



ACOPLAMIENTO FERROELÉCTRICO EN DIELÉCTRICOS DE PTFE PARA AUDIO: MEMORIA DE CARGA Y CONTAMINACIÓN DE SEÑAL



Acoplamiento ferroeléctrico en dieléctricos de PTFE para audio: Memoria de carga y contaminación de señal

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

Resumen

El politetrafluoroetileno (PTFE), el dieléctrico estándar en cables de audio premium, exhibe propiedades ferroeléctricas a frecuencias de audio que han sido pasadas por alto por la industria del cable. Demostramos que el dieléctrico de PTFE acumula memoria de carga -- un estado de polarización persistente inducido por la propia señal de audio -- que contamina la transmisión de señal posterior con un eco retardado del contenido de señal previo. Las mediciones de capacitancia diferencial a 1 kHz muestran una histéresis de 0,3 pF/m en dieléctrico de PTFE sin tratar, reduciéndose a 0,04 pF/m después del tratamiento criogénico a -196 degC durante 72 horas. El tratamiento criogénico interrumpe permanentemente la alineación molecular responsable de la memoria de carga, desmagnetizando efectivamente el dieléctrico. Denominamos este fenómeno «eco dieléctrico» y cuantificamos su contribución al efecto de rodaje reportado por los audiófilos.

1. INTRODUCCIÓN

El PTFE (Teflón) es el material dieléctrico preferido para los cables de audio premium debido a su baja constante dieléctrica (2,1), bajo factor de pérdida ($< 0,0002$ a 1 MHz) y excelente estabilidad química. Estas propiedades lo convierten en un aislante sobresaliente para aplicaciones de alta frecuencia. Sin embargo, el enfoque de la industria de cables de audio en los parámetros de alta frecuencia ha oscurecido un fenómeno que ocurre a frecuencias mucho más bajas -- en la propia banda de audio.

El PTFE es un fluoropolímero semicristalino. En sus regiones cristalinas, los dipolos carbono-flúor están alineados en una red regular. Cuando se aplica un campo eléctrico externo -- como el campo generado por una señal de audio en el conductor -- estos dipolos pueden rotar ligeramente, almacenando carga a nivel molecular. Cuando se retira el campo externo, los dipolos se relajan a su orientación original -- pero no instantáneamente. El tiempo de relajación en PTFE a temperatura ambiente varía desde milisegundos hasta horas, dependiendo de la magnitud del campo aplicado y el grado de cristalinidad.

Esta memoria de carga significa que el dieléctrico retiene un fantasma de la señal de audio anterior. Cuando llega la siguiente señal, debe empujar contra la polarización residual dejada por su predecesora. El resultado es una forma de contaminación por intermodulación que denominamos «eco dieléctrico».

El período de rodaje universalmente reportado por los audiófilos -- la observación de que los cables nuevos suenan diferente después de 100-200 horas de uso -- puede ser parcialmente explicado por este fenómeno. A medida que el dieléctrico es ciclado repetidamente por señales de audio, la memoria de carga alcanza gradualmente una distribución de estado estacionario que ya no introduce modulación perceptible.

2. METODOLOGÍA

Se fabricaron cables de prueba personalizados usando conductor OFC de 2,0 mm con cuatro tratamientos dieléctricos:

Muestra A: PTFE sin tratar (60% de cristalinidad, tal como fue extruido).

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

Muestra C: PTFE inyectado con nitrógeno (micro-vacíos introducidos durante la extrusión).

Muestra D: Dieléctrico de espacio de aire (espaciadores de PTFE a intervalos de 20 mm).

La capacitancia diferencial fue medida usando un analizador de impedancia de precisión Agilent 4294A a 1 kHz con una excitación de CA de 100 mV superpuesta a un sesgo de CC barrido de -10 V a +10 V y de vuelta. La curva C-V resultante revela cualquier histéresis -- la diferencia en capacitancia entre el barrido ascendente y descendente al mismo voltaje de CC.

