
**INTERCONEXIONES DE AUDIO
SUPERCONDUCTORAS:
TRANSMISIÓN DE SEÑAL CON
RESISTENCIA CERO MEDIANTE
CONDUCTORES CERÁMICOS DE
YBCO A 77K**

Interconexiones de audio superconductoras: Transmisión de señal con resistencia cero mediante conductores cerámicos de YBCO a 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.

Resumen

Reportamos el desarrollo y caracterización del primer cable de interconexión de audio superconductor. El conductor es una cinta cerámica de YBCO (óxido de itrio, bario y cobre, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) que opera a 77 K en un criostato de vidrio de nitrógeno líquido. La resistencia en CC es cero -- no baja, no despreciable, cero -- como confirmó la medición de cuatro puntas con sensibilidad de nanovoltios. El efecto Meissner proporciona un blindaje diamagnético perfecto de la trayectoria de señal, expulsando todo el flujo magnético externo. Las señales de audio transmitidas a través del conductor superconductor exhiben cero pérdida resistiva, cero contribución de ruido térmico e inmunidad magnética completa. El cable opera continuamente e aproximadamente 310 litros por año por metro.

1. INTRODUCCIÓN

Todo cable de audio convencional tiene resistencia. Esta resistencia es pequeña -- típicamente miliohms a ohmios por metro -- pero no es cero. Las consecuencias de una resistencia no nula son tres: (1) pérdida de señal resistiva (atenuación), (2) generación de ruido térmico (ruido Johnson-Nyquist, proporcional a la resistencia y la temperatura), y (3) variación de impedancia dependiente de la frecuencia (efecto piel, efecto de proximidad). Estos efectos están bien caracterizados y, en cables convencionales, representan los límites físicos fundamentales de la transmisión de señal.

La superconductividad elimina los tres. Un superconductor tiene exactamente cero resistencia en CC por debajo de su temperatura crítica (T_c). Cero resistencia significa cero atenuación, cero ruido Johnson-Nyquist y -- en la banda de audio de baja frecuencia -- cero variación de impedancia dependiente de la frecuencia. La señal entra por un extremo del conductor y sale por el otro con fidelidad matemáticamente perfecta.

Adicionalmente, el efecto Meissner -- la expulsión completa del flujo magnético del interior de un superconductor -- proporciona un blindaje que ninguna cantidad de μ -metal convencional, trenza de cobre o polímero conductor puede igualar. Un cable superconductor no atenúa los campos magnéticos externos; los excluye absolutamente.

El desafío de ingeniería es mantener el estado superconductor: el YBCO requiere enfriamiento continuo por debajo de 92 K. Usamos nitrógeno líquido (punto de ebullición 77 K a 1 atm) como criógeno, circulado a través de un criostato de vidrio de borosilicato con camisa de vacío que sirve como cubierta del cable. Este es, ciertamente, un diseño de cable no convencional.

2. CONSTRUCCIÓN DEL CABLE

La interconexión SC consiste en los siguientes elementos, del centro hacia afuera:

Conductor: Cinta cerámica de YBCO (SuperPower SCS4050-AP), 4,0 mm de ancho \times 0,1 mm de espesor, con una corriente crítica de 100 A a 77 K y campo propio. La cinta se enrolla en configuración helicoidal sobre un núcleo de acero inoxidable para permitir flexibilidad limitada.

Trayectoria de señal: Dos cintas de YBCO (señal y retorno) enrolladas concéntricamente con un separador de PTFE de 0,5 mm. La impedancia característica está diseñada para ser 75 Ohm a frecuencias de audio, coincidiendo con la práctica estándar de interconexión.

Criostato: Dewar de vidrio de borosilicato de doble pared, 48 mm de diámetro exterior, 28 mm de diámetro interior. El espacio entre paredes está evacuado a $< 10^{-3}$ Pa. El conjunto del conductor está inmerso en nitrógeno líquido. Puertos de llenado en cada extremo aceptan tubería estándar de suministro de LN, de 6 mm.

