

重イオン照射を用いた高温超伝導薄膜の高臨界電流密度化に対する 磁束ピンニングランドスケープの構築

Flux pinning landscape for enhancement of critical current density
in high- T_c superconducting thin films using heavy-ion irradiations

末吉 哲郎¹⁾, 上瀧 哲也¹⁾, 浦口 雄世¹⁾, 藤吉 孝則¹⁾,
嶋田 雄介²⁾, 安田 和弘²⁾, 石川 法人³⁾

Tetsuro SUEYOSHI, Tetsuya KOUTAKI, Yuusei URAGUCHI, Takanori FUJIYOSHI, Yuusuke SHIMADA, Kazuhiro YASUDA,
Norito ISHIKAWA

¹⁾熊本大学 ²⁾九州大学 ³⁾原子力機構

(概要)

高温超伝導体の臨界電流密度 J_c の磁場角度依存性における線状の格子欠陥の不連続性の影響を調べるために、タンデム加速器において 80 MeV, 270 MeV の Xe イオンをそれぞれ用いて高温超伝導試料に円柱状の格子欠陥の導入を行った。照射試料の断面像の TEM 観察により、80 MeV の照射では照射方向に沿って不連続な柱状欠陥が形成され、一方 270 MeV の照射では線状の格子欠陥が連続に導入されることを確認した。これらの試料の J_c の磁場角度依存性においては、低温において 80 MeV の試料が広範囲の磁場方向で J_c が高くなった。これは、不連続な柱状欠陥による磁束ピンニングでは、連続な柱状欠陥での磁束ピンニング効果に加えて、その端部での磁束ピンニングとの相乗効果が生じていることを示唆している。

キーワード：

高温超伝導線材, 臨界電流密度, 柱状欠陥, ナノ粒子, 複合効果

1. 目的

希土類系高温超伝導体 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ を用いた超伝導線材の応用が普及していくためには、広範囲の磁場方向で均一に高い臨界電流密度 J_c をもつ線材であることが不可欠要素の一つである。高温超伝導体において、ナノサイズの径をもつ線状の格子欠陥や不純物は 1 次元ピンと呼ばれ、長さ方向に平行な印加磁場 (通常 c 軸方向) において、臨界電流密度 J_c の飛躍的な向上を図ることができる¹⁾。一方、球状のナノサイズの不純物は 3 次元ピンに属し、1 次元ピンよりピン力は劣るが、磁束ピンニングに対して指向性を示さない形状により、全磁場方向で等方的な J_c の改善に寄与できる²⁾。この両者の利点を組み合わせ、複合し、広範囲の磁場方向にわたって更に高い J_c を実現するような磁束ピンニング構造、すなわち磁束ピンニングランドスケープの構築が最近積極的に試みられている³⁻⁶⁾。

本研究では、重イオン照射における照射エネルギーを調整することで、1 次元ピンに 3 次元ピンの特徴を付加したピン構造となるように短くカットした 1 次元ピン、すなわち不連続な線状の照射欠陥の導入を試み、 J_c の磁場角度依存性を与える影響について調べた。

2. 方法

照射試料には、市販の $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ テープ線材 (フジクラ製, 5cm 幅, 膜厚 2.2 μm , $I_c = 280\text{A}$) を用い、これをフォトリソグラフィにより長さ 1 mm, 幅約 40 μm のブリッジに加工した。重イオン照射は原子力機構東海研

のタンデム加速器に行い、270 MeV と 80 MeV の Xe イオンを用いた。照射方向は c 軸に対して平行とし、また照射量は 1.94×10^{11} ions/cm² とした。270 MeV の照射では膜厚方向にわたって格子欠陥が連続な線状として導入され、一方 80 MeV においては膜厚方向に沿って短い線状の格子欠陥が膜厚方向に沿って形成することが、それぞれの照射エネルギーにおける電子的阻止能の値より予測される⁷⁾。

重イオン照射により導入された照射欠陥の形態を確認するために、照射試料を FIB 加工し、TEM を用いて試料断面の微細構造の観察を行った。超伝導特性の評価においては、通電法により J_c の磁場角度依存性を測定した。このとき、 J_c は電界基準 10^{-4} V/m を用いて定義し、また磁場は電流と常に垂直に印加し、磁場と c 軸のなす角度 θ と定義した。

