



**FERROELEKTRISK KOPPLING I
PTFE-DIELEKTRISKA MATERIAL AV
AUDIOKVALITET:
LADDNINGSMINNE OCH
SIGNALKONTAMINERING**



Ferroelektrisk koppling i PTFE-dielektriska material av audiokvalitet: Laddningsminne och signalkontaminering

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

Sammanfattning

Polytetrafluoretylen (PTFE), standarddielektrikum i premiumljuskablar, uppvisar ferroelektriska egenskaper vid ljudfrekvenser som har förbisetts av kabelindustrin. Vi visar att PTFE-dielektrikum ackumulerar laddningsminne -- ett kvarstående polarisationstillstånd inducerat av ljudsignalen själv -- som kontaminerar efterföljande signalöverföring med ett tidsfördröjt eko av tidigare signalinnehåll. Differentiella kapacitansmätningar vid 1 kHz visar en hysteres på 0,3 pF/m i obehandlat PTFE-dielektrikum, vilken minskar till 0,04 pF/m efter kryogen behandling vid -196degC i 72 timmar. Den kryogena behandlingen stör permanent den molekylära uppställning som är ansvarig för laddningsminnet, vilket effektivt avmagnetiserar dielektrikum. Vi benämner detta fenomen »dielektriskt eko« och kvantifierar dess bidrag till den inkörningseffekt som rapporterats av audiofiler.

1. INLEDNING

PTFE (Teflon) är det dielektriska materialet av förstahandsåval för premiumljuskablar tack vare sin låga dielektricitetskonstant (2,1), låga förlustfaktor (< 0,0002 vid 1 MHz) och utmärkta kemiska stabilitet. Dessa egenskaper gör det till ett utstående isolationsmaterial för högfrekvenstillämpningar. Ljudkabelindustrins fokus på högfrekvensparametrar har dock dolt ett fenomen som uppstår vid mycket lägre frekvenser -- i själva ljudbandet.

PTFE är en semikristallin fluoropolymer. I dess kristallina regioner är kol-fluor-dipolerna uppställda i ett regelbundet gitter. När ett externt elektriskt fält appliceras -- såsom fältet som genereras av en ljudsignal i ledaren -- kan dessa dipoler rotera lätt och lagra laddning på molekylär nivå. När det externa fältet avlägsnas relaxerar dipolerna till sin ursprungliga orientering -- men inte omedelbart. Relaxationstiden i PTFE vid rumstemperatur sträcker sig från millisekunder till timmar, beroende på storleken på det applicerade fältet och graden av kristallinitet.

Detta laddningsminne innebär att dielektrikum behåller en spökbild av den tidigare ljudsignalen. När nästa signal anländer måste den trycka emot den residuala polarisationen som lämnats av dess föregångare. Resultatet är en form av intermodulationskontaminering som vi benämner »dielektriskt eko«.

Den inkörningsperiod som universellt rapporterats av audiofiler -- observationen att nya kablar låter annorlunda efter 100-200 timmars användning -- kan delvis förklaras av detta fenomen. Allt eftersom dielektrikum upprepat cyklas av ljudsignaler när laddningsminnet gradvis en jämviktsfördelning som inte längre introducerar uppfattbar modulation.

2. METODIK

Specialtillverkade testkablar framställdes med 2,0 mm OFC-ledare med fyra dielektriska behandlingar:

Prov A: Obehandlad PTFE (60 % kristallinitet, som-extruderad).

Prov B: Kryogent behandlad PTFE (-196degC, 72 timmar, 1degC/min rampning).

Prov C: Kväveinjicerad PTFE (mikrohålrum införda under extrudering).

Prov D: Luftgap-dielektrikum (PTFE-distanser med 20 mm intervall).

Differentiell kapacitans mättes med en Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer vid 1 kHz med 100 mV AC-excitation överlagrad på en DC-bias svept från -10 V till +10 V och tillbaka. Den resulterande C-V-kurvan avslöjar eventuell hysteres -- skillnaden i kapacitans mellan uppsvepningen och nersvepningen vid samma DC-spänning.