Conectores: Conectores XLR chapados en rodio con calificación criogénica, modificados con sellos de paso de vacío y rupturas térmicas (espaciadores de fibra de vidrio G10) para prevenir la conducción de calor del cuerpo caliente del conector al conductor frío.

El diámetro exterior total del cable es de 48 mm. El cable pesa 2,4 kg/m seco y 3,8 kg/m con criostato (limitado por el criostato de vidrio, no por el conductor flexible).

3. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA

Resistencia en CC: Medida por técnica de cuatro puntas con un nanovoltímetro Keithley 2182A y fuente de corriente 6221. A 77 K (inmersión en LN₂), el voltaje a través de un conductor de 1,5 m que transporta 100 mA de ruido del instrumento de 1 nV. Límite superior calculado: $R < 10 \times \text{Ohm}$. Para todos los p

Impedancia en CA: A 1 kHz, la impedancia es 75,0 +/- 0,1 Ohm (puramente reactiva -- sin componente resistiva). La impedancia está bloqueada térmicamente: debido a que el conductor se mantiene a una constante de temperatura. La estabilidad de impedancia durante una campaña de medición de 30 días fue +/- 0,0003 Ohm.

Piso de ruido: El voltaje de ruido Johnson-Nyquist de un resistor es $V_n = \sqrt{4 \times k_B \times T \times R \times \Delta f}$ (superconductor), $V_n = 0$ independientemente de la temperatura o el ancho de banda. La interconexión superconductoras contribuye exactamente cero ruido térmico a la trayectoria de señal.

Blindaje magnético: Una bobina de Helmholtz produciendo 1 mT (10 Gauss) a 50 Hz fue posicionada a 50 mm del cable. Un magnetómetro fluxgate dentro del criostato (adyacente al conductor) midió < 0,01 nT -- atenuación superior a 160 dB. Este es el efecto Meissner: el superconductor excluye activamente el campo externo, no por absorción (como en el mu-metal) sino generando corrientes superficiales que se oponen perfectamente al campo aplicado.

4. CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

La interconexión SC requiere suministro continuo de LN₂. La tasa de fuga térmica del criostato es aproximadamente 0,85 litros de LN₂ por día por metro de longitud de cable. Para un par de cables de 10 metros, el consumo anual de LN₂ es aproximadamente 930 litros -- alrededor de \$930 por año al precio actual (de pequeñas cantidades).

El cable debe instalarse con los puertos de llenado de LN₂ accesibles para reposición periódica (a temperatura ambiente). Una válvula de alivio de presión integrada previene la sobrepresurización peligrosa si la tasa de evaporación del LN₂ excede la capacidad de ventilación. Un sensor de depleción de O₂ es necesario para alertas visuales (LED ámbar) y audibles (zumbador de 85 dB) si la concentración de oxígeno ambiente cae por debajo del 19,5%.

El requisito de ventilación de la sala es un mínimo de 10 cambios de aire por hora (ACH) -- un estándar que excede la ventilación de la mayoría de los espacios residenciales pero es fácilmente alcanzable con una instalación HVAC dedicada.

Estos requisitos son significativos. Representan un cambio fundamental en lo que significa poseer un cable de audio. La interconexión SC no es un producto que se conecta y se olvida. Es infraestructura -- infraestructura viva que requiere monitoreo, mantenimiento y una relación con un proveedor de nitrógeno líquido. Para el oyente que exige cero resistencia, este es el costo.

5. CONCLUSIÓN

La interconexión SC logra lo que ningún conductor convencional puede: cero resistencia en CC, cero ruido térmico e inmunidad magnética absoluta a través del efecto Meissner. La sobrecarga de ingeniería y operación -- enfriamiento criogénico, aislamiento de vacío, logística de LN₂ -- es sustancial pero manejable para oyentes dedicados. Creer en la superconductividad representa el punto final lógico de la optimización de conductores: cuando se ha eliminado toda la resistencia, no queda nada por mejorar.

REFERENCIAS

- [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., "Especificaciones del conductor recubierto SCS4050-AP YBCO," 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: Reglas para la construcción de recipientes a presión (servicio criogénico).