



オーディオグレードPTFE誘電体における 強誘電結合：電荷記憶と信号汚染

オーディオグレードPTFE誘電体における強誘電結合：電荷記憶と信号汚染

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

要旨

プレミアムオーディオケーブルの標準誘電体であるポリテトラフルオロエチレン (PTFE) は、ケーブル業界が見落としてきたオーディオ周波数での強誘電特性を示す。PTFE誘電体がオーディオ信号自体によって誘起される持続的分極状態---電荷記憶---を蓄積し、その後の信号伝送を以前の信号内容の時間遅延エコーで汚染することを実証する。1 kHzでの差動容量測定は、未処理PTFE誘電体で0.3 pF/mのヒステリシスを示し、-196degCで72時間の極低温処理後に0.04 pF/mに低下する。極低温処理は電荷記憶の原因となる分子配列を永久的に破壊し、誘電体を効果的に消磁する。我々はこの現象を「誘電体エコー」と名付け、オーディオフィールが報告するバーンイン効果への寄与を定量化する。

1. はじめに

PTFE (テフロン) は、その低い誘電率 (2.1)、低い損失正接 (1 MHzで0.0002未満)、優れた化学的安定性により、プレミアムオーディオケーブルの誘電体材料として選択されている。これらの特性は高周波用途において卓越した絶縁体となる。しかし、高周波パラメータに対するオーディオケーブル業界の注目は、はるかに低い周波数で---オーディオ帯域自体で---発生する現象を覆い隠してきた。

PTFEは半結晶性フッ素ポリマーである。その結晶領域では、炭素-フッ素双極子が規則的な格子に整列している。外部電場が印加されると---導体内のオーディオ信号が生成する電場のような---これらの双極子はわずかに回転し、分子レベルで電荷を蓄積できる。外部電場が除去されると、双極子は元の配向に緩和する---しかし瞬時ではない。室温でのPTFEの緩和時間は、印加電場の大きさと結晶化度に応じてミリ秒から数時間に及ぶ。

この電荷記憶は、誘電体が以前のオーディオ信号の残像を保持することを意味する。次の信号が到来すると、それはその先行者が残した残留分極に逆らって押さなければならない。結果は我々が「誘電体エコー」と呼ぶ相互変調汚染の一形態である。

オーディオフィールが普遍的に報告するバーンイン期間---新しいケーブルが100-200時間の使用後に異なって聞こえるという観察---は、この現象によって部分的に説明される可能性がある。誘電体がオーディオ信号によって繰り返しサイクルされるにつれ、電荷記憶は徐々に知覚可能な変調をもちや導入しない定常状態の分布に到達する。

2. 方法

4種類の誘電体処理を施した直径2.0 mm OFC導体を用いてカスタムテストケーブルを製作した：

- 試料A：未処理PTFE (結晶化度60%、押しのまま)。
- 試料B：極低温処理PTFE (-196degC、72時間、1degC/min冷却速度)。
- 試料C：窒素注入PTFE (押し出し中にマイクロポイドを導入)。
- 試料D：エアギャップ誘電体 (20 mm間隔のPTFEスペーサー)。

差動容量はAgilent 4294A精密インピーダンスアナライザを用いて、-10 Vから+10 Vおよび戻りのDCバイアスに重畳された100 mV AC励起により1

kHzで測定した。結果のC-V曲線はヒステリシス---同一DC電圧における上昇スイープと下降スイープの容量差---を明らかにする。

時間領域緩和は、10 V DCバイアスを60秒間印加した後、導体を短絡し、Keithley 6517Bエレクトロメータで回復電圧 (誘電体吸収) を600秒間にわたり1秒間隔で測定することにより測定した。

3. 結果

1 kHzでの差動容量ヒステリシス：

- 試料A (未処理PTFE) : 0.31 +/- 0.04 pF/m
- 試料B (クライオ処理PTFE) : 0.04 +/- 0.01 pF/m
- 試料C (窒素注入) : 0.12 +/- 0.03 pF/m
- 試料D (エアギャップ) : 0.02 +/- 0.01 pF/m

クライオ処理PTFEは未処理PTFEと比較して容量ヒステリシスの87%の低減を示し、エアギャップ設計の性能に接近した。

誘電体吸収 (放電後t = 60秒での回復電圧)：

試料A : 142 mV



試料B：18 mV
試料C：67 mV
試料D：8 mV

回復電圧減衰の時定数は、未処理PTFEで85秒、クライオ処理PTFEで12秒であった。未処理誘電体はクライオ処理材料の約7倍長く電荷記憶を保持する。

バーンイン実験は、試料Aを2 Vrmsのピンクノイズで0、24、48、96、200時間駆動し、各間隔後に容量ヒステリシスを測定した。ヒステリシスは0.31 pF/m (0時間) から0.19 pF/m (200時間) に低下した---約150時間後にプラトーに達する39%の低減。この時間経過はオーディオファイル文献で報告される100-200時間のバーンイン期間と一致する。

4. 考察

メカニズムは単純である：極低温処理はPTFEの結晶秩序を破壊する。半結晶性ポリマーは、1degC/minで-196degCに冷却されると、結晶領域とアモルファス領域間の差動収縮により内部応力が発生する。これらの応力は結晶ドメインを通じてマイクロクラックを伝播させ、電荷記憶の原因となる長距離双極子配列を減少させる。

実用的な含意は、プレミアムケーブル製造において誘電体の---導体だけでなく---極低温処理が必要なステップであるということである。当社のTropicティアは未処理PTFEを使用し、100時間のバーンイン期間を要する。Equinoxティアはクライオ処理PTFE (-196degC、72時間) を使用し、約15時間で定常状態の性能に到達する。Zero-Pointティアは延長クライオ処理 (-196degC、168時間) を使用し、有効バーンイン期間を5時間未満に短縮する。

エアギャップ誘電体 (試料D) がすべてのPTFE変種を上回ることに注目する---空気にはゼロの電荷記憶がある。しかし、エアギャップ誘電体は複雑さを増し、ケーブル径を増大させ、柔軟性を低下させる機械的スパーサーを必要とする。クライオ処理PTFEは電気的性能と機械的実用性の最適な妥協を代表する。

5. 結論

オーディオケーブルのPTFE誘電体は、以前の内容の時間遅延エコーによって信号伝送を汚染する測定可能な電荷記憶 (強誘電体様ヒステリシス) を示す。極低温処理はこの電荷記憶を87%低減し、業界で報告されるバーンイン効果は定常状態の電荷分布の段階的確立として説明できる。プレミアムオーディオケーブル製造における標準的実践として、導体と誘電体の両方の極低温処理を推奨する。

参考文献

- [1] B. Chu, "強誘電性ポリマーPVDFとその共重合体," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "PVDFおよび関連共重合体の結晶構造と相転移," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "フッ化ビニリデン共重合体の強誘電特性," *Phase Transitions*, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, 誘電率および誘電正接の測定に関する推奨方法.
- [5] ASTM D2149-13, 誘電率および誘電正接に関する標準試験方法.