

## 5

### Efeito da Rugosidade nas Propriedades Supercondutoras

Neste capítulo, discutiremos o efeito de rugosidade da interface entre um supercondutor (SC) e ferromagneto (FM) nas propriedades supercondutoras de multicamadas de Nb/Co. Este problema já foi inicialmente abordado no Cap. 2, e agora vamos construir um modelo matemático a fim de discutir melhor.

#### 5.1

##### Modelos Matemáticos para o Estudo da Diminuição de $T_c$

Como explicamos no Cap. 1, a diminuição de  $T_c$  nas multicamadas SC/FM é principalmente devido ao efeito de proximidade e campo de dispersão das camadas FM. Neste caso, a variação de  $T_c$  pode ser escrita:

$$\Delta T_c = f(E_p + E_H) \quad (5-1)$$

Nesta equação  $\Delta T_c = T_c(\text{Nb puro}) - T_c(\text{Nb/Co})$ , é sempre positivo, pois o  $T_c(\text{Nb/Co})$  é sempre menor do que  $T_c(\text{Nb puro})$ . Maior  $\Delta T_c$  significa  $T_c$  diminuiu mais.  $E_p$  é o efeito de proximidade, e  $E_H$  significa o efeito do campo de dispersão. Aqui não consideramos o spin-flip e os vórtices espontâneos, porque estamos discutindo o efeito nas multicamadas, e em tais sistemas o spin-flip não acontece [Xing08]. Também foi relatado que não há nenhuma evidência para a existência de vórtices espontâneos em multicamadas SC/FM [Monton07].

Foi relatado que a diminuição da  $T_c$  é proporcional à fração de volume de Cu em amostras de Pb/Cu [Sternfeld05]. Assim  $\Delta T_c$  é uma função linear do efeito de proximidade, e o efeito de proximidade só ocorre na interface entre um SC e FM. Se não consideramos a mudança periódica de  $T_c$  quando a camada magnética é muito fina (na nossa amostra, as camadas magnéticas são muito grossas em comparação com a espessura da camada magnética na literatura) [Garifullin02], tem-se:

$$\Delta T_c = a \cdot S_{SC/FM} + f(E_H) \quad (5-2)$$

onde  $S_{SC/FM}$  é a área da interface entre os materiais SC e FM por volume unitário, e “a” é uma constante. O efeito do campo de dispersão em  $T_c$  sem formação de vórtices é semelhante ao efeito de um campo magnético externo.

A partir do diagrama de fase de um supercondutor podemos saber que, quando o campo magnético externo é menor do que  $H_{c2}$ ,  $T_c$  diminui não linearmente com o aumento do campo, porém o campo magnético ainda diminui a  $T_c$ . Desta forma, neste trabalho não abordaremos os cálculos quantitativos, apenas discussões qualitativas, e assim podemos supor aproximadamente que  $f(E_H)$  é uma função linear do campo. Assim, a Eq. 5-2 pode ser escrita como:

$$\Delta T_c = a \cdot S_{SC/FM} + b \cdot H_s \quad (5-3)$$

onde “b” é outra constante e  $H_s$  é o campo de dispersão das camadas magnéticas. Aqui supomos que a interface entre SC e FM é sempre muito bem definida, isto é, não há difusão entre as duas camadas. No Cap. 6 saberemos que essa suposição é razoável a partir das imagens TEM.

Da Eq. 5-3 podemos ver que a fim de discutir o efeito da rugosidade em diminuição de  $T_c$ , precisamos entender quais efeito da rugosidade na área de superfície e do campo de dispersão das camadas magnéticas. A seguir, vamos construir um modelo do efeito da rugosidade.

## 5.2

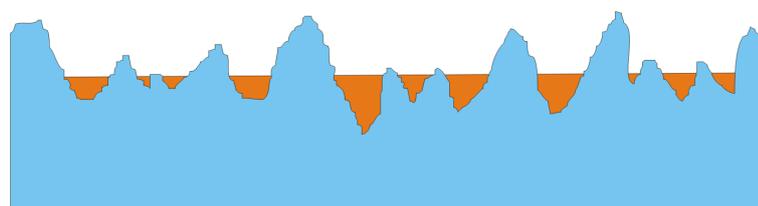
### Modelos do Efeito da Rugosidade

A fim de discutir o efeito da rugosidade, precisamos tomar a espessura da camada magnética em conta. Usamos  $R$  para denotar a rugosidade e “d”, a espessura da camada magnética. Obviamente, existem dois limites: um é com  $R \gg d$  e o outro com  $R \ll d$ . Nós usamos:

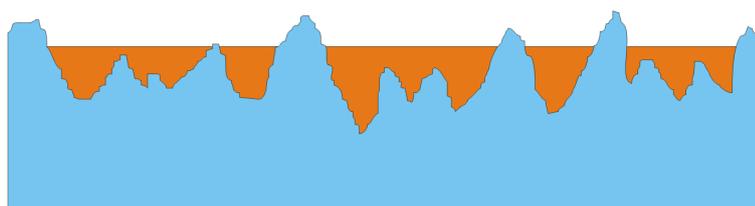
$$\delta \equiv R/d \quad (5-4)$$

para demonstrar os dois limites, quando  $\delta \gg 1$ ,  $R \gg d$ , quando  $\delta \ll 1$ ,  $R \ll d$ . Como mostrado na Fig. 5.1 (a), quando  $\delta \gg 1$ , a quantidade do material depositado é tão pequena que não forma uma camada continua. Neste caso, todos os materiais são em formas de muitas ilhas isoladas ou partículas. Se continuar depositando, alguma parte das ilhas podem se conectar umas as outras e formar maiores ilhas isoladas como mostrado na Fig. 5.1 (b). Se depositar o material ainda mais, todas as ilhas irão se conectar e podem formar uma camada, como mostrado na Fig. 5.1 (c). As Fig. 5.1 (b) e (c) mostram as circunstâncias de  $\delta \sim 1$ . Quando  $\delta \ll 1$ , a rugosidade é muito menor que a espessura da camada, e o efeito da rugosidade pode ser ignorado considerando que a interface é plana, como mostrado na Fig. 5.1 (d).

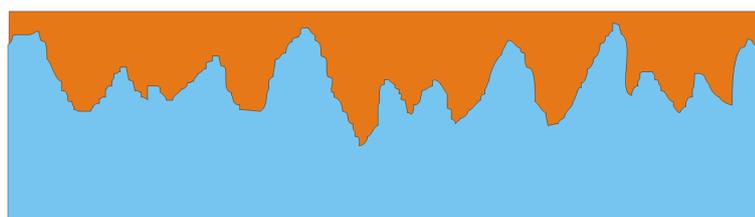
Em multicamadas SC/FM, o efeito das camadas magnéticas é bem diferente para as três circunstâncias, porque a distribuição do campo de dispersão é muito diferente. Usamos um software chamado “Mathematica” e um add-in chamado “Radia” para fazer cálculos do campo de dispersão de diferentes



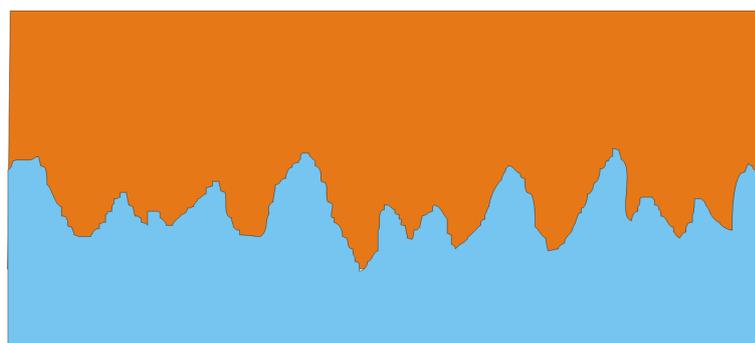
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.1: Esquema da interface entre duas camadas com a espessura da camada superior sendo (a) muito menor do que a rugosidade; (b) menor do que a rugosidade; (c) maior do que a rugosidade e (d) muito maior do que a rugosidade.

formas das camadas magnéticas. Usamos Co como material magnético e a magnetização de saturação é 1420 kA/m. Todos os cálculos são feitos com a magnetização do Co ao longo da direção Y. O campo magnético é calculado como  $B = \mu_0 M$  porque o campo magnético externo  $H = 0$ . A seguir vamos discutir cada caso separadamente.