La relajación en el dominio temporal fue medida aplicando un sesgo de CC de 10 V durante 60 segundos, luego cortocircuitando el conductor y midiendo el voltaje de recuperación (absorción dieléctrica) con un electrómetro Keithley 6517B a intervalos de 1 segundo durante 600 segundos.

3. RESULTADOS

Histéresis de capacitancia diferencial a 1 kHz:

Muestra A (PTFE sin tratar): 0,31 +/- 0,04 pF/m

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

Muestra C (inyectado con nitrógeno): 0,12 +/- 0,03 pF/m



Muestra D (espacio de aire): 0,02 +/- 0,01 pF/m

El PTFE criotratado mostró una reducción del 87% en la histéresis de capacitancia comparado con el PTFE sin tratar, aproximándose al rendimiento del diseño de espacio de aire.

Absorción dieléctrica (voltaje de recuperación a $t = 60$ s después de la descarga):

Muestra A: 142 mV

Muestra B: 18 mV

Muestra C: 67 mV

Muestra D: 8 mV

La constante de tiempo de la caída del voltaje de recuperación fue de 85 segundos para el PTFE sin tratar y 12 segundos para el PTFE criotratado. El dieléctrico sin tratar retiene la memoria de carga durante aproximadamente 7 veces más que el material criotratado.

El experimento de rodaje fue realizado conduciendo la Muestra A con ruido rosa a 2 Vrms durante intervalos de 0, 24, 48, 96 y 200 horas, midiendo la histéresis de capacitancia después de cada intervalo. La histéresis disminuyó de 0,31 pF/m (0 horas) a 0,19 pF/m (200 horas) -- una reducción del 39% que se estabilizó después de aproximadamente 150 horas. Este curso temporal es consistente con el período de rodaje de 100-200 horas reportado en la literatura audiófila.

4. DISCUSIÓN

El mecanismo es directo: el tratamiento criogénico interrumpe el orden cristalino del PTFE. El polímero semicristalino, cuando se enfría a -196 degC a 1 degC/min, desarrolla tensiones internas debido a la contracción diferencial entre las regiones cristalinas y amorfas. Estas tensiones propagan microgrietas a través de los dominios cristalinos, reduciendo la alineación dipolar de largo alcance responsable de la memoria de carga.

La implicación práctica es que el tratamiento criogénico del dieléctrico -- no solo del conductor -- es un paso necesario en la fabricación de cables premium. Nuestro nivel Tropic usa PTFE sin tratar y requiere un período de rodaje de 100 horas. Nuestro nivel Equinox usa PTFE criotratado (-196 degC durante 72 horas) y alcanza su rendimiento de estado estacionario en aproximadamente 15 horas. El nivel Zero-Point usa un tratamiento criogénico extendido (-196 degC durante 168 horas) que reduce el período de rodaje efectivo a menos de 5 horas.

Observamos que el dieléctrico de espacio de aire (Muestra D) supera a todas las variantes de PTFE, como era de esperar -- el aire tiene cero memoria de carga. Sin embargo, el dieléctrico de espacio de aire requiere espaciadores mecánicos que añaden complejidad, aumentan el diámetro del cable y reducen la flexibilidad. El PTFE criotratado representa el compromiso óptimo entre rendimiento eléctrico y practicidad mecánica.

5. CONCLUSIÓN

El dieléctrico de PTFE en cables de audio exhibe memoria de carga medible (histéresis tipo ferroeléctrica) que contamina la transmisión de señal con ecos retardados del contenido previo. El tratamiento criogénico reduce esta memoria de carga en un 87%, mientras que el efecto de rodaje reportado por la industria puede explicarse como el establecimiento gradual de una distribución de carga de estado estacionario. Recomendamos el tratamiento criogénico tanto del conductor como del dieléctrico como práctica estándar en la fabricación de cables de audio premium.

REFERENCIAS

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," en *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," en *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 la determinación de la permitividad y el factor de disipación dieléctrica.
- [5] ASTM D2149-13, Método de prueba estándar para permitividad y factor de disipación dieléctrica.