

Caractérisation du $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ en C(V) pour l'amélioration du modèle et de la compréhension de son comportement

Chafé CHEBALAH^{1,2}, Zarel VALDEZ-NAVA^{1,2}, Lionel LAUDEBAT^{1,3}, Thierry LEBEY^{1,2}

¹ Université de Toulouse; UPS, INPT; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie); 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 9, France.

² CNRS; LAPLACE; 31062 Toulouse, France.

³ Centre Universitaire Jean-François Champollion ; Place de Verdun 81012 Albi Cedex, France.

RÉSUMÉ– Depuis l'observation d'une très forte permittivité diélectrique sur la céramique $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ au début des années 2000, de nombreux travaux ont été effectués pour comprendre l'origine physique de ce phénomène. Les différentes techniques de caractérisations électriques déjà utilisées ont conduit à proposer qu'une polarisation interfaciale existerait dans la microstructure de ce matériau métallisé. Dans cet article, la mesure capacité-tension (C-V), couramment utilisée plutôt dans le domaine des semi-conducteurs a été exploitée pour caractériser nos échantillons. Les résultats des mesures ont montré que l'allure de la réponse peut s'apparenter au comportement d'une double structure Métal-Isolant-Semi-conducteur (MIS). Une comparaison des résultats expérimentaux avec une simulation numérique d'un modèle double structure MIS a montré une bonne adéquation tant en basses qu'en hautes fréquences. De plus, ce modèle permet de donner des éléments sur le comportement électrique non symétrique du matériau, une propriété observée mais qui n'est pas prise en compte par les modèles existants.

Mots-clés – Permittivité colossale, C-V, modélisation, caractérisations électriques, condensateurs, céramiques, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$.

1. INTRODUCTION

Depuis la découverte d'une permittivité diélectrique colossale dans la céramique $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) [1], les matériaux qui présentent cette propriété continuent de susciter beaucoup d'attention avec une permittivité diélectrique relative (ϵ_r) supérieur à 10^5 . Cette permittivité reste constante sur une large gamme de températures sans transition ferroélectrique ou transformation de phase en dessous de 732K [2]. Ces caractéristiques rendent ces matériaux très attractifs pour la miniaturisation des condensateurs en microélectronique. Malgré d'intensifs travaux [3, 4, 5] pour comprendre les origines physiques de cette forte permittivité de ces céramiques, qu'elles soient sous formes polycristallines, monocristallines, ou dans des couches fines ou épaisses, le rôle exact de la composition chimique et de leur microstructure par rapport aux propriétés électriques du CCTO reste toujours sujet à discussion. Après des résultats non concluants incriminant une polarisation intrinsèque de la structure cristalline [2, 6], une origine extrinsèque a été proposée où les interfaces seraient un paramètre clef du mécanisme de polarisation. Ces interfaces sont associées par exemple au contact du matériau avec les électrodes, le travail de sortie du métal modifiant la réponse diélectrique de la structure [7]. Sur la base de

cette hypothèse, Deng et al. [8] ont observé une modification de la caractéristique courant-tension (I-V) après un traitement de surface de l'échantillon; des mesures de capacité-tension ont aussi montré que deux types de contacts existaient entre une couche mince de CCTO, un contact Métal-Isolant-Semi-conducteur (MIS), et un contact Métal-Semi-conducteur (MS). D'un autre côté, la caractérisation des matériaux polycristallins à Constante Diélectrique Colossale (CDC) au moyen d'une spectroscopie d'impédance large bande permet de proposer une autre hypothèse, reposant sur une hétérogénéité électrique entre des grains semi-conducteurs et des joints de grains isolants [9]. Ainsi, des barrières internes sont formées par les joints de grains. Récemment, une controverse est apparue lorsque Fu et al. [10] ont montré par des mesures réalisées à l'aide d'un microscope à force atomique, le caractère semi-conducteur des joints de grains et la présence de zones isolantes dans des grains semi-conducteurs. Plus récemment, des études complémentaires de ces matériaux ont montré une réponse non symétrique par rapport à la direction du champ électrique appliqué [11], un comportement qui n'est pas pris en compte par les modèles couramment présentés dans la littérature. Dans ce travail, les différentes propriétés connues pour ces matériaux sont présentées, puis en exploitant une technique de caractérisation couramment utilisée pour les matériaux semi-conducteurs; la nature électrique des pastilles cette céramique CCTO métallisé a été étudiée. Un modèle de double structure de type MIS est proposé, puis validé par comparaison avec les résultats de simulation et ce dans toute la bande de fréquences de l'étude.