### 5.2.1

#### Caso $\delta \gg 1$

Como discutido anteriormente, quando  $\delta \gg 1$ , a segunda camada forma nanopartículas magnéticas. A distribuição do campo de dispersão é calculada. No modelo matemático, usamos cubos em lugar de nanopartículas da forma aleatória para simplificar a programação, como mostrado na Fig. 5.2. A magnetização toda é ao longo da direção Y.

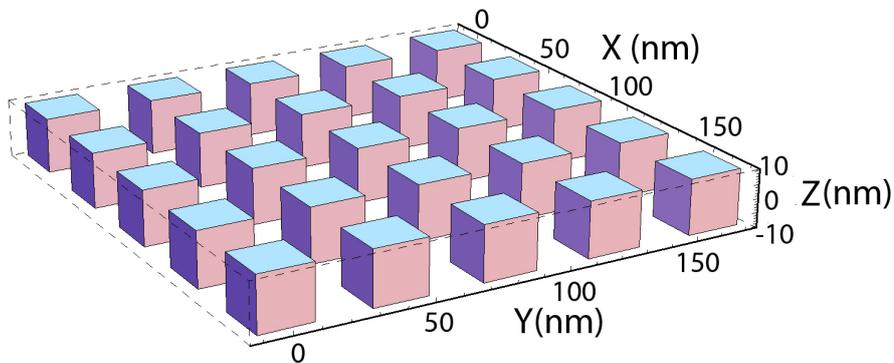


Figura 5.2: Esboço dos materiais magnéticos que usamos para o cálculo. A dimensão de cada cubo é  $20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$  e temos  $5 \times 5$  cubos idênticos. O ponto zero está no centro do primeiro cubo do lado esquerdo.

A Fig. 5.3 mostra a intensidade de campo para uma secção transversal em  $Z = 0$ . A partir da figura podemos descobrir que o mais forte campo magnético está no material magnético. Nas amostras de SC/FM, o efeito do material magnético é o campo de dispersão, que é sempre fora do material magnético, sendo que a mais interessante parte para nós é o campo magnético entre os materiais. A partir desta figura podemos ver que ao longo da direção X, o campo magnético entre dois cubos é negativo, e ao longo da direção Y é positivo. A fim de mostrá-lo mais claramente, duas curvas 2D do campo magnético foram esboçadas para uma secção transversal de XZ entre os cubos magnéticos e cruzadas, como mostrado na Fig. 5.4 e Fig. 5.5, respectivamente. Desde que as componentes  $B_x$  e  $B_z$  do campo magnético  $B(B_x, B_y, B_z)$  são muito menores do que  $B_y$ , somente traçamos  $B_y$  nas curvas seguintes.

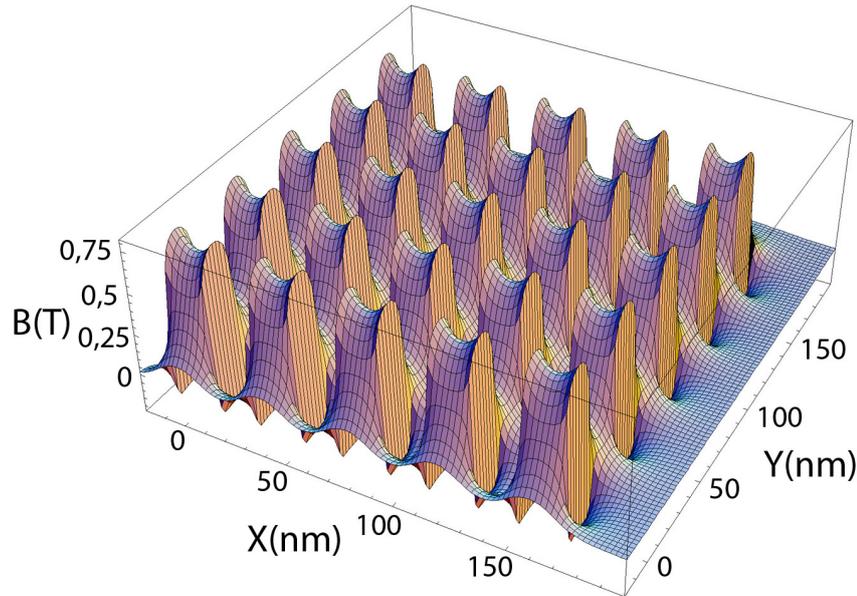


Figura 5.3: Um gráfico 3D da distribuição do campo magnético de uma secção transversal de XY em  $Z = 0$ .

Da Fig. 5.4 podemos ver que o campo magnético é positivo em toda a coordenada X. O campo magnético entre os dois cubos é 0,28 T (máximo nesta figura, mas na verdade é mínimo no gráfico 3D, tendo em mente que esta seção transversal é ao longo de X e que não passa qualquer cubo magnético.). Este ponto corresponde ao centro de uma linha que conecta os dois cubos ao longo da direção Y. O mínimo campo magnético nesta figura é cerca 0,07 T, correspondendo ao centro de um quadrado construído pelo centro de quatro mais próximos cubos. O campo magnético é muito fraco, mas ainda é positivo.

Se mudar a posição desta secção transversal para a posição que passa no centro de materiais magnéticos, a distribuição do campo magnético é mostrada na Fig. 5.5. A partir desta figura, podemos ver que o campo magnético no material FM é  $\sim 0,8$  T, e entre eles o campo magnético é negativo, e o valor é cerca de -0,15 T.

