

一次元欠陥を導入した希土類系高温超伝導薄膜における 臨界電流特性の成膜温度依存性

春田正和*, 堀井 滋

(受領日: 2011 年 5 月 15 日)

高知工科大学環境理工学群

〒 782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

E-mail: *haruta.masakazu@kochi-tech.ac.jp

要約: 希土類系高温超伝導薄膜における実用レベルの磁場中臨界電流密度の実現を目的として、第二相であるナノロッドを超伝導母相中に導入し、成膜温度が臨界電流特性（不可逆曲線、電流－電圧特性）に与える影響を明らかにした。ナノロッドが一次元欠陥として作用すれば、磁場中臨界電流密度の向上が期待される。不可逆曲線からは欠陥導入による磁束状態の変化を評価でき、また電流－電圧特性から超伝導組織の均一性・高性能性を表す臨界電流密度の空間分布を評価できる。Ba-Nb-O 系ナノロッドを導入した $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜において、一次元欠陥導入時に特徴的な Bose グラス的磁束状態に起因した不可逆曲線が現れ、成膜温度によって不可逆曲線の振る舞い及び、臨界電流密度の空間分布が変化することを見出した。これらの結果は、成膜温度によってナノロッドの密度および形態が変化することにより、磁場中超伝導特性が大きく変化したことを示唆する。本研究から、磁場中送電能力の高い希土類系高温超伝導線材の製造プロセスの制御因子としての成膜温度の重要性が明らかとなった。

1. 緒言

希土類系高温超伝導体 ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, REBCO) は 90 K 級の超伝導転移温度を有し、次世代の電力輸送ケーブルや超伝導リニア、MRI、科学研究用の強磁場発生マグネットなどへの応用が期待され開発が進んでいる [1]。実用的 REBCO は薄膜型線材として製造されるが、安価な冷媒である液体窒素冷却 (77 K) による動作が前提とされ、さらに、磁場中での高い臨界電流密度 (J_c) が求められる。

超伝導体の J_c は物質固有の値ではなく、材料学的操作により制御できる。特に、磁場中での J_c を向上させる重要な鍵は、超伝導体内に侵入した磁束の動きを阻止する結晶欠陥を導入することであり、この欠陥を磁束ピンニング点と呼んでいる。REBCO は層状の結晶構造を有しており、それに起因して J_c が磁場の印加方向に対して大きく異なる。磁場を REBCO の c 軸に垂直に印加した場合は結晶構造に起因した強力な磁束ピンニング効果が働き、磁場下においても大きな J_c を維持する。一方、磁場を REBCO の c 軸に平行に

印加した場合 ($B//c$) は、 c 軸方向に沿った転位などの結晶欠陥がピンニング点として働くものの、その密度は低く、磁場の印加に伴って J_c は著しく低下する。この $B//c$ での J_c を改善するためには、ナノロッドと呼ばれる一次元欠陥を超伝導母相の c 軸方向に平行に導入することが有効であるとされている [2-11]。パルスレーザ堆積 (PLD) 法で作製される REBCO 薄膜の場合、ナノロッドの導入を目的として非超伝導のバリウム系酸化物である BaZrO_3 (BZO) [2-5]、 BaSnO_3 (BSO) [6, 7]、 BaNb_2O_6 (BNO) [8-10] などを添加した REBCO 焼結体をターゲットとして利用する。結果的に、成膜後の薄膜試料には、第二相物質が自己組織化によって REBCO の c 軸方向へ柱状に成長し、超伝導母相内にナノサイズの一次元欠陥を形成する。つまり、超伝導薄膜中に人工的に磁束ピンニング点としてのナノロッドを導入することができ、この組織制御により、 $B//c$ での J_c が大きく向上する。しかしながら、高磁場かつ液体窒素温度における J_c は実用レベルに達していないのが現状である。

近年、我々は、1.5 wt% の BNO を添加した

ErBCO 薄膜において、ナノロッドの形態が成膜温度 (T_s) により変化し、これに伴い臨界電流特性が変化することを報告した [8-10]。一方で、ナノロッドの「形態」に加えてナノロッドの「密度」も磁束ピンニング特性や磁場中臨界電流特性を決定づける重要な因子であるが、これらの関係はよく分かっていない。実用レベルの高い磁場中 J_c を実現するためには、第二相ナノロッドの最適な濃度と形態を実現するターゲット組成と成膜条件を決定する必要がある。

