La mesure des propriétés critiques des matériaux dans les systèmes électroniques avancés

Le suivi des principales propriétés des condensateurs et inducteurs

Par Giovanni d'Amore, Marketing Brand Manager, Keysight Technologies

Nous sommes habitués à penser au progrès technologique en termes de générations de modèles de téléphones portables ou des versions de procédé de fabrication des semi-conducteurs. Cela fournit un raccourci utile, mais éclipse toute une série d'autres formes d'innovation, comme celles dans la science des matériaux. Quiconque a retiré le panneau arrière d'un téléviseur CRT ou ouvert une ancienne alimentation aura fait le constat suivant: vous ne pouvez pas construire l'électronique du XXI^{ème} siècle en utilisant des composants du XX^{ème} siècle.

Par exemple, les progrès rapides de la science des matériaux et de la nanotechnologie ont créé de nouveaux matériaux dotés des caractéristiques nécessaires pour construire des inducteurs et condensateurs denses et performants. Les dispositifs de développement qui utilisent ces matériaux exigent une mesure précise des caractéristiques électriques et magnétiques, telles que la permittivité et la perméabilité, dans une gamme de fréquences et de températures de fonctionnement. Cet article traite des approches pour caractériser les matériaux diélectriques et magnétiques en utilisant des analyseurs d'impédance et des dispositifs de test spécialisés.

Des propriétés complexes

Les matériaux diélectriques jouent un rôle clé dans les composants électroniques tels que les condensateurs et les isolateurs. La valeur constante diélectrique d'un matériau peut être ajustée en contrôlant sa composition et/ou sa microstructure, en particulier pour les céramiques. Il est important de mesurer les propriétés diélectriques d'un nouveau matériau dès le début du cycle de développement d'un composant afin de pouvoir prédire ses performances.

Les propriétés électriques d'un matériau diélectrique sont caractérisées par sa permittivité complexe, comprenant à la fois des parties réelles et imaginaires.

La partie réelle de la permittivité, également appelée constante diélectrique, représente la capacité du matériau à stocker de l'énergie lorsqu'il est soumis à un champ électrique. Les matériaux ayant une constante diélectrique plus élevée peuvent stocker plus d'énergie par unité de volume que ceux avec des constantes diélectriques inférieures, un moyen de réaliser des condensateurs denses. Les matériaux à constantes diélectriques faibles constituent des isolateurs utiles dans les systèmes de transmission de signaux, précisément parce que leur incapacité à stocker une grande quantité d'énergie minimise le

délai de propagation du signal à travers les fils qu'ils isolent.

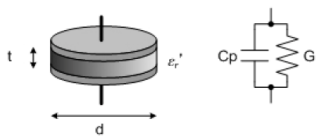
La composante imaginaire de la permittivité complexe représente l'énergie dissipée par un matériau diélectrique lorsqu'il se trouve dans un champ électrique. Ceci doit être soigneusement géré pour éviter que des dispositifs tels que des condensateurs construits en utilisant ces nouveaux matériaux diélectriques ne dissipent trop d'énergie.

La mesure des propriétés diélectriques

Il existe différentes façons de mesurer une constante diélectrique. La méthode des plaques parallèles place le matériau sous test (MUT) entre deux électrodes. L'impédance du matériau est mesurée et convertie en permittivité complexe en utilisant les équations représentées sur la figure 1, qui font référence à son épaisseur et à la surface et au diamètre des électrodes.

Cette approche est principalement utilisée pour les mesures aux basses fréquences. Bien que le principe soit simple, les mesures précises sont difficiles en raison des erreurs de mesure, en particulier pour les matériaux à faible perte.

La permittivité complexe varie avec la fréquence et doit donc être évaluée à la fréquence de fonctionnement. Aux hautes fréquences, les erreurs dues au système de mesure augmentent, rendant la mesure imprécise.



$$\varepsilon^* = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$$

$$\varepsilon_r' = \frac{C_P}{\varepsilon_0}\frac{t}{A} = \frac{C_P \times t}{\varepsilon_0 \times \pi \times (d/2)^2}$$

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_r' \times \tan\delta$$

where ε^* : complex permittivity
ε_0 : permittivity of free space
C_P : measured capacitance
$\tan\delta$: measured loss tangent
A : Area of electrode
d: diameter of electrode
t: thickness of sample material

Figure 1: Méthode des plaques parallèles (Source: Keysight Technologies)

