

Estudo de supercondutor de alta temperatura crítica

João Salgado Cabaço

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto,
Laboratório Avançado II

Resumo—Neste trabalho é feito um estudo de algumas propriedades de supercondutores de alta temperatura crítica (HTS). Na primeira parte é encontrada a temperatura crítica para BiPbSrCaCuO , através de uma montagem que nos permite ter a amostra num recipiente com azoto líquido, abaixo de T_C , e ir progressivamente aumentando a sua temperatura, até que a resistência deixe de ser nula e ocorra a transição abrupta. A temperatura obtida foi de $T_{Cexp} = 108K$, em concordância com o valor esperado. Na segunda parte utilizou-se o Mr.SQUID, um SQUID-DC, para caracterizar uma curva V-I de uma amostra de $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, obtendo-se $R_N = 29785,64\Omega$ e $I_C = 0,005\mu A$, tendo o SQUID uma $V = 148,9281\mu V$. Para além disso, também se obteve V- Φ , e da curva periódica esperada obteve-se $\Delta V = 42,86\mu V$. Estes valores de V e ΔV são ligeiramente superiores aos que são dados no manual do equipamento, no entanto, consideram-se aceitáveis tendo em conta a sensibilidade da experiência.

Keywords:

HTSC: High Temperature Superconductor
SQUID: Superconducting Quantum Interference Device
BCS: Teoria de Bardeen-Cooper-Schrieffer
IC: Integrated Circuits
S-I-S: Superconductor Insulator Superconductor
BNC: British Naval Connector

INTRODUÇÃO

a) Supercondutividade[1]

Em 1911, enquanto estudava as propriedades da matéria a muito baixas temperaturas, um grupo liderado por Heike Kamerlingh Onnes descobriu que a resistência elétrica do mercúrio se torna nula abaixo de 4,2K. Esta foi a primeira observação de um fenómeno de supercondutividade. Abaixo de uma temperatura crítica (T_C), os materiais passam por uma transição para o seu estado supercondutor, caracterizado por duas propriedades básicas:

- 1) Não oferecem resistência à passagem de uma corrente elétrica, quando $R=0$ uma corrente pode propagar-se dentro do material indefinidamente, sem dissipação de energia.¹
- 2) Desde que sejam suficientemente pequenos, campos magnéticos não irão penetrar o supercondutor, apesar de permanecerem à sua superfície. Este fenómeno de expulsão de campo é conhecido como efeito Meissner. Está associado ao facto de um supercondutor se comportar como um diamagneto perfeito.

¹O recorde é de 2 anos e meio, S.C. Collins, E.A. Lynton, Superconductivity, Wiley, New York, 1969

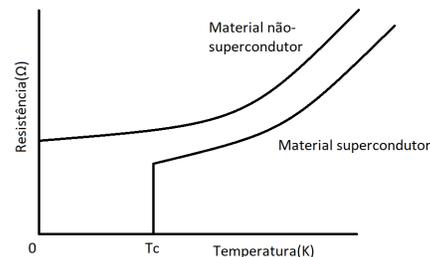


Figure .1: Ilustração do comportamento da resistência em função da temperatura para um material supercondutor e não-supercondutor.