2. CARACTÉRISTIQUES DU CCTO

Les premières observations de propriétés diélectriques exceptionnelles avec des valeurs de permittivité relatives dites « colossales » sur des céramique pérovskites de formules $\text{ACu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ et $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{FeO}_{12}$ (avec A un cation trivalent ou Bi) ont été faites dans les années 2000 [1]. Parmi ces matériaux, le $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ présente les meilleures performances en température et en fréquence. Du fait de la facilité et la disponibilité de plusieurs techniques de mise en oeuvre, il est de loin, le plus étudié. Les échantillons de CCTO utilisés dans ces travaux ont été élaborés par la technique de coprécipitation d'oxalates. Cette méthode a été mise au point au cours de la thèse de Madona Boulos [12] au laboratoire CIRIMAT de Toulouse, puis optimi-

sée par Loïc Marchin [13] dans le but d'obtenir des céramiques à forte permittivité relative. Les réactifs de départ sont le chlorure de titane $TiCl_3$, le chlorure de cuivre $CuCl_2$, le chlorure de calcium $CaCl_2$, et l'acide oxalique dissous dans l'éthanol. Cette solution est mélangée pendant quelques heures. Le précipité obtenu est centrifugé puis séché à l'étuve à $80^\circ C$ pendant 24 h. Les précurseurs obtenus après broyage et tamisage sont ensuite exposés à un traitement thermique de calcination dans un four à $950^\circ C$ sous air pendant 10 h. Des pastilles sont ensuite obtenues par pressage uniaxial (100 MPa) des poudres après l'ajout d'un liant organique pour les compacter. Les pastilles d'environ 5mm de diamètre et 1,2 mm d'épaisseur (Figure 1) sont frittées sous air statique à $1050^\circ C$ pendant 24 h.



Fig. 1 – Pastille CCTO métallisée.

2.1. En fonction de la température et de la fréquence

Avec les matériaux diélectriques utilisés dans l'industrie comme le titanate de baryum dopé ($BaTiO_3$), on peut atteindre des valeurs de permittivité relative de l'ordre de quelques milliers dans une plage de températures restreinte centrée sur la température de Curie, ce qui limite souvent leur domaine d'application. Contrairement à ces derniers, les matériaux à permittivité colossale présentent une faible dépendance en température sur une large gamme, en effet une caractérisation par spectroscopie d'impédance du CCTO montre une bonne stabilité entre 100 et 600K [1]. Au dessous d'une température critique 100K pour une fréquence de 1kHz, le CCTO voit sa permittivité chuter de plusieurs ordres de grandeur suivit d'un pic sur les pertes diélectriques ($\tan \delta$). Par une mesure de diffraction des rayons X, Ramirez et al. [14] ont montré qu'aucun changement dans la structure cristallographie n'accompagne cette chute de permittivité; une propriété connue dans le cas des matériaux ferroélectriques qui subissent un passage d'une forme cristallographique à une autre. À température ambiante, le CCTO présente une constante diélectrique stable jusqu'à une valeur critique autour de 1MHz où cette permittivité diminue brusquement pour atteindre une valeur de 100. Notons la valeur élevée des pertes diélectriques ($\tan \delta \gg 1$). Comme nous pouvons l'observer sur la Figure 2, ce phénomène de relaxation se déplace vers une plus haute fréquence lorsque la température augmente.

