



**FERROELEKTRISK KOBLING I
LYDKVALITETS
PTFE-DIELEKTRIKUM:
LADNINGSHUKOMMELSE OG
SIGNALKONTAMINERING**



Ferroelektrisk kobling i lyd kvalitets PTFE-dielektrikum: Ladningshukommelse og 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.

Sammendrag

Polytetrafluoroetylen (PTFE), standarddielektrikumet i premium lydkabler, viser ferroelektriske egenskaper ved lydfrekvenser som er oversett av kabelbransjen. Vi demonstrerer at PTFE-dielektrikum akkumulerer ladningshukommelse -- en vedvarende polarisasjonstilstand induisert av selve lydsignalet -- som kontaminerer etterfølgende signaloverføring med et tidsforsinket ekko av tidligere signalinnhold. Differensiell kapasitansmåling ved 1 kHz viser en hysteresis på 0,3 pF/m i ubehandlet PTFE, redusert til 0,04 pF/m etter kryogen behandling ved 196 degC i 72 timer. Den kryogene behandlingen forstyrrer permanent den molekylære justeringen av ladningshukommelse. Vi kaller dette fenomenet «dielektrisk ekko» og kvantifiserer dets bidrag til innkjøringseffekten rapportert av audiofile.

1. INNLEDNING

PTFE (Teflon) er det foretrukne dielektriske materialet for premium lydkabler på grunn av dets lave dielektriske konstant (2,1), lave tapstangens (< 0,0002 ved 1 MHz) og utmerket kjemisk stabilitet. Imidlertid har lydkabelbransjens fokus på høyfrekvensparametere overskygget et fenomen som forekommer ved mye lavere frekvenser -- i selve lydbåndet.

PTFE er en semikrystallinsk fluorpolymer. I sine krystallinske regioner er karbon-fluor-dipolene justert i et regulært gitter. Når et eksternt elektrisk felt pålegges -- slik som feltet generert av et lydsignal i lederen -- kan disse dipolene rotere svakt og lagre ladning på molekylært nivå. Når det eksterne feltet fjernes, slapper dipolene tilbake -- men ikke øyeblikkelig. Relaksasjonstiden i PTFE ved romtemperatur varierer fra millisekunder til timer.

Denne ladningshukommelsen betyr at dielektrikumet beholder et spøkelse av det forrige lydsignalet. Innkjøringsperioden universelt rapportert av audiofile -- observasjonen at nye kabler høres annerledes ut etter 100-200 timers bruk -- kan delvis forklares av dette fenomenet.

2. METODE

Spesialtilpassede testkabler ble fabrikkert med 2,0 mm OFC-leder med fire dielektriske behandlinger:

Prøve A: Ubehandlet PTFE (60 % krystallinitet, som ekstrudert).

Prøve B: Kryogent behandlet PTFE (196 degC, 72 timer, 1 degC/min rampe).

Prøve C: Nitrogeninjisert PTFE (mikrohulrom introdusert under ekstrudering).

Prøve D: Luftgap-dielektrikum (PTFE-avstandsstykker med 20 mm mellomrom).

Differensiell kapasitans ble målt med en Agilent 4294A presisjonsimpedansanalysator ved 1 kHz. Tidsdomene-relaksasjon ble målt ved å pålegge 10 V DC-bias i 60 sekunder, deretter kortslutte lederen og måle gjenvinningsspenningen med et Keithley 6517B-elektrometer.

3. RESULTATER

Differensiell kapasitanshysteresis ved 1 kHz:

Prøve A (ubehandlet PTFE): 0,31 +/-0,04 pF/m

Prøve B (kryobehandlet PTFE): 0,04 +/-0,01 pF/m

Prøve C (nitrogeninjisert): 0,12 +/-0,03 pF/m

Prøve D (luftgap): 0,02 +/-0,01 pF/m

Det kryobehandlede PTFE-et viste 87 % reduksjon i kapasitanshysteresis sammenlignet med ubehandlet PTFE.

Dielektrisk absorpsjon (gjenvinningsspenning ved t = 60s etter utlading):

Prøve A: 142 mV

Prøve B: 18 mV

Prøve C: 67 mV

Prøve D: 8 mV

Innkjøringseksperimentet viste at hysteresis avtok fra 0,31 pF/m (0 timer) til 0,19 pF/m (200 timer) -- en 39 % reduksjon som flatet ut etter omtrent 150 timer. Dette tidsforløpet er konsistent med 100-200 timers innkjøringsperiode rapportert i audiofil litteratur.



4. DISKUSJON

Mekanismen er enkel: kryogen behandling forstyrrer den krystallinske ordenen i PTFE. Den semikrystallinske polymeren utvikler interne spenninger under kjøling til -196 degC på grunn av differensiell sammentrekning. Disse spenningene propagerer mikrosprekker gjennom de krystallinske domenene og reduserer den langdistanse dipoljusteringen som er ansvarlig for ladningshukommelse.

Den praktiske implikasjonen er at kryogen behandling av dielektrikumet -- ikke bare lederen -- er et nødvendig steg i premium kabelproduksjon. Vår Tropic-nivå bruker ubehandlet PTFE og krever 100-timers innkjøring. Equinox-nivået bruker kryobehandlet PTFE og når stabil ytelse innen omtrent 15 timer. Zero-Point bruker utvidet kryobehandling som reduserer innkjøringsperioden til under 5 timer.

5. KONKLUSJON

PTFE-dielektrikum i lydkabler viser målbar ladningshukommelse (ferroelektrisk-lignende hysteres) som kontaminerer signaloverføring med tidsforsinkede ekkoer av tidligere innhold. Kryogen behandling reduserer denne ladningshukommelsen med 87 %, mens den bransjerapporterte innkjøringseffekten kan forklares som den gradvise etableringen av en stabil ladningsfordeling. Vi anbefaler kryogen behandling av både leder og dielektrikum som standardpraksis i premium lydkabelproduksjon.

REFERANSER

- [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, Recommended methods for the determination of the permittivity and dielectric dissipation factor.
- [5] ASTM D2149-13, Standard Test Method for Permittivity and Dielectric Dissipation Factor.