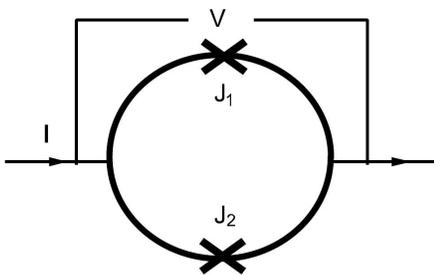
Foi apenas em 1957 que John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer estabeleceram a teoria microscópica da supercondutividade. Esta teoria ficou conhecida como teoria BCS, os eletrões agrupam-se em pares através da interação com vibrações da rede, chamadas de fonões, formando pares de Cooper, que se movem dentro do sólido sem fricção. O sólido pode ser visto como uma rede de iões positivos imersa numa nuvem de eletrões. Quando um eletrão passa por esta rede, os iões movem-se ligeiramente, atraídos pela carga negativa do eletrão. Este movimento gera uma área eletricamente positiva que, por sua vez, atrai outro eletrão. A energia da interação eletrónica é bastante fraca, e os pares podem facilmente ser desfeitos pela energia térmica - é devido a isto que a supercondutividade habitualmente ocorre a muito baixas temperaturas. No entanto, a teoria BCS não oferece uma explicação satisfatória para a existência de supercondutividade a altas temperaturas, para os quais outros mecanismos de acoplamento eletrónico devem ser invocados. Em materiais supercondutores estas características aparecem apenas quando se está abaixo de T_C . Na Fig.1. pode ver-se a curva R-T de um material supercondutor e de um não-supercondutor. Um supercondutor pode considerar-se como sendo de alta temperatura se a sua T_C for superior a 30K, e de baixa temperatura se for inferior. Tal como foi referido anteriormente, o interior de um supercondutor não é penetrado por um campo magnético fraco, efeito de Meissner. Se este campo B se torna grande a fase supercondutora perde-se. Os supercondutores podem classificar-se em dois tipos:

- Type-I: Nos supercondutores do Type-I esta transição de fase é de 1ª ordem, existe apenas um campo crítico. Este tipo é normalmente exibido por metais puros, por exemplo, Al, Pb e Hg.
- Type-II: Caracterizada pela formação de vortices

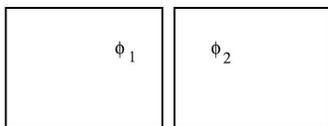
magnéticos num campo magnético aplicado. Isto ocorre acima de um campo crítico H_{C1} , a densidade do vortice aumenta com a intensidade do campo. A um campo superior, H_{C2} , esta fase é destruída. Os supercondutores Type-II não exibem efeito de Meissner completo. Estes supercondutores são normalmente feitos de ligas metálicas ou óxidos cerâmicos complexos. Todos os supercondutores de alta temperatura são deste tipo

A razão entre o comprimento de penetração de London (λ), para o comprimento de coerência supercondutor (ζ), determina se um material é Type-I ou II. No Type-I: $0 < \frac{\lambda}{\zeta} < \frac{1}{\sqrt{2}}$, nos Type-II $\frac{\lambda}{\zeta} > \frac{1}{\sqrt{2}}$.

b) DC SQUID[2]



(a) Ilustração de um DC-SQUID, os X's representam as junções de Josephson.



(b) Diagrama de duas regiões de supercondutoras separadas por um pequeno espaço, S-I-S, essencialmente uma junção de Josephson.

Figure .2

Duas regiões de supercondutor são colocadas muito próximas uma da outra, tal como em Fig.2 b). Em mecânica quântica, a sua fase na esquerda e na direita são representadas por ϕ_1 e ϕ_2 . Num material normal, as fases em dois pontos distintos não estão relacionadas. No entanto, numa peça única de supercondutor, as fases em dois locais diferentes têm uma relação específica entre elas. Esta configuração assegura um estado fundamental de mais baixa temperatura, resultando em supercondutividade. Nesta figura, se as duas regiões de supercondutores estiverem muito próximas, as fases estarão relacionadas, comportando-se como um supercondutor. Correntes elétricas irão fluir entre estas duas regiões, sem resistência. Tais correntes são designadas por correntes de Josephson, e os sistemas compostos por regiões S-I-S que exibem esta propriedade, por junções de Josephson. As correntes a fluir sem resistência por estas junções são uma manifestação do efeito de Josephson DC, e se as correntes oscilarem a alta frequência, do efeito de Josephson AC.