Ces matériaux présentent donc des pertes diélectriques importantes ce qui constitue une limitation importante pour les applications. En effet pour les matériaux diélectriques couramment utilisés comme condensateurs, de très faibles valeurs de pertes sont recherchées ($\tan \delta < 10^{-3}$). De ce fait, la plupart des travaux menés initialement sur ces matériaux portaient sur la diminution de cette constante. Actuellement, la plus faible valeur atteinte est de l'ordre de 0,02 par ajout de $CaTiO_3$ (à température ambiante et 1kHz) sans variation de la valeur de permitti-

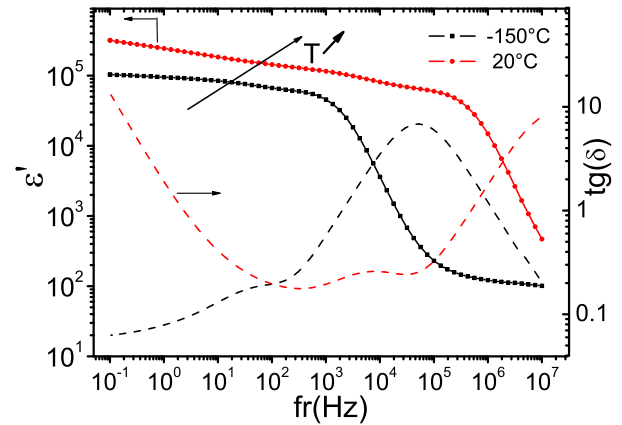


Fig. 2 – Variation de la permittivité et des pertes en fonction de la fréquence pour différentes températures

vité (4000). Dans la littérature, la valeur des pertes diélectriques pour le CCTO est comprise dans le meilleur des cas entre 0,1 et 0,3.

3. CARACTÉRISATION EN TANT QUE SEMI-CONDUCTEUR

Différentes techniques de caractérisations spécifiques aux matériaux diélectriques ont montré que ces matériaux présentaient des comportements différents des matériaux diélectriques classiques : pertes élevées, asymétrie des réponses [15, 16]. Ceci a soulevé des questions concernant la pertinence des caractérisations classiques (Spectroscopie, Polarisation, I(V) etc.) pour les étudier. Une caractérisation capacité-tension C(V), communément utilisée en microélectronique pour évaluer les structures Métal-Isolant-Semiconducteurs (MIS) a donc été proposée.

3.1. Capacité MIS

En microélectronique, la mesure C-V est la méthode la plus simple et la plus utilisée pour l'évaluation de la qualité de la couche de l'isolant et des propriétés de l'interface isolant/semi-conducteur [17] (Figure 3).

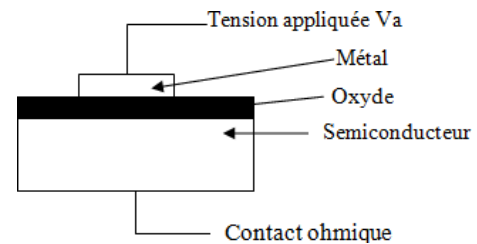


Fig. 3 – structure classique d'une MIS polarisée (V_a)

3.2. Principe de la mesure C(V)

Le principe de la mesure C(V) consiste à superposer sur la structure test un signal alternatif de faible amplitude (δv) et une tension continue V_0 et de mesurer la variation de la capacité dynamique en fonction du niveau de tension appliquée V_a et de la fréquence.

$$V_a = V_0 + \delta v \quad (1)$$

Lors de la polarisation d'une structure MIS idéale, trois configurations se distinguent en fonction de la valeur de la tension

appliquée [18, 19] : l'accumulation, la déplétion et l'inversion, Figure 4.

