au mode TEM présent dans la structure

coaxiale demi-onde, alors que le premier mode tend vers une fréquence de résonance nulle car il n'est limité par aucune fréquence de coupure.

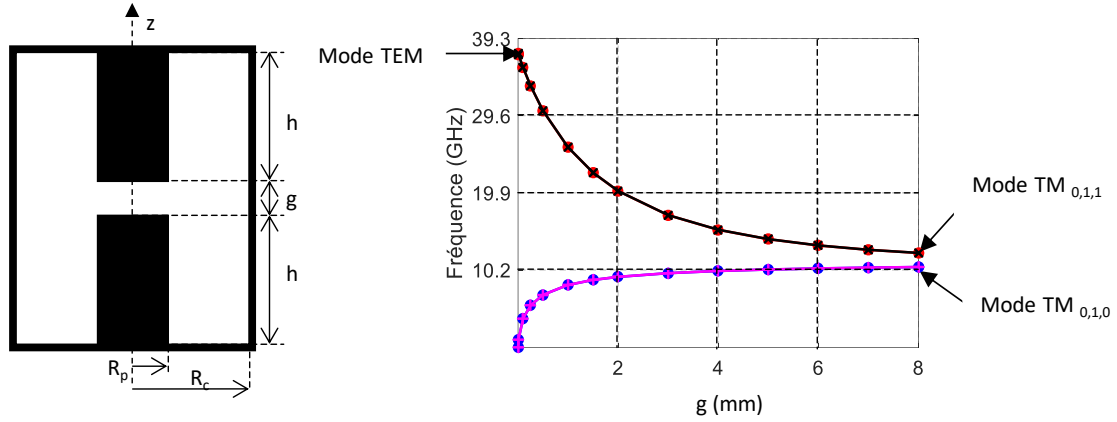


Fig.1. (a) Cavité réentrante analysée. (b) Fréquences de résonance des deux premiers modes

Pour le premier mode de résonance, des fréquences de résonances très basses sont atteintes pour de faibles valeurs du gap g alors que les dimensions de la structure sont très inférieures à la longueur d'onde.

3. ANALYSE EN OSCILLATIONS FORCEES

3.1. Système de couplage

Différents systèmes de couplage, utilisant des sondes coaxiales ont été analysés. La solution retenue est celle présentée sur la figure 2(a) qui a l'avantage de conserver la symétrie de révolution de la structure. Pour cela les sondes coaxiales électriques sont placées dans l'axe des plots centraux.

Avec cette structure la réponse en transmission globale ($|S_{21g}|$), présente une allure particulière avec une fréquence de résonance, notée Fr , une fréquence d'antirésonance, Far , et un point particulier à la fréquence Fi où il est possible d'observer un point d'inflexion de la courbe (figure 2(b)). Ce type de réponse traduit un effet le couplage direct entre les deux sondes d'excitations ($|S_{21d}|$) sur lequel se superpose la résonance de la cavité ($|S_{21c}|$). Le couplage, et donc la position des sondes, a donc un impact sur les valeurs des fréquences de résonance et d'antirésonance.

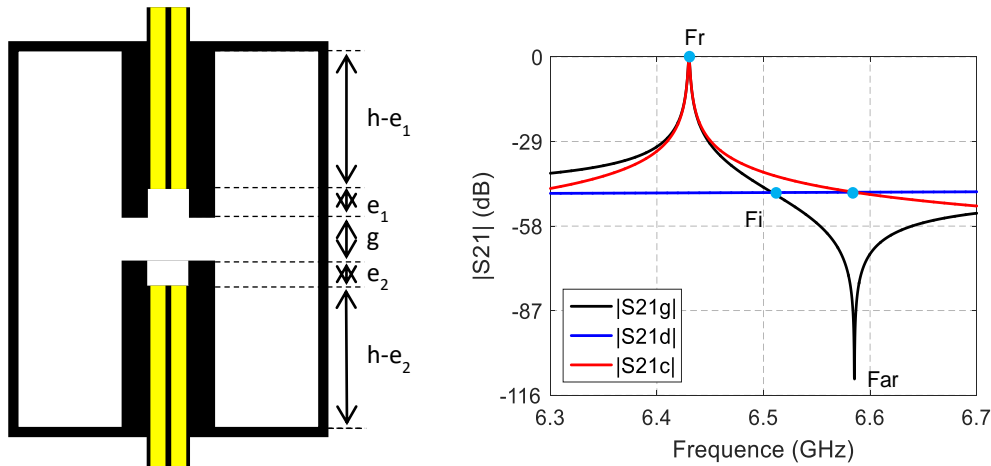


Fig.2. (a) Système de couplage de la cavité. (b) Réponses en fréquence de la cavité

3.2 Schéma équivalent

Pour étudier le système, nous avons établi un schéma équivalent du dispositif en faisant apparaître les impédances des deux lignes coaxiales court-circuitées ramenées dans le plan du gap (figure 3a).