Le dispositif de test de matériau diélectrique Keysight 16451B peut faire des mesures précises jusqu'à 30MHz, lorsqu'il est combiné avec l'analyseur d'impédance Keysight

E4990A. Ce dispositif de test, conforme à la norme de mesure d'isolation ASTM D150, comporte trois électrodes. Deux d'entre elles forment un condensateur et le troisième fournit une électrode de protection. L'électrode de protection est nécessaire car lorsqu'un champ électrique est établi entre deux électrodes, une partie de celui-ci s'écoule au-delà du MUT monté entre elles (voir la figure 2). L'existence de ce champ de dispersion peut conduire à une mauvaise mesure de la constante diélectrique du MUT. L'électrode de protection absorbe le courant circulant dans le champ de dispersion, améliorant ainsi la précision de la mesure.

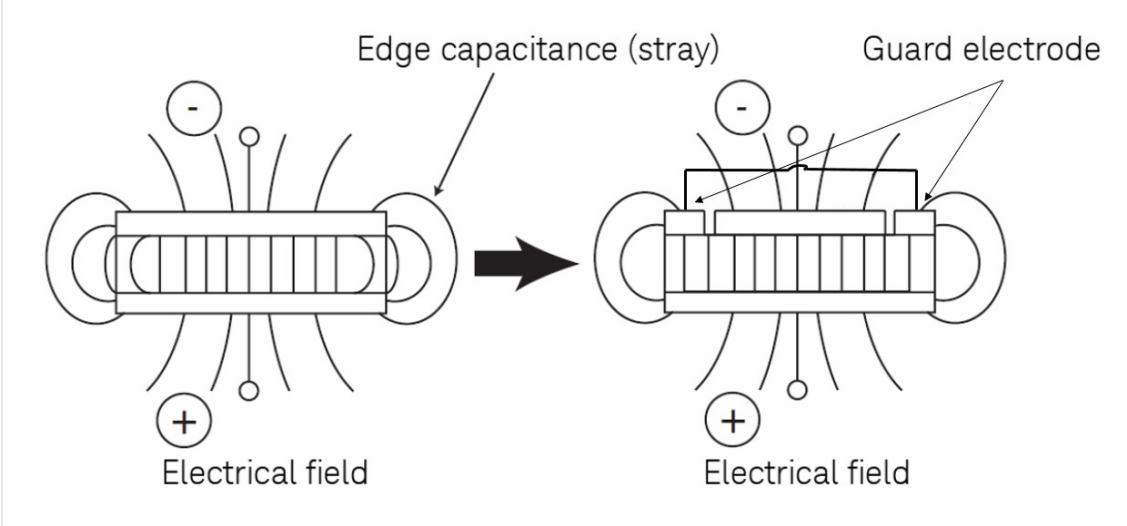


Figure 2: Effet de l'électrode de protection (Source: Keysight Technologies)

Préparation d'un échantillon

Si vous voulez mesurer les propriétés diélectriques d'un matériau, il est important que vous ne mesuriez que le matériau et rien d'autre. Pour cette raison, il est essentiel de s'assurer que l'échantillon de matériau est très plat, pour éliminer totalement l'air entre lui et les électrodes.

Il y a deux façons d'y parvenir. La première consiste à appliquer des électrodes en couche mince à la surface du matériau à tester. La seconde consiste à déduire la permittivité complexe en comparant les capacités entre les électrodes, mesurées avec et sans le matériau présent.

L'analyseur d'impédance E4990A supporte ces deux approches et fournit une excellente précision de mesure de phase, permettant un facteur de perte mesuré *tan* δ de seulement

0,006. Il prend également en compte l'effet de dispersion dans les dispositifs de test décrits ci-dessus, pour extraire les vraies caractéristiques du MUT.

Une électrode de protection aide à améliorer la précision de la mesure aux basses fréquences, mais, à des fréquences plus élevées, peut avoir un impact défavorable sur le champ électromagnétique. Certains testeurs sont proposés avec une option de dispositif de test de matériau diélectrique, avec des électrodes compactes qui étendent la gamme de fréquences utiles de cette technique de mesure. Le logiciel peut également aider à éliminer l'effet des capacités dispersives.