本研究では、ターゲットに含むナノロッド物質の密度に着目した。異なるナノロッド密度をもつ ErBCO 薄膜において T_s の変化によるナノロッドの形態制御効果を調べるため、3.5 wt% の BNO を添加した ErBCO 薄膜を PLD 法により様々な T_s で作製した。ナノロッドを導入した REBCO 薄膜の臨界電流特性と T_s の関係を解明するため、 T_s に依存した不可逆曲線を明らかにするとともに、不可逆温度近傍における磁場下での詳細な電流-電圧特性からパーコレーション遷移モデルを用いて J_c の空間分布を導出した。

2. 実験

PLD 法を用いてナノロッドを導入した ErBCO 薄膜を SrTiO₃ (100) 単結晶基板上に作製した [10]。使用するターゲットは、ErBCO 粉末に 3.5 wt% の BNO 粉末を混合し、ペレット状にプレス成形後、電気炉にて 960°C で焼結させて作製した。ターゲットの x 線回折測定により、ErBCO 相からの回折ピークに加えてペロブスカイト系 Ba-Nb-O 相からの回折ピークが観測された。このターゲットを用いて成膜を行うことにより、堆積する ErBCO 母相中に自己組織化により BNO ナノロッドを形成させる。レーザー光源には ArF エキシマレーザを用いた。レーザーエネルギーを 400 mJ/pulse に設定し、レーザー周波数 1 Hz で 60 分間成膜を行った。成膜中の雰囲気は 200 cc/min の流量で酸素を流し、圧力が 0.4 Torr となるように制御した。基板はランプヒータにより加熱し、710 ~ 750°C の各温度で成膜を行った ($T_s = 710, 730, 750$ °C で作製した試料をそれぞれ Er710, Er730, Er750 とする)。以前の報告 [9] より、この温度領域で作製した薄膜に形成されるナノロッドの直径はコヒーレンス長と同程度の 10 nm 前後であることが予測される。 $T_s = 750$ °C で成膜した試料断面の予備観察より膜厚は約 300 nm であり、成膜レートは約 5 nm/min と見積もられた。成膜後の

薄膜は ex-situ でのアニール処理を 425°C で 15 分間、酸素気流中にて行った。

作製した薄膜は x 線回折測定により c 軸配向していることを確認した。通電特性測定のため、試料を幅 100 μ m、長さ 2 mm のブリッジ状にパターニングした。その後、電流・電圧端子部分に接触抵抗低減のため Au を蒸着し、四端子法により測定を行った。測定の際、通電電流は印加磁場と常に垂直になるようにした。電気抵抗の温度依存性を 0 ~ 10 T の磁場下で測定し、これより不可逆曲線を導出した。電流-電圧 (E - J) 特性を磁場 0.5 ~ 9 T の範囲で測定し、パーコレーション遷移モデル [12, 13] を用いてピンニングパラメータを導出した。

3. 結果および考察

図 1 に $T_s = 710$ °C、730°C、および 750°C で作製した BNO ナノロッドを導入した ErBCO 薄膜 (以下、Er710、Er730、および Er750 とする。) の不可逆曲線を示す。ここで不可逆曲線は、磁束がピンニングされて動けない磁束ガラス状態 ($J_c > 0$) と、磁束が自由に動ける磁束液体状態 ($J_c = 0$) の境界を示している。不可逆曲線は低磁場領域では下に凸の曲線を示したが、ある磁場を境としてほぼ直線的な温度依存性へ変化することが分かる。同様な不可逆曲線の振る舞いが、重イオン照射により一次元欠陥を導入した YBCO 単結晶において報告されている [14]。これによると、温度-磁場相図において低温低磁場領域では磁束は 1 次元欠陥

