

金属基板上 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の磁場中超伝導特性

Superconducting properties in magnetic fields of $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ thin films deposited on metallic substrate

名古屋大・工, CREST 吉田 隆, 一野 祐亮, 舩木 修平, 尾崎 壽紀

東北大金研 淡路智, 渡辺和雄

Y. Yoshida^{A,C}, Y. Ichino^{A,C}, S. Funaki^{A,C}, T. Ozaki^{A,C}, S. Awaji^B, K. Watanabe^B

^ADept. of Energy Eng. and Sci., Nagoya University

^BInstitute for Materials Research, Tohoku University

^CCREST-JST

1. はじめに

超伝導転移温度が液体窒素の沸点(77.3 K)を超える $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Y123)超伝導体を用いた超伝導線材の開発が日米を中心に盛んに行われている。最近では、長さ 790 m で 1 cm 幅当たりの I_c が 190 A/cm@77.3 K を示す Y123 線材も開発されている[1]。

超伝導線材を用いた応用機器を 77.3 K で動作させる場合、Y123 よりも T_c の高い $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE123)超伝導体を用いることで温度マージンを大きく出来るため、熱的に安定なシステムの構築が可能になる。また、強磁場発生マグネットなどのコイルに応用する場合、場所によって線材に加わる磁場の印加方向が変わるため、磁場印加方向に対して臨界電流密度(J_c)は等方的であることが望ましい。そのため、超伝導体中に人工的にナノサイズの磁束量子のピンニング点(APC)を導入する研究が盛んに行われている(例えば[2, 3]など)。

我々はこれまで、高い成長温度で高品質な c 軸配向エピタキシャル膜を薄く作製し、その上に低い温度で RE123 薄膜を成長させる低温成膜(LTG)法 [4]を用いることで、単結晶基板上に作製した Sm123 薄膜の磁場中 J_c が飛躍的に向上することを明らかにしてきた[5]。

以上を踏まえて、本研究では $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Sm123)および $(\text{Nd, Eu, Gd})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (NEG)超伝導体に注目し、LTG 法を用いて金属基板上に成長させた NEG 薄膜の超伝導特性、および APC として RE123 中で自己組織化することが報告されている BaZrO_3 (BZO)を用い、RE123 薄膜の磁場中 J_c の向上に関する検討を行った。

2. 実験方法

RE123 薄膜はパルスレーザー蒸着(PLD)法を用いて $\text{MgO}(100)$ 単結晶基板および金属基板上に作製した。金属基板上には、IBAD 法を用いて二軸配向した YSZ が蒸着されており、さらにその上に PLD 法を用いて CeO_2 を中間層として成膜した基板を用いた。なお、本研究は RE123 を用いた線材開発の基礎検討であるため、1 cm 角の短尺金属基板を用いた。成膜時のレーザー条件は、エネルギー密度 1~3 J/cm²、繰り返し周波数 10 Hz とし、基板-ターゲット間距離は 5~6 cm とした。また、成膜時のチャンバー内の酸素圧力(p_{O_2})は 0.4~1.0 Torr とした。ターゲットには、Sm123 と NEG 焼結体を用いた。また、BZO は、超伝導体ターゲットに BZO を 2 vol.%混合する手法を用いた。

上述したとおり、LTG 法は二段階に分けて薄膜を作

製する手法である。以下にその作製方法について説明する。まず、PLD 法を用いて成長基板温度(T_s) 830~910 °C の比較的高い温度で高品質な c 軸配向エピタキシャル膜(シード層)を 100 nm 程度の厚さで蒸着し、 T_s を 40~100°C ほど下げてから 400 nm 厚の薄膜(アッパー層)を作製する。この手法の特徴として、シード層がアッパー層のエピタキシャル成長を助けるため、通常では c 軸配向しない成長温度領域でも良質な c 軸配向膜を得ることが可能となる。