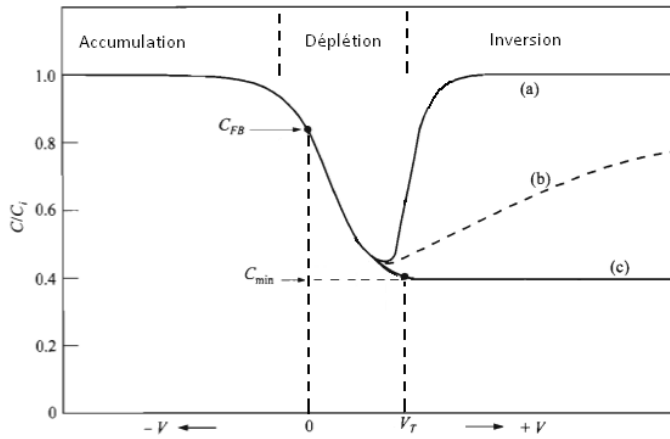


Fig. 4 – Courbe $C(V)$ d'une structure MIS polarisée avec un semi-conducteur de type P.

3.2.1. La zone d'accumulation

Pour une C-MOS de type P, la région d'accumulation est observée lorsque des tensions négatives sont appliquées sur l'électrode. Cette polarité négative attire les porteurs majoritaires (trous) qui s'accumulent dans le substrat à l'interface avec l'oxyde. La capacité mesurée est alors similaire à un condensateur plan parallèle porté par l'oxyde et est donnée par la relation suivante :

$$C_{totale} = C_{max} = C_{ox} = \varepsilon_{ox} \frac{A}{t_{ox}} \quad (2)$$

Où ε_{ox} , A et t_{ox} , représentent respectivement la permittivité, la surface et l'épaisseur de l'oxyde. Quand l'accumulation est établie, la capacité mesurée C_{ox} devient indépendante de la tension appliquée V_a , un plateau constant est alors observé sur le tracé de $C(V)$.

3.2.2. La zone de déplétion

Lorsque la tension appliquée sur l'électrode augmente vers des valeurs positives, les porteurs majoritaires (trous) vont être repoussés vers le volume du semi-conducteur et créent ainsi une zone de charge d'espace constituée d'ions ionisés négativement. La capacité mesurée est alors égale à la mise en série de la capacité d'oxyde C_{ox} et d'une capacité C_s associée à cette zone de déplétion dans le semi-conducteur.

Avec

$$C_s = \varepsilon_s \frac{A}{W} \quad (3)$$

ε_s permittivité du semi-conducteur et W : épaisseur de la zone de déplétion donnée par l'expression :

$$W = \left[\frac{2\varepsilon_s \phi_s}{qN_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ϕ_s est le potentiel de surface du semi-conducteur et N_a son dopage [19].

La capacité totale s'écrit :

$$\frac{1}{C_{totale}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s} \quad (5)$$

3.2.3. La zone d'inversion

Lorsque la tension appliquée V_a augment au-dessus d'une tension de seuil V_T , cette polarisation va générer une paire d'électron-trou dans le volume du semi-conducteur et attirer les électrons vers l'électrode. Ces porteurs minoritaires s'accumulent dans le substrat, à l'interface avec l'oxyde, créant ainsi une couche d'inversion. Au-delà d'une certaine tension positive appliquée sur l'électrode, tous les porteurs minoritaires disponibles sont dans la couche d'inversion. La zone de déplétion atteint alors son maximum et sa largeur est donnée par :

$$W = W_T = \left[\frac{2\varepsilon_s}{qN_a} 2\phi_F \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

ϕ_F représente le potentiel de Fermi du semi-conducteur.

La caractéristique $C(V)$ dans la zone d'inversion va dépendre de la fréquence selon que les porteurs minoritaires (dépendant du temps de génération des paires électron-trou) vont pouvoir suivre ou non le signal alternatif δv :

- En haute fréquence, C est la résultante de la capacité d'oxyde et celle du maximum de déplétion (Figure 4c) ;
- En basse fréquence, C tend vers la capacité d'accumulation (Figure 4a) ;
- On obtiendra une valeur intermédiaire pour des fréquences moyennes (Figure 4b).

4. MESURES

Les mesures $C(V)$ ont été effectuées à l'aide d'un analyseur d'impédance de type *HP4284A*, un signal alternatif (100Hz, 1MHz) de 200mV superposé à une tension continue (-40, +40V) a été appliqué aux échantillons. Le résultat de la mesure $C(V)$ en basse fréquence (1kHz) pour une structure de CCTO métallisée par les deux faces est représenté Figure 5. La même mesure a été reproduite avec un signal en haute fréquence (Figure 6).

