

令和 6 年度 卒業論文概要					
所 属	物理情報工学科・生物物理工学コース				
学生番号	212C3039	学生氏名	佐久川 蒔	指導教員	小田部 荘司
論文題目	マイスナー状態にある超伝導薄膜の臨界電流特性				

1. 緒言

第二種超伝導体は、磁場や電流密度、温度などを上げると完全反磁性であるマイスナー状態から、磁束線の侵入を許す混合状態を経て常伝導状態となる。このときの電流密度について、マイスナー状態を維持できる最大の電流密度が臨界電流密度 J_c 、超伝導状態を維持できる最大の電流密度が対破壊電流密度 J_d と定義されている。より多くの電流を流し、実用性を向上させるためには、臨界電流密度 J_c を大きくし、対破壊電流密度 J_d に近づけることが重要である。本研究では、横磁場と縦磁場をそれぞれ印加した第二種超伝導体薄膜のマイスナー状態における臨界電流特性を解析し、どうすれば臨界電流密度 J_c が大きな値を取るか、その条件について考察した。

2. 解析手法

輸送電流 I_t 、外部磁場 B_a としたとき、横磁場と縦磁場の計算モデルをそれぞれ Fig. 1 のように考えた。横磁場は外部磁場 B_a を通電電流 I_t に対して垂直な向きに印加し、縦磁場は外部磁場 B_a を通電電流 I_t に対して平行な向きに印加することとした。

Ginzburg-Landau(GL)方程式は臨界磁場の計算や、膜厚や形状が臨界電流や磁場に与える影響の評価するときに用いられる式である。本研究では臨界電流密度 J_c の磁場 B_a

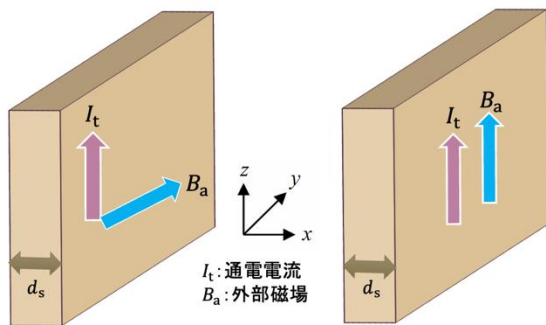


Fig. 1 Transverse magnetic field and Longitudinal magnetic field

及び膜厚 d_s 依存性を解析するに当たって、この GL 方程式から理論式を導いた。さらに、実際にパラメータを適用した数値計算を行うために、GL 方程式より微視的な挙動を記述する非線形 London 方程式を導いた。^[1]

$$\lambda^2 \frac{da}{dx^2} = (1 - |a|^2)a \quad (1)$$

ここで、 λ は磁場侵入長、 a はゲージ不変ベクトルポテンシャルである。このように、GL 方程式による理論式と非線形 London 方程式による計算結果を用いて解析を行った。

3. 計算結果

Fig. 2 には、一次元 GL 方程式を用いて数値計算により求めたゼロ磁場中の臨界電流密度 J_{c0} および過熱磁場 B_{sh} の膜厚 d_s 依存性を示している。縦軸は、 J_d で規格化した J_{c0}/J_d と、 B_c で規格化した B_{sh}/B_c を表し、横軸は磁場侵入長 λ で規格化した膜厚 d_s/λ を示している。

膜厚が薄い場合($d_s \lesssim \lambda$)は J_d に近づき、 B_{sh} は (λ/d_s) に比例することが確認できた。一方、膜厚が十分に厚い場合($d_s \gg \lambda$)では、 J_{c0} は $(\lambda/d_s)J_d$ に、また B_{sh} は B_c に収束することが分かった。 J_{c0} と B_{sh} はともに高い方が好ましい。よってこのグラフからは膜厚は薄い方が良いということが読み取れた。

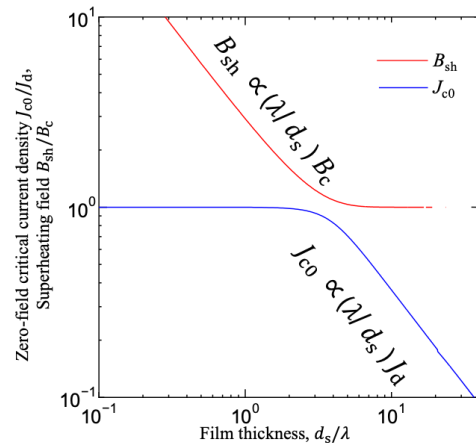


Fig. 2 Dependence of the zero-field critical current density J_{c0} and the superheating field B_{sh} on the film thickness d_s

