

MgB₂/Ni 多層薄膜の強磁場下における磁束ピンニング特性

Flux pinning properties of MgB₂/Ni multilayered thin films in high magnetic fields

熊本大・大学院自然科学研究科 藤吉 孝則, 梶田 龍, 米倉 健志, 末吉哲郎
鹿児島大・工学部 土井 俊哉
物質材料研究機構 北口 仁
東北大・金研 淡路 智, 渡辺 和雄

T. Fujiyoshi¹, R. Kajita¹, K. Yonekura¹, T. Sueyoshi¹, T. Doi², H. Kitaguchi³, S. Awaji⁴, K. Watanabe⁴
¹ Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University
² Faculty of Engineering, Kagoshima University
³ National Institute for Material Science
⁴ Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

電子ビーム蒸着法[1]で作製された MgB₂ 超伝導薄膜は、柱状結晶が成長するため結晶粒界がピンニングとして働き、膜面に垂直な方向の磁場に対して、高い臨界電流密度 J_c を示すことが報告されている[2]。また、酸素中雰囲気中で成膜することにより、その結晶粒界に沿って MgO が導入され、結晶粒界による磁束ピンニングが強化されることにより J_c が向上することも報告されている[3,4]。しかし、印加磁場方向による J_c の大きな異方性を無くすためには膜面に対して平行に磁場を印加したときの J_c の向上も望まれる。

本研究では、膜面に平行に磁場を印加した場合の J_c の向上を目的として、MgB₂/Ni 多層薄膜を電子ビーム蒸着法で Si 基板上に作製した。Ni は強磁性を示すため、この層は強い磁束ピンニングとして働くことが期待される。特に、量子化磁束の格子間隔と Ni 層の間隔が一致する磁場は効率良く磁束ピンニングできると考えられることから、この磁場をマッチング磁場 B_0 と定義する。Ni 層による磁束ピンニング効果を調べるために、様々な温度・磁場範囲において J_c の磁場依存性および印加磁場角度依存性を測定した。また、電界-電流密度 (E - J) 特性の測定を行い、磁束ピンニング特性の評価を行った。

2. 実験方法

電子ビーム蒸着法を用いて MgB₂/Ni 多層薄膜を Si 基板(100)上に作製した[5]。また Ni 層は同軸アーク蒸着法を用いて堆積させた。作製前の背圧は 5×10^{-7} Pa であり、ハロゲンランプヒータを用いて基板を 250°C に加熱した。成膜レートは Mg:B=2:0.7(nm/s)とし、膜面に平行な磁場に対するピンニングセンターとして導入した Ni 層は 0.01nm/pulse とした。

Si 基板上に MgB₂ 層を 24.4nm, Ni を 0.3nm, 13 サイクル積層させたものを試料 S1 ($B_0=3$ T)。また、MgB₂ 層を 15.0nm, 20 サイクル積層させたものを試料 S2(pure)とした。S1 ($B_0=3$ T) 試料, S2(pure) 試料の合計の膜厚はそれぞれ 280nm, 300nm であった。また、作製した S1 ($B_0=3$ T) 試料および S2(pure) 試料の超伝導転移温度 T_c は、それぞれ 23.0K および 32.8K であった。このように Ni 層の導入により、著しく T_c が低下する。

製膜後の試料はフォトリソグラフィにより幅 50 μ m,

長さ 1mm のブリッジ状にパターンニングした。四端子法により E - J 特性の測定をし、電界基準を 10 μ V/cm として J_c を定義した。 J_c の磁場依存性や磁場角度依存性を測定した。また、様々な温度・磁場範囲において E - J 特性の測定を行い、パーコレーション遷移モデルを適用して導出した磁束ガラス-液体温度 T_g や m 値より磁束ピンニング特性の評価を行った。測定時の温度精度は ± 0.03 K 以内であった。

3. 結果および考察

Fig. 1 に J_c の磁場依存性を示す。温度 $T=10$ K で、膜面に対してそれぞれ垂直, 平行に磁場を印加している。膜面に対して磁場を垂直に印加した場合は S1 ($B_0=3$ T) 試料, S2(pure) 試料ともに磁場の増加とともに J_c は単調に減少した。一方、膜面に対して平行に磁場を印加した場合、S1 ($B_0=3$ T) 試料においてマッチング磁場 3T 付近でのピークが見られる。S2(pure) 試料においては膜面に対して垂直に磁場を印加した場合と同様にこのような顕著な変化は見られなかった。従って、S1 ($B_0=3$ T) 試料にこれよりマッチング磁場付近で有効なピンニングセンターが導入されたと考えられる。