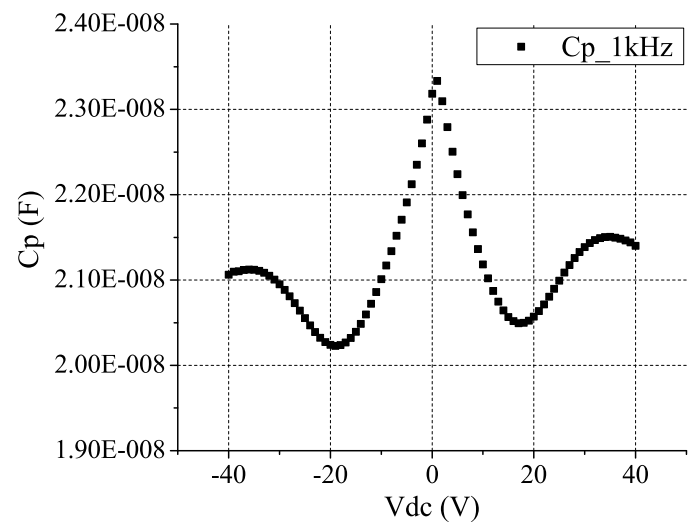


Fig. 5 – Mesure $C(V)$ à basse fréquence

Si on confronte les caractéristiques obtenues sur les Figures

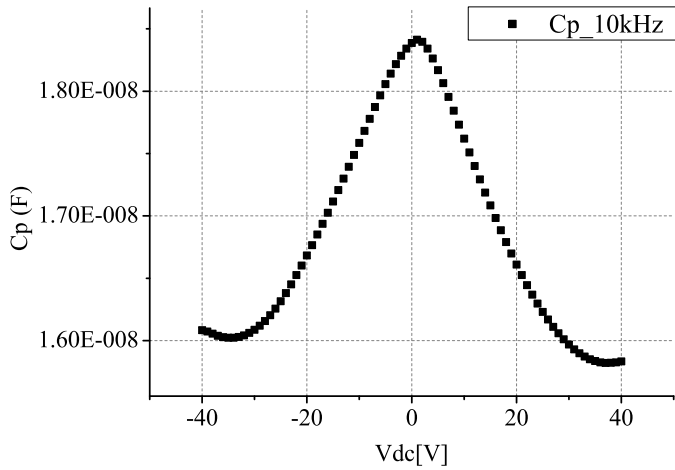


Fig. 6 – Mesure C(V) à haute fréquence

5 et 6 par rapport à la réponse théorique d’une structure MIS (Figure 4), elles s’apparentent à une configuration de deux structures Métal Isolant Semi-conducteur têtes bèches (MIS-SIM) comme représentée sur la Figure 7. Dans ce cas, lorsqu’une électrode est polarisée positivement, l’autre électrode est polarisée négativement, et réciproquement. La réponse de toute la structure (MIS-SIM) est alors, à chaque instant, la résultante des deux structures MIS simultanément. On observe bien une non-symétrie des réponses sur les figures 5 et 6, notamment sur les niveaux de capacités ou des tensions de basculement.

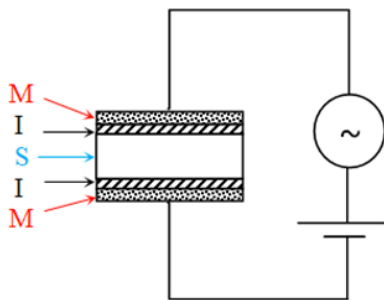


Fig. 7 – Schéma électrique de mesure C(V) pour une structure MIS-SIM.

