UNE MÉTHODE RAPIDE DE MESURE ET D'ENREGISTREMENT GRAPHIQUE AUTOMATIQUE DES VARIATIONS D'UNE ADMITTANCE COMPLEXE EN FONCTION DE DIVERS PARAMÈTRES PHYSIQUES ⁽¹⁾

Par FRANÇOIS KOVER,

Centre de Recherches de la Compagnie Générale d'Électricité, 91-Marcoussis.

(Reçu le 4 avril 1968.)

Résumé. — On décrit une méthode permettant de mesurer directement et d'enregistrer graphiquement les parties réelle et imaginaire d'une capacité complexe ou de toute admittance complexe variant en fonction de paramètres tels que la température, la tension appliquée, etc. Le tracé est effectué directement dans le plan complexe avec une précision de l'ordre de quelques %.

Abstract. — A description is given of a method of direct measurement and recording for the real and imaginary parts of a complex capacitance, or of any complex admittance, varying as a function of parameters such as temperature, applied voltage, etc. The record is directly drawn in the complex plane, with a precision of several %.

La représentation de la capacité dans le plan complexe est un des moyens d'investigation des propriétés de diélectriques et de semiconducteurs; cette représentation exige de laborieuses mesures de capacité et de facteur de pertes, ainsi qu'un traitement mathématique de leurs résultats. Dans le cadre de nos recherches sur les structures M.O.S. (métal/oxyde/semi-conducteur) [1, 2, 3, 4], nous avons mis au point une méthode qui permet de mesurer directement les parties réelle et imaginaire de la capacité complexe, et d'en enregistrer graphiquement les variations à fréquence fixe en fonction de paramètres tels que la tension continue appliquée à la structure étudiée, la température, etc. Cette méthode s'étend aux admittances complexes, qui sont proportionnelles aux capacités à une rotation de phase près.

L'élément principal du dispositif décrit est un comparateur d'impédances [5] dont le principe de fonctionnement est le suivant (*fig. 1*) : le signal alternatif de mesure E_0 est appliqué, par l'intermédiaire d'un transformateur à point milieu M_0 , à deux admittances Y_1 et Y_2 reliées en un point commun M ; l'appareil mesure la tension complexe E^* entre les points M_0 et M et indique l'amplitude des composantes de E^* en phase et en quadrature avec E_0 . L'admittance complexe du circuit de mesure de E^* est figurée en W . Pour les besoins de l'expérimentation,

FIG. 1.

une tension continue est appliquée à Y_1 et à Y_2 par la source de tension V dont l'admittance interne vaut G . En posant $Y_3 = G + W$, on trouve la relation (1) :

$$E^* = E_0(Y_1 - Y_2)/(Y_1 + Y_2 + Y_3). \quad (1)$$

Soient Y_1 l'admittance étudiée et Y_2 une admittance connue; les limites d'emploi de l'appareillage sont données par les conditions (2) :

$$\begin{aligned} |Y_1 - Y_2| &< 0,1 Y_1 \\ |\arg(Y_1) - \arg(Y_2)| &< 0,1 \text{ radian} \\ Y_3 &\ll Y_1 \text{ et } Y_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Si l'on cherche à mesurer en Y_1 les propriétés d'une structure M.O.S., ces conditions ne pourront pas être remplies; en effet, la capacité complexe est suscep-

⁽¹⁾ Cette étude a été effectuée dans le cadre du Marché de Recherches, n° 64.FR.007, de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique.