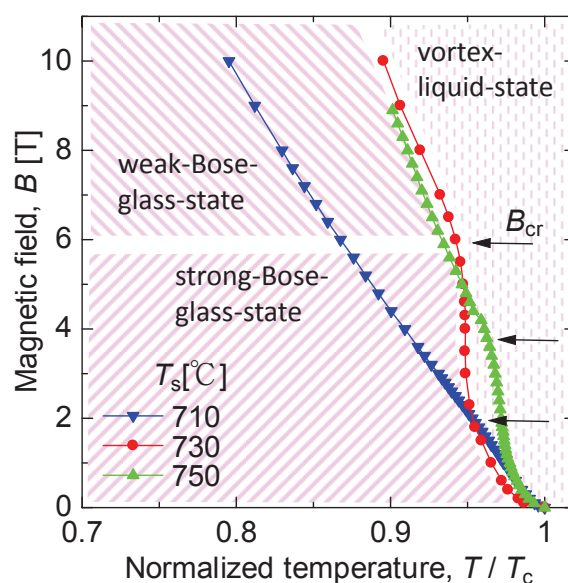


図 1. 3.5 wt%-BNO 添加 ErBCO 薄膜の不可逆曲線、Er730 における各磁束状態をそれぞれ網掛けで示す。

にピンニングされた Bose グラス状態となっているが、温度・磁場の増加により不可逆曲線を境として磁束液体状態へとクロスオーバーする。また、この不可逆曲線の傾きが劇的に変化する磁場をクロスオーバー磁場 (B_{cr}) と定義すると、 B_{cr} 以下の磁場では磁束がすべて一次元欠陥にピンニングされた強い Bose グラス状態となっており、 B_{cr} より高い磁場では磁束間の相互作用により弱くピンニングされた磁束を含む弱い Bose グラス状態となっている。この不可逆曲線の類似性から、BNO ナノロッドを導入した ErBCO 薄膜においても Bose グラス的な磁束状態が実現していると容易に推測できる (図 1 参照、温度-磁場相図における Er730 での磁束状態を示す)。したがって、ErBCO 薄膜中でナノロッドは ErBCO の c 軸方向に沿って成長することで、重イオン照射による一次元欠陥と同様に非常に強い磁束ピンニング点の役割を果たしていると考えられる。

図 2 に B_{cr} の成膜温度依存性を示す。以前、我々のグループは、1.5 wt%-BNO 添加によりナノロッドを導入した ErBCO 薄膜において、 B_{cr} は T_s の低下とともに増加することを報告した [10]。今回用いた 3.5 wt%-BNO 添加 ErBCO 薄膜においても、Er750 より Er730 の B_{cr} が高く、同様の振る舞いが見られた。これより、 T_s の低い Er730 のほうが Er750 に比べて導入されたナノロッドの密度が高いと考えられる。一方、Er710 では B_{cr} が低くなり、1.5 wt%-BNO 添加 ErBCO 試料で見られた T_s の低下に伴う B_{cr} の単調増加とは異なる振る舞いである。この原因としては、後述するようにナノロッドの密度に加えてナノロッドの形状が B_{cr} の決定に大きく影響していると考えている。このように B_{cr} は T_s に大きく依存しており、同じ組成のターゲットを用いても、ナノロッドの密度および形状を成膜温度によって制御できること、ターゲット

