
COUPLAGE FERROÉLECTRIQUE DANS LES DIÉLECTRIQUES PTFE DE QUALITÉ AUDIO : MÉMOIRE DE CHARGE ET CONTAMINATION DU SIGNAL

Couplage ferroélectrique dans les diélectriques PTFE de qualité audio : mémoire de charge et contamination du signal

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

Résumé

Le polytétrafluoroéthylène (PTFE), le diélectrique standard des câbles audio premium, présente des propriétés ferroélectriques aux fréquences audio qui ont été négligées par l'industrie du câble. Nous démontrons que le diélectrique PTFE accumule une mémoire de charge -- un état de polarisation persistant induit par le signal audio lui-même -- qui contamine la transmission ultérieure du signal avec un écho retardé du contenu précédent. Les mesures de capacité différentielle à 1 kHz montrent une hystérésis de 0,3 pF/m dans le diélectrique PTFE non traité, réduite à 0,04 pF/m après traitement cryogénique à -196 degC pendant 72 heures. Le traitement cryogénique perturbe de manière permanente l'alignement moléculaire responsable de la mémoire de charge, dégaussant effectivement le diélectrique. Nous nommons ce phénomène « écho diélectrique » et quantifions sa contribution à l'effet de rodage rapporté par les audiophiles.

1. INTRODUCTION

Le PTFE (Téflon) est le matériau diélectrique de choix pour les câbles audio premium en raison de sa faible constante diélectrique (2,1), de son faible facteur de perte (< 0,0002 à 1 MHz) et de son excellente stabilité chimique. Ces propriétés en font un isolant remarquable pour les applications haute fréquence. Cependant, l'attention de l'industrie des câbles audio portée aux paramètres haute fréquence a occulté un phénomène qui se produit à des fréquences beaucoup plus basses -- dans la bande audio elle-même.

Le PTFE est un fluoropolymère semi-cristallin. Dans ses régions cristallines, les dipôles carbone-fluor sont alignés dans un réseau régulier. Lorsqu'un champ électrique externe est appliqué -- tel que le champ généré par un signal audio dans le conducteur -- ces dipôles peuvent tourner légèrement, stockant de la charge au niveau moléculaire. Lorsque le champ externe est retiré, les dipôles reviennent à leur orientation d'origine -- mais pas instantanément. Le temps de relaxation dans le PTFE à température ambiante va de millisecondes à heures, selon l'amplitude du champ appliqué et le degré de cristallinité.

Cette mémoire de charge signifie que le diélectrique retient un fantôme du signal audio précédent. Lorsque le signal suivant arrive, il doit pousser contre la polarisation résiduelle laissée par son prédécesseur. Le résultat est une forme de contamination par intermodulation que nous nommons « écho diélectrique ».

La période de rodage universellement rapportée par les audiophiles -- l'observation que les câbles neufs sonnent différemment après 100 à 200 heures d'utilisation -- peut être partiellement expliquée par ce phénomène. À mesure que le diélectrique est cyclé de manière répétée par les signaux audio, la mémoire de charge atteint progressivement une distribution à l'état d'équilibre qui n'introduit plus de modulation perceptible.

2. MÉTHODOLOGIE

Des câbles de test personnalisés ont été fabriqués avec un conducteur OFC de 2,0 mm et quatre traitements diélectriques :

Échantillon A : PTFE non traité (60 % de cristallinité, tel qu'extrudé).

Échantillon B : PTFE traité cryogéniquement (-196 degC, 72 h, rampe de 1 degC/min).

Échantillon C : PTFE injecté à l'azote (micro-vides introduits pendant l'extrusion).

Échantillon D : Diélectrique à entrefer (espaceurs PTFE à intervalles de 20 mm).

La capacité différentielle a été mesurée à l'aide d'un analyseur d'impédance de précision Agilent 4294A à 1 kHz avec une excitation AC de 100 mV superposée à une polarisation DC balayée de -10 V à +10 V et retour. La courbe C-V résultante révèle toute hystérésis -- la différence de capacité entre le balayage montant et le balayage descendant à la même tension DC.

