

1 Introdução

1.1 Sistemas Híbridos Supercondutor/Ferromagneto

Materiais compósitos na escala nanométrica, os chamados nanocompósitos, constituem atualmente um campo muito interessante de pesquisa. Dentro deste campo, híbridos de dois diferentes materiais que normalmente não existem na natureza e que apresentam propriedades conflitantes podem ser fabricados artificialmente, combinando então as propriedades de todos os componentes e resultando em propriedades pouco usuais. É neste domínio que podemos citar os sistemas compostos por materiais supercondutores (SC) e ferromagnetos (FM).

Supercondutividade e ferromagnetismo são dois fenômenos naturais e cuja interação é peculiar, uma vez que o spin dos elétrons em um ferromagneto tenta alinhar-se paralelamente, enquanto o spin de elétrons em um supercondutor convencional tem seu alinhamento antiparalelo, em pares de Cooper. Quando SC e FM entram em contato, no entanto, novas e interessantes interações acontecem. Existem na literatura vários estudos sobre a fabricação artificial de nanocompósito SC/FM e de suas devidas propriedades [Bulaevskii85, Buzdin05, Lyuksyutov05, Velez08, AYAladyshkin09]. Estes pesquisadores verificaram que devido à interação entre o SC e o FM, campos magnéticos externos podem aumentar os parâmetros críticos do supercondutor. Outros fenômenos interessantes também foram encontrados, como o domínio da parede de supercondutividade [Yang04], e o efeito de histerese-pinning [Palau07].

Os compósitos SC/FM podem ser classificados em três grupos principais, de acordo com a sua estrutura: sistemas multicamadas [Monton07], filmes de SC decorados com nanopartículas FM e sistemas granulares SC/FM. Os sistemas multicamadas têm sido produzidos para estudar o efeito de proximidade nas camadas SC/FM. Os filmes decorados com nanopartículas são geralmente utilizados para estudar a formação de vórtices e antivórtices induzidos pelas nanopartículas FM, podendo ou não influenciar a temperatura

crítica do SC (T_c) [Lange05, VanBael99]. Já para os sistemas granulares estudam-se as interações coletivas entre SC e FM, o efeito de histerese-pinning foi descoberto neste tipo de sistema [Palau07].

Recentemente o grupo de pesquisas do CBPF liderado pela Prof.^a Elisa Saitovitch reportou o estudo de um sistema híbrido SC/FM composto de nanopartículas monodomínios de Co (FM) imersas em uma matriz de Pb (SC) [Xing08, Xing09], comprovando a coexistência entre supercondutividade e magnetismo. Novas e interessantes propriedades foram apresentadas, devido à criação e manipulação de vórtices magnéticos espontâneos. Concluiu-se então que devido à incorporação de nanopartículas de material ferromagnético em um supercondutor é possível a geração de vórtices espontâneos em um intervalo de temperaturas abaixo da T_c . Como estes vórtices são criados de forma aleatória no material, existe uma transição para uma fase sólida desordenada chamada vidro de vórtice (vortex glass).

1.2

Influência dos Ferromagnetos na Supercondutividade

Após a descoberta de SC, descobriu-se que o campo magnético externo pode suprimir a supercondutividade como um aumento de temperatura e a passagem de corrente através do material SC. Assim, um supercondutor tem três parâmetros críticos: temperatura crítica (T_c), densidade de corrente crítica (J_c) e campo crítico (H_c). Por um longo tempo, acreditou-se que o campo magnético somente pode diminuir os parâmetros críticos de um supercondutor [Kittel95]. Mais tarde descobriu-se que nos compostos SC/FM, o campo magnético externo pode induzir a supercondutividade devido à presença do campo de dispersão de FM na amostra [Milosevic05]. Isso é muito interessante para as aplicações tecnológicas de supercondutores. Na maioria das circunstâncias o campo magnético ou o campo de dispersão de FM em nanocompósito SC/FM irá diminuir a T_c da amostra. A seguir, vamos discutir o efeito da diminuição da T_c .

1.2.1

Diminuição da T_c Devido ao Efeito de Proximidade

Embora as propriedades básicas dos sistemas SC/FM já tenham sido muito estudadas, os efeitos de proximidade estão longe de ser entendidos completamente. O efeito de proximidade em um supercondutor acontece quando um supercondutor está em contato com um condutor normal. Como são bem conhecidos, os portadores de carga em um supercondutor são os pares de Cooper e em um condutor normal são os elétrons livres. Quando eles estão em

contato uns com os outros na interface, os pares de Cooper do supercondutor podem difundir para o condutor normal e vice-versa, os elétrons individuais no condutor normal também podem difundir para o supercondutor. Como um resultado, a densidade dos pares de Cooper na superfície do supercondutor diminui, mas no condutor normal não é zero mais, o que resulta na supressão da supercondutividade no supercondutor, e induzir uma fraca supercondutividade na superfície do condutor normal [Buzdin05].

Como se pode ver, a redução de T_c devido ao efeito de proximidade é proporcional à área da interface entre supercondutor e condutor normal, ou seja, quanto maior a área da interface, maior a diminuição de T_c na amostra. Isso também é relacionado com a densidade dos elétrons livres no condutor normal.

1.2.2

Diminuição de T_c Devido ao Campo Magnético Disperso

Em um supercondutor puro, T_c pode ser diminuído pelo campo magnético externo. A partir do diagrama de fase de um supercondutor pode-se saber que quanto mais forte um campo magnético externo, mais ele pode suprimir a supercondutividade, e quando ele é maior do que o campo crítico H_c , a supercondutividade é suprimida completamente.