A partir dos resultados anteriores, podemos ver que o campo de dispersão de multicamadas SC/FM com  $\delta \gg 1$  é muito complicado. No SC, parte do campo magnético é positivo e outra parte do campo magnético é negativo. O campo de dispersão magnético total (sem tomar o campo do Co em conta) pode ser calculado pela seguinte equação:

$$B_{total} = \iiint_0^V B(x, y, z) dv \quad (5-5)$$

que deve ser positivo, desde que a partir da análise feita, a área positiva é maior e o valor é maior também. Nesta equação  $V = V_{total} - V_{Co}$ . Os resultados con-

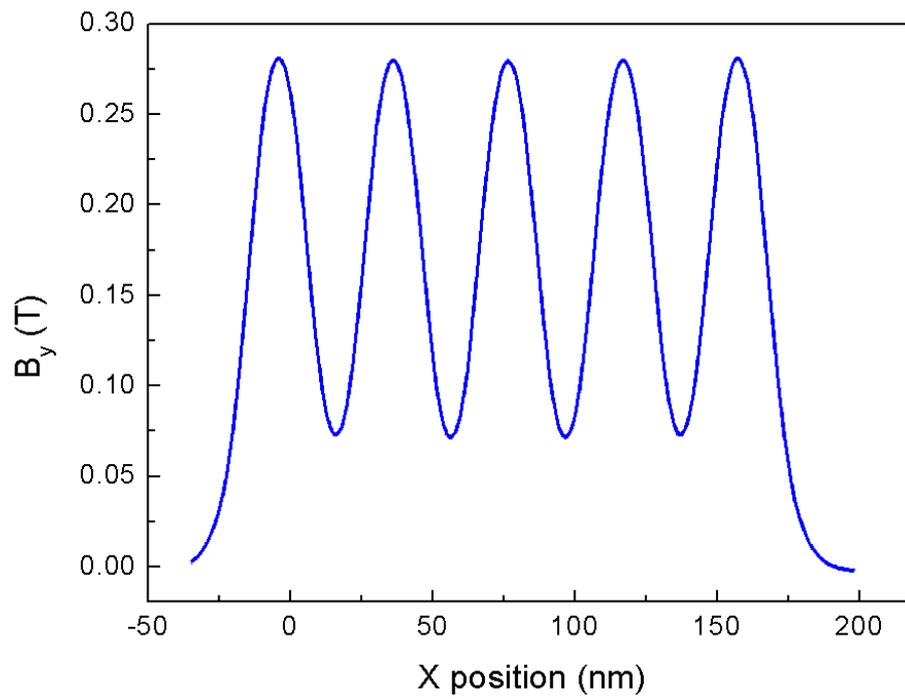


Figura 5.4: O componente Y do campo magnético ao longo de X entre dois cubos.

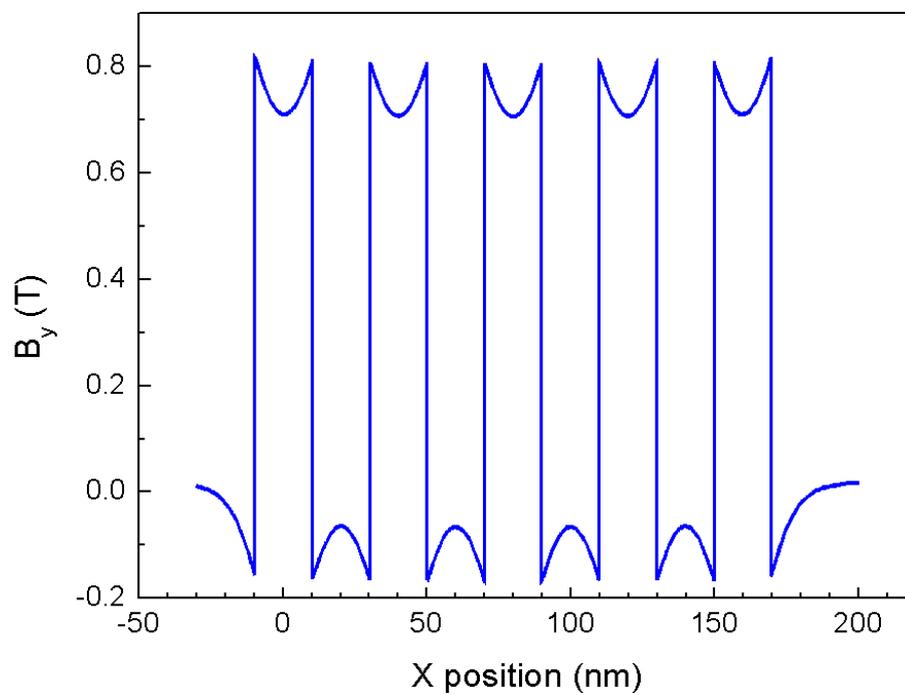


Figura 5.5: O componente Y de campo magnético ao longo de X passando no centro de um cubo.

firmaram que com nanopartículas magnéticas em um supercondutor, o campo de dispersão das partículas não é zero e pode induzir vórtices espontâneos na amostra [Xing08].

### 5.2.2

#### Caso $\delta \ll 1$

O limite com  $\delta \ll 1$  pode ser considerado como multicamadas com interface completamente plana. Calculou-se também o campo magnético disperso de tal sistema com cinco camadas magnéticas, como mostrado na Fig. 5.6. A espessura da camada é de 20 nm como em uma das nossas amostras e a distância entre eles é 100 nm. A dimensão XY é muito maior do que a espessura (5 ~ 10 mm). Este é um sistema bem conhecido de placa magnética infinita com magnetização no plano e aqui a diferença é que temos 5 das placas paralelas umas às outras.

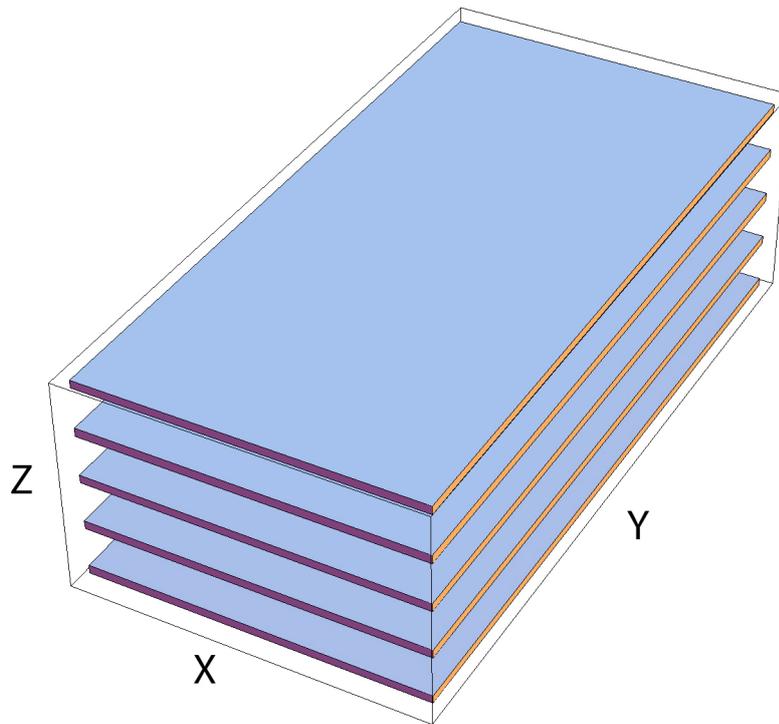


Figura 5.6: Esboço dos materiais magnéticos que usamos para o cálculo quando  $\delta \ll 1$ . A dimensão de cada placa é 5 mm  $\times$  10 mm  $\times$  20 nm e a distância entre eles é 100 nm. O ponto zero está no centro da placa inferior.