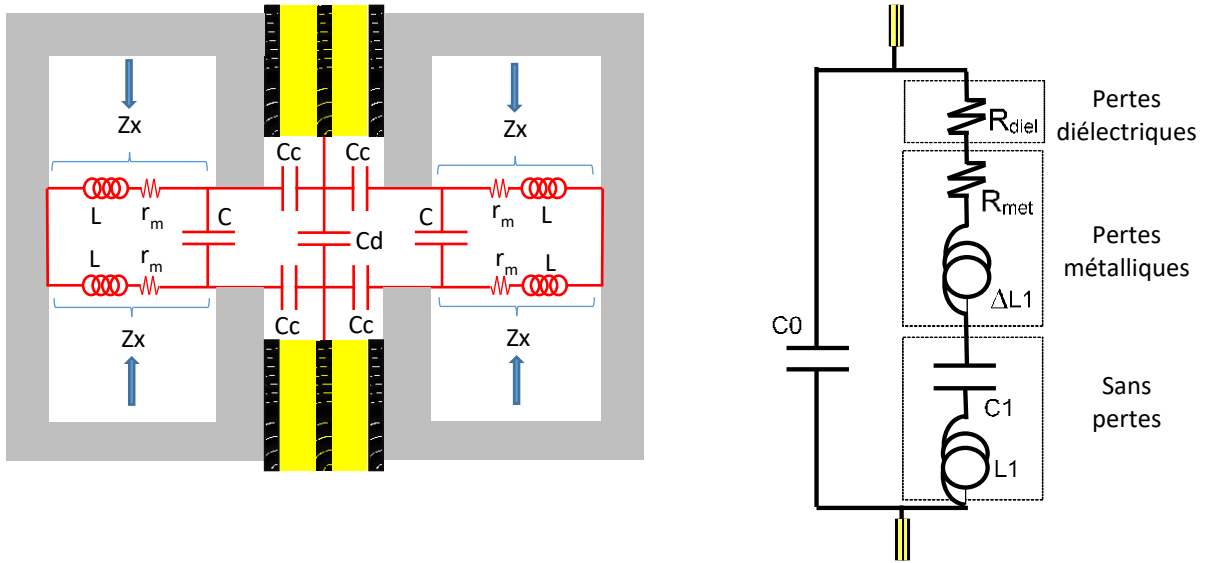


Fig.3. (a) Schéma équivalent distribué de la structure. (b) Schéma équivalent simplifié de la structure

Une analyse électromagnétique montre simplement que pour les impédances \$Z_x\$ de la figure 3(a), les parties réelle et imaginaire dues aux pertes métalliques sont égales et il est possible d'écrire :

$$Z_x = r_m + j L \omega = r_m + j (L - L_{sp}) \omega + j L_{sp} \omega \quad \text{avec} \quad r_m = (L - L_{sp}) \omega \quad (1)$$

Il est alors très simple de supprimer l'effet des pertes métalliques dans le schéma équivalent et d'obtenir la réponse en transmission du dispositif sans pertes.

Pour des raisons de simplicité, une autre forme de schéma équivalent (figure 3(b)) sera utilisé dont l'équivalence peut facilement être calculée avec celui de la figure 3a.

4. APPLICATION A LA CARACTERISATION DE MATERIAUX

4.1 Cavité vide

La caractérisation de la cavité vide consiste à déterminer les valeurs du gap \$g\$ entre les plots, de la position des sondes représentées par les distances \$e_1\$ et \$e_2\$ (figure 2a) et de la conductivité \$\sigma\$ du métal. Pour cela la mesure de la réponse en transmission de la cavité est effectuée sur une bande de fréquence laissant apparaître les fréquences de résonances et d'antirésonances. De cette réponse, il est possible de déterminer les éléments du schéma équivalent établi dans le paragraphe précédent (figure 3(b)) où l'absence de diélectrique conduit à \$R_{diel} = 0\$. On peut alors déduire la réponse sans pertes de la structure, en éliminant la contribution de \$\Delta L_1\$ et \$R_{met}\$ dus aux pertes métalliques. Cette réponse sans pertes sert alors de modèle à une optimisation électromagnétique des grandeurs \$g\$, \$e_1\$ et \$e_2\$ permettant d'obtenir les mêmes fréquences de résonance et d'antirésonance. Lorsque ces grandeurs sont déterminées, il suffit d'introduire la conductivité \$\sigma\$ du métal pour retrouver la réponse expérimentale avec pertes.

Un exemple de résultat est donné dans le tableau 1, pour une cavité de dimensions : \$R_c = 10\$ mm, \$R_p = 3\$ mm et \$h = 2\$ mm.

Tableau 1. Exemple de caractérisation à vide de la cavité.

