



**SUPRALEDANDE
LJUDMELLANKOPPLINGSKABLAR:
NOLLRESISTANS
SIGNALÖVERFÖRING VIA
YBCO-KERAMISKA LEDARE VID 77
K**



Supraledande ljudmellankopplingskablar: Nollresistans signalöverföring via YBCO-keramiska ledare vid 77 K

M. Ferro, L. Solder, H. Park, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

Sammanfattning

Vi rapporterar utvecklingen och karakteriseringen av den första supraledande ljudmellankopplingskabeln. Ledaren är ett YBCO (yttrium-barium-kopparoxid, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) keramiskt band som opererar vid 77 K i en vakuummantlad flytande kväve. DC-resistansen är noll -- inte låg, inte försumbar, noll -- som bekräftat genom fyrpunktsmätning med nanovolts känslighet. Meissnereffekten ger perfekt diamagnetisk skärmning av signalvägen, som driver ut allt externt magnetiskt flöde. Ljudsignaler överförda genom den supraledande ledaren uppvisar noll resistiv förlust, noll termiskt brusbidrag och fullständig magnetisk immunitet. Kabeln opererar kontinuerligt med passiv påfyllning av flytande kväve vid ungefär 310 liter per år per meter.

1. INLEDNING

Varje konventionell ljudkabel har resistans. Denna resistans är liten -- typiskt milliohm till ohm per meter -- men den är inte noll. Konsekvenserna av icke-noll resistans är trefaldig: (1) resistiv signalförlust (dämpning), (2) termiskt brusgenerering (Johnson-Nyquist-brus, proportionellt mot resistans och temperatur), och (3) frekvensberoende impedansvariation (skineffekt, närhetseffekt). Dessa effekter är välkarakteriserade och representerar i konventionella kablar de fundamentala fysikaliska gränserna för signalöverföring.

Supraledning eliminerar alla tre. En supraledare har exakt noll DC-resistans under sin kritiska temperatur (T_c). Noll resistans innebär noll dämpning, noll Johnson-Nyquist-brus och -- i det lågfrekventa ljudbandet -- noll frekvensberoende impedansvariation. Signalen går in i ena änden av ledaren och går ut i andra änden med matematiskt perfekt trohet.

Dessutom ger Meissnereffekten -- den fullständiga utdrivningen av magnetiskt flöde från supraledarens inre -- skärmning som ingen mängd konventionell μ -metall, kopparfläta eller ledande polymer kan matcha. En supraledande kabel dämpar inte externa magnetfält; den utesluter dem absolut.

Den tekniska utmaningen är att upprätthålla det supraledande tillståndet: YBCO kräver kontinuerlig kylning under 92 K. Vi använder flytande kväve (kokpunkt 77 K vid 1 atm) som kylmedel, cirkulerat genom en vakuummantlad borosilikatglaskryostat som fungerar som kabelmanteln. Detta är, måste det erkännas, inte en konventionell kabeldesign.

2. KABELKONSTRUKTION

SC-mellankopplingskabeln består av följande element, från centrum utåt:

Ledare: YBCO-keramiskt band (SuperPower SCS4050-AP), 4,0 mm brett \times 0,1 mm tjockt, med en kritisk ström på 100 A vid 77 K och egenfält. Bandet är lindat i en spiralkonfiguration på en rostfri stålkropp för att tillåta begränsad flexibilitet.

Signalväg: Två YBCO-band (signal och retur) är koncentriskt lindade med en 0,5 mm PTFE-distans. Den karakteristiska impedansen är konstruerad för att vara 75 Ohm vid ljudfrekvenser, matchande standardpraxis för mellankopplingskablar.

Kryostat: Dubbelväggig borosilikatglas-Dewar, 48 mm ytterdiameter, 28 mm innerdiameter. Utrymmet mellan väggarna är evakuerat till $< 10^{-3}$ Pa. Ledare-enheten är nedsjänkt i flytande kväve i det inre röret. Påfyllnings- och tillförselslang för flytande kväve.

Kontakter: Kryograderade, rodiumbeläggda XLR-kontakter, modifierade med vakuumgenomföringar och termiska avbrott (G10-fiberglasdisstanser) för att förhindra värmeledning från den varma kontaktkroppen till den kalla ledaren.

Den totala kabelns ytterdiameter är 48 mm. Kabeln väger 2,4 kg/m torr och 3,8 kg/m fylld med flytande kväve. Den minsta böjradien är 300 mm (begränsad av glaskryostaten, inte den flexibla ledaren).