A Fig. 5.7 mostra o campo magnético para seção transversal YZ em  $X = 0$  (no centro da amostra). A partir desta figura pode-se ver que o campo magnético nas camadas de Co é muito forte desde que todas as magnetizações são assumidas como sendo ao longo de uma direção (Y). Entre as camadas de

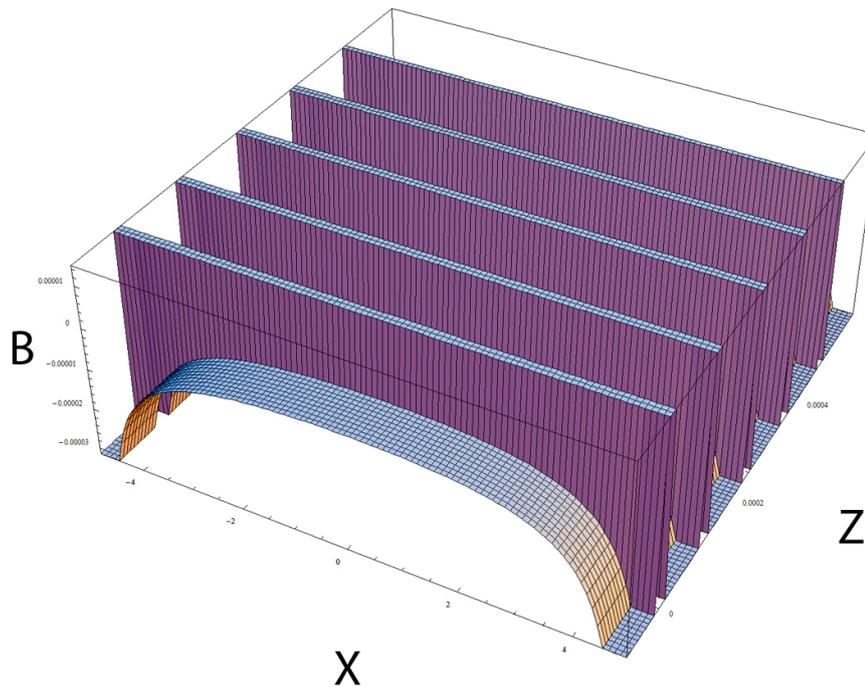


Figura 5.7: Gráfico 3D da distribuição do campo magnético para uma seção transversal de YZ em  $X = 0$  mm.

Co o campo magnético é negativo. Para vê-lo claramente, traçamos novamente duas curvas 2D do campo magnético com diferentes posições Z. Os resultados são mostrados nas Fig. 5.8 e Fig. 5.9, respectivamente.

A partir da Fig. 5.8 pode-se ver claramente que o campo magnético em camadas de Co é 1,0 T e entre as camadas é zero. A mudança do campo magnético na superfície das camadas de Co é muito estreita. Isso significa que em multicamadas SC/FM, o campo magnético disperso na camada supercondutor é zero. Este resultado confirmou que em multicamadas SC/FM não há nenhuma evidência para a existência de vórtices espontâneos[Monton07], desde que o campo de dispersão é zero. Somente no final das camadas, parece que há campo magnético negativo entre as camadas. Da Fig. 5.9 pode-se ver isso claramente. O campo magnético no final da camada de Co ainda é muito forte, apenas muito perto da interface existe uma camada muito fina com o campo magnético negativo. O valor mais elevado do campo magnético é diferente com o valor na Fig. 5.8 porque este é no final da camada e o campo magnético diminui. Além disso, a magnetização na borda também irá mudar a sua direção a fim de que ela diminua o campo magnético ao longo da direção Y.

A partir das análises anteriores, podemos ver que quando  $\delta \ll 1$  o campo

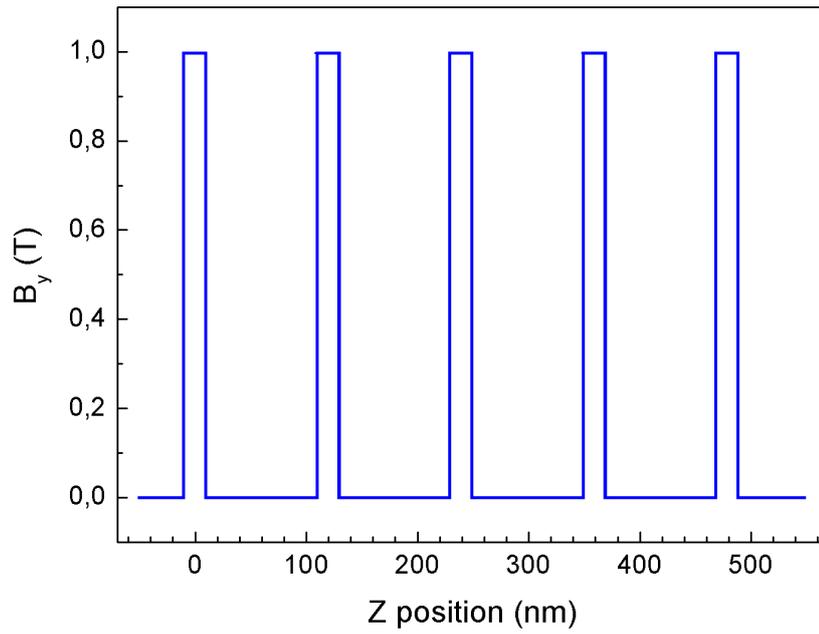


Figura 5.8: Campo magnético com uma função da posição  $Z$  em  $X, Y = 0$ .

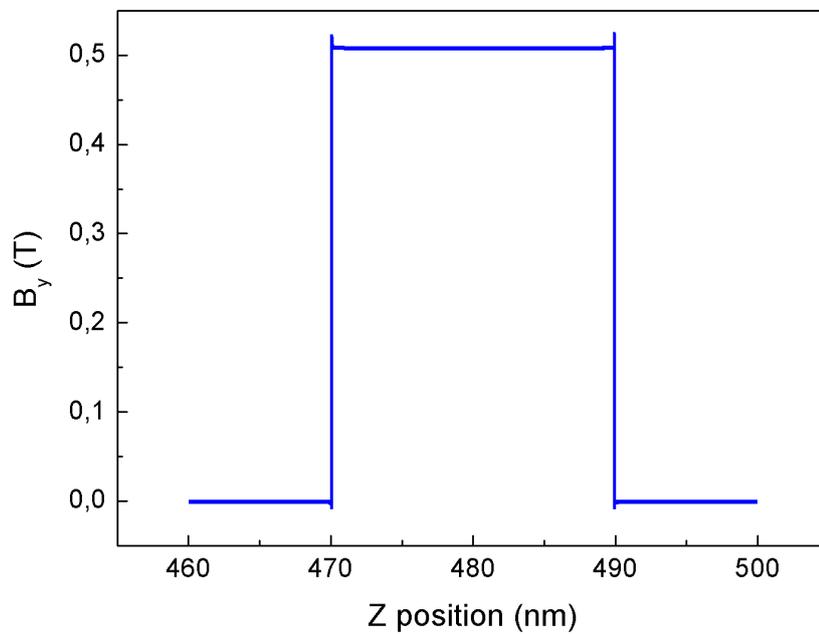


Figura 5.9: Campo magnético com função da posição  $Z$  por apenas uma camada de Co na extremidade da amostra (posição:  $X = 0, Y = 5$  mm).

magnético disperso das camadas de Co na camada supercondutor é muito fraco. O campo de dispersão total do campo magnético calculado pela Eq. 5-5, nesta amostra deve ser muito menor do que a de uma amostra com  $\delta \gg 1$ , e mais importante, o  $B_{total}$  com  $\delta \ll 1$  é negativo, mas com  $\delta \gg 1$ , é positivo. O diferente sinal do campo de dispersão pode dar uma reação bem diferente em um campo magnético externo para um supercondutor e isso será discutido mais tarde.