4.1. Simulations BF / HF

Les résultats des simulations des modèles semi-conducteurs d’une structure MIS-SIM (Figure 7) sont présentées dans les Figure 8 et Figure 9. On remarque des allures générales proches des mesures effectuées, présentées sur la Figure 5 et la Figure 6. Les paramètres de la simulation sont dérivés des paramètres utilisés pour les semi-conducteurs : dopage, épaisseur d’oxyde, valeur de la permittivité de l’isolant et du semi-conducteur. Ces paramètres permettent d’ajuster les seuils de basculement et les valeurs des capacités en BF et HF. En prenant, une épaisseur d’oxyde de $90nm$, des densités accepteurs de $4.10^{16} cm^{-3}$ et donneurs de $1,2.10^{11} cm^{-3}$, des permittivités de l’isolant de 12 et de 80 pour le CCTO, nous obtenons par simulation les résultats représentés sur les figures 8 et 9. Afin de reproduire la dissymétrie de la réponse observée sur les mesures (figure 5 et 6), nous avons modifié l’épaisseur de l’isolant sur l’une des faces ($95nm$ au lieu de $90nm$). Lors des caractérisations

électriques nous avons observé [15] ainsi que d’autres auteurs [6, 20, 21] des mécanismes de conceptions qui pourraient s’apparenter à un contact de type Schottky. Dans cette hypothèse, les valeurs des épaisseurs du contact Schottky et la permittivité associée alors obtenues sont comprises entre 5 et $100nm$ et entre 6 et 80 pour la valeur de permittivité aux hautes fréquences.

Nous remarquons une bonne adéquation sur l’allure générale entre les mesures (figures 5 et 6 et les simulations (figures 8 et 9). Il n’y a alors que peu d’intérêt d’ajuster au plus près les différentes valeurs des capacités de simulation pour se rapprocher des mesures. En effet, nous avons fait ici une analogie avec un semi-conducteur et les valeurs de dopage ne peuvent pas être directement transférées à notre diélectrique. De plus, la mesure nécessiterait un contact ohmique ce qui n’est pas dans notre cas ici. On peut aussi observer les limites de notre modèle en basses fréquences autour d’une tension nulle. La capacité mesurée autour de $0V$ s’avère être plus importante que pour des tensions plus importantes (en valeur absolue). Or le modèle se basant sur une simple structure MIS-MIS (figure 7) propose une mise en série de deux condensateurs est insuffisant pour expliquer le phénomène observé pour des faibles tensions.

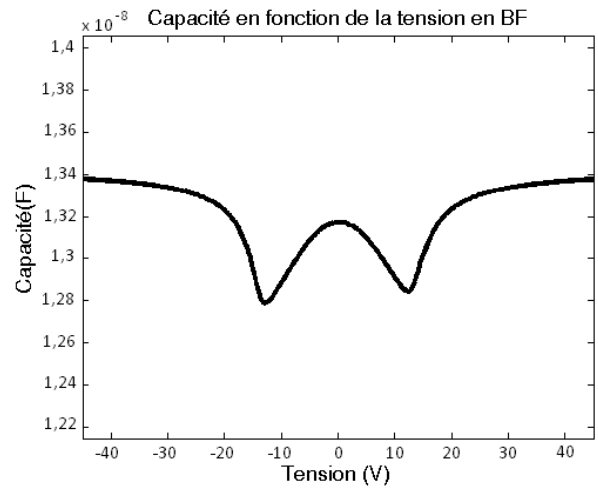


Fig. 8 – Résultat de simulation d’une structure MIS-SIM en basse fréquence.

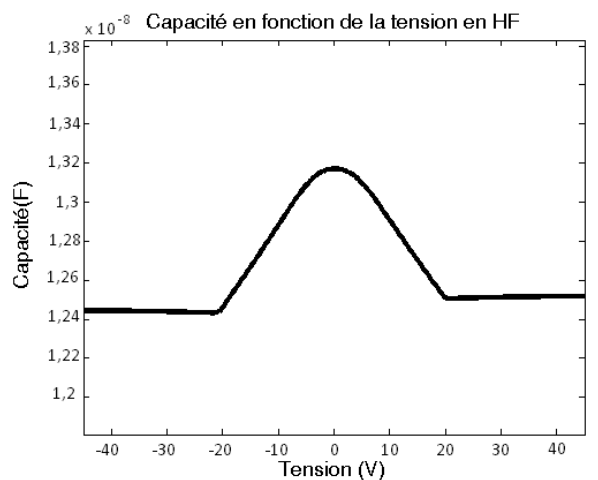


Fig. 9 – Résultat de simulation d’une structure MIS-SIM en haute fréquence.