No nanocompósito SC/FM, além do efeito de proximidade, o campo de dispersão do material magnético também pode diminuir a T_c .

Em um supercondutor, as impurezas magnéticas (átomos individuais) podem suprimir a supercondutividade muito facilmente, como mostrado na Fig. 1.1. Isto ocorre, pois o par de Cooper é quebrado quando ele passa pelas impurezas magnéticas devido ao efeito spin-flip. Se as impurezas magnéticas no SC formam nanopartículas magnéticas, será preciso de maior fração do volume das impurezas magnéticas para suprimir a supercondutividade. Quando a temperatura é mais baixa do que a temperatura de bloqueio (T_b) de uma nanopartícula magnética, os momentos magnéticos das partículas estão congelados. Neste caso, não tem spin-flip dos elétrons, e o mecanismo de quebrar o par não existe neste tipo de amostra. Foi descoberto que as nanopartículas magnéticas podem induzir vórtices espontâneos, e o volume dos vórtices é proporcional ao comprimento de coerência do supercondutor, o qual é muito maior do que o volume de nanopartículas magnéticas [Xing08]. Devido à formação de vórtices espontâneos, a diminuição da T_c de um supercondutor é muito maior do que a amostra que com nanopartículas não magnéticas, por exemplo, as nanopartículas de Cu. Neste último caso, a diminuição da T_c é apenas devido ao efeito de proximidade.

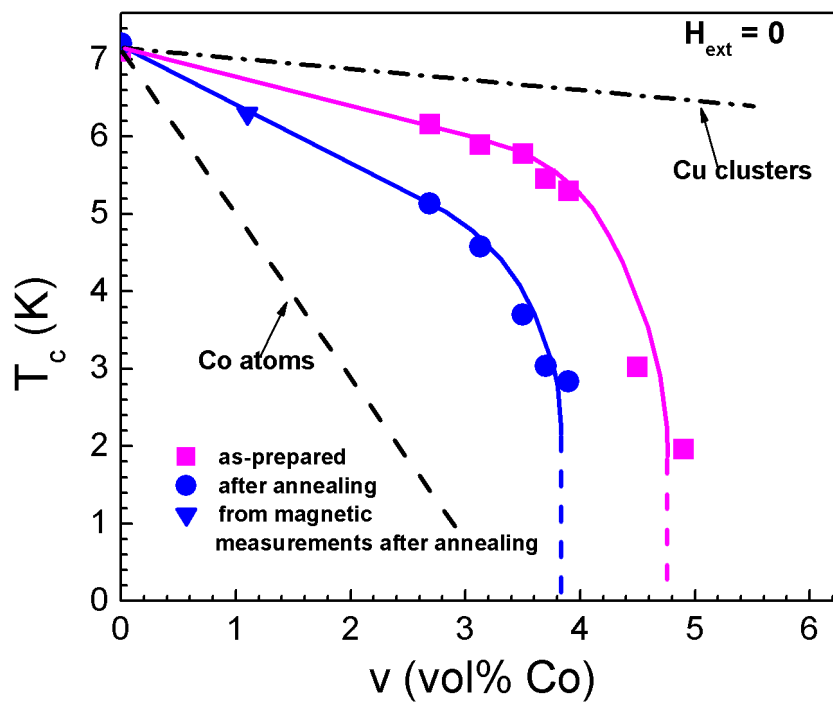


Figura 1.1: Variação de T_c em função de vol% Co para nanopartículas de Co, comparado com o caso de átomos de Co e de nanopartículas de Cu [Xing10].

Para multicamadas SC/FM, os resultados são bem diferentes. Primeiro, foi relatado que as camadas magnéticas não podem induzir vórtices espontâneos nas camadas supercondutoras [Monton07], e em segundo, os momentos magnéticos delas geralmente são alinhados no plano e o campo de dispersão é muito fraco no supercondutor. Também foi relatado que em sistemas de Nb/Gd a T_c diminui e aumenta periodicamente com o aumento da espessura das camadas magnéticas [Garifullin02]. Este comportamento pode ser explicado pelo efeito de espalhamento magnético, o qual é inerente nas ligas ferromagnéticas. O espalhamento magnético fortalece a diminuição da corrente com um aumento da espessura da camada FM, ao mesmo tempo em que aumenta o período de oscilação da corrente J_c . Este fenômeno foi observado quando a espessura das camadas magnéticas é muito fina (< 4 nm) [Garifullin02]. Com camadas FM mais grossas, acredita-se geralmente que a T_c irá diminuir mais rápido.

Dentro desta mesma linha de pesquisa que já vem sendo desenvolvido em compósitos SC/FM, este trabalho tem como objetivo a produção de um híbrido Nb/Co, para avaliação de suas propriedades magnéticas. Para isso, foram produzidos filmes sob forma de multicamadas por deposição catódica, para

serem submetidos a tratamentos térmicos de modo a induzir a interdifusão nas interfaces entre camadas. Era esperado que após tratamentos térmicos as camadas de Co formassem um plano de nanopartículas magnéticas ordenadas, cujo efeito deve ser muito diferente das nanopartículas aleatoriamente orientadas acima citadas, e das camadas magnéticas contínuas.

Esta dissertação está dividida de modo a explicar de forma clara e concisa a pesquisa desenvolvida. Após esta breve introdução serão apresentados a motivação que nos levou a estudar este tema, assim como os objetivos a serem alcançados, seguido de uma fundamentação teórica, no qual são explicados de forma rápida os conceitos envolvidos. Nos capítulos seguintes serão apresentados o procedimento experimental, resultados, discussão, e conclusão.