	Expérimentation	Schéma équivalent avec pertes	Analyse électromagnétique avec pertes		
			\$e_1 = e_2\$ (mm)	\$g\$ (mm)	\$\sigma\$ (S/m)
			0.40849	1.18968	193086
Fr (GHz)	7.483	7.483		7.482	
Far (GHz)	7.813	7.811		7.811	
Q	213	225		217	

4.2 Etude de la cavité chargée – Caractérisation de matériaux

Pour déterminer les caractéristiques électriques d'un échantillon diélectrique, celui-ci est placé entre les deux plots de la cavité. A ce stade de l'étude, les inconnues du problème sont l'épaisseur et la permittivité complexe de l'échantillon. Le principe de résolution suit la même méthodologie que dans le cas de la cavité vide. Les valeurs des éléments du schéma équivalent sont déduites de la mesure de la réponse en transmission de la cavité chargée. Connaissant la valeur de la conductivité σ , déterminée lors de la mesure de la cavité vide, il est possible de séparer les éléments dus aux pertes métalliques et aux pertes diélectriques pour obtenir l'ensemble des valeurs du schéma de la figure 3(b) et ainsi déterminer la réponse sans pertes du dispositif. Pour tenir compte des deux gaps d'air inconnus, entre l'échantillon et les plots métalliques, nous nous plaçons dans les deux cas limites où soit le matériau est posé sur l'un des plots (figure 4(a)), soit il est centré entre les deux plots (figure 4(b)). Pour chacun des cas, nous procédons à une optimisation électromagnétique de l'épaisseur et la partie réelle de la permittivité de l'échantillon qui conduit aux fréquences de résonance et d'antirésonance de la réponse sans pertes. Pour chacun des cas, une analyse avec pertes est alors réalisée pour déterminer finalement la tangente de pertes du matériau.

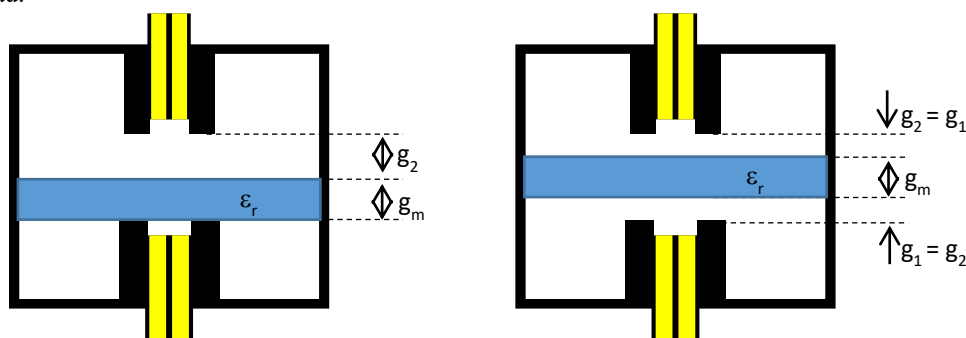


Fig.4. (a) Echantillon posé sur un des plots. (b) Echantillon centré dans la structure.

Un exemple de résultat, utilisant la cavité vide étudiée au paragraphe 3, est donné dans le tableau 2, pour une cavité de dimensions : $R_c = 10$ mm, $R_p = 3$ mm et $h = 2$ mm.

Tableau 2. Exemple de caractérisation d'un échantillon diélectrique.

Expérimentation		Schéma équivalent avec pertes	Analyse électromagnétique avec pertes	
			Echantillon centré	Echantillon posé
			$g_m = 1.024$ mm	$g_m = 0.995$ mm
			$\epsilon_r = 3.045$	$\epsilon_r = 3.209$
			$\text{tg } \delta = 0.051$	$\text{tg } \delta = 0.055$
Fr (GHz)	5.003	5.005	5.003	5.003
Far (GHz)	5.320	5.305	5.300	5.310
Q	22.8	21	21.4	21.5

4. CONCLUSIONS

La méthode de caractérisation de matériaux présentée dans cet article, permet de déterminer une plage de valeurs de la permittivité complexe et de l'épaisseur de l'échantillon. L'incertitude obtenue dans l'exemple présenté, est inférieure à 3% sur les deux grandeurs et il est possible, en optimisant le dispositif, de diminuer cette valeur. Cette méthode s'avère donc particulièrement intéressante pour des échantillons de très faibles épaisseurs où la précision des méthodes traditionnelles est médiocre. Une autre application est également la caractérisation de matériaux bicouches pour lesquels il est actuellement très difficile d'évaluer séparément les épaisseurs de chaque couche.

RÉFÉRENCES

- [1] J. Krupka, "Frequency domain complex permittivity measurements at microwave frequencies", published 26 april 2006, IOP publishing, measurement science and technology, volume 17, number 6
- [2] Le Floch J.M. and all, "Rigorous analysis of highly tunable cylindrical transverse magnetic mode reentrant cavities", Review of Scientific Instruments 84, 125114 (2013); <https://doi.org/10.1063/1.4848935>