5. DISCUSSION ET CONCLUSION

Une analogie entre un modèle MIS d'un semi-conducteur et la céramique CCTO a été proposée. Les caractérisations électriques de ce matériau (spectroscopie, $I(V)$, $I(t)$ etc.) nous ont conduit à proposer une structure qui s'apparente à deux structures MIS mises en tête bêche (Figure 7); quand l'une est conductrice, l'autre est bloquée, et vice-versa. Une bonne adéquation entre la théorie et la pratique a été observée. De plus, la non-symétrie observée, peut être expliquée dans ce modèle par des paramètres différents entre les deux interfaces de contact du métal avec le CCTO, soit donc une différence de charges d'une face à l'autre de l'échantillon pour une même tension appliquée. Les résultats des caractérisations $C(V)$ présentés ici, ont été comparés avec la simulation d'une structure SIM-MIS aussi bien en basse qu'en haute fréquence. Les tracés de ces résultats ont montré des allures semblables; l'hypothèse d'une double structure MIS-SIM est fortement plausible. Néanmoins une validation définitive de cette hypothèse est difficile du fait que les paramètres exacts de notre structure ne sont pas bien définis et que l'on doit faire une analogie avec des paramètres de semi-conducteurs tel que le dopage, la densité de charge intrinsèque du CCTO, la densité des charges qui peut exister dans la couche d'oxyde ou même l'épaisseur d'oxyde. Ceci explique en grande partie la différence sur les valeurs des capacités obtenues par simulation et par la mesure. Ce modèle offre une alternative intéressante par rapport aux autres modèles car il arrive à corréliser les différents comportements électriques du CCTO, notamment, la non-symétrie non prise en compte par les modèles existants jusqu'à présent. Néanmoins quelques paramètres restent à définir pour mieux accorder les résultats de simulation avec l'expérimental. Pour une validation complète de ce modèle, il serait nécessaire d'obtenir un contact ohmique sur une des faces de contact. En effet, nous observons toujours la réponse de deux contacts à la fois et avoir une seule capacité pourrait permettre l'étude et la caractérisation de la nature de ce contact. Ainsi, ce modèle apporte de nouveaux éléments, qui renforcent l'hypothèse d'une origine de la permittivité colossale observée dans ces céramiques qui serait reliée aux interfaces de leurs contacts avec les électrodes.

