

MATERIALS CHARACTERIZATION USING KLYSTRON CAVITY: EXTRACTION OF THICKNESS AND DIELECTRIC PARAMETERS OF THIN LAYER

ANOUMOU APEDJINOU¹, DOMINIQUE CROS¹, VALERIE MADRANGEAS¹,
DAMIEN PASSERIEUX¹, MICHEL AUBOURG¹, JEAN MICHEL LEFLOCH²,
MICHAEL EDMUND TOBAR²

¹ XLIM, UMR CNRS n° 7252, Université de Limoges, 123 Av. A. Thomas, 87060 Limoges, France

² School of Physics, The University of Western Australia, Crawley, WA 6009, Australia

Abstract: In Microwave field, the utilization of klystron cavity also called re-entrant cavity is interesting because of its small dimensions compared to wavelengths. The main aim of this article is to explain the working of the cavity with original coupling system using coaxial probes and its frequency response similar to piezoelectric resonators. That led us to build an equivalent circuit based on lumped elements,

Keywords: passive circuits, klystron, re-entrant cavity, material characterization

1. INTRODUCTION

Dans la littérature scientifique, de nombreuses études ont porté sur la configuration la plus simple de ce type de cavité que l'on trouve sous le nom de « re-entrant cavity ». Les applications sont nombreuses et concernent le résonateur accordable [1] [2], la réalisation de filtres [3] ou encore la synthèse de matériau chimique [4]. Dans chacun des cas les propriétés utilisées sont, soit la forte dynamique de variations des fréquences de résonances (résonateurs accordables), soit les faibles dimensions de la structure (filtres), soit encore la forte concentration du champ électromagnétique (effet onde matière).

Nous souhaitons, dans cette étude, appliquer cette cavité à la caractérisation de matériaux pour laquelle la structure présente certains avantages. Pour atteindre cet objectif, il est impératif de comprendre le fonctionnement du dispositif avec notamment une modélisation de la structure par un schéma équivalent. Nous présenterons ensuite une application à la caractérisation de matériaux.

2. CAVITE DE TYPE KLYSTRON

2.1. Présentation de la structure

A l'origine la cavité klystron a été utilisée pour moduler un faisceau d'électrons afin de réaliser des amplificateurs ou des oscillateurs. Le principe consiste à créer localement un fort champ électrique afin de jouer sur la vitesse des électrons au rythme de la fréquence de résonance de la cavité (figure 1).

Ce phénomène est dû au fort confinement du champ entre les plots centraux de la cavité qui entraîne un fort comportement capacitif au sein de la cavité. Dans le cas de la cavité micro-onde, cela conduit donc à des valeurs de fréquences de résonances très faibles avec des structures de faibles dimensions. Pour mettre en évidence cette propriété nous avons calculé les fréquences de résonances de la structure présentée figure 2a. Celle ci présente un plan de symétrie (S) qui suivant sa nature, cce ou ccm, conduit respectivement à la fréquence de résonance du mode impair ou pair.

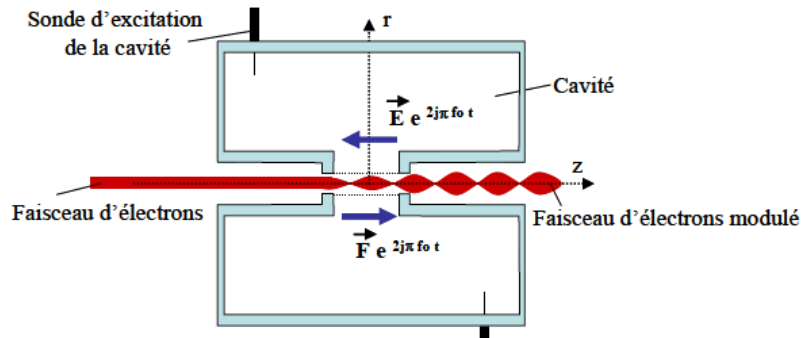


Fig 1 Principe klystron

Les variations de ces fréquences en fonction du gap “g”, tracées sur la figure 2b permettent d’apprécier d’une part la faible valeur de la fréquence de résonance du mode impair pour des valeurs de “g” faibles, et d’autre part une dynamique élevée de ces variations qui couvre quasiment une décade.