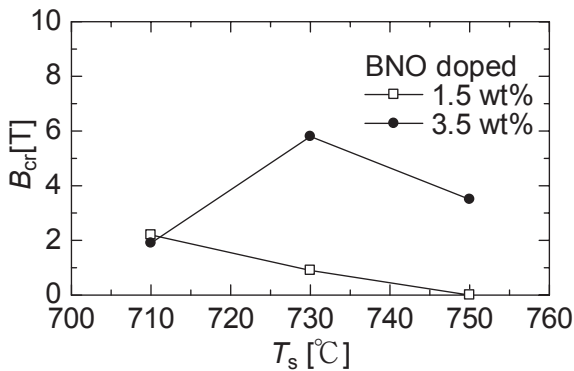


図 2. BNO を 1.5 wt% および 3.5 wt% 添加した ErBCO 薄膜の B_{cr} の成膜温度依存性

組成によって適切な成膜温度が変化する可能性があることが分かった。

成膜温度が臨界電流特性に与える影響について詳細に調べるため、 T_s が異なる試料 ($T_s = 710^\circ\text{C}$, 730°C) の E - J 特性を様々な温度・磁場下において測定した。図 3 に一例として Er730 試料の 1 T における E - J 特性を示す。 E - J 曲線は温度を上昇させるに従い、ある温度を境として上に凸から下に凸の曲線へと変化している。この境となる温度は磁束グラス-磁束液体転移温度 T_g と呼ばれている。このような高温超伝導体に特徴的な E - J 特性は、空間的な J_c の分布である局所的臨界電流密度 (J_{cl}) の分布を統計的に考慮したパーコレーション遷移モデルによって表せることが報告されている [5, 12, 13]。なお、 J_{cl} の分布は要素的ピンニング力の分布を反映している。パーコレーション遷移モデルに基づく E - J 特性の理論式は次のように与えられる。

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

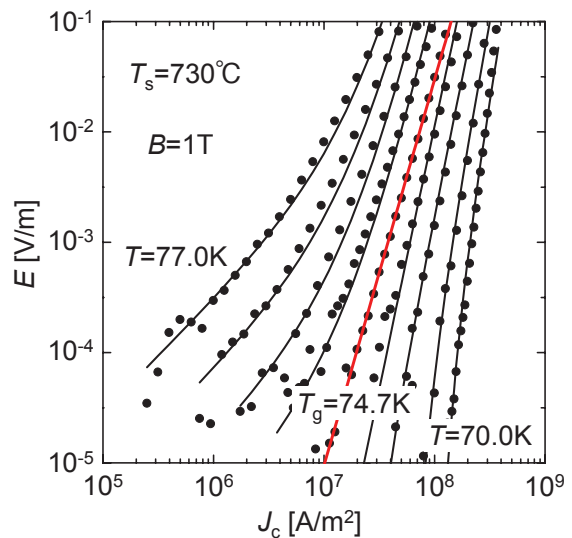


図 3. $T_s = 730^\circ\text{C}$ で作製した 3.5 wt%-BNO 添加 ErBCO 薄膜の電流-電圧特性、丸印は測定値、実線はパーコレーション遷移モデルによるフィット曲線を示す。

このモデルによると、混合状態における超伝導体の E - J 特性は、3つのピンニングパラメータ m 、 J_{cm} 、 ΔJ_c を用いて記述できる。ピンニングパラメータ m は J_{cl} 分布の形を特徴付け、 m が大きいと分布の立ち上がりが鋭い。 J_{cm} および ΔJ_c はそれぞれ、 J_{cl} 分布の最小値および分布の幅を表す。また、 $m+1$ の値は $T = T_g$ での log-log プロットした E - J 曲線の傾きを表している。実験的に求めた E - J 特性をパーコレーション遷移モデルに基づく理論式でフィッティングさせることにより、ピンニングパラメータを導出することが出来る。実際、図3に示すように、実験値と理論曲線はよい一致を示したことから、ナノロッドを含む ErBCO 薄膜についてもパーコレーション遷移モデルを用いたピンニング特性の解析が可能である。

Er710 と Er730 におけるピンニングパラメータ m と ΔJ_c の磁場依存性を図4(a)および(b)に示す。また、比較として人工的なピンニング点の導入を行っていない pure-YBCO 薄膜の結果を同図に示す。まず、pure-YBCO 薄膜において、 m は磁場の増加に伴い単調に減少し、 ΔJ_c は磁場の増加に伴い単調に増加していた。これは人工的なピンニング点を含まない、ランダムなピンニング点のみを含む REBCO 薄膜で見られる一般的な振る舞いである。これに対して、ナノロッドを含んだ Er710