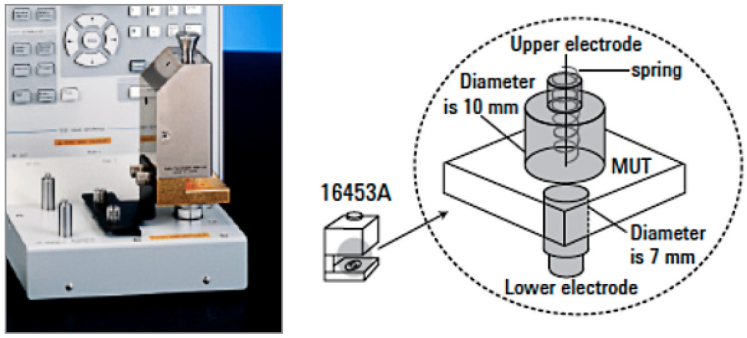


Figure 3: Structure d'un dispositif de support de mesure diélectrique de Keysight (Source: Keysight Technologies)

Les erreurs résiduelles dues au dispositif de support et à l'analyseur peuvent être réduites par compensation en circuit ouvert, en court-circuit et en charge. Certains analyseurs d'impédance ont cette caractéristique de compensation intégrée, ce qui permet des mesures précises sur une large gamme de fréquences.

L'évaluation de la variation des caractéristiques d'un matériau diélectrique en fonction de la température exige l'utilisation d'une chambre à contrôle de température et des câbles résistant à la chaleur sont nécessaires. Certains analyseurs sont proposés avec un logiciel pour contrôler une chambre thermique et des kits de câbles adaptés.

Mesure de matériaux magnétiques

Comme les matériaux diélectriques, les matériaux en ferrite s'améliorent régulièrement et sont largement utilisés dans les équipements électroniques pour des composants inductifs et des aimants, et font partie de transformateurs, ainsi que d'absorbeurs et suppresseurs de champ magnétique.

Les principales propriétés de ces matériaux comprennent leur perméabilité et leurs pertes aux fréquences de fonctionnement clés. Les analyseurs d'impédance avec dispositifs de

test pour matériau magnétique peuvent fournir des mesures précises et reproductibles sur une large gamme de fréquences.

Comme pour les matériaux diélectriques, la perméabilité d'un matériau magnétique est une propriété complexe exprimée à la fois avec des parties réelles et imaginaires. La partie réelle représente la capacité d'un matériau à conduire le flux magnétique et la partie imaginaire représente les pertes dans le matériau. Les matériaux ayant une grande perméabilité sont utiles pour réduire la taille et le poids des systèmes magnétiques. La composante de perte de perméabilité d'un matériau magnétique peut être minimisée pour un rendement optimal dans des applications telles que des transformateurs ou maximisée pour des applications telles que le blindage.

La perméabilité complexe est déterminée par l'impédance d'un inducteur formé avec le matériau. Dans la plupart des cas, elle varie avec la fréquence et doit donc être caractérisée à la fréquence de fonctionnement. Aux fréquences plus élevées, les mesures précises sont difficiles en raison de l'impédance parasite de l'appareil. Pour les matériaux à faibles pertes, l'angle de phase de l'impédance est critique, la précision des mesures de phase est souvent insuffisante.
La perméabilité varie également avec la température, et les systèmes de mesure doivent donc être capables d'évaluer avec précision les caractéristiques de température sur une large gamme de fréquences.
La perméabilité complexe peut être obtenue en mesurant l'impédance du matériau magnétique. Cela se fait en enroulant un fil autour du matériau et en mesurant l'impédance par rapport aux extrémités du fil (voir figure 4). Le résultat peut changer en fonction de la façon dont le fil est enroulé et comment le champ magnétique interagit avec son environnement.

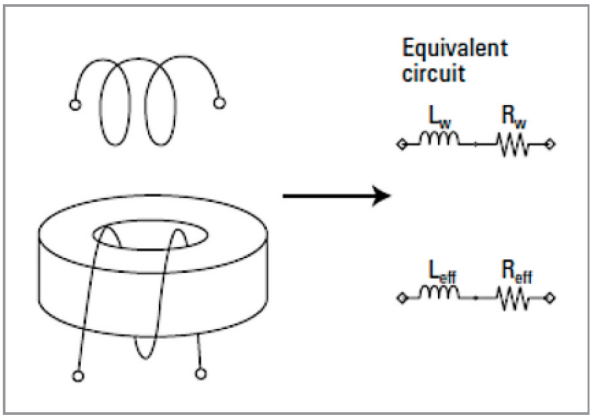


Figure 4: Une façon de mesurer la perméabilité efficace (Source: Keysight Technologies)

Le dispositif de test de matériau magnétique Keysight 16454A (voir la figure 5) fournit un inducteur à un seul tour qui s'enroule autour d'un tore du MUT. Il n'y a pas de flux de fuite dans l'inducteur à un seul tour et donc le champ magnétique dans le montage peut être calculé à partir de la théorie électromagnétique.