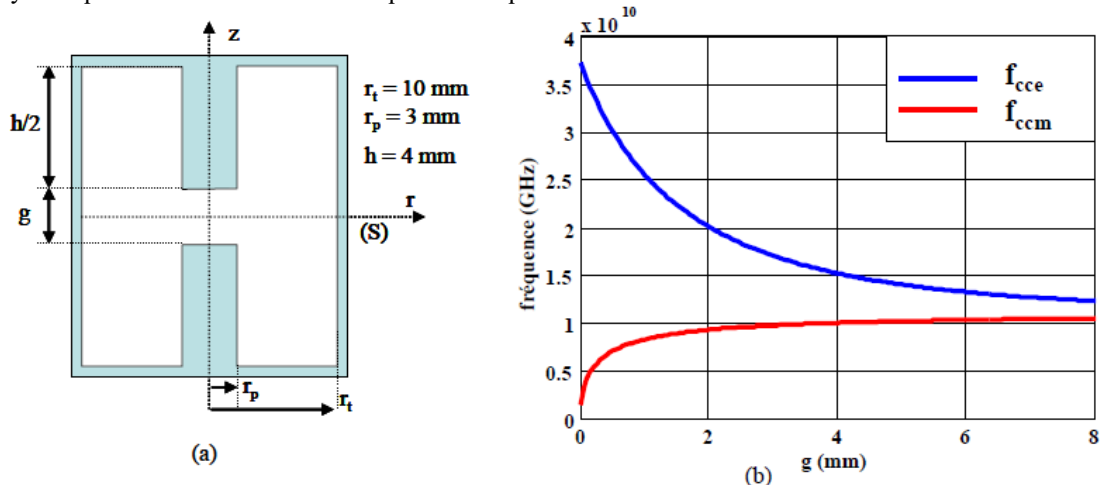


Fig 2 Dispositif e frequencies des modes pair et impair en fonction de gap “g”

2.1.2. Système d’excitation

L’étude en transmission, c’est-à-dire des paramètres [S], de la cavité nécessite de coupler celle-ci avec des sondes coaxiales de dimensions standards. Plusieurs tests expérimentaux ont été réalisés en fonction de la position de sondes de type électrique ou magnétique (figure-3).

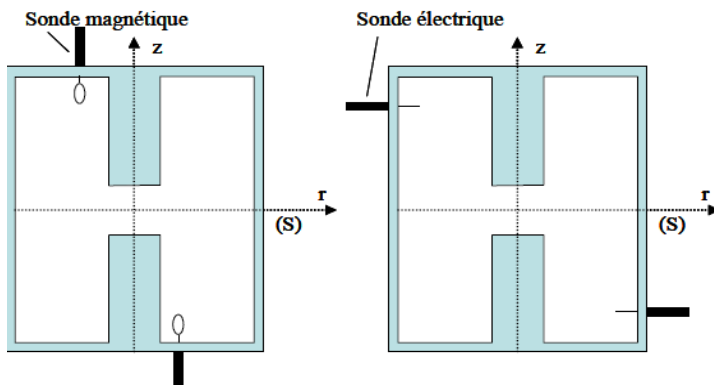


Fig. 3 Differentes systems de couplage

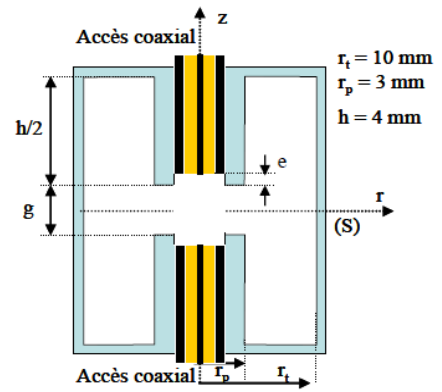


Fig. 4 couplage par ligne coaxial

Dans chacun des cas analysés, le couplage sonde – cavité a été difficile à réaliser sans que la sonde ne perturbe fortement la fréquence de résonance du mode. De plus la position des sondes, éliminait la symétrie de révolution de la structure et une analyse électromagnétique en 3 dimensions était nécessaire pour caractériser le dispositif. Avec un logiciel de type éléments-finis, cela conduisait à des temps de calcul important et à une sensibilité très forte au maillage. Un système original de couplage a alors été évalué. Dans ce cas les sondes électriques sont

placées suivant l'axe de la cavité au centre des plots métalliques (figure 4). Cette configuration présente l'avantage de ne pas détruire la symétrie de révolution de la structure et donc de permettre une analyse en deux dimensions de la coupe transversale du dispositif. Nous avons également observé que l'analyse en transmission de ce dispositif faisait apparaître simultanément, une réponse de type passe-bande (fréquence de résonance) et une réponse de type stop-bande (fréquence d'anti-résonance). Ce type de réponse traduit un effet de couplage direct entre les deux sondes d'excitations sur lequel se superpose la résonance de la cavité. Le couplage, et donc la position des sondes, ont donc un impact sur les valeurs des fréquences de résonance et d'antirésonance.