Fig. 2 に J_c の磁場角度依存性を示す。 $\theta=0^\circ$ は磁場を膜面に対して垂直に印加した場合であり、 $\theta=90^\circ$ は膜面に平行に磁場を印加した場合に対応する。S1

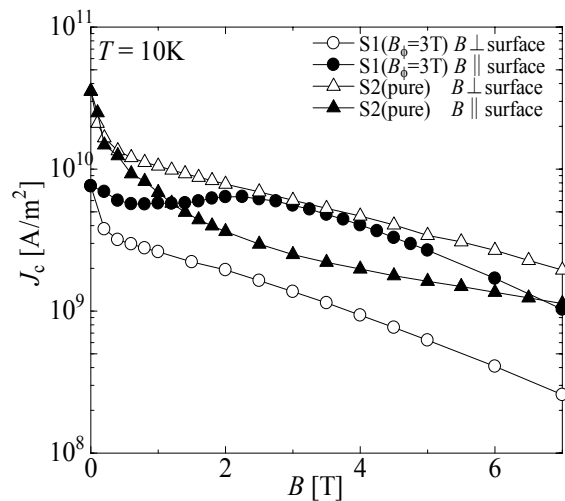


Fig. 1 Magnetic field dependences of J_c .

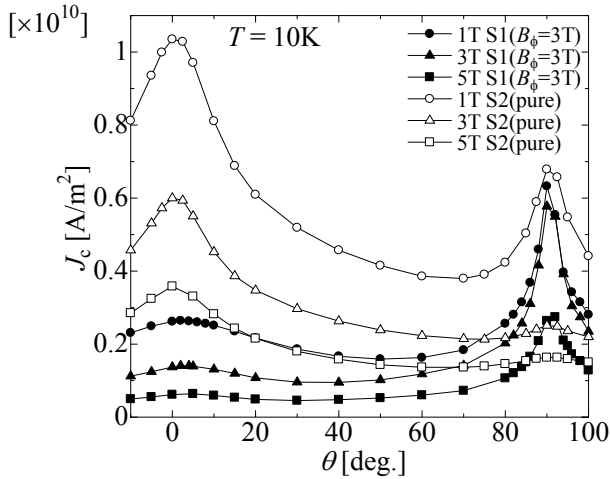


Fig. 2 Angular dependences of J_c .

($B_0=3T$) 試料において $\theta=90^\circ$ 付近での J_c の著しいピークが見られる. 一方, S2(pure)試料においては結晶粒界によるピンニングと思われる $\theta=0^\circ$ 付近でのピークが見られる. これより S1 ($B_0=3T$) 試料において Ni 層の導入により, 膜面に平行に印加された磁場に対して有効なピンニングセンターが導入されたことが判る.

T_g と m 値の磁場依存性を調べるために, 印加磁場を変化させて E - J 特性を測定した. Fig. 3 に S1 ($B_0=3T$) 試料における $B=1T$, 膜面に垂直に磁場を印加したときの E - J 特性を示す. 両対数プロットした E - J 特性は, 低温領域では上に凸の曲線となっているが, 温度の上昇に伴いある温度を境として下に凸の曲線へと変化する. この境となる温度は磁束ガラス-液体転移温度 T_g と呼ばれる. このような特徴的な E - J 特性の振る舞いは $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ などの高温超伝導体において観測される特徴と同じである.

高温超伝導体の E - J 特性はピン力の統計的分布を考慮したパーコレーション遷移モデル(ディピンニングモデル)によって定量的に記述できることが知られている [6-8]. また, MgB_2 薄膜における E - J 特性もパーコレーション遷移モデルによって表せることも報告されている [9]. パーコレーション遷移モデルでは, 分布した要素的ピン力に基づく局所的な臨界電流密度 J_{cl} の確率密度分布関数 $P(J_{cl})$ として, 信頼性工学で用いられる Weibull 関数を用いている.

このモデルにおいて, J_{cl} の分布は三つのピンニングパラメータ J_{cm} , ΔJ_c , m 値によって特徴づけられる. ここで, J_{cm} は局所的臨界電流密度の分布の最小値, ΔJ_c は分布の幅, m は分布の形を特徴付けるパラメータである. なお局所的がピン止め力がばらついていると J_{cl} の分布は立ち上がりが緩やかでなだらかな分布となり m 値が小さくなる. 一方, 局所的なピン止め力がそろっていると, 立ち上がりが急で鋭い分布となり m 値は大きくなる. この局所的臨界電流密度の分布関数 $P(J_{cl})$ から, E - J 特性は次式のように表される.

