
**INTERCONEXÕES
SUPERCONDUTORAS DE ÁUDIO:
TRANSMISSÃO DE SINAL COM
RESISTÊNCIA ZERO VIA
CONDUTORES CERÂMICOS YBCO
A 77K**

Interconexões Supercondutoras de Áudio: Transmissão de Sinal com Resistência Zero via Condutores Cerâmicos 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.

Resumo

Relatamos o desenvolvimento e a caracterização do primeiro cabo de interconexão supercondutor de áudio. O condutor é uma fita cerâmica YBCO (Óxido de Ítrio Bário Cobre, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) operando a 77 K em um criostato de nitrogênio líquido. A resistência CC é zero -- não baixa, não desprezível, zero -- conforme confirmado por medição de quatro pontas com sensibilidade de nanovolts. O efeito Meissner fornece blindagem diamagnética perfeita do caminho do sinal, expulsando todo o fluxo magnético externo. Os sinais de áudio transmitidos pelo condutor supercondutor exibem perda resistiva zero, contribuição zero de ruído térmico e imunidade magnética completa. O cabo opera continuamente com reposição de litros por ano por metro.

1. INTRODUÇÃO

Todo cabo de áudio convencional tem resistência. Essa resistência é pequena -- tipicamente miliohms a ohms por metro -- mas não é zero. As consequências da resistência não nula são três: (1) perda resistiva do sinal (atenuação), (2) geração de ruído térmico (ruído Johnson-Nyquist, proporcional à resistência e temperatura) e (3) variação de impedância dependente da frequência (efeito pelicular, efeito de proximidade). Esses efeitos são bem caracterizados e, em cabos convencionais, representam os limites físicos fundamentais da transmissão de sinal.

A supercondutividade elimina todos os três. Um supercondutor tem resistência CC exatamente zero abaixo de sua temperatura crítica (T_c). Resistência zero significa atenuação zero, ruído Johnson-Nyquist zero e -- na faixa de áudio de baixa frequência -- variação de impedância dependente da frequência zero. O sinal entra em uma extremidade do condutor e sai da outra com fidelidade matematicamente perfeita.

Além disso, o efeito Meissner -- a expulsão completa de fluxo magnético do interior de um supercondutor -- fornece blindagem que nenhuma quantidade de mu-metal convencional, malha de cobre ou polímero condutor pode igualar. Um cabo supercondutor não atenua campos magnéticos externos; ele os exclui absolutamente.

O desafio de engenharia é manter o estado supercondutor: o YBCO requer resfriamento contínuo abaixo de 92 K. Usamos nitrogênio líquido (ponto de ebulição 77 K a 1 atm) como criogênio, circulado através de um criostato de vidro borossilicato com camisa de vácuo que serve como jaqueta do cabo. Este é, reconhecidamente, um projeto de cabo não convencional.

2. CONSTRUÇÃO DO CABO

A Interconexão SC consiste nos seguintes elementos, do centro para fora:

Condutor: Fita cerâmica YBCO (SuperPower SCS4050-AP), 4,0 mm de largura \times 0,1 mm de espessura, com corrente crítica de 100 A a 77 K e campo próprio. A fita é enrolada em configuração helicoidal em um formador de aço inoxidável para permitir flexibilidade limitada.

Caminho do sinal: Duas fitas YBCO (sinal e retorno) são enroladas concêntricamente com um espaçador de PTFE de 0,5 mm. A impedância característica é projetada para ser 75 Ohm em frequências de áudio, compatível com a prática padrão de interconexão.

Criostato: Dewar de vidro borossilicato de parede dupla, 48 mm de diâmetro externo, 28 mm de diâmetro interno. O espaço entre paredes é evacuado a $< 10^{-3}$ Pa. O conjunto do condutor é imerso em nitrogênio líquido e enchimento em cada extremidade aceitam tubulação padrão de fornecimento de LN, de 6 mm.

