

---

**INTERKONEKSI AUDIO  
SUPERKONDUKTOR: TRANSMISI  
SINYAL TANPA RESISTANSI  
MELALUI KONDUKTOR KERAMIK  
YBCO PADA 77K**

---

# Interkoneksi Audio Superkonduktor: Transmisi Sinyal Tanpa Resistansi melalui Konduktor Keramik YBCO pada 77K

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.

## Abstrak

Kami melaporkan pengembangan dan karakterisasi kabel interkoneksi audio superkonduktor pertama. Konduktornya adalah pita keramik YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide,  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ) yang beroperasi pada 77 K dalam kriostat nitrogen cair. Resistansi DC adalah nol -- bukan rendah, bukan dapat diabaikan, nol -- sebagaimana dikonfirmasi oleh pengukuran empat-probe dengan sensitivitas nanovolt. Efek Meissner memberikan pelindung diamagnetik sempurna dari jalur sinyal, mengusir semua fluks magnetik eksternal. Sinyal audio yang ditransmisikan melalui konduktor superkonduktor menunjukkan nol kerugian resistif, nol kontribusi noise termal, dan kekebalan magnetik lengkap. Kabel beroperasi secara kontinu dengan liter per tahun per meter.

## 1. PENDAHULUAN

Setiap kabel audio konvensional memiliki resistansi. Resistansi ini kecil -- biasanya miliohm hingga ohm per meter -- tetapi bukan nol. Konsekuensi resistansi non-nol ada tiga: (1) kerugian sinyal resistif (atenuasi), (2) pembangkitan noise termal (noise Johnson-Nyquist, proporsional terhadap resistansi dan suhu), dan (3) variasi impedansi bergantung frekuensi (efek kulit, efek kedekatan). Efek-efek ini terkarakterisasi dengan baik dan, dalam kabel konvensional, mewakili batas fisik fundamental transmisi sinyal.

Superkonduktivitas menghilangkan ketiganya. Superkonduktor memiliki resistansi DC tepat nol di bawah suhu kritisnya ( $T_c$ ). Resistansi nol berarti atenuasi nol, noise Johnson-Nyquist nol, dan -- di pita audio frekuensi rendah -- variasi impedansi bergantung frekuensi nol. Sinyal memasuki satu ujung konduktor dan keluar dari ujung lainnya dengan fidelitas yang secara matematis sempurna.

Selain itu, efek Meissner -- pengusiran lengkap fluks magnetik dari interior superkonduktor -- memberikan pelindung yang tidak dapat ditandingi oleh jumlah mu-metal, anyaman tembaga, atau polimer konduktif konvensional apa pun. Kabel superkonduktor tidak melemahkan medan magnet eksternal; ia mengecualikannya secara absolut.

Tantangan rekayasa adalah mempertahankan keadaan superkonduktor: YBCO memerlukan pendinginan kontinu di bawah 92 K. Kami menggunakan nitrogen cair (titik didih 77 K pada 1 atm) sebagai kriogen, yang disirkulasikan melalui kriostat kaca borosilikat berjacket vakum yang berfungsi sebagai jaket kabel. Ini, harus diakui, bukan desain kabel konvensional.

## 2. KONSTRUKSI KABEL

Interkoneksi SC terdiri dari elemen-elemen berikut, dari tengah ke luar:

Konduktor: pita keramik YBCO (SuperPower SCS4050-AP), lebar 4,0 mm x tebal 0,1 mm, dengan arus kritis 100 A pada 77 K dan medan sendiri. Pita dililitkan dalam konfigurasi heliks pada former baja tahan karat untuk memungkinkan fleksibilitas terbatas.

Jalur sinyal: Dua pita YBCO (sinyal dan retur) dililitkan secara konsentris dengan penyangga PTFE 0,5 mm. Impedansi karakteristik dirancang menjadi 75 Ohm pada frekuensi audio, sesuai dengan praktik interkoneksi standar.

Kriostat: Dewar kaca borosilikat dinding ganda, diameter luar 48 mm, diameter dalam 28 mm. Ruang antar-dinding dievakuasi ke  $< 10^{-3}$  Pa. Rakitan konduktor direndam dalam nitrogen cair di dalam bore dalam. Port pengisian LN<sub>2</sub>, standar 6 mm.

Konektor: Konektor XLR berlapis rhodium tahan kriogenik, dimodifikasi dengan segel umpan-melalui vakum dan pemutus termal (penyangga fiberglass G10) untuk mencegah konduksi panas dari bodi konektor hangat ke konduktor dingin.