Um DC-SQUID é um circuito relativamente simples, Fig.2 a), contendo duas junções de Josephson em paralelo num loop supercondutor. A propriedade fundamental dos anéis supercondutores é que estes podem conter fluxo magnético no seu interior apenas em múltiplos de uma constante universal designada por quantum de fluxo. Dado que este quantum de fluxo é bastante pequeno, este efeito físico pode ser explorado para produzir um detetor magnético extremamente pequeno, tal como é o SQUID. Estes aparelhos funcionam como transdutores de flux-to-voltage, onde a sensibilidade é dada pelo quantum de fluxo magnético, $2 * 10^{-15} Wb$. Em termos práticos, o campo magnético da terra ao passar pela área de um sensor HTS SQUID corresponde a 100 quantum de fluxo, devido a isto, a pequena fração que não é atenuada pela blindagem magnética é suficiente para introduzir um shift em curvas $V - \Phi$. Na Fig.2 a) uma supercorrente irá fluir através do SQUID, desde que a corrente não exceda a corrente crítica (I_C) das junções de Josephson. A experiência mais simples que pode ser feita com este dispositivo é a de passar corrente I, da esquerda para a direita ao longo do anel, e de proceder à medida da voltagem V que aparece no anel, deste modo pode medir-se a corrente crítica.

MONTAGEM E PROCEDIMENTO

a) Cálculo da temperatura crítica

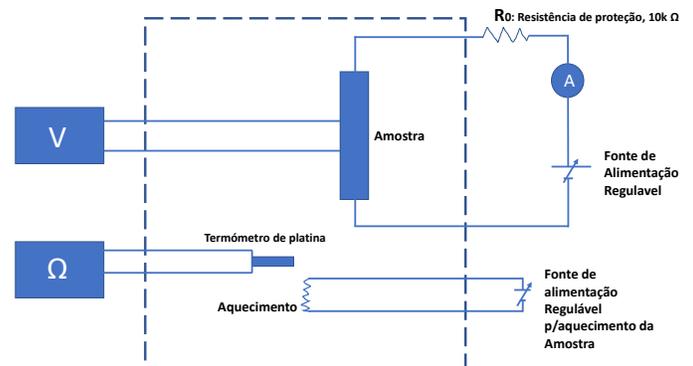


Figure .3: Esquema da montagem experimental

A amostra utilizada nesta parte da experiência foi de BiPbSrCaCuO, que tem uma temperatura crítica de cerca de 108K. Tal como é referido na Fig.3 deve ter-se o seguinte material:

- 1) Amostra supercondutora com 4 contactos elétricos.
- 2) Termómetro de platina Pt100 com 4 contactos colocado junto à amostra.
- 3) Criostato contendo a câmara experimental (sob vácuo).
- 4) Dewar de inox com azoto líquido para arrefecimento da câmara.
- 5) Aquecedor da câmara.
- 6) Fonte de alimentação para produzir a corrente que atravessa a amostra.



Figure .4: Aparelho Mr.SQUID, composto por: caixa de controlo eletrônica, com 2 baterias de 9V. Probe com um sensor SQUID. Cabos de ligação entre a caixa de controlo e o SQUID. Dewar de azoto líquido.

- 7) Fonte de alimentação do aquecedor.
- 8) Caixa de terminais no topo do cristato para ligações elétricas.
- 9) Placa de terminais do circuito de alimentação da amostra.
- 10) Amperímetro para medir a corrente da amostra(I).
- 11) Multímetro digital(HP 34401A) para medida da tensão na amostra(V).
- 12) Multímetro digital(HP 34401A) para medida da resistência(r) do termómetro (com 4 fios).
- 13) Tabela de calibração T(r) do termómetro de platina.

Deve ter-se em atenção durante o decorrer desta experiência que o azoto líquido pode provar queimaduras graves por contacto prolongado com a roupa e pele. O procedimento experimental adotado foi o seguinte:

- 1) Verificar que as ligações elétricas estão realizadas de acordo com o esquema da Fig.3, ajustando a corrente da amostra.
- 2) Arrefecer a amostra, utilizando azoto líquido, até esta se encontrar no seu estado superconductor.
- 3) Após este arrefecimento, utiliza-se uma fonte de tensão para aquecer a amostra, tendo como objetivo traçar um gráfico de R(T).
- 4) Utilizando uma câmara de vídeo filma-se a variação dos 3 aparelhos de medida, que nos dão: resistência da amostra de platina, corrente na amostra, voltagem na amostra.
- 5) Utilizando a tabela de calibração de temperaturas para a resistência de platina, converte-se a resistência obtida numa temperatura. Com a lei de Ohm, tendo I e V da amostra, obtem-se a resistência(R).
- 6) Traçar gráfico R(T) na subida de temperatura, observando a transição abrupta que permite retirar o valor de T_c .

b) Traçar curva V-I e V- Φ utilizando DC-SQUID[3]

b1): Nesta parte da experiência foi utilizado o aparelho Mr.SQUID, que é um SQUID DC. Funcionando como um magnetómetro, com um sensor de filme fino HTS.



Figure .5: Pormenor da cabeça do sensor do Mr.SQUID. As junções de Josephson não são claramente visíveis, pois tratam-se de dispositivos extremamente pequenos, a camada isoladora deve ser inferior às dezenas de angstroms de espessura[2].

São utilizadas metal coils para modulação e external coupling, um probe criogenico e um shield magnético que é removível. O probe está contruído para ser imerso num banho de azoto líquido no dewar. O único equipamento extra que não faz parte do pacote do Mr.SQUID são os cabos BNC e o osciloscópio. No interior do Mr.SQUID encontra-se um chip com um circuito integrado, cujos principais componentes são um SQUID DC e duas coils de modulação. Este SQUID é feito de $Y_1Ba_2Cu_3O_7$, por vezes chamado de YBCO, estando num anel com duas junções de Josephson². Estas estruturas são extremamente difíceis de fabricar, utilizando técnicas de fotolitografia, métodos habituais da fabricação de IC. Sendo o Mr.SQUID um magnetómetro HTS DC SQUID, este pode ser usado para detetar pequenos sinais magneticos Como as suas coils de modulação não são superconductoras, este aparelho não tem a sensividade de um SQUID normal de laboratório. No entanto, este aparelho permite a realização de alguns estudos interessantes sobre supercondutividade, nomeadamente o de traçar a curva V-I e V- Φ , que iremos obter na próxima secção.

b2)

O DC SQUID tem a propriedade particular de haver uma relação periódica entre a voltagem de saída e o fluxo magnético aplicado. Esta relação vem da propriedade de quantização do fluxo dos aneis superconductoras. O Mr.SQUID permite-nos observar esta relação na forma V- Φ , que podemos observar no osciloscópio. Com o controlo do flux bias é possível ver que a corrente crítica do SQUID oscila entre um máximo(região flat da curva V-I) e mínimo, nas regiões mais lineares. A caixa de controlo do Mr.SQUID permite-nos observar este comportamento periodico de forma automatizada. Para obter o plot V- Φ , a corrente bias é ajustada tal que a voltagem do SQUID seja

²As duas junções de Josephson são típicas num SQUID-DC, num SQUID RF utiliza-se apenas uma junção

mais sensível a variações do campo magnético aplicado, isto ocorre nos “knee” da curva V-I, Fig.9. De forma a encontrar este ponto, ajustamos o flux bias control tal que a corrente crítica atinja o seu maior valor. Após isto, diminuímos a amplitude, até que seja visível apenas 1 ponto no ecrã do osciloscópio. Torna-se então possível fazer um varrimento do ponto, para cima e para baixo na curva V-I, ao ajustar a corrente bias. Ao ajustar a corrente bias tal que o ponto repouse num knee da curva V-I. Aumentando então o flux bias, que controla a quantidade de fluxo magnético que passa pela abertura do loop do SQUID, o movimento periodico que se vai observar emerge devido às screening currents no corpo do SQUID, dependendo do fluxo magnético aplicado de forma periódica. O periodo é determinado pelo quantum de fluxo magnético, sendo este fenómeno uma manifestação macroscópica da natureza quântica da supercondutividade.³