6. RÉFÉRENCES

- [1] M. A. Subramanian, Dong Li, N. Duan, B. A. Reisner, and A. W. Sleight, « High dielectric constant in $ACu_3Ti_4O_{12}$ and $ACu_3Ti_3FeO_{12}$ phases », *Journal of Solid State Chemistry*, 151(2) : 323-325, 2000.
- [2] Akira Onodera, Masaki Takesada, Keiichi Kawatani, and Shogo Hiramatsu, « Dielectric properties and phase transition in $CaCu_3Ti_4O_{12}$ at high temperatures », *Japanese Journal of Applied Physics*, 47(9) : 7753-7756, 2008.
- [3] S. Guillemet-Fritsch, T. Lebey, M. Boulos, and B. Durand, « Dielectric properties of $CaCu_3Ti_4O_{12}$ based multiphased ceramics », *Journal of the European Ceramic Society*, 26(7) : 1245-1257, 2006
- [4] S. G. Ebbinghaus A. Loidl S. Krohns, P. Lunkenheimer, « Broadband dielectric spectroscopy on single-crystalline and ceramic $CaCu_3Ti_4O_{12}$ », *Applied physics letters*, 91 : 022910, 2007.
- [5] Prasit Thongbai, Bundit Putasaeng, Teerapon Yamwong, and Santi Maensiri, « Current-voltage nonlinear and dielectric properties of ceramics prepared by a simple thermal decomposition method », *Journal of Materials Science : Materials in Electronics*, 23 : 795-801, 2012.
- [6] Lixin He, J. B. Neaton, Morrel H. Cohen, David Vanderbilt, and C. C. Homes, « First-principles study of the structure and lattice dielectric response of $CaCu_3Ti_4O_{12}$ », *Phys. Rev. B*, 65(21) : 214112, Jun 2002.
- [7] S. G. Ebbinghaus P. Lunkenheimer, R. Fichtl and A. Loidl, « Nonintrinsic origin of the colossal dielectric constants in $CaCu_3Ti_4O_{12}$ », *Physical review B*, 70 : 172102, 2004.
- [8] Guochu Deng, Tomoaki Yamada, and Paul Murali, « Evidence for the existence of a metal-insulator-semiconductor junction at the electrode interfaces of $CaCu_3Ti_4O_{12}$ thin film capacitors », *Applied Physics Letters*, 91(20) : 202903, 2007.
- [9] Derek C. Sinclair Timothy B. Adams and Anthony R. West, « Characterization of grain boundary impedances in fine- and coarse-grained $CaCu_3Ti_4O_{12}$ ceramics », *Physical review B*, 73 : 094124, 2006
- [10] Desheng Fu, Hiroki Taniguchi, Tomoyasu Taniyama, Mitsuru Itoh, and Shin-ya Koshihara, « Origin of giant dielectric response in nonferroelectric $CaCu_3Ti_4O_{12}$: Inhomogeneous conduction nature probed by atomic force microscopy », *Chemistry of Materials*, 20(5) : 1694-1698, 2008
- [11] Zarel Valdez-Nava, Sorin Dinculescu, and Thierry Lebey, « Non-symmetrical electric response in $CaCu_3Ti_4O_{12}$ and $La_{0.05}Ba_{0.95}TiO_3$ -sps materials », *Journal of Physics D : Applied Physics*, 43(38) : 385401, 2010.
- [12] Madona Boulos, « élaboration de poudres de titanates par chimie douce, caractérisation, mise en forme de céramique et de couches, et propriétés électriques. Application aux matériaux à très fortes valeurs de permittivité », Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 2005.
- [13] Loïc Marchin, « Optimisation de la synthèse de poudre par coprécipitation en vue d'obtenir des céramiques de $CaCu_3Ti_4O_{12}$ à forte permittivité », Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 2007.
- [14] A P Ramirez, M A Subramanian, M Gardel, G Blumberg, D Li, T Vogt, and S M Shapiro, « Giant dielectric constant response in a copper-titanate », *Solid State Communications*, 115(5) : 217-220, 2000.
- [15] Chafé Cheballah, « étude des mécanisme physiques à l'origine de la permittivité colossale observée dans certaines céramiques », Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 2012.
- [16] C. Cheballah, Z. Valdez-Nava, L. Laudebat, T. Lebey, P. Bidan, S. Diaham, and S. Guillemet-Fritsch, « Dielectric properties of colossal permittivity materials : An update », *Journal of Energy and Power Engineering*, 7 : 726-732, 2013.
- [17] Yannis Tsididis, « Operation and Modeling of the MOS Transistor », Second Edition. Thomas Casson, 1999.
- [18] E.H. Nicollian and J.R. Brews, « MOS Physics and Technology », 1982.
- [19] S. M. Sze, « Physic of semiconductor devices », Jhon Wiley & Sons, 2nd edition, 1981.
- [20] C. C. Homes, T. Vogt, S. M. Shapiro, S. Wakimoto, and A. P. Ramirez, « Optical response of high dielectric constant perovskite-related oxide », *Science*, 293(5530) : 673-676, 2001.
- [21] Patrick Fiorenza, Raffaella Lo Nigro, Corrado Bongiorno, Vito Raineri, Matthew C. Ferarrelli, Derek C. Sinclair, and Anthony R. West, « Localized electrical characterization of the giant permittivity effect in $CaCu_3Ti_4O_{12}$ ceramics », *Applied Physics Letters*, 92(18) : 182907, 2008.