Diameter luar total kabel adalah 48 mm. Kabel berbobot 2,4 kg/m kering dan 3,8 kg/m terdamp. Panjang maksimum 300 mm (dibatasi oleh kriostat kaca, bukan konduktor fleksibel).

## 3. KARAKTERISASI LISTRIK

Resistansi DC: Diukur dengan teknik empat-probe menggunakan nanovoltmeter Keithley 2182A dan sumber arus 6221. Pada 77 K (perendaman LN<sub>2</sub>), tegangan di sepanjang konduktor 1,5 m yang membawa 100 mA DC bernilai nol. Batas atas terhitung:  $R < 10^{-8}$  Ohm. Untuk semua tujuan praktis, resistansi adalah nol.

Impedansi AC: Pada 1 kHz, impedansi adalah 75,0 +/- 0,1 Ohm (murni reaktif -- tanpa komponen resistif). Impedansi terkunci suhu:

karena konduktor dipertahankan pada 77 K konstan oleh bak LN,, tidak ada pergeseran termal. Stabilitas imp kampanye pengukuran 30 hari adalah +/- 0,0003 Ohm.

Lantai Noise: Tegangan noise Johnson-Nyquist sebuah resistor adalah  $V_n = \sqrt{4 \times k_B \times T \times R \times \Delta f}$  (superkonduktor),  $V_n = 0$  terlepas dari suhu atau bandwidth. Interkoneksi superkonduktor berkontribusi tepat nol noise termal ke jalur sinyal.

Pelindung Magnetik: Koil Helmholtz yang menghasilkan 1 mT (10 Gauss) pada 50 Hz diposisikan 50 mm dari kabel. Magnetometer fluxgate di dalam kriostat (berdekatan dengan konduktor) mengukur < 0,01 nT -- atenuasi melebihi 160 dB. Ini adalah efek Meissner: superkonduktor secara aktif mengecualikan medan eksternal, bukan melalui absorpsi (seperti pada mu-metal) tetapi dengan menghasilkan arus permukaan yang secara sempurna melawan medan yang diterapkan.

## 4. PERTIMBANGAN PRAKTIS

Interkoneksi SC memerlukan suplai LN, kontinu. Laju kebocoran termal kriostat berjacket meter panjang kabel. Untuk sepasang interkoneksi 1,5 m, konsumsi LN, tahunan sekitar 9 liter. Harga LN, komersial saat ini (\$1/liter untuk pengiriman kuantitas kecil).

Kabel harus dipasang dengan port pengisian LN, yang dapat diakses untuk pengisian ulang (suhu ambien). Katup pelepas tekanan terintegrasi mencegah tekanan berlebihan yang berakibat kapasitas ventilasi. Sensor deplesi O<sub>2</sub>, dipasang pada kriostat dan memberikan peringatan (85 dB) jika konsentrasi oksigen ambien turun di bawah 19,5%.

Persyaratan ventilasi ruangan minimal 10 pergantian udara per jam (ACH) -- standar yang melebihi ventilasi kebanyakan ruang hunian tetapi mudah dicapai dengan instalasi HVAC khusus.

Persyaratan ini signifikan. Mereka mewakili pergeseran fundamental dalam arti memiliki kabel audio. Interkoneksi SC bukan produk yang dicolokkan dan dilupakan. Ini adalah infrastruktur -- infrastruktur hidup yang memerlukan pemantauan, pemeliharaan, dan hubungan dengan pemasok nitrogen cair. Bagi pendengar yang menuntut resistansi nol, inilah biayanya.

## 5. KESIMPULAN

Interkoneksi SC mencapai apa yang tidak dapat dicapai konduktor konvensional: resistansi DC nol, noise termal nol, dan kekebalan magnetik absolut melalui efek Meissner. Beban rekayasa dan operasional -- pendinginan substansial tetapi dapat dikelola untuk pendengar yang berdedikasi. Kami percaya audio superkonduktor mewakili titik akhir logis optimasi konduktor: ketika Anda telah menghilangkan semua resistansi, tidak ada lagi yang tersisa untuk diperbaiki.

## REFERENSI

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Muller, "Possible high-T<sub>c</sub> 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., "SCS4050-AP YBCO Coated Conductor Specifications," 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: Rules for Construction of Pressure Vessels (layanan kriogenik).