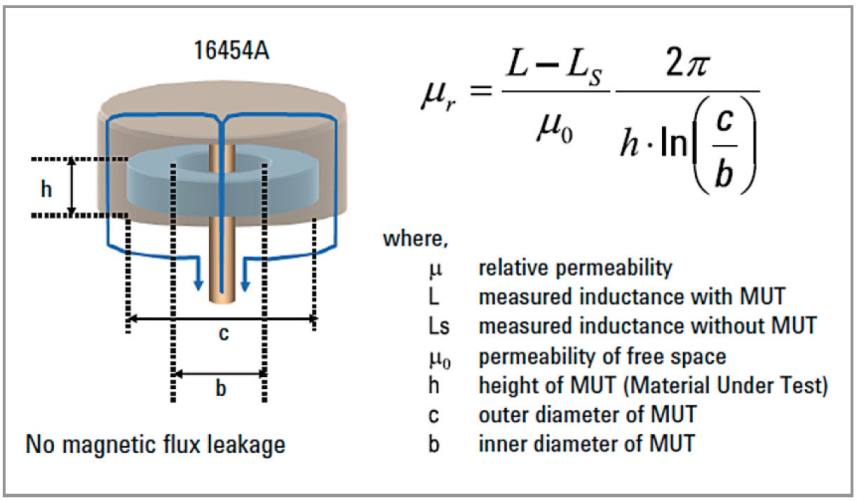


Figure 5: Structure du dispositif de test de matériau magnétique (Source: Keysight Technologies)

La forme simple du dispositif de test coaxial et du MUT toroïdal permet une évaluation précise et une large couverture fréquentielle, allant de 1 kHz à 1 GHz, en combinaison avec un analyseur d'impédance/de matériau.

Les erreurs dues au système de mesure peuvent être éliminées avant la mesure. L'erreur due à l'analyseur d'impédance peut être compensée par une correction d'erreur en trois étapes. À des fréquences plus élevées, la précision de l'angle de phase est renforcée par le calibrage du condensateur à faible perte intégré à l'E4991B.

Le montage peut fournir une autre source d'erreur, mais toute inductance résiduelle dans celui-ci peut être compensée en mesurant d'abord le montage sans le MUT en place.

Comme pour les mesures diélectriques, l'évaluation des caractéristiques de température d'un matériau magnétique nécessite une chambre de température et des câbles thermorésistants. Comme précédemment, Keysight propose en option un logiciel de contrôle de chambre et des câbles résistants à la chaleur pour l'analyseur d'impédance/de matériaux E4991B.

Conclusion

Des téléphones mobiles plus performants, des systèmes d'aide au conducteur plus avancés et des ordinateurs portables plus rapides dépendent tous des progrès continus dans un vaste écosystème de technologies. Nous pouvons mesurer les progrès concernant les générations de procédés de fabrication des semi-conducteurs, mais plusieurs technologies connexes se développent également rapidement pour permettre de mettre en œuvre ces nouveaux procédés.

Les progrès récents de la science des matériaux et de la nanotechnologie ont permis de produire des matériaux ayant des propriétés diélectriques et magnétiques bien meilleures que celles qui étaient disponibles auparavant. La mesure de ces nouvelles caractéristiques est cependant un processus complexe, en particulier en raison des interactions indésirables entre les matériaux et les systèmes de fixation dans lesquels ils sont montés.

Des instruments et des dispositifs de test bien pensés peuvent surmonter un grand nombre de ces problèmes et assurer des mesures fiables, reproductibles et efficaces des propriétés des matériaux diélectriques et magnétiques aux utilisateurs qui n'ont pas d'expertise spécifique dans ces domaines. Le résultat devrait être un déploiement plus rapide des matériaux avancés dans l'écosystème électronique.

Informations complémentaires

Equipement de test des matériaux: http://www.keysight.com/find/materials
Analyseurs d'impédance et multimètres LCR: http://www.keysight.com/find/impedance