3. 結果及び考察

図 1 に、270 MeV、80 MeV でそれぞれ照射した試料の断面 TEM 像を示す。図中の矢印は、柱状欠陥の位置を指している。270 MeV で照射した試料では、径が 4 ~ 11 nm で長さ方向に連続した線状の照射欠陥を確認できる。これに対し、80 MeV の照射により試料中に導入された線状の照射欠陥は、明らかに長さ方向に沿って間隔 15 ~ 35 nm で分離し、不連続になっている。照射欠陥の不連続な照射欠陥の径は 4 ~ 11 nm、その長さは 15 ~ 35 nm である。これは、高温超伝導線材に 74 MeV の Ag イオンを照射した場合に観察された不連続な柱状欠陥の形状⁷⁾と同様であり、導入される照射欠陥の形態は、イオン種ではなく、電子的阻止能の値に関係することを意味している⁸⁾。

図 2 に、低温から高温領域 (70 K ~ 84 K) にわたる J_c の磁場角度依存性の振る舞いを示す。全ての温度において、 J_c の磁場角度依存性中に 2 つのピークを確認できる。 $\theta = 90^\circ$ での J_c のピークは、高温超伝導体の結晶構造に起因する積層欠陥や固有ピンニングにより生じることが知られている。一方、 $\theta = 0^\circ$ での J_c のピークはその方向に導入した重イオン照射欠陥に起因する。この $\theta = 0^\circ$ での J_c のピークは、84 K のような高温領域では 80 MeV と 270 MeV にほとんど差はないが、低温になると 270 MeV と比較して 80 MeV で照射した試料の J_c が広範囲の磁場方向にわたって高くなり、特に 70 K では、その差は顕著になる。これは、低温において不連続な照射欠陥の端部がピン止め点として有効になり、1 次元ピンにおいて固有に生じる磁束線のダブルキックによる熱活性運動を妨げる作用^{9,10)}に寄与した

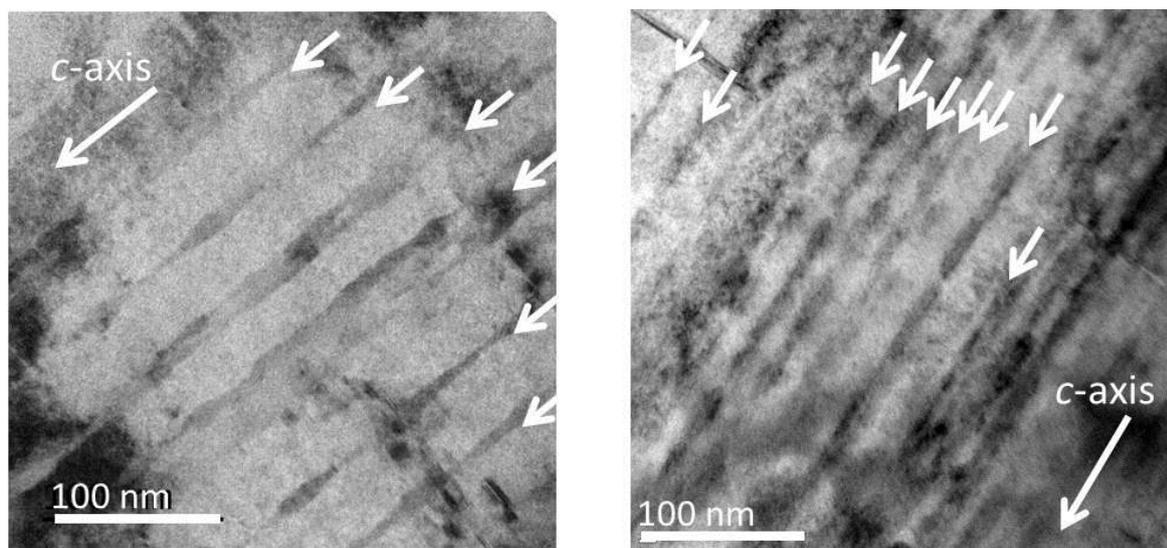


図 1. 照射した試料の断面の TEM 像 (左 : 270 MeV, 右 : 80 MeV) .

