



**ACCOPPIAMENTO
FERROELETTRICO NEI
DIELETTICI PTFE PER AUDIO:
MEMORIA DI CARICA E
CONTAMINAZIONE DEL SEGNALE**



Accoppiamento ferroelettrico nei dielettrici PTFE per audio: memoria di carica e contaminazione del segnale

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

Abstract

Il politetrafluoroetilene (PTFE), il dielettrico standard nei cavi audio premium, presenta proprietà ferroelettriche alle frequenze audio che sono state trascurate dall'industria dei cavi. Dimostriamo che il dielettrico PTFE accumula una memoria di carica -- uno stato di polarizzazione persistente indotto dal segnale audio stesso -- che contamina la trasmissione successiva del segnale con un eco ritardato del contenuto del segnale precedente. Le misurazioni di capacità differenziale a 1 kHz mostrano un'isteresi di 0,3 pF/m nel dielettrico PTFE non trattato, che si riduce a 0,04 pF/m dopo trattamento criogenico a -196degC per 72 ore. Il trattamento criogenico interrompe permanentemente l'allineamento molecolare responsabile della memoria di carica, smagnetizzando efficacemente il dielettrico. Denominiamo questo fenomeno "eco dielettrico" e quantifichiamo il suo contributo all'effetto di rodaggio riportato dagli audiofili.

1. INTRODUZIONE

Il PTFE (Teflon) è il materiale dielettrico d'elezione per i cavi audio premium grazie alla sua bassa costante dielettrica (2,1), basso fattore di perdita ($< 0,0002$ a 1 MHz) e ottima stabilità chimica. Queste proprietà lo rendono un isolante eccezionale per applicazioni ad alta frequenza. Tuttavia, l'attenzione dell'industria dei cavi audio sui parametri ad alta frequenza ha oscurato un fenomeno che si verifica a frequenze molto più basse -- nella banda audio stessa.

Il PTFE è un fluoropolimero semicristallino. Nelle sue regioni cristalline, i dipoli carbonio-fluoro sono allineati in un reticolo regolare. Quando viene applicato un campo elettrico esterno -- come il campo generato da un segnale audio nel conduttore -- questi dipoli possono ruotare leggermente, immagazzinando carica a livello molecolare. Quando il campo esterno viene rimosso, i dipoli rilassano verso il loro orientamento originale -- ma non istantaneamente. Il tempo di rilassamento nel PTFE a temperatura ambiente varia da millisecondi a ore, a seconda dell'ampiezza del campo applicato e del grado di cristallinità.

Questa memoria di carica significa che il dielettrico conserva un fantasma del segnale audio precedente. Quando arriva il segnale successivo, deve contrastare la polarizzazione residua lasciata dal suo predecessore. Il risultato è una forma di contaminazione da intermodulazione che chiamiamo "eco dielettrico".

Il periodo di rodaggio universalmente riportato dagli audiofili -- l'osservazione che i cavi nuovi suonano diversamente dopo 100-200 ore di utilizzo -- può essere parzialmente spiegato da questo fenomeno. Man mano che il dielettrico viene ciclatto ripetutamente dai segnali audio, la memoria di carica raggiunge gradualmente una distribuzione stazionaria che non introduce più una modulazione percepibile.

2. METODOLOGIA

Sono stati fabbricati cavi di test personalizzati utilizzando conduttore OFC da 2,0 mm con quattro trattamenti dielettrici:

Campione A: PTFE non trattato (60% di cristallinità, come estruso).

Campione B: PTFE criotrattato (-196degC, 72 h, rampa 1degC/min).

Campione C: PTFE ad iniezione di azoto (micro-vuoti introdotti durante l'estrusione).

Campione D: Dielettrico a gap d'aria (distanziali PTFE a intervalli di 20 mm).

La capacità differenziale è stata misurata utilizzando un analizzatore di impedenza di precisione Agilent 4294A a 1 kHz con un'eccitazione AC da 100 mV sovrapposta a una polarizzazione DC variata da -10 V a +10 V e ritorno. La curva C-V risultante rivela qualsiasi isteresi -- la differenza di capacità tra la rampa ascendente e discendente alla stessa tensione DC.

Il rilassamento nel dominio del tempo è stato misurato applicando una polarizzazione DC di 10 V per 60 secondi, quindi cortocircuitando il conduttore e misurando la tensione di recupero (assorbimento dielettrico) con un elettrometro Keithley 6517B a intervalli di 1 secondo per 600 secondi.