### 5.2.3

#### Caso $\delta \approx 1$

O caso  $\delta \approx 1$ , é o mais complicado do que os outros dois limites. Como mostrado na Fig. 5.1, pode haver nanopartículas magnéticas, camadas parcialmente conectadas e camadas completamente conectadas com interface muito ásperas, etc.. Para camadas parcialmente conectadas, combinou-se o comportamento de partículas magnéticas e camadas magnéticas. Mesmo para as camadas completamente conectadas, é muito diferente das camadas planas. Isto ocorre porque o momento magnético de Co na interface muito grosseira vai alterar a sua orientação, e o momento magnético não será paralela à superfície mais. A interface rugosa também será preenchida com materiais supercondutores a fim de que o campo de dispersão no supercondutor não seja zero ou muito fraco. O comportamento do supercondutor realmente depende da interface das camadas de Nb e Co.

Anteriormente discutimos as diferentes circunstâncias de rugosidade comparando com a espessura da camada magnética. Para responder a primeira pergunta que fizemos no Cap. 2, ainda precisamos dos resultados experimentais para mostrar a rugosidade da interface entre as camadas de Nb e Co. A seguir, é apresentado o resultado experimental sobre a rugosidade.

## 5.3

### Resultados Experimentais

#### 5.3.1

##### Resultados de AFM

Para estudar a rugosidade da interface, estudamos a superfície da amostra com a AFM. Como se sabe, a AFM pode medir apenas a rugosidade da superfície, que não pode medir a rugosidade da interface diretamente. A nossa amostra é formada por multicamadas Nb/Co, e a rugosidade da superfície é da mesma ordem da rugosidade na interface. Neste capítulo nossa discussão será baseada na rugosidade obtida por meio de AFM. A Fig. 5.10 mostra a

superfície das três amostras com diferentes espessuras de Co. A partir desta figura pode-se ver que a rugosidade da superfície da amostra Co5 é muito maior do que as outras duas amostras. No entanto, a rugosidade das outras duas amostras é quase a mesma.

Fizemos a análise quantitativa com um software e os resultados da rugosidade da superfície são dados na Tab. 5.1. Nesta tabela,  $R_q$  é raiz quadrática da média;  $R_a$  é média aritmética e  $R_{max}$  é o valor máximo, respectivamente. Os valores de  $R_q$  e  $R_a$  são dados pela equação seguinte:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n R_i^2} \quad (5-6)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |R_i| \quad (5-7)$$

| Amostras | $R_q$<br>(nm) | $R_a$<br>(nm) | $R_{max}$<br>(nm) | R obtidas pelo Raio X [Hernandez11] |                |
|----------|---------------|---------------|-------------------|-------------------------------------|----------------|
|          |               |               |                   | camada Nb (nm)                      | camada Co (nm) |
| Co5      | 1,4           | 1,1           | 16                | 1,1                                 | 0,74           |
| Co10     | 0,74          | 0,59          | 11                | 0,75                                | 0,68           |
| Co20     | 0,85          | 0,74          | 14                | 0,84                                | 0,78           |

Tabela 5.1: A rugosidade da superfície das três amostras obtidas a partir das imagens de AFM.

A partir desta tabela pode-se ver que a rugosidade média é bastante pequena, pois mesmo para Co5, a amostra com a rugosidade máxima, o  $R_q$  é apenas 1,4 nm, sendo ainda menor do que a espessura das camadas de Co. Comparando as três amostras, a Co5 tem a maior rugosidade e o valor é quase o dobro do valor da Co10 e Co20. As superfícies de Co10 e Co20 são muito semelhantes, com rugosidade muito menor e os grãos menores. Os resultados são de acordo com os resultados obtidos a partir de raios-X de reflexão com baixo ângulo. Como as amostras para estudar por AFM e raios-X são as mesmas amostras, preparadas em dias diferentes com as mesmas condições, podemos concluir que o resultado para o estado da superfície é reproduzível. A diferença da rugosidade entre as três amostras neste trabalho é apenas devido à diferente espessura da amostra, mais precisamente, a espessura das camadas de Co. Isso significa que com mais Co, a rugosidade diminui e ela satura quando a camada de Co atinge 10 nm. Pode haver duas razões possíveis para isso. A primeira é, depois de depositar a primeira camada de Nb, já possui superfície bastante áspera e mais tarde, a deposição da camada de Co pode encher os buracos da superfície a fim de que ele possa diminuir a rugosidade da superfície. No entanto, este efeito tem um limite. Quando aumentar a espessura

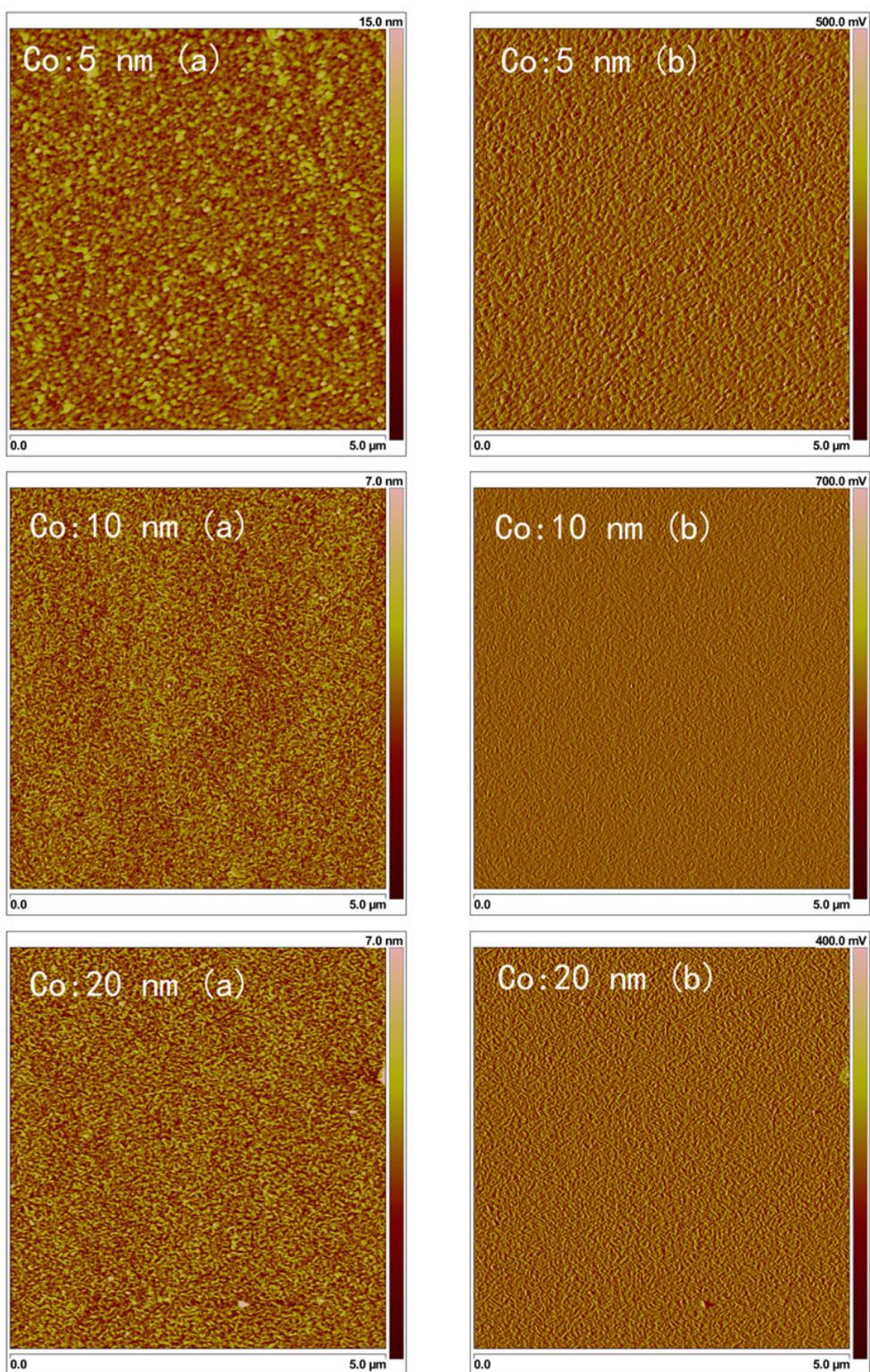


Figura 5.10: Imagens de AFM das três amostras com camadas de Co diferentes. Para cada amostra, (a) é a topologia da superfície em nm e (b) é a imagem varrida em mV.