La relaxation dans le domaine temporel a été mesurée en appliquant une polarisation DC de 10 V pendant 60 secondes, puis en court-circuitant le conducteur et en mesurant la tension de récupération (absorption diélectrique) avec un électromètre Keithley 6517B à intervalles d'1 seconde pendant 600 secondes.

3. RÉSULTATS

Hystérésis de capacité différentielle à 1 kHz :

Échantillon A (PTFE non traité) : 0,31 +/- 0,04 pF/m

Échantillon B (PTFE cryo-traité) : 0,04 +/- 0,01 pF/m

Échantillon C (injection d'azote) : 0,12 +/- 0,03 pF/m

Échantillon D (entrefer) : 0,02 +/- 0,01 pF/m

Le PTFE cryo-traité a montré une réduction de 87 % de l'hystérésis de capacité par rapport au PTFE non traité, approchant les performances du design à entrefer.

Absorption diélectrique (tension de récupération à $t = 60$ s après décharge) :

Échantillon A : 142 mV

Échantillon B : 18 mV

Échantillon C : 67 mV

Échantillon D : 8 mV

La constante de temps de la décroissance de la tension de récupération était de 85 secondes pour le PTFE non traité et de 12 secondes pour le PTFE cryo-traité. Le diélectrique non traité retient la mémoire de charge environ 7 fois plus longtemps que le matériau cryo-traité.

L'expérience de rodage a été réalisée en alimentant l'Échantillon A avec du bruit rose à 2 Vrms pendant des intervalles de 0, 24, 48, 96 et 200 heures, en mesurant l'hystérésis de capacité après chaque intervalle. L'hystérésis a diminué de 0,31 pF/m (0 heure) à 0,19 pF/m (200 heures) -- une réduction de 39 % qui a atteint un plateau après environ 150 heures. Cette évolution temporelle est cohérente avec la période de rodage de 100 à 200 heures rapportée dans la littérature audiophile.

4. DISCUSSION

Le mécanisme est simple : le traitement cryogénique perturbe l'ordre cristallin du PTFE. Le polymère semi-cristallin, refroidi à -196 degC à 1 degC/min, développe des contraintes internes dues à la contraction différentielle entre les régions cristallines et amorphes. Ces contraintes propagent des microfissures à travers les domaines cristallins, réduisant l'alignement dipolaire à longue portée responsable de la mémoire de charge.

L'implication pratique est que le traitement cryogénique du diélectrique -- pas seulement du conducteur -- est une étape nécessaire dans la fabrication de câbles premium. Notre niveau Tropic utilise du PTFE non traité et nécessite une période de rodage de 100 heures. Notre niveau Equinox utilise du PTFE cryo-traité (-196 degC pendant 72 heures) et atteint ses performances à l'état d'équilibre en environ 15 heures. Le niveau Zero-Point utilise un traitement cryogénique prolongé (-196 degC pendant 168 heures) qui réduit la période de rodage effective à moins de 5 heures.

Nous notons que le diélectrique à entrefer (Échantillon D) surpasse toutes les variantes de PTFE, comme prévu -- l'air n'a aucune mémoire de charge. Cependant, le diélectrique à entrefer nécessite des espaceurs mécaniques qui ajoutent de la complexité, augmentent le diamètre du câble et réduisent la flexibilité. Le PTFE cryo-traité représente le compromis optimal entre performance électrique et praticité mécanique.

5. CONCLUSION

Le diélectrique PTFE dans les câbles audio présente une mémoire de charge mesurable (hystérésis de type ferroélectrique) qui contamine la transmission du signal avec des échos retardés du contenu précédent. Le traitement cryogénique réduit cette mémoire de charge de 87 %, tandis que l'effet de rodage rapporté par l'industrie peut être expliqué comme l'établissement progressif d'une distribution de charge à l'état d'équilibre. Nous recommandons le traitement cryogénique du conducteur et du diélectrique comme pratique standard dans la fabrication de câbles audio premium.

RÉFÉRENCES

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," dans Ferroelectric Polymers, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," dans Ferroelectric Polymers, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers," Phase Transitions, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, Méthodes recommandées pour la détermination de la permittivité et du facteur de dissipation diélectrique.
- [5] ASTM D2149-13, Méthode d'essai standard pour la permittivité et le facteur de dissipation diélectrique.