超伝導薄膜に横磁場をかけた場合の計算結果をプロットしたグラフと、GL方程式から導かれた理論式を以下に示す。

$$J_{c\perp} = J_{c0} \left(1 - \frac{B_a}{B_c}\right) \quad (2)$$

Fig. 3では、縦軸はゼロ磁場での臨界電流密度 J_{c0} で規格化した臨界電流密度 J_c/J_{c0} 、横軸は過熱磁場 B_{sh} で規格化した外部磁場 B_a/B_{sh} であり、膜厚ごとに色分けして描画した。グラフより、薄膜であるほど傾斜が緩やかであり、磁場依存性が弱いことがわかった。磁場依存性が弱いということは、磁場を印加していても臨界電流密度が下がりにくいということである。厚膜の場合は、傾斜が急で磁場依存性が強い。このグラフから、膜厚は薄い方が磁場を印加していても J_c が下がりにくく有利であると考えた。また、厚膜の場合の計算結果が理論式とほぼ一致していた。この事実から、横磁場下での計算は正しく行われており、従って薄膜であるほど磁場依存性が弱いという事実の裏付けとなった。

横磁場の場合と同様にして、通電電流 I_t と平行な向きに外部磁場 B_a を印加する、縦磁場の場合の解析を行なった。その際に比較した理論式とグラフを以下に示す。

$$J_{c\parallel} = J_{c0} \left[1 - \left(\frac{B_a}{B_c}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

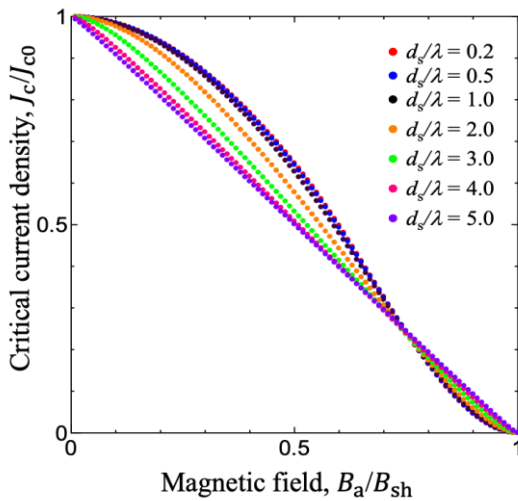


Fig. 3 Dependence of the critical current density J_c on the Transverse magnetic field B_a , where J_c is scaled by J_{c0} and B_a is scaled by B_c

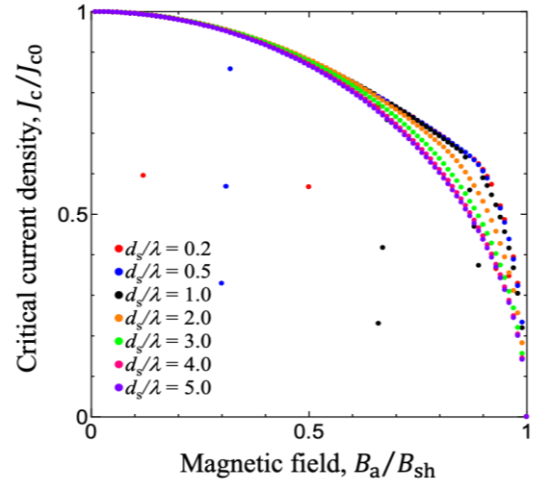


Fig. 4 Dependence of the critical current density J_c on the longitudinal magnetic field B_a , where J_c is scaled by J_{c0} and B_a is scaled by B_c

Fig. 4 からは、薄膜であるほど傾斜が緩やかであり、磁場依存性が高いことがわかった。厚膜の場合は、傾斜が急で磁場依存性が低く、こちらも理論式とほぼ一致しているため、計算が正しく行えたと言える。このグラフからも、膜厚が薄い方が、 J_c が高い値を保つことができ、有利であると考えた。また、縦磁場の場合と横磁場の場合を比較すると、縦磁場の場合の方が常に高い J_c を保っており、これらをまとめると、膜厚は薄く、磁場の向きは縦磁場であることが J_c を高くする条件であるという結論に至った。

4. 結言

本研究では、横磁場と縦磁場をそれぞれ印加した第二種超伝導体薄膜のマイスナー状態における臨界電流特性についての解析をした。横磁場をかけると、薄膜の場合には磁場の増加とともに急激な減少を見せ、厚膜の場合には緩やかな減少となり、理論式とほぼ一致した。縦磁場をかけた場合には、薄膜の場合に緩やかな減少を見せ理論式と一致し、厚膜の場合に急激な減少を見せた。また、横磁場を印加した場合に比べて、縦磁場をかけた場合の方が臨界電流密度 J_c は大きい値を取るという結果を得た。この結果が超伝導薄膜の実用性の向上に貢献するだろう。

参考文献

- [1] P. G. de Gennes, Solid Stat. Commun, 3, 127 (1965)