de Co demais, a camada também tem sua rugosidade, e mesmo com mais Co ele irá manter o seu próprio valor. A rugosidade da camada final depende da interface do Co e Nb. O motivo da primeira camada de Nb ter rugosidade elevada pode ser devido à adesão de Nb em substrato Si, sendo muito diferente da interface Nb/Co. Outra possível razão pode ser que a camada Co mais fina tenha rugosidade mais alta do que a camada de Co mais grossa. Nós ainda precisamos estudar mais para esclarecer esta questão.

O valor de  $R_{max}$ , por outro lado, é bastante grande como pode ser visto a partir da Tab. 5.1. Para a amostra Co5, a  $R_{max}$  (16 nm)  $\gg$   $d_{Co}$  (5 nm); para Co10, a  $R_{max}$  (11 nm)  $\approx$   $d_{Co}$  (10 nm) e para Co20,  $R_{max}$  (14 nm)  $<$   $d_{Co}$  (20 nm).

A fim de estudar a rugosidade da superfície, analisamos uma secção transversal da imagem das três amostras e os resultados são mostrados na Fig. 5.11. A partir da Fig. 5.11(a) pode-se ver que a variação da altura do Co5 está entre -5 a +5 nm, que é maior do que  $d_{Co}$ . Existem vários picos muito elevados e as outras variações são pequenas. Significa que sobre a superfície as grandes mudanças de altura podem quebrar as camadas de Co, mas a quantidade é pequena. As maiorias das outras variações estão na mesma ordem ou mesmo muito menor do que  $d_{Co}$ . Os espectros de Co10 e Co20 ainda são muito semelhantes. A variação da altura é entre -2 a +2 nm. A maior mudança da altura é ainda menor do que  $d_{Co}$ , significando que a rugosidade da superfície não pode quebrar as camadas de Co, e isso é uma grande diferença de amostra Co5.

Foi feita a transformada de Fourier das três curvas, e os resultados são mostrados abaixo de cada espectro. A partir das três curvas, podemos ver que os componentes de maior amplitude são sempre com baixa frequência e os componentes de frequências mais altas são sempre com pequena amplitude. Neste caso, se vê apenas uma área muito pequena, a superfície poderia ser bastante plana, pois a escala de comprimento é muito pequena, a amplitude da variação da superfície é muito pequena. Se aumentar a escala de comprimento da área, a possibilidade de encontrar uma grande variação da rugosidade da superfície aumenta. Isso foi confirmado com as imagens HRTEM e os resultados serão discutidos no Cap. 6.

Para obter uma visão direta da rugosidade da superfície fizemos as imagens em 3D das três amostras, como mostrado na Fig. 5.12. A partir desta figura, podemos ver diretamente que a rugosidade da Co5 é muito maior do que as outras duas amostras e há muitos picos elevados na superfície. Os grãos também são maiores do que as outras duas amostras. Para a amostra Co20 [Fig. 5.12 (c)], existem três picos muito elevados e exceto eles, todos os outros picos

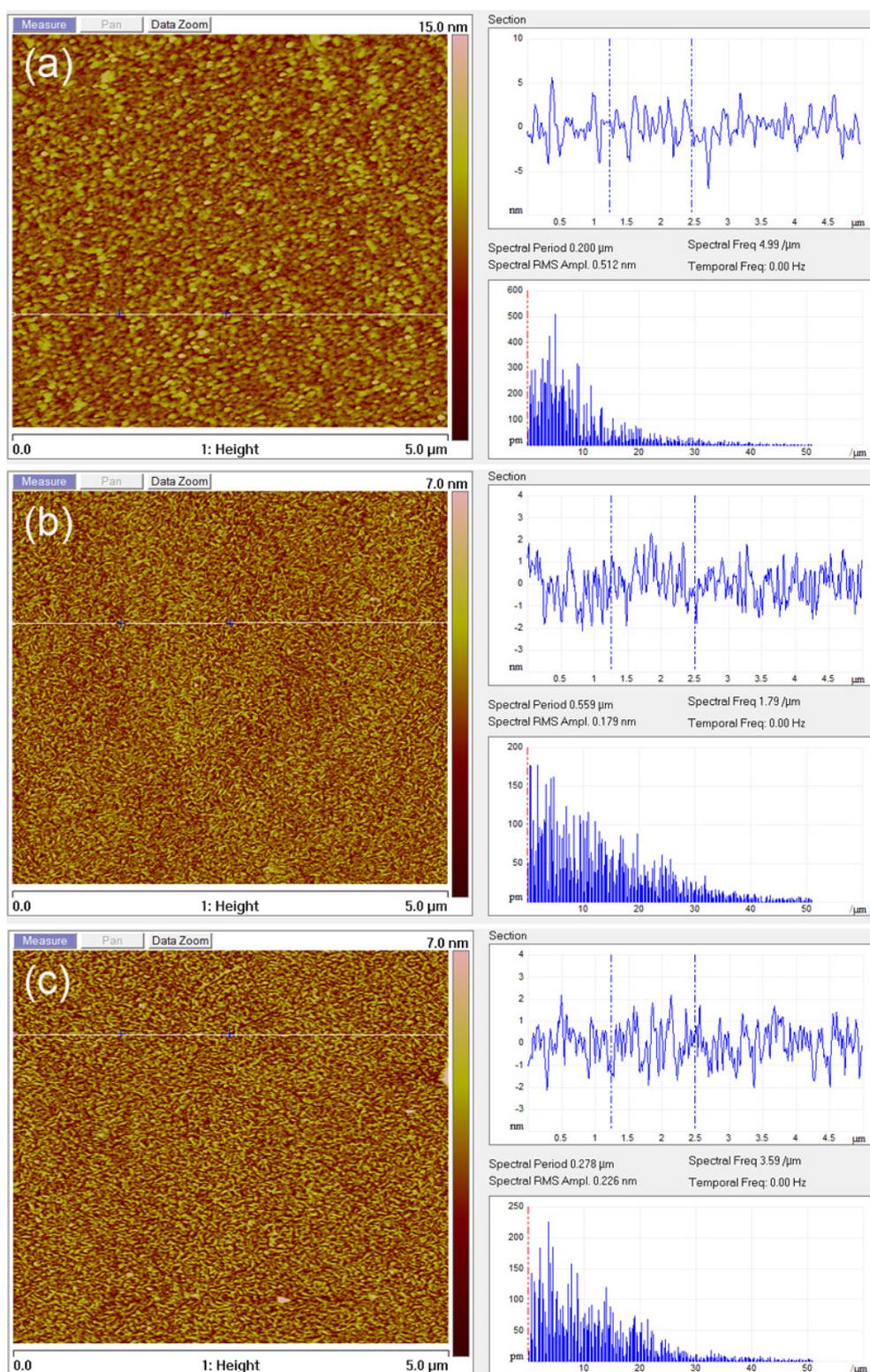


Figura 5.11: Perfil da superfície de uma seção transversal e Transformada de Fourier do espectro para (a) Co5 (b) Co10 e (c) Co20. As linhas brancas sobre as imagens mostram a posição da seção transversal de cada espectro.