以上の通りに作製した RE123 薄膜の評価方法として、結晶相及び配向性の評価は X 線回折法($2\theta/\omega$ 測定)及び ϕ スキャン法を用い、表面形態は原子間力顕微鏡 (AFM)によって観察した。超伝導特性は磁場中直流四端子法で測定した。この時、東北大金研の超伝導マグネットおよび PPMS (physical properties measurement system, カンタムデザイン社製)を使用して、RE123 薄膜の c 軸方向に対して 0~120°の角度で 0~17 T の磁場を印加した。

3. 実験結果

3-1. 金属基板上 RE123 薄膜の超伝導特性

LTG 法及び通常の PLD 法を用いて、IBAD 金属基板上に RE123 薄膜をエピタキシャル成長させた。ここでは省略するが、X 線回折パターンから、Sm123、NEG ともに RE123 (001)[100] // CeO_2 (001)[110]のエピタキシャルな方位関係を示し、金属基板上に二軸配向していることを確認した。また、 T_c はどの試料も 92~93 K であった。

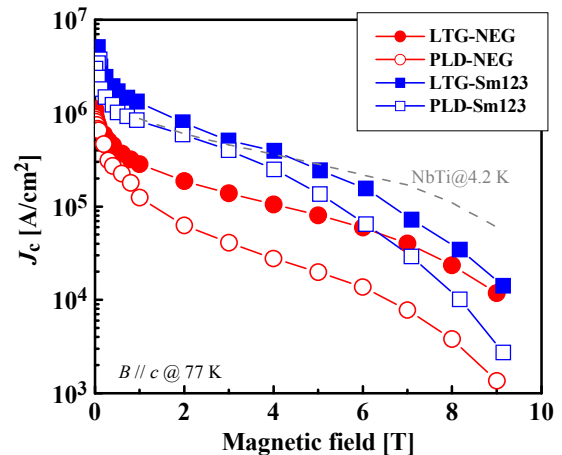


Fig. 1 J_c of RE123 films on IBAD substrate as a function of magnetic field. For comparison, J_c -B of NbTi at 4.2 K [6] is also plotted.

次に、これらの薄膜の磁場中 J_c を測定した。Fig. 1 に金属基板上 RE123 薄膜の J_c - B を示す。比較のために 4.2 K における NbTi の J_c - B もプロットした。この図から、Sm123 と NEG 両方ともに PLD 法よりも LTG 法の方が J_c - B が高く、この傾向は MgO(100)基板上でも同じであった。また、 J_c の大きさを MgO 基板上の J_c と比較すると、金属基板上の J_c は MgO 基板上と同じか若干低い程度であった。以上から、LTG 法が金属基板上でも有効であることが示された。

さらに、実用線材である NbTi の 4.2 K における J_c と比較すると、4 T までは LTG-Sm123 の J_c の方が高いことが分かる。平成 18 年度の研究成果(採択番号 1356)から、低い T_c のナノパーティクルを RE123 薄膜中に分散させることで、77 K においても 4.2 K の NbTi と同程度の J_c - B 曲線が得られていることから、金属基板上においても同様の手法で NbTi を上回る J_c - B が得られると考えられる。

3-2. BaZrO₃ 添加による磁場中超伝導特性の変化

RE123 中に侵入した磁束量子の運動を抑制するために、結晶欠陥や常伝導析出物などを RE123 中に微細分散する手法がとられる。近年、Y123 薄膜中に BZO を添加することで BZO がナノサイズのロッド状に自己組織化し、磁束量子のピン止め点となることが報告されている[2,7,8]。そこで、本研究でも RE123 薄膜中に BZO を添加し、その BZO が磁場中 J_c 、特に磁場印加角度に対する J_c に与える影響について検討を行った。なお、本実験では、RE123 薄膜を MgO(100)単結晶基板上に LTG 法を用いて成膜している。

Fig. 2 に磁場印加角度(θ)に対する 77 K、1 T における J_c を示す。なお、試料の J_c は $B \parallel ab$ ($\theta=90^\circ$)の J_c で規格化している。図から、 $\theta=40\sim 90^\circ$ の範囲で BZO を含まない LTG-Sm123 薄膜のみが異なる振る舞いをしており、 $B \parallel c$ ($\theta=0^\circ$)で比較すると、Sm123 と NEG 両方とも BZO を含む薄膜の方が J_c が高いことが分かる。また、この傾向は 1 T よりも大きな印加磁場下においても同様で