DADOS OBTIDOS

a) Calculo da temperatura crítica

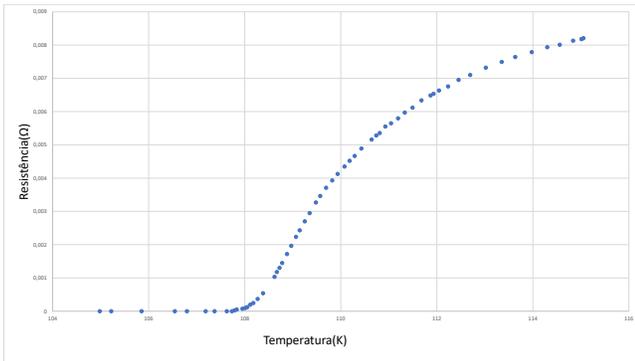


Figure .6: Gráfico da resistência em função da temperatura, é possível observar na região de $T \approx 108K$ um aumento abrupto da resistência, a partir de zero.

Utilizando a montagem referida na Fig.2, após as conversões da resistência de platina em temperatura, obteve-se o gráfico da Fig.6. Nesta figura está visível a transição abrupta da fase supercondutora. Tal observa-se na passagem de uma região de resistência nula para uma região em que o material apresenta resistência, isto era o esperado, tendo em conta a Fig.1. O material BiPbSrCaCuO tem uma $T_C = 108K$, e tal como seria esperado, obteve-se $T_{Cexp} = 108K$.

³Esta secção é apenas um pequeno resumo das muitas páginas do manual do SQUID[3], que explicam com detalhe como se podem fazer estas medidas variando os vários botões de controlo do Mr.SQUID.

b) DC-SQUID

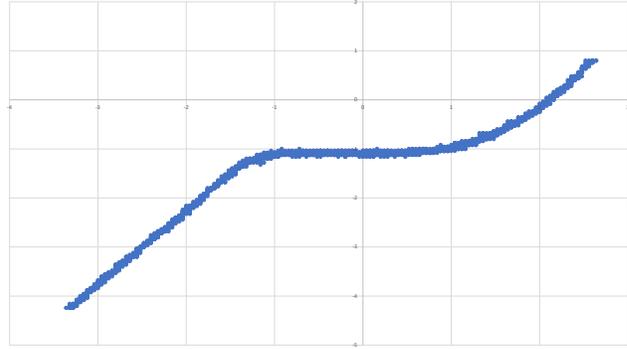


Figure .7: Dados obtidos experimentalmente a partir do osciloscópio, CH2 em função de CH1. De forma a transformar isto numa curva V-I com a escala adequada é necessário seguir as indicações de manual do Mr.SQUID[3].

b1) *Obtenção da curva V-I:* Na Fig. 7 podem observar-se os dados obtidos a partir do osciloscópio, o output funciona como um voltímetro, a corrente de output representa a voltagem numa resistência de $10k\Omega$. De forma a converter o eixo dos x numa corrente, será necessário utilizar a lei de Ohm, $I = \frac{V}{R} = \frac{V}{10000}$. A voltagem típica de um SQUID é tão pequena que neste dispositivo está incorporada uma amplificação. De forma a obter as voltagens reais no SQUID será necessário dividir ainda os valores de x-y por 10k. Analisando agora a curva V-I, característica das duas junções ligadas em paralelo uma com a outra. A parte mais relevante desta curva é a região flat no centro, chamada de corrente crítica, I_C . Neste região, corrente flui sem voltagem, é portanto uma supercorrente, isto é, uma manifestação do efeito de Josephson DC. De forma a obter esta corrente I_C , mede-se a largura da região flat da curva V-I. Este valor deve ainda ser dividido por 1/4, de forma a ter em conta a existência de duas junções, e o facto da curva ter uma parte positiva e negativa, simétrica. Para além desta corrente crítica, há também um parâmetro da junção, designado por resistência do estado normal, R_N . Esta resistência pode ser obtida fazendo uma linearização das regiões lineares da curva V-I, através do declive, $m = \frac{R_N}{2}$. Optou-se por fazer apenas o ajuste na região linear esquerda do gráfico da Fig. 7, pois a região da direita não apresenta a tendência pretendida. O produto de $I_C R_N$ dá-nos uma voltagem, que é um parâmetro importante para a operação de um SQUID. Os valores obtidos foram os seguintes:

- $I_C = \frac{2 \cdot 10^{-8}}{4} = 0,005 \mu A$
- $R_N = 29785,64 \Omega$
- $V = 148,9281 \mu V$

Este valor de V obtido encontra-se um pouco fora da gama recomendada no manual Mr.SQUID, $10-100 \mu V$, no entanto, tendo em conta que pode haver interferência com fontes de ruído ou conexões, este considera-se aceitável. O facto da curva V-I não ser exatamente simétrica pode dever-se ao facto das junções não serem exatamente iguais.

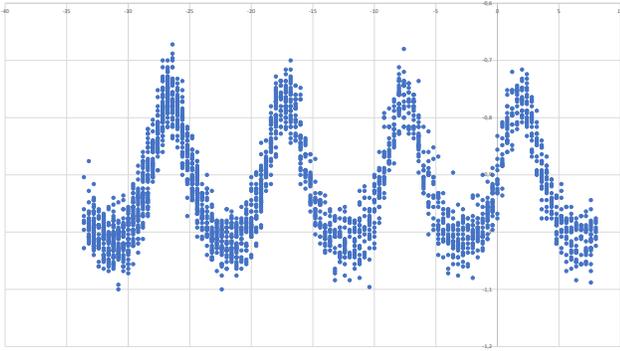


Figure .8: Gráfico de $V-\Phi$, da forma que é obtida diretamente do osciloscópio. De forma a observar os valores reais, será necessário ter em conta os fatores de amplificação[3].

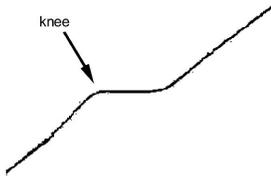


Figure .9: Knee de uma figura V-I.

b2) Obtenção de curva $V-\Phi$

Ao seguir o o que é descrito em b2), da secção da montagem e procedimento, foi possível obter o gráfico da Fig.8. A partir deste obtem-se um $\Delta V = 42,86\mu V$, o valor pico a pico de V , tendo em conta o fator de amplificação de 10k. De forma a ver o máximo de períodos possíveis de $V-\Phi$ a amplitude foi aumentada no sentido CW. A gama de valores esperada para ΔV era $10 - 30\mu V$ [3], no entanto, e tendo em conta a interferência que foi observada ao registar os valores do osciloscópio, o valor observado considera-se aceitável. Este valor de ΔV dá-nos um período de variação de voltagem correspondente ao aumento de um quantum de fluxo. Este valor de ΔV é por vezes designado de maximum voltage modulation depth.

CONCLUSÃO

Conseguiu obter-te a temperatura crítica em a), o valor obtido foi de $T_c = 108K$, tal como era de esperar. Em b1) obteve-se uma curva I-V, característica de um material supercondutor, com uma região notoriamente flat. Foi possível calcular I_C e R_n , e com estes o valor $V = 148,9281\mu V$ do SQUID que se estudou, valor um pouco acima da gama recomendada no manual do Mr.SQUID, mas que mesmo assim se considerou satisfatório. Ao traçar $V-\Phi$ em b2) foi possível observar a tendência sinusoidal que era esperada, com um $\Delta V = 42,86\mu V$, um pouco superior ao do manual. De forma a complementar estes estudos de supercondutividade, poder-se-ia ter concebido um aparato experimental em que, utilizando azoto líquido, um magneto e um HTS, se pudesse observar levitação magnética.

REFERENCES

[1] Ashcroft N. W., Mermin D. N, Solid State Physics, 1st Ed, 1976, Cengage Learning;

[2] Newrock, Richard, What are Josephson junctions? How do they work?, Scientific American

[3] Mr.SQUID User's Guide, STAR Cryoelectronics, LLC, Los Alamos, U.S.A.