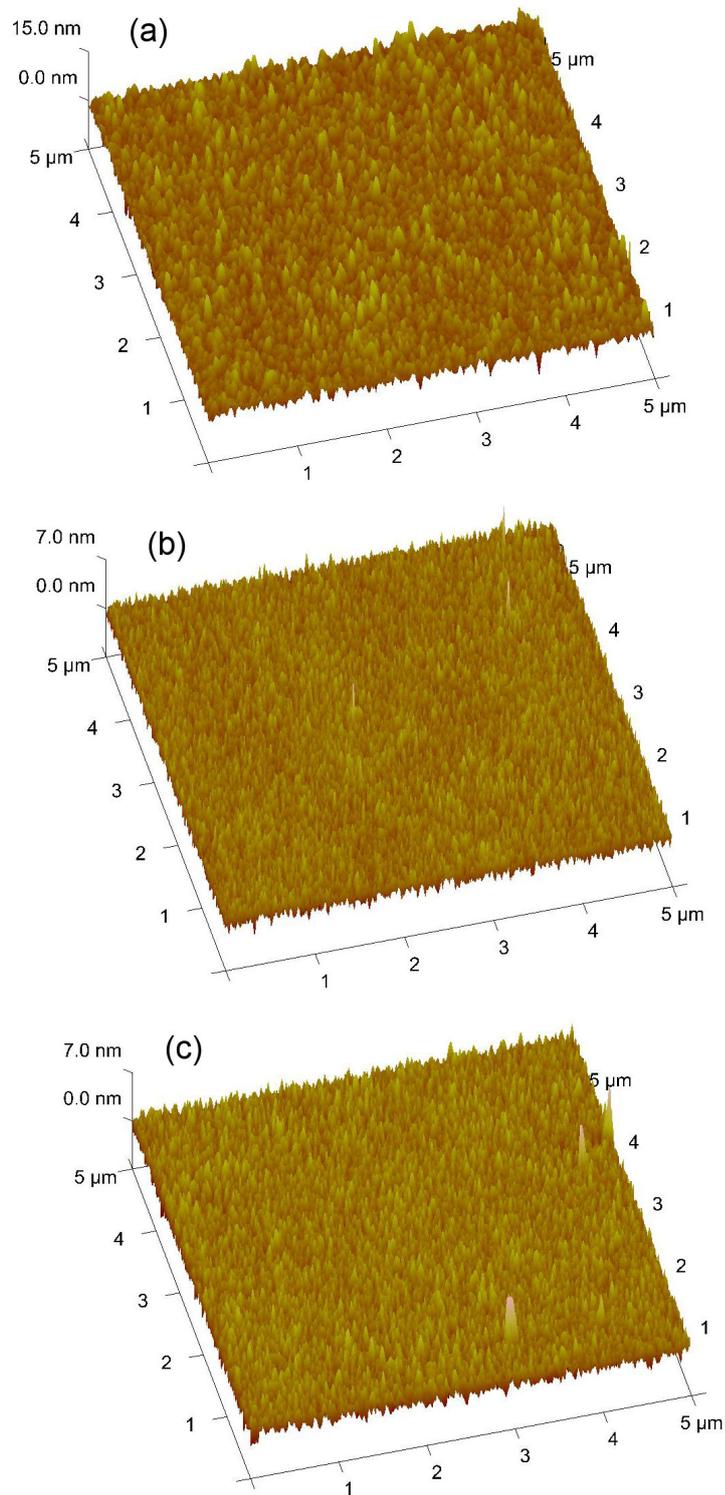


Figura 5.12: Imagens 3D topológicas da superfície de (a) Co5 (b) Co10 e (c) Co20.

são muito baixos. Estes três picos podem ser devido às poeiras na superfície. Então, quando nós consideramos o  $R_{max}$  desta amostra, o valor deve ser muito menor do que apresentado na Tab. 5.1 (14 nm), isso significa que o valor real da  $R_{max}$  deve ser muito menor do que a espessura das camadas de Co (20 nm). Esses três picos não têm grande efeito sobre os valores da rugosidade média desde que existem apenas alguns deles na superfície.

### 5.3.2 Medida do Transporte das Novas Amostras

Como mencionado anteriormente, as amostras neste trabalho são as mesmas usadas para fazer medidas de R-T [Hernandez11], mas sendo elas preparadas em dias diferentes. Os resultados da rugosidade são reprodutíveis e na seqüência discutiremos as medidas de R-T para as novas amostras (como mostrado na Fig. 5.13).

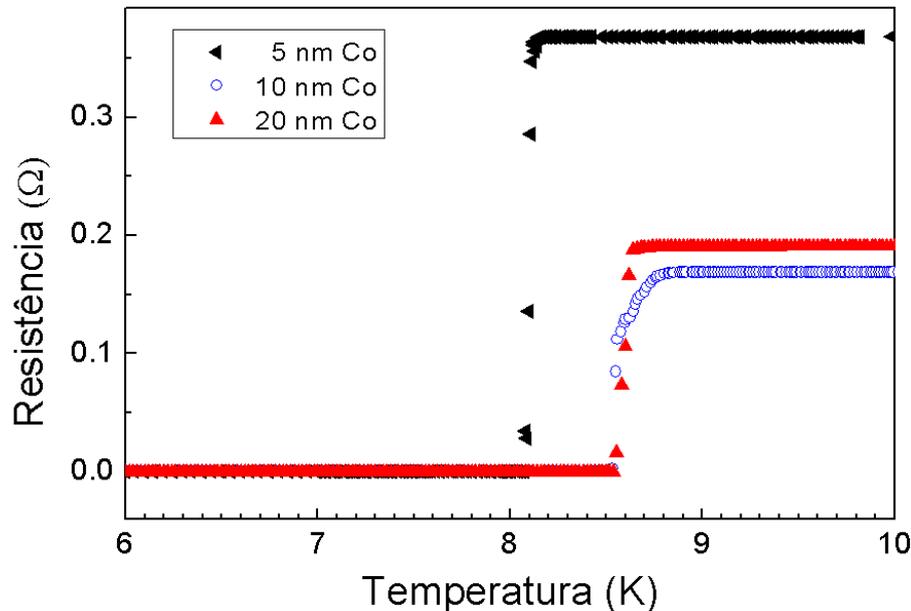


Figura 5.13: Resistência em função de temperatura para as três amostras.

A partir da Fig. 5.13 pode-se ver que a  $T_c$  de Co5 é a mais baixa, e as outras duas amostras com camadas de Co mais grossas têm  $T_c$  mais alta. Este resultado é semelhante com os resultados na Fig. 2.1. As diferenças entre os resultados antigos e novos são os seguintes: primeiro, a  $T_c$  de Co10 e Co20 são quase iguais nos novos resultados, mas são diferentes nos resultados antigos; segundo,  $T_c$  de todas as três amostras é muito mais alta do que os resultados antigos. Acreditamos que as razões para as duas diferenças são as mesmas, ou em outras palavras, as duas diferenças estão conectadas umas com as outras. Por alguma razão (que poderia ser menor pressão de base  $P_B$ , menor valor

de oxigênio, etc., durante o crescimento do filme fino), a qualidade das novas amostras é maior do que as antigas, e como resultado, a  $T_c$  de todas as três amostras é mais alta do que os resultados antigos. Todas as três amostras têm diminuição de  $T_c$  devido à presença de camadas de Co. No entanto, o Co5 diminui mais a  $T_c$  do que as outras duas amostras, e Co10 e Co20 têm uma muito pequena diminuição de  $T_c$  ( $T_c$  deles está perto da  $T_c$  do Nb puro). Neste caso,  $\Delta T_c$  é tão pequena que não podemos observar uma diferença muito grande entre Co10 e Co20.