Conectores: Conectores XLR banhados a ródio com classificação criogênica, modificados com vedações de passagem a vácuo e quebras térmicas (espaçadores de fibra de vidro G10) para evitar condução de calor do corpo quente do conector para o condutor frio.

O diâmetro externo total do cabo é de 48 mm. O cabo pesa 2,4 kg/m seco e 3,8 kg/m preenchido. A curvatura é de 300 mm (limitado pelo criostato de vidro, não pelo condutor flexível).

3. CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

Resistência CC: Medida pela técnica de quatro pontas com nanovoltímetro Keithley 2182A e fonte de corrente 6221. A 77 K

(imersão em LN₂), a tensão através de um condutor de 1,5 m transportando 100 mA CC ficou abaixo do piso do instrumento de 1 nV. Limite superior calculado: $R < 10 \times \text{Ohm}$. Para todos os propósitos práticos, a resistência

Impedância CA: A 1 kHz, a impedância é 75,0 +/- 0,1 Ohm (puramente reativa -- sem componente resistivo). A impedância é travada pela temperatura: como o condutor é mantido a 77 K constantes pelo banho de LN₂, a impedância ao longo de uma campanha de medição de 30 dias foi de +/- 0,0003 Ohm.

Piso de Ruído: A tensão de ruído Johnson-Nyquist de um resistor é $V_n = \sqrt{4 \times k_B \times T \times R \times B}$ (supercondutor), $V_n = 0$ independentemente da temperatura ou largura de banda. A interconexão supercondutora contribui com exatamente zero ruído térmico para o caminho do sinal.

Blindagem Magnética: Uma bobina de Helmholtz produzindo 1 mT (10 Gauss) a 50 Hz foi posicionada a 50 mm do cabo. Um magnetômetro fluxgate dentro do criostato (adjacente ao condutor) medi $< 0,01$ nT -- atenuação superior a 160 dB. Este é o efeito Meissner: o supercondutor ativamente exclui o campo externo, não por absorção (como no mu-metal), mas gerando correntes superficiais que se opõem perfeitamente ao campo aplicado.

4. CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

A Interconexão SC requer fornecimento contínuo de LN₂. A taxa de perda térmica do criostato é aproximadamente 0,85 litros de LN₂ por dia por metro de comprimento de cabo. Para um consumo anual de LN₂, é de aproximadamente 930 litros -- cerca de US\$ 930 por ano aos preços atuais (1 litro para entrega em pequenas quantidades).

O cabo deve ser instalado com as portas de enchimento de LN₂, acessíveis para reposição (da temperatura ambiente). Uma válvula de alívio de pressão integrada evita sobrepressurização perigosa caso a taxa de evaporação do LN₂ exceda a capacidade de ventilação. Um sensor de depleção de O₂, é monitorado por sensores visuais (LED âmbar) e audíveis (buzina de 85 dB) se a concentração de oxigênio ambiente cair abaixo de 19,5%.

A exigência de ventilação do ambiente é um mínimo de 10 trocas de ar por hora (ACH) -- um padrão que excede a ventilação da maioria dos espaços residenciais, mas é facilmente alcançável com uma instalação de HVAC dedicada.

Essas exigências são significativas. Representam uma mudança fundamental no que significa possuir um cabo de áudio. A Interconexão SC não é um produto que é conectado e esquecido. É infraestrutura -- infraestrutura viva que requer monitoramento, manutenção e um relacionamento com um fornecedor de nitrogênio líquido. Para o ouvinte que exige resistência zero, este é o custo.

5. CONCLUSÃO

A Interconexão SC alcança o que nenhum condutor convencional pode: resistência CC zero, ruído térmico zero e imunidade magnética absoluta via efeito Meissner. A sobrecarga de engenharia e operacional -- resfriamento criogênico, isolamento a vácuo, logística de LN₂, -- é substancial, mas gerenciável para ouvintes dedicados. Acreditamos que este é o ponto final lógico da otimização de condutores: quando você eliminou toda a resistência, não há mais nada a melhorar.

REFERÊNCIAS

- [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., "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 (serviço criogênico).