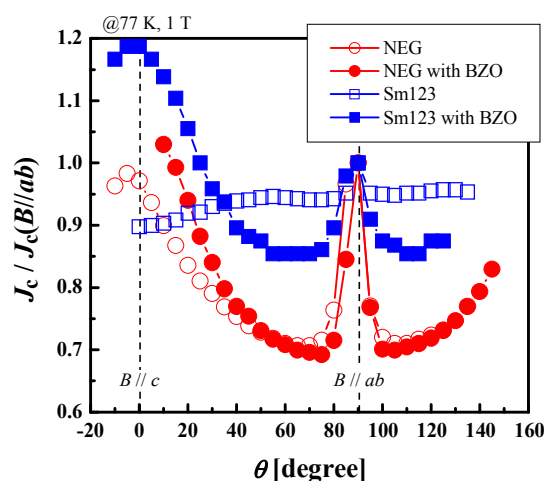


Fig. 2 J_c of LTG-RE123 films with/without BZO as a function of applied magnetic field angle θ at 77 K and 1 T. J_c are normalized by J_c at $B \parallel ab$.

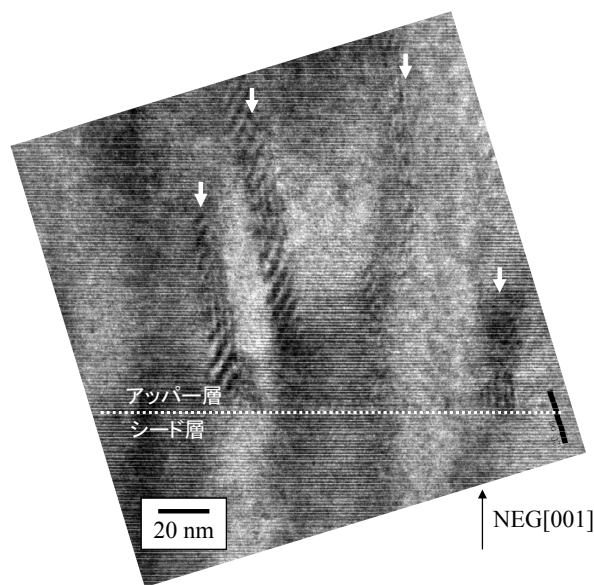


Fig. 3 Cross-sectional TEM image of LTG-NEG thin film including 2 vol.% BZO. BZO nanorods are represented by white arrows.

あった。

ここで、 J_c - θ 曲線の形に注目すると、BZO を含む薄膜は特に $B \parallel c$ に大きな J_c ピークを持っていることが見て取れる。これは、BZO によって c 軸相関ピンが導入されたことを示している。Fig. 3 に BZO を含む LTG-NEG 薄膜の断面 TEM 像を示す。 J_c - θ 曲線から予想される通り、直径 10 nm 程の BZO ナノロッドが見られた。従って、Y123 薄膜と同様に、RE123 薄膜中でも BZO は自己組織化し、 c 軸相関ピンとなることが明らかになった。

4. まとめ

RE123 薄膜の超伝導線材応用を目指し、金属基板上への薄膜成長、および BZO ピン止め点の導入に関して検討を行った。その結果、LTG 法は金属基板上に置いても高い超伝導特性を持つ RE123 薄膜の作製が可能であることが分かった。また、BZO は RE123 薄膜中でも自己組織化し、 c 軸相関ピンとなることが明らかになった。

参考文献

- [1] Superconductivity communications, Vol.17, No.1, February. 2008
- [2] J. L. Macmanus-Driscoll et al.: Nature Materials 3 (2004) 439
- [3] K. Matsumoto et al.: Physica C 426-431 (2005) 1091
- [4] M. Itoh et al. : Physica C 412-414 (2004) 833
- [5] Y. Yoshida et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) L129
- [6] C. Meingast et al.: J. Appl. Phys. 66 (1989) 5971
- [7] Y. Yamada et al.: Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 132502
- [8] S. Kang et al. : Science 311 (2006) 1911