## 5.4

### A Interpretação dos Resultados Experimentais

#### 5.4.1

##### A Interpretação da Diminuição da $T_c$

Antes de discutir a diminuição da  $T_c$ , é preciso relembrar a Eq. 5-3:

$$\Delta T_c = a \cdot S_{SC/FM} + b \cdot H_s$$

O primeiro termo no lado direito da equação é muito simples, desde que é apenas proporcional à área da interface. É muito fácil de entender que a maior área da superfície é com a maior rugosidade. A partir dos resultados de AFM podemos saber que a rugosidade  $R_{Co5} > R_{(Co10, Co20)}$ , de modo que o  $S_{SC/FM}(Co5) > S_{SC/FM}(Co10, Co20)$ . Como resultado, a diminuição da  $T_c$  de Co5 é devido ao efeito de proximidade, que é muito maior que nas outras duas amostras. A rugosidade da superfície de Co10 e Co20 é muito semelhante de modo que a diminuição da  $T_c$  destas duas amostras devido ao efeito de proximidade deve ser muito similar também.

O segundo termo no lado direito da equação é bastante complicado. A partir dos resultados de  $R_q$  e  $R_a$  na Tab. 5.1 sabemos que todos os valores de  $R_q$  e  $R_a$  são menores do que a espessura das camadas de Co, mesmo em amostra Co5. No entanto, a partir dos valores de  $R_{max}$  (Tab. 5.1), os espectros da seção transversal (Fig. 5.11) e as imagens 3D da superfície, pode-se saber que, quando discutimos a rugosidade da superfície, que não podemos apenas tomar rugosidade média em conta, temos que considerar a  $R_{max}$  também.

A variação da superfície da amostra Co5 está entre -5 nm e 5 nm e neste nível da amplitude existem muitos picos na superfície [Fig. 5.11 (a) e 5.12 (a)]. Esses picos podem romper as camadas de Co (5 nm) nesta amostra e pode formar ilhas ou um tipo de rede de Co. A partir dessas discussões podemos saber que a amostra Co5 está na circunstância de  $\delta_{Co5} > 1$ . Quando  $\delta_{Co5} > 1$ , o campo de dispersão magnético de camadas de Co é muito

forte e tem efeito sobre as propriedades supercondutoras nas camadas de Nb diminuindo a  $T_c$  devido à presença do campo magnético, e pode mesmo induzir vórtices espontâneos na amostra uma vez que foi relatado que nanopartículas magnéticas de Co podem induzir vórtices espontâneos em Pb [Xing08]. Os vórtices espontâneos podem diminuir mais  $T_c$ .

Comparando as amostras, ambas as rugosidades médias ( $R_a$ ,  $R_q$ ) e a rugosidade máxima ( $R_{max}$ ) de Co10 são menores do que a de Co5. A partir do espectro da secção transversal, pode-se ver que a variação da superfície é principalmente entre -2 nm e 2 nm, mas a  $R_{max}$  é muito próxima da espessura das camadas de Co. A partir dos dados podemos saber que  $\delta_{Co10} \approx 1$  ou  $\delta_{Co10}$  é levemente menor do que 1. Como discutimos antes, quando  $\delta_{Co10} \approx 1$ , a distribuição do campo de dispersão magnético é mais complicada do que quando  $\delta \gg 1$  e  $\delta \ll 1$ . Deve haver muito poucos vórtices espontâneos induzidos pelas camadas magnéticas comparando com Co5, e o campo de dispersão das camadas de Co deve ser mais fraca do que Co5. Assim, a diminuição de  $T_c$  na Co10 devido ao campo de dispersão magnética nas camadas de Co deve ser menor do que a na Co5.

A rugosidade de Co20 é muito similar ao Co10, mas a espessura das camadas de Co é muito maior. Portanto, esta amostra é no limite de  $\delta_{Co20} \ll 1$ . Todas as camadas de Co devem ser interligadas, e o campo de dispersão das camadas de Co é muito pequeno de acordo com o cálculo no início deste capítulo. O campo de dispersão não é exatamente como o que foi calculado, mas deve ser semelhante. Assim, a diminuição da  $T_c$  devido ao campo de dispersão magnético de camadas de Co na Co20 é muito menor do que na Co5. Comparando com Co10,  $\Delta T_c$  poderia ser menor do que Co10 se  $\delta_{Co10} \sim 1$ , que pode ser semelhante se  $\delta_{Co10} < 1$ . Isto é porque  $\delta_{Co10}$  é apenas uma média e que é difícil de determinar qual é o valor de  $\delta_{Co10}$ .

Em suma, a  $\Delta T_c$  devido ao efeito de proximidade de Co5 é maior e  $\Delta T_c$  devido ao campo de dispersão magnético de Co é também maior para esta amostra. A razão que as camadas mais espessas de Co diminuem menos  $T_c$  é  $\delta < 1$  nesta amostra. A partir do estudo, podemos concluir que nas amostras, não é somente a espessura ou a rugosidade que determina a diminuição de  $T_c$ , mas a proporção delas desempenha um papel importante.

#### 5.4.2

#### A Interpretação da Diferente Resposta Magnética nas Três Amostras

Na Fig. 2.2, sabemos que a resposta magnética das três amostras perto de  $H_{c2}$  é muito diferente, mudando de positiva (Co5) para plana (Co10) e depois negativa (Co20). Com o mesmo modelo, podemos explicar a diferença entre as

três amostras. O campo de dispersão das camadas magnéticas de Co determina o comportamento da amostra em um campo magnético externo perto de  $H_{c2}$ .

Como discutimos na secção 5.2, quando  $\delta \gg 1$ , o campo de dispersão total das camadas magnéticas é positivo e valor mais elevado é de cerca de 0,8 T. Quando  $\delta \ll 1$ , o campo magnético no centro da amostra é zero e no o final do padrão há um campo de dispersão negativo, e como resultado, o campo de dispersão magnético total é negativo. Quando  $\delta \approx 1$ , que é o mais provável entre os dois casos, o campo de dispersão total deve ser próximo de zero. A resposta final da amostra deve ser determinada por ambos os campos, tanto o de dispersão quanto o campo magnético externo. Tendo em mente que o valor absoluto do campo de dispersão é da mesma ordem (0,8 ~ 1 T) com  $H_{c2}$  do camadas Nb, o efeito total dos mesmos para Co5, que tem campo de dispersão positiva, é reforçar a resposta. Para amostra Co, uma vez que o campo de dispersão é muito próximo a zero, o efeito é exatamente como somente com o campo magnético externo e é por isso que a curva que perto a  $H_{c2}$  é plana. Para Co20, por outro lado, o campo de dispersão é negativo e o efeito total é que vai cancelar parte do campo magnético externo, que é oposto à amostra Co5. Assim, a diferença da resposta magnética para as três amostras abaixo de  $T_c$  é também determinada pela razão de  $\delta$ .