3. ELEKTRISK KARAKTERISERING

DC-resistans: Mätt med fyrpunktsteknik med en Keithley 2182A nanovoltmeter och 6221 strömkälla. Vid 77 K (nedsjänkning i flytande kväve) var spänningen över en 1,5 m lång ledare som förde 100 mA DC under instrumentets brusgolv på 1 nV. Beräknad övre gräns: $R < 10^{-x}$ Ohm. För alla praktiska ändamål är resistansen noll.

AC-impedans: Vid 1 kHz är impedansen 75,0 \pm 0,1 Ohm (rent reaktiv -- ingen resistiv komponent). Impedansen är temperaturast:



eftersom ledaren hålls vid en konstant 77 K av flytande kvävebadet finns ingen termisk drift. Impedansstabiliteten över en 30-dagars mätkampanj var +/- 0,0003 Ohm.

Brusgolv: Johnson-Nyquist-brusspänningen för ett motstånd är $V^{\text{TM}} = \sqrt{4 \times k_B \times T \times R \times \Delta f}$. Den supraledande mellankopplingskabeln bidrar med exakt noll termiskt brus till signalvägen.

Magnetisk skärmning: En Helmholtzspole som producerade 1 mT (10 Gauss) vid 50 Hz placerades 50 mm från kabeln. En fluxgate-magnetometer inuti kryostaten (intill ledaren) mätte < 0,01 nT -- dämpning överstigande 160 dB. Detta är Meissnereffekten: supraledaren driver aktivt ut det externa fältet, inte genom absorption (som i mu-metall) utan genom att generera ytströmmar som perfekt motverkar det applicerade fältet.

4. PRAKTISKA ÖVERVÄGANDEN

SC-mellankopplingskabeln kräver kontinuerlig tillförsel av flytande kväve. Den termiska läckagehastigheten för den vakuummantlade kryostaten är ungefär 0,85 liter flytande kväve per dag per meter kabelslängd. För ett 1,5 m mellankopplingspar är den årliga förbrukningen av flytande kväve ungefär 930 liter -- ungefär 930 USD per år vid nuvarande kommersiella priser (1 USD/liter för småkvantitetsleverans).

Kabeln måste installeras med påfyllningsportarna tillgängliga för periodisk påfyllning (var 3-5 dag, beroende på omgivningstemperatur). En integrerad tryckavlastningsventil förhindrar farligt övertryck om avkokningshastigheten för flytande kväve överstiger ventilationskapaciteten. En O₂-utarmningssensor är monterad på kryostaten och ger (ca 100 dB summer) varningar om den omgivande syrekoncentrationen sjunker under 19,5 %.

Kravet på rumsventilation är minst 10 luftväxlingar per timme (ACH) -- en standard som överstiger ventilationen i de flesta bostadsutrymmen men som är lätt uppnåbar med en dedicerad VVS-installation.

Dessa krav är betydande. De representerar ett fundamentalt skifte i vad det innebär att äga en ljudkabel. SC-mellankopplingskabeln är inte en produkt som ansluts och glöms bort. Det är infrastruktur -- levande infrastruktur som kräver övervakning, underhåll och en relation med en leverantör av flytande kväve. För lyssnaren som kräver noll resistans är detta kostnaden.

5. SLUTSATS

SC-mellankopplingskabeln uppnår vad ingen konventionell ledare kan: noll DC-resistans, noll termiskt brus och absolut magnetisk immunitet via Meissnereffekten. Den tekniska och driftmässiga överheaden -- kryogen kylning, vakuumisolering, logistik för flytande kväve -- är betydande men hanterbar förhängivna lyssnare. Vi anser att supraledande ljud representerar den logiska ändpunkten för ledaroptimering: när du har eliminerat all resistans finns inget kvar att förbättra.

REFERENSER

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Müller, "Possible high-T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," Z. Phys. B, vol. 64, pp. 189-193, 1986.
- [2] M. K. Wu et al., "Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O system," Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 908-910, 1987.
- [3] SuperPower Inc., "Specifikationer för SCS4050-AP YBCO-belagd ledare," Rev. 12, 2023.
- [4] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," Naturwissenschaften, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," Phys. Rev., vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [6] ASME BPVC Section VIII, Division 1: Regler för konstruktion av tryckkärl (kryogen drift).