3. SCHEMA EQUIVALENT

Pour comprendre au mieux les phénomènes qui régissent la réponse en fréquence de la structure, nous avons cherché à modéliser le dispositif par un schéma équivalent. Nous souhaitons notamment savoir pourquoi expérimentalement la fréquence d'antirésonance était systématiquement noyée dans le bruit lorsque le couplage était faible. Pour ce faire nous avons modélisé la cavité par un schéma simple, sans pertes, constitué d'éléments localisés (LC) (figure 5a).

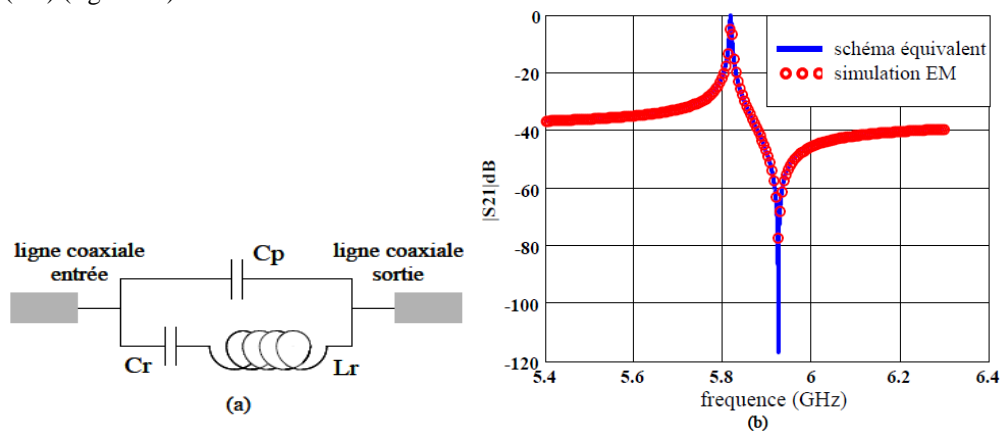


Fig 5. Schéma équivalent sans pertes et comparaison avec la réponse EM(a)

La réponse étant similaire à celle d'un résonateur piézoélectrique, le schéma équivalent est celui utilisé pour l'étude de ces résonateurs. Le but étant d'obtenir des valeurs de fréquences de résonance et d'antirésonance plus fiables permettant de caractériser au mieux le dispositif. Afin de montrer la bonne concordance entre les résultats obtenus par l'analyse électromagnétique et par l'utilisation du schéma équivalent, nous avons représenté les deux réponses (figure 5b) pour la cavité décrite sur la figure 4 avec un gap $g=0.5$ mm et une valeur de $e=0.1$ mm. A ce stade il est donc possible, à partir d'une réponse expérimentale, de construire le schéma équivalent de la structure puis à l'aide de l'outil électromagnétique, de déterminer la position des sondes et la valeur du gap entre les plots centraux (valeurs "e" et "g" de la figure 4) qui conduisent à ces résultats.

4. APPLICATION A LA CARACTERISATION D'UN ECHANTILLON DE MATERIAUX

Le dispositif utilisé afin de caractériser un matériau est présenté sur la figure 6. Le matériau est placé au centre de la cavité entre les plots centraux. Dans cette zone le champ électrique possède une forte composante axiale et il est donc important de considérer le gap d'air de part et d'autre du matériau.

Dans notre cas, l'étude est faite sur un matériau cylindrique de rayon $r=10$ mm et d'épaisseur $g_{mat}=0.45$ mm avec une permittivité relative $\epsilon_r=10$. Les sondes sont positionnées avec une valeur de $e=0.1$ mm et un gap d'air $g_{air}=0.025$ mm de part et d'autre du matériau. Cela correspond bien à la réalité expérimentale. Les réponses à vide et en charge, sont données sur la figure 7 où nous observons un décalage fréquentiel notable dû uniquement à la présence du matériau. Ce résultat sera donc mis à profit dans la caractérisation de matériaux diélectriques. La mesure à vide, comme nous l'avons indiqué au paragraphe précédent, permet de déterminer la position des sondes (paramètre "e"), et la valeur du gap entre les deux plots centraux (paramètres "g"). Puis pour la mesure avec le matériau, il reste à déterminer deux inconnues qui sont l'épaisseur et la permittivité du matériau. Cette résolution est faite en considérant les valeurs des fréquences de résonance et d'antirésonance de la réponse de la cavité chargée par le matériau. Pour illustrer cette méthode de résolution, nous avons considéré que la mesure à vide avait permis de déterminer les valeurs des paramètres "e" et "g" et d'obtenir $e=0.1$ mm et

$g = 0.5$ mm. Pour ces valeurs fixées, nous avons recherché avec l'outil de simulation électromagnétique les couples de valeurs (ϵ_r , g_{mat}) qui conduisaient à la fréquence de résonance $f_r = 2.906$ GHz relevée lors de l'étude de la cavité chargée.