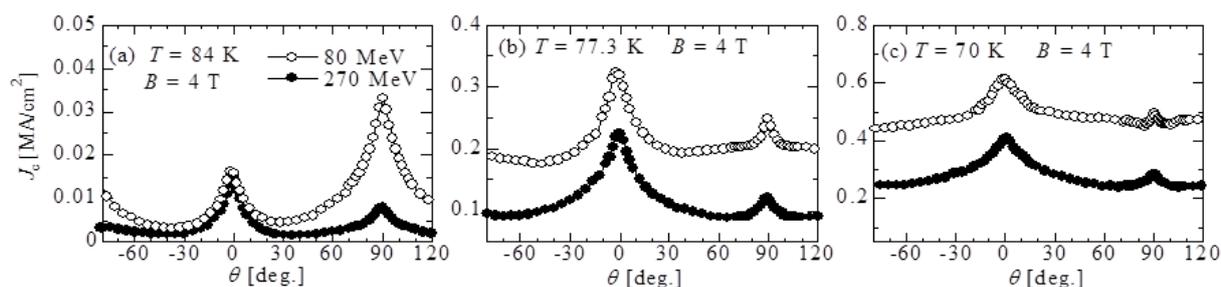


図2. 臨界電流密度 J_c の磁場角度依存性 ((a) 84 K, (b) 77.3 K, (c) 70 K).

ものと考えられる。また、この端部は、照射方向の $\theta=0^\circ$ 以外の磁場方向でも有効にピン止め作用していることから、不連続な1次元ピンには3次元ピンのようなピン止め作用が付加されたことが示唆される^{6, 11)}。以上の結果より、線状の格子欠陥を不連続化は、低温領域においては広範囲の磁場方向での高 J_c 化に寄与することが明らかとなった。

4. 引用(参照)文献等

- 1) L. Civale, A. D. Marwick, T. K. Worthington, M. A. Kirk, J. R. Thompson, L. Krusin-Elbaum, Y. Sun, J. R. Clem, F. Holtzberg, Phys. Rev. Lett. 67 (1991) 648-651.
- 2) A. A. Gapud, D. Kumar, S. K. Viswanathan, C. Cantoni, M. Varela, J. Abiade, S. J. Pennycook, D. K. Christen, Supercond. Sci. Technol. 18 (2005) 1502-1505.
- 3) J. Hua, U. Welp, J. Schlueter, A. Kayani, Z. L. Xiao, G. W. Crabtree, W. K. Kwok, Phys. Rev. B 82 (2010) 024505.
- 4) T. Sueyoshi, T. Koutaki, T. Fujiyoshi, F. Mitsugi, T. Ikegami, N. Ishikawa, Physica C 494 (2013) 153-157.
- 5) T. Horide, T. Kawamura, K. Matsumoto, A. Ichinose, M. Yoshizumi, T. Izumi, Y. Shiohara, Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 75019.
- 6) K. Matsumoto, I. Tanaka, T. Horide, P. Mele, Y. Yoshida, S. Awaji, J. Appl. Phys. 116 (2014) 163903.
- 7) N. M. Strickland, E. F. Talantsev, N. J. Long, J. A. Xia, S. D. Searle, J. Kennedy, A. Markwitz, M. W. Rupich, X. Li, and S. Sathyamurthy, Physica C 469 (2009) 2060-2067.
- 8) Y. Zhu, Z. X. Cai, R. C. Budhani, M. Suenaga, and D. O. Welch, Phys. Rev. B 48 (1993) 6436-6450.
- 9) D. R. Nelson, V. M. Vinokur, Phys. Rev. B 48 (1993) 13060-13097.
- 10) G. Fuchs, K. Nenkov, G. Krabbes, R. Weinstein, A. Gandini, R. Sawh, B. Mayes, and D. Parks, Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) S197-S204.
- 11) G. Ercolano, M. Bianchetti, S. C. Wimbush, S. A. Harrington, H. Wang, J. H. Lee, and J. L. MacManus-Driscoll, Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 095012.