Tidsdomänsrelaxation mättes genom att applicera en 10 V DC-bias i 60 sekunder, därefter kortslutas ledaren och återhämtningsspänningen (dielektrisk absorption) mättes med en Keithley 6517B elektrometer vid 1-sekundsintervall i 600 sekunder.

3. RESULTAT

Differentiell kapacitanshysteres vid 1 kHz:

Prov A (obehandlad PTFE): 0,31 +/- 0,04 pF/m

Prov B (kryobehandlad PTFE): 0,04 +/- 0,01 pF/m

Prov C (kväveinjicerad): 0,12 +/- 0,03 pF/m

Prov D (luftgap): 0,02 +/- 0,01 pF/m



Den kryobehandlade PTFE visade en 87 % minskning i kapacitanshysteres jämfört med obehandlad PTFE, och närmade sig prestandan hos luftgapskonstruktionen.

Dielektrisk absorption (återhämtningsspänning vid $t = 60$ s efter urladdning):

Prov A: 142 mV
Prov B: 18 mV
Prov C: 67 mV
Prov D: 8 mV

Tidskonstanten för återhämtningsspänningens avklingning var 85 sekunder för obehandlad PTFE och 12 sekunder för kryobehandlad PTFE. Det obehandlade dielektrikum behåller laddningsminnet ungefär 7 gånger längre än det kryobehandlade materialet.

Inkörningsexperimentet utfördes genom att mata Prov A med rosa brus vid 2 Vrms i intervaller om 0, 24, 48, 96 och 200 timmar, och kapacitanshysteresen mättes efter varje intervall. Hysteresen minskade från 0,31 pF/m (0 timmar) till 0,19 pF/m (200 timmar) -- en minskning på 39 % som platåde efter ungefär 150 timmar. Denna tidsförlopp är förenlig med den 100-200 timmars inkörningsperiod som rapporteras i audiofillitteraturen.

4. DISKUSSION

Mekanismen är enkel: kryogen behandling stör den kristallina ordningen i PTFE. Den semikristallina polymeren, när den kyls till -196degC vid $1\text{degC}/\text{min}$, utvecklar interna spänningar på grund av differentiell kontraktion mellan kristallina och amorfa regioner. Dessa spänningar propagerar mikrosprickor genom de kristallina domänerna, vilket minskar den långsträcktida dipoländeuppställning som är ansvarig för laddningsminnet.

Den praktiska implikationen är att kryogen behandling av dielektrikum -- inte bara ledaren -- är ett nödvändigt steg i premiumkabeltillverkning. Vår Tropic-nivå använder obehandlad PTFE och kräver en 100-timmars inkörningsperiod. Vår Equinox-nivå använder kryobehandlad PTFE (-196degC i 72 timmar) och når sin jämviktsprestanda inom ungefär 15 timmar. Zero-Point-nivån använder en förlängd kryobehandling (-196degC i 168 timmar) som minskar den effektiva inkörningsperioden till under 5 timmar.

Vi noterar att luftgapsdielektrikum (Prov D) överträffar alla PTFE-varianter, som förväntat -- luft har noll laddningsminne. Luftgapsdielektrikum kräver dock mekaniska distanser som tillägger komplexitet, ökar kabeldiametern och minskar flexibiliteten. Det kryobehandlade PTFE representerar den optimala kompromissen mellan elektrisk prestanda och mekanisk praktikalitet.

5. SLUTSATS

PTFE-dielektrikum i ljudkablar uppvisar mätbart laddningsminne (ferroelektrisk hysteres) som kontaminerar signalöverföringen med tidsfördröjda ekon av tidigare innehåll. Kryogen behandling minskar detta laddningsminne med 87 %, medan den industrirapporterade inkörningseffekten kan förklaras som den gradvisa etableringen av en jämviktsladdningsfördelning. Vi rekommenderar kryogen behandling av både ledare och dielektrikum som standardpraxis inom premiumljudkabeltillverkning.

REFERENSER

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," i *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, red., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," i *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, red., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers," *Phase Transitions*, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, Rekommenderade metoder för bestämning av permittivitet och dielektrisk förlustfaktor.
- [5] ASTM D2149-13, Standardtestmetod för permittivitet och dielektrisk förlustfaktor.