tible de varier par exemple [3] en module entre 600 et 1 500 pF et en argument entre 0 et 0,5 radian. On peut réduire la variation apparente de Y_1 en branchant en parallèle sur la capacité complexe étudiée C^* un condensateur de capacité C_1 beaucoup plus grande et dont le facteur de pertes soit négligeable; en Y_2 , on branche un condensateur de capacité C_2 très semblable à C_1 . En exprimant l'admittance Y_3 sous forme d'une capacité complexe C_3^* , on tire de la relation (1) la relation (3) suivante :

$$E^* = E_0 \frac{(C^* + C_1 - C_2)}{(C^* + C_1 + C_2 + C_3^*)}. \quad (3)$$

Lorsque les conditions (2) sont amplement satisfaites, la relation (3) se simplifie en $E^* = E_0 \frac{C^*}{2C_1}$ et l'enregistrement $X - Y$ des composantes réelle et imaginaire de E^* donne directement la représentation de C^* dans le plan complexe; l'étalonnage se fait aisément en substituant à C^* des condensateurs étalons et la fréquence de mesure n'intervient pas dans cet étalonnage. Si les conditions (2) ne sont pas parfaitement satisfaites, on peut prévoir les perturbations qui en résultent en différentiant la relation (3) par rapport aux quantités dC^* , $(C_1 - C_2)$ et C_3^* ; dans l'approximation du premier ordre, on trouve :

$$dE^* = \frac{E_0}{2C_1} \cdot \left[dC^* + (C_1 - C_2) + C_3^* \cdot \frac{(C^* + C_1 - C_2)}{2C_1} \right] = 0. \quad (4)$$

La différence entre C_1 et C_2 entraîne une translation de C^* sur l'axe des capacités réelles; la compensation en est aisée par décalage de l'échelle de l'enregistreur. L'action de C_3^* peut être rendue négligeable : dans

nos conditions expérimentales, l'élément W se compose d'une résistance de 200 mégohms en parallèle sur une capacité de 9 pF, et l'élément G est de l'ordre de 10 mégohms⁻¹; les fréquences de mesure sont imposées par les caractéristiques du comparateur d'impédances et sont comprises entre 100 Hz et 100 kHz; il s'ensuit que la valeur de C_3^* varie en module entre 9 et 82 pF et en argument entre 0 et $\pi/2$. Par le choix de C_1 , on peut maintenir le facteur $\frac{(C^* + C_1 - C_2)}{2C_1}$ inférieur à 0,02 et l'erreur absolue sur C^* due à C_3^* devient alors inappréciable; dans l'exemple cité [3], on prend $C_1 = 0,1 \mu F$.

Les erreurs introduites par le comparateur d'impédances peuvent être compensées au cours de l'étalonnage de l'enregistreur $X - Y$; celui-ci impose une limite de précision qui est de l'ordre de 1 % de la plus grande déviation pour la plupart des modèles. Dans l'exemple cité, l'erreur absolue sur C^* est ainsi de l'ordre de 10 pF, soit moins de 2 % en module dans la plus grande partie du diagramme complexe de C^* .

La rapidité des mesures est limitée par la constante de temps de l'enregistreur; en pratique, le domaine complet de variation de C^* peut être exploré en quelques secondes. La durée de l'exploration la plus lente est limitée par la dérive des amplificateurs du comparateur d'impédances, elle est de l'ordre de l'heure, et peut être prolongée grâce au ré-étalonnage du dispositif. L'imperfection des amplificateurs conduit aussi à des fluctuations (constante de temps de l'ordre de la minute) difficiles à éliminer autrement qu'en traçant plusieurs fois les mêmes courbes afin d'obtenir une courbe « moyenne ». Dans ces conditions, nous avons pu vérifier que le tracé automatique de la capacité complexe coïncide bien, dans la limite de précision de quelques %, avec le résultat des mesures « point par point » [6].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NANNONI (R.) et KOVER (F.), *C. R. Acad. Sc.*, 7 mars 1966, **262**, 729-732.
- [2] KOVER (F.) et NANNONI (R.), *Rev. gén. Elec.*, juin 1966, **75**, 6, 777-784.
- [3] NANNONI (R.), *C. R. Acad. Sc.*, 4 janvier 1967, **264**, 76-79.
- [4] NANNONI (R.), *C. R. Acad. Sc.*, 27 novembre 1967, **265**, 1259-1262.
- [5] Appareil Général Radio, type 1605-A.
- [6] NANNONI (R.), à l'obligeance duquel nous devons les échantillons de structures M.O.S. étudiées (oxydes anodiques de silicium) ainsi que les mesures « point par point » de la capacité complexe.