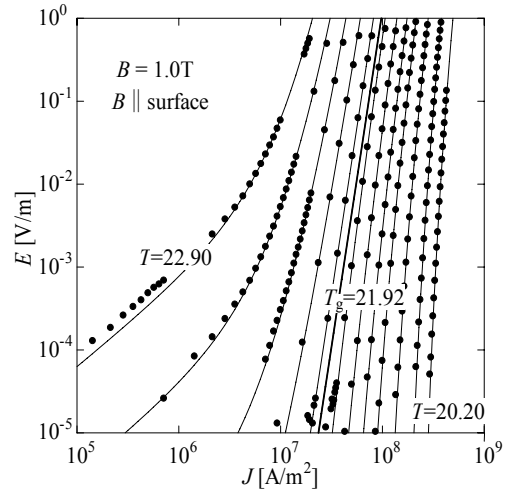


Fig. 3 E - J characteristics in the magnetic field of $B=1T$.

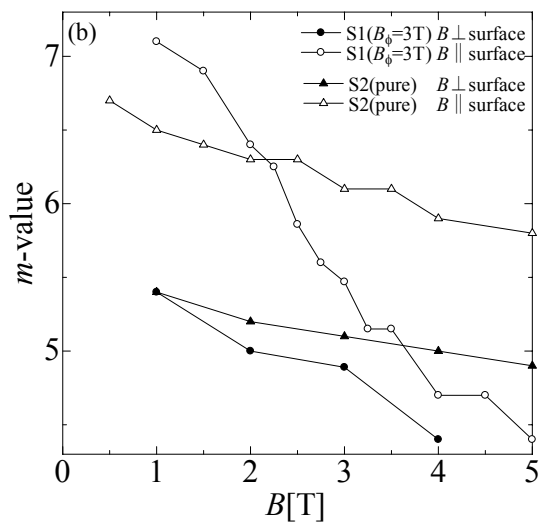
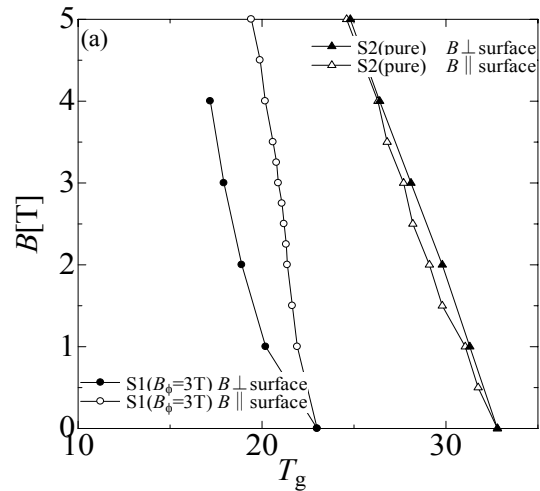


Fig. 4 Magnetic field dependences of (a) T_g and (b) m -value.

$$E = \rho_{FF} \int_{J_{cm}}^J (J - J_{cl}) P(J_{cl}) dJ_{cl}$$

$$= \begin{cases} \frac{\rho_{FF} \Delta J_c}{m+1} \left(\frac{J - J_{cm}}{\Delta J_c} \right)^{m+1} & \text{for } T < T_g \\ \frac{\rho_{FF} \Delta J_c}{m+1} \left(\frac{J}{\Delta J_c} \right)^{m+1} & \text{for } T = T_g \\ \frac{\rho_{FF} \Delta J_c}{m+1} \left\{ \left(\frac{J + |J_{cm}|}{\Delta J_c} \right)^{m+1} - \left(\frac{|J_{cm}|}{\Delta J_c} \right)^{m+1} \right\} & \text{for } T > T_g \end{cases}$$

ここで、 ρ_{FF} は磁束フロー抵抗である。実験より得られた E - J 特性をパーコレーション遷移モデルによる上式とフィッティングを行った。フィッティングでは実験値と理論値の誤差が最も小さくなるようにピンニングパラメータ J_{cm} , ΔJ_c , m 値を決定した。Fig. 3 においてシンボルが実験値、実線が理論値を示しており、両者はよく一致している。

Fig. 4 (a), (b) にパーコレーション遷移モデルから得られた S1 ($B_\phi=3T$) 試料と S2(pure) 試料の T_g と m の磁場依存性を示す。Fig. 4 (a) に示した T_g の磁場依存性より、S1 ($B_\phi=3T$) 試料、S2(pure) 試料とも膜面に平行、垂直に磁場を印加した場合において直線的に変化しており異常な振る舞いは見られなかった。S2(pure) 試料では印加磁場角度で T_g にほとんどに差が見られず、S1 ($B_\phi=3T$) 試料では膜面に磁場を平行に印加した場合に T_g が膜面に垂直に印加した場合と比べて著しく高くなっていた。

m 値の磁場依存性では、膜面に磁場を平行に印加した場合において S2(pure) 試料では異常な変化は見られなかったが、S1 ($B_\phi=3T$) 試料にマッチング磁場を境に m 値の傾きに変化が見られた。一方、膜面に垂直に磁場を印加した場合には両試料とも m 値に変化は見られなかった。

