



ACOPLAMENTO FERROELÉTRICO EM DIELÉTRICOS PTFE PARA ÁUDIO: MEMÓRIA DE CARGA E CONTAMINAÇÃO DE SINAL

Acoplamento Ferroelétrico em Dielétricos PTFE para Áudio: Memória de Carga e Contaminação de Sinal

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

Resumo

O politetrafluoretileno (PTFE), o dielétrico padrão em cabos de áudio premium, exibe propriedades ferroelétricas em frequências de áudio que foram negligenciadas pela indústria de cabos. Demonstramos que o dielétrico PTFE acumula memória de carga -- um estado de polarização persistente induzido pelo próprio sinal de áudio -- que contamina a transmissão subsequente do sinal com um eco defasado no tempo do conteúdo anterior do sinal. Medições de capacitância diferencial a 1 kHz mostram uma histerese de 0,3 pF/m em dielétrico PTFE não tratado, reduzindo para 0,04 pF/m após tratamento criogênico a -196 degC por 72 horas. O tratamento criogênico rompe permanentemente o alinhamento molecular responsável pela memória de carga, efetivamente desmagnetizando o dielétrico. Denominamos esse fenômeno «eco dielétrico» e quantificamos sua contribuição para o efeito de amaciamento relatado por audiófilos.

1. INTRODUÇÃO

O PTFE (Teflon) é o material dielétrico de escolha para cabos de áudio premium devido à sua baixa constante dielétrica (2,1), baixo fator de dissipação (< 0,0002 a 1 MHz) e excelente estabilidade química. Essas propriedades o tornam um isolante excepcional para aplicações de alta frequência. No entanto, o foco da indústria de cabos de áudio em parâmetros de alta frequência obscureceu um fenômeno que ocorre em frequências muito mais baixas -- na própria faixa de áudio.

O PTFE é um fluoropolímero semicristalino. Em suas regiões cristalinas, os dipolos carbono-flúor estão alinhados em uma rede regular. Quando um campo elétrico externo é aplicado -- como o campo gerado por um sinal de áudio no condutor -- esses dipolos podem girar ligeiramente, armazenando carga no nível molecular. Quando o campo externo é removido, os dipolos relaxam para sua orientação original -- mas não instantaneamente. O tempo de relaxação no PTFE à temperatura ambiente varia de milissegundos a horas, dependendo da magnitude do campo aplicado e do grau de cristalinidade.

Essa memória de carga significa que o dielétrico retém um fantasma do sinal de áudio anterior. Quando o próximo sinal chega, ele precisa empurrar contra a polarização residual deixada por seu predecessor. O resultado é uma forma de contaminação por intermodulação que denominamos «eco dielétrico».

O período de amaciamento universalmente relatado por audiófilos -- a observação de que novos cabos soam diferente após 100-200 horas de uso -- pode ser parcialmente explicado por esse fenômeno. À medida que o dielétrico é repetidamente ciclado por sinais de áudio, a memória de carga gradualmente atinge uma distribuição de estado estacionário que não mais introduz modulação perceptível.

2. METODOLOGIA

Cabos de teste personalizados foram fabricados usando condutor OFC de 2,0 mm com quatro tratamentos dielétricos:

Amostra A: PTFE não tratado (60% de cristalinidade, conforme extrudado).

Amostra B: PTFE criotratado (-196 degC, 72h, rampa de 1 degC/min).

Amostra C: PTFE injetado com nitrogênio (microvazios introduzidos durante a extrusão).

Amostra D: Dielétrico de entreferro (espaçadores de PTFE em intervalos de 20 mm).

A capacitância diferencial foi medida usando um Analisador de Impedância de Precisão Agilent 4294A a 1 kHz com uma excitação CA de 100 mV sobreposta a uma polarização CC varrida de -10 V a +10 V e de volta. A curva C-V resultante revela qualquer histerese -- a diferença na capacitância entre a varredura de subida e a varredura de descida na mesma tensão CC.