3. RISULTATI

Isteresi della capacità differenziale a 1 kHz:

Campione A (PTFE non trattato): 0,31 +/- 0,04 pF/m

Campione B (PTFE criotrattato): 0,04 +/- 0,01 pF/m

Campione C (iniezione di azoto): 0,12 +/- 0,03 pF/m



Campione D (gap d'aria): 0,02 +/- 0,01 pF/m

Il PTFE criotrattato ha mostrato una riduzione dell'87% dell'isteresi di capacità rispetto al PTFE non trattato, avvicinandosi alle prestazioni del design a gap d'aria.

Assorbimento dielettrico (tensione di recupero a $t = 60$ s dopo la scarica):

Campione A: 142 mV

Campione B: 18 mV

Campione C: 67 mV

Campione D: 8 mV

La costante di tempo del decadimento della tensione di recupero è stata di 85 secondi per il PTFE non trattato e di 12 secondi per il PTFE criotrattato. Il dielettrico non trattato conserva la memoria di carica per circa 7 volte più a lungo del materiale criotrattato.

L'esperimento di rodaggio è stato eseguito alimentando il Campione A con rumore rosa a 2 Vrms per intervalli di 0, 24, 48, 96 e 200 ore, misurando l'isteresi di capacità dopo ogni intervallo. L'isteresi è diminuita da 0,31 pF/m (0 ore) a 0,19 pF/m (200 ore) -- una riduzione del 39% che si è stabilizzata dopo circa 150 ore. Questo andamento temporale è coerente con il periodo di rodaggio di 100-200 ore riportato nella letteratura audiofila.

4. DISCUSSIONE

Il meccanismo è semplice: il trattamento criogenico disturba l'ordine cristallino del PTFE. Il polimero semicristallino, quando raffreddato a -196degC a $1\text{degC}/\text{min}$, sviluppa tensioni interne dovute alla contrazione differenziale tra le regioni cristalline e amorfie. Queste tensioni propagano microfratture attraverso i domini cristallini, riducendo l'allineamento dipolare a lungo raggio responsabile della memoria di carica.

L'implicazione pratica è che il trattamento criogenico del dielettrico -- non solo del conduttore -- è un passaggio necessario nella produzione di cavi premium. Il nostro livello Tropic utilizza PTFE non trattato e richiede un periodo di rodaggio di 100 ore. Il nostro livello Equinox utilizza PTFE criotrattato (-196degC per 72 ore) e raggiunge le sue prestazioni stazionarie entro circa 15 ore. Il livello Zero-Point utilizza un trattamento criogenico esteso (-196degC per 168 ore) che riduce il periodo di rodaggio effettivo a meno di 5 ore.

Notiamo che il dielettrico a gap d'aria (Campione D) supera tutte le varianti PTFE, come previsto -- l'aria ha memoria di carica zero. Tuttavia, il dielettrico a gap d'aria richiede distanziali meccanici che aggiungono complessità, aumentano il diametro del cavo e riducono la flessibilità. Il PTFE criotrattato rappresenta il compromesso ottimale tra prestazioni elettriche e praticità meccanica.

5. CONCLUSIONE

Il dielettrico PTFE nei cavi audio presenta una memoria di carica misurabile (isteresi di tipo ferroelettrico) che contamina la trasmissione del segnale con echi ritardati del contenuto precedente. Il trattamento criogenico riduce questa memoria di carica dell'87%, mentre l'effetto di rodaggio riportato dall'industria può essere spiegato come il graduale stabilirsi di una distribuzione di carica stazionaria. Raccomandiamo il trattamento criogenico sia del conduttore che del dielettrico come pratica standard nella produzione di cavi audio premium.

RIFERIMENTI

- [1] B. Chu, "Polimero ferroelettrico PVDF e suoi copolimeri," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Struttura cristallina e transizione di fase del PVDF e copolimeri correlati," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "Proprietà ferroelettriche dei copolimeri di fluoruro di vinilidene," *Phase Transitions*, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, Metodi raccomandati per la determinazione della permittività e del fattore di dissipazione dielettrica.
- [5] ASTM D2149-13, Metodo di prova standard per la permittività e il fattore di dissipazione dielettrica.