これは、Fig. 5 (a) に示すように、マッチング磁場以下では Ni 層に磁束が全て捕らえられ m 値が高くなり、Fig. 5 (b) に示すようにマッチング磁場付近では効率よく磁束がピンニングされているためと考えられる。しかし、Fig. 5 (c) に示すように外部磁場がマッチング磁場以上になると、磁束密度の関係上 Ni 層と Ni 層の間に磁束が存在してしまう。そのためにピンニング効率が低下したと考えられる。このような理由により m 値の傾きにマッチング磁場を境に変化が見られたと考えられる。

4. まとめ

電子ビーム蒸着法を用いて MgB₂/Ni 多層薄膜を作製した。膜面に対して平行に磁場を印加したときの J_c 向上を目的として Ni 層をピンニングセンターとして導入した。Ni 層の効果とその磁束ピンニング特性を調べるために、 J_c の磁場依存性や J_c の磁場角度依存性を測定した。また、様々な温度・磁場範囲において E - J 特性の測定を行い、パーコレーション遷移モデルを適用し導出した T_g と m 値より磁束ピンニング特性の評価を行った。

J_c の磁場依存性から膜面に平行に磁場を印加した場

合においてマッチング磁場付近で J_c の向上が見られた。 J_c の磁場角度依存性において $\theta=90^\circ$ での鋭いピークが見られた。 T_g の磁場依存性より S1 ($B_\phi=3T$) 試料は膜面に平行に磁場を印加した場合において膜面に垂直に磁場を印加した場合よりも T_g が向上していたが、S2(pure) 試料は印加磁場角度による T_g の変化は見られなかった。 m 値の磁場依存性より、S1 ($B_\phi=3T$) 試料は膜面に磁場を平行に印加した場合においてマッチング磁場を境にグラフの傾きに変化が見られた。これらより、Ni 層が膜面に平行に磁場を印加した場合においてマッチング磁場付近で有効なピンニングセンターとして働くことが分かった。

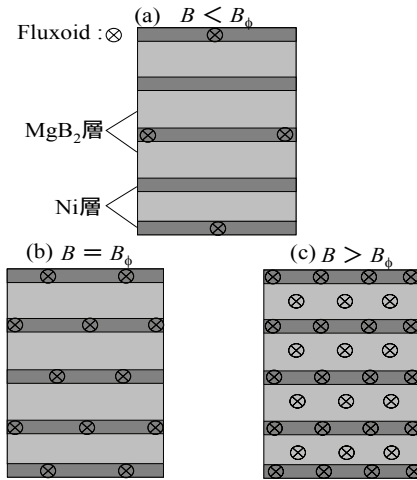


Fig. 5 Pattern diagrams of flux pinning
(a) $B < B_\phi$ (b) $B = B_\phi$ (c) $B > B_\phi$

参考文献

- [1] M. Okuzono, T. Doi, Y. Ishizaki, Y. Kobayashi, Y. Hakuraku and H. Kitaguchi: IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 3253.
- [2] H. Kitaguchi, T. Doi, Y. Kobayashi, A. Matsumoto, H. Sosiati, S. Hata, M. Fukutomi, H. Kumakura: IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 3313.
- [3] M. Haruta, T. Fujiyoshi, T. Sueyoshi, K. Miyahara, T. Doi, H. Kitaguchi, S. Awaji, K. Watanabe: Supercond.Sci. Technol. 18 (2005) 1460.
- [4] 春田正和, 藤吉孝則, 末吉哲郎, 宮原邦幸, 土井俊哉, 北口仁, 淡路智, 渡辺和雄: 低温工学 40 (2005) 473.
- [5] K. Fukuyama, T. Doi, H. Kitaguchi, Z. Mori, K. Masuda, Hamada, Y. Hakuraku: IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 2891.
- [6] K. Yamafuji and T. Kiss: Physica C 258 (1996) 197.
- [7] K. Yamafuji and T. Kiss: Physica C 290 (1997) 9.
- [8] K. Yamafuji, T. Fujiyoshi and T. Kiss: Physica C 397 (2003) 132.
- [9] M. Haruta, T. Fujiyoshi, T. Sueyoshi, K. Miyahara, T. Doi, H. Kitaguchi: Physica C (2005) 426-431 (2005) 174.