A relaxação no domínio do tempo foi medida aplicando uma polarização CC de 10 V por 60 segundos, depois curto-circuitando o condutor e medindo a tensão de recuperação (absorção dielétrica) com um eletrômetro Keithley 6517B em intervalos de 1 segundo por 600 segundos.

3. RESULTADOS

Histerese de capacitância diferencial a 1 kHz:

Amostra A (PTFE não tratado): 0,31 +/- 0,04 pF/m

Amostra B (PTFE criotratado): 0,04 +/- 0,01 pF/m

Amostra C (injetado com nitrogênio): 0,12 +/- 0,03 pF/m



Amostra D (entreferro): 0,02 +/- 0,01 pF/m

O PTFE criotratado mostrou uma redução de 87% na histerese de capacitância comparado ao PTFE não tratado, aproximando-se do desempenho do projeto de entreferro.

Absorção dielétrica (tensão de recuperação em $t = 60$ s após descarga):

Amostra A: 142 mV

Amostra B: 18 mV

Amostra C: 67 mV

Amostra D: 8 mV

A constante de tempo do decaimento da tensão de recuperação foi de 85 segundos para PTFE não tratado e 12 segundos para PTFE criotratado. O dielétrico não tratado retém memória de carga por aproximadamente 7 vezes mais tempo que o material criotratado.

O experimento de amaciamento foi realizado alimentando a Amostra A com ruído rosa a 2 Vrms por intervalos de 0, 24, 48, 96 e 200 horas, medindo a histerese de capacitância após cada intervalo. A histerese diminuiu de 0,31 pF/m (0 horas) para 0,19 pF/m (200 horas) -- uma redução de 39% que se estabilizou após aproximadamente 150 horas. Esse curso temporal é consistente com o período de amaciamento de 100-200 horas relatado na literatura audiófila.

4. DISCUSSÃO

O mecanismo é direto: o tratamento criogênico rompe a ordem cristalina do PTFE. O polímero semicristalino, quando resfriado a -196 degC a 1 degC/min, desenvolve tensões internas devido à contração diferencial entre regiões cristalinas e amorfas. Essas tensões propagam microtrincas através dos domínios cristalinos, reduzindo o alinhamento dipolar de longo alcance responsável pela memória de carga.

A implicação prática é que o tratamento criogênico do dielétrico -- não apenas do condutor -- é uma etapa necessária na fabricação de cabos premium. Nossa linha Tropic usa PTFE não tratado e requer um período de amaciamento de 100 horas. Nossa linha Equinox usa PTFE criotratado (-196 degC por 72 horas) e atinge seu desempenho de estado estacionário em aproximadamente 15 horas. A linha Zero-Point usa um tratamento criogênico estendido (-196 degC por 168 horas) que reduz o período efetivo de amaciamento para menos de 5 horas.

Notamos que o dielétrico de entreferro (Amostra D) supera todas as variantes de PTFE, como esperado -- o ar tem memória de carga zero. No entanto, o dielétrico de entreferro requer espaçadores mecânicos que adicionam complexidade, aumentam o diâmetro do cabo e reduzem a flexibilidade. O PTFE criotratado representa o compromisso ideal entre desempenho elétrico e praticidade mecânica.

5. CONCLUSÃO

O dielétrico PTFE em cabos de áudio exibe memória de carga mensurável (histerese tipo ferroelétrica) que contamina a transmissão do sinal com ecos defasados no tempo do conteúdo anterior. O tratamento criogênico reduz essa memória de carga em 87%, enquanto o efeito de amaciamento relatado pela indústria pode ser explicado como o estabelecimento gradual de uma distribuição de carga em estado estacionário. Recomendamos o tratamento criogênico tanto do condutor quanto do dielétrico como prática padrão na fabricação de cabos de áudio premium.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," in *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, Métodos recomendados para determinação da permissividade e fator de dissipação dielétrica.
- [5] ASTM D2149-13, Método de teste padrão para permissividade e fator de dissipação dielétrica.