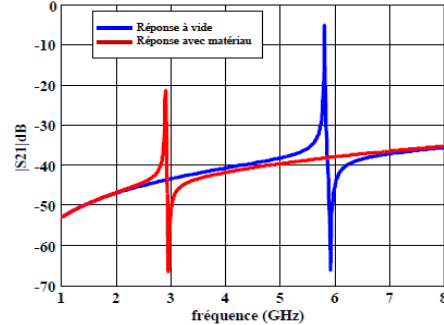
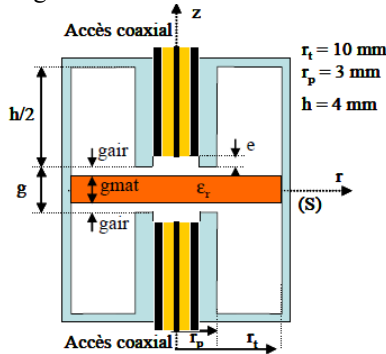


Fig. 6. Cavité chargée par un échantillon diélectrique Fig. 7. Response de la cavité sans et avec matériau

Les résultats sont donnés sur la figure 8a. Puis pour ces différents couples de valeurs nous avons calculé la fréquence d'anti-résonance, f_{ar} , et déterminé ainsi le couple optimal qui permettait d'obtenir la même fréquence ($f_{ar} = 2.964$ GHz) que celle relevée avec la cavité chargée (figure 8b)

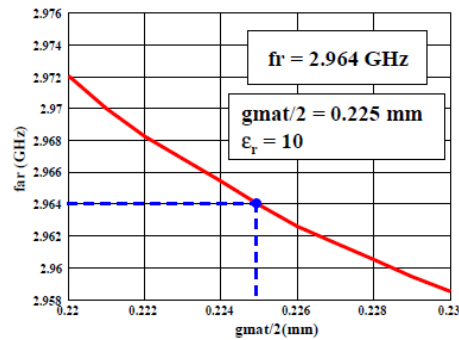
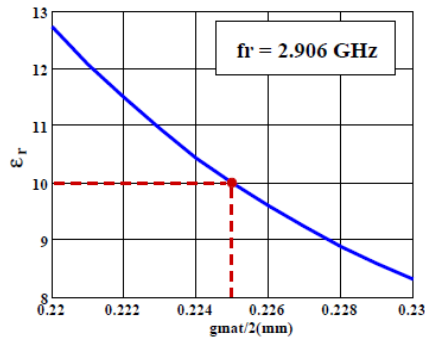


Fig.8. Caractérisation de l'échantillon

On en déduit que la solution est unique et que cette méthode permet à la fois de déterminer l'épaisseur et la permittivité diélectrique du matériau.

5. CONCLUSIONS

Par rapport aux études conventionnelles, la méthode de caractérisation de matériau présentée brièvement dans cet article est une méthode intéressante qui permet de déterminer simultanément l'épaisseur et la permittivité d'un échantillon de matériau. Elle est basée sur l'unicité des fréquences de résonance et d'antirésonance. A ces deux paramètres nous pouvons aussi rajouter le niveau du paramètre de transmission (S_{21}) qui permet de rajouter une donnée pour le calcul du couplage. Actuellement nous travaillons sur la sensibilité de la réponse par rapport aux différents paramètres (couplage, gap, permittivité, dimensions de la structure) avec comme objectif d'avoir une méthode de caractérisation la plus précise possible.

Un autre volet va consister à s'intéresser aux simulations des pertes, ce qui nous permettrait d'extraire en plus des paramètres précédents le coefficient de qualité et donc la tangente de pertes de l'échantillon.

RÉFÉRENCES

- [1] Kazuo Fujisawa, « General Treatment of Klystron Resonant cavities », IRE Trans. On MTT, Vol. 6, 1958, pp 344-358
- [2] Le Floch J.M. and all, « Rigorous analysis of highly tunable cylindrical transverse magnetic mode re-entrant cavities », Review of Scientific Instruments, Vol. 84, 2013
- [3] Himanshu Pandit and all, « High Tc superconductor re-entrant cavity filter structures », Physica C: Superconductivity, Vol. 425, 1 Sept. 2005, pp 44-51.
- [4] Shirzad Kalhori and all, « A re-entrant cavity for microwave-enhanced chemistry », Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy, Vol. 38, N°2, 2003, pp 126-135