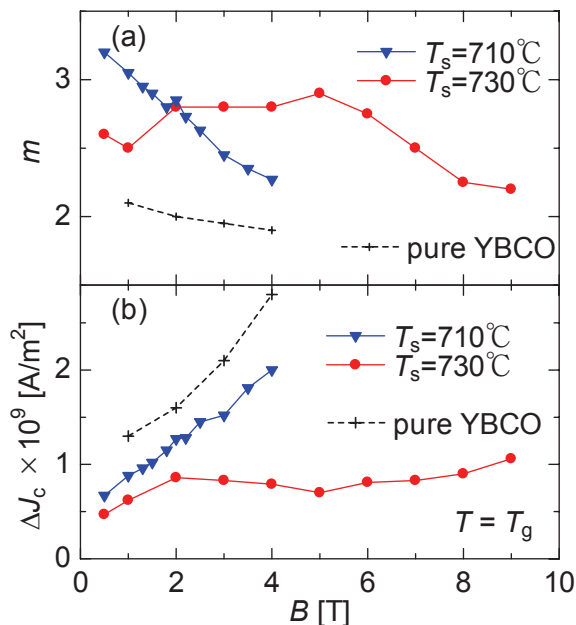


図4. 二種類の異なる成膜温度で作製した 3.5 wt%-BNO 添加 ErBCO 薄膜の (a) ピンニングパラメータ m および、(b) ΔJ_c の磁場依存性。なお、比較として人工的なピンニング点を含まない YBCO 薄膜の結果を示す。

および Er730 では、それぞれ注目すべき振る舞いが見られた。Er710 ではナノロッドを導入したにもかかわらず、ナノロッドを含まない pure-YBCO と似た磁場依存性を示した。また、Er710 では ΔJ_c も pure-YBCO と同様の磁場依存性を示し、ナノロッドによる明確なピンニングの影響は見られなかった。一方 Er730 では、ブロードな m のピークが 5 T 付近に観測され、ナノロッドによる磁束ピンニングを示唆している [5]。Er730 における m の値は 2 T から 6 T の範囲でほぼ一定であるが、6 T 以上では磁場の増加に伴い減少しており、6 T 以上ではピンニング効果が低下することを示している。ここで、 m が減少し始める磁場は B_{cr} と一致している。また、Er730 の ΔJ_c は 2 T から 7 T の範囲で磁場に対してほぼ一定である。これらのことより B_{cr} 以下の磁場においては、一本の磁束線がそれぞれナノロッドにピンニングされた single-vortex-pinning-regime [14, 15] が実現していると考えられる。このように B_{cr} 以下の磁場においてはすべての磁束線が均一なピンニング力を持ったナノロッドにピンニングされているために、 J_{cl} 分布の立ち上がりが鋭く、且つ分布幅が狭くなったと考えられる。なお、single-vortex-pinning-regime が実現する場合、ナノロッド密度 (n_{nr}) は B_{cr} を磁束量子 (Φ_0) で割ることにより推測できる ($n_{nr} \sim B_{cr} / \Phi_0$)。

ここで、Er710 と Er730 で磁束ピンニング特性が大きく異なった理由について考える。参考文献 [10, 11] で報告された 1.5 wt%-BNO 添加 ErBCO 薄膜の透過型電子顕微鏡 (TEM) による組織観察に着目すると、750°C 程度の高い T_s ではナノロッドが ErBCO 母相内で c 軸方向にまっすぐ伸びているが、710°C の低い T_s においてはナノロッドが曲がって成長していた。ナノロッドの成長様式は、成膜時の表面状態に強く依存している。ナノロッドの傾きは薄膜の成長様式を反映した表面ステップの影響を受けることが報告されている。このため、らせん状成長が支配的な結晶成長様式となる低温成膜においては、ステップの影響を受けてナノロッドが曲がりやすいと考えられる [16]。さらに、TEM 観察より見積もったナノロッドの直径は 10 nm 以下と小さい [9]。このため、コヒーレンス長よりも小さな直径のナノロッドが曲がっていた場合には磁束を有効にピンニングできないため、ピンニング効率が著しく低下してしまう。以上のことより、Er710 においてはナノロッドの曲がりに起因して、 m や ΔJ_c の磁場依存性にナノロッド

ドの影響が表れなかったと考えられる。ナノロッドの傾きは J_c の磁場角度依存性からも確認している。 c 軸相関ピンが存在する場合、 $B//c$ において J_c のピークが観測される。しかしながら Er710 では、 $B//c$ において J_c のピークは見られず、印加磁場が c 軸方向から 20° 程度傾いたところでブロードなピークが観測された。

最後に E - J 特性から導出したピンニングパラメータを用いて算出した Er710 および Er730 における J_{cl} の分布 (J_c の空間分布) を図 5 に示す。 Er730 では 7 T の高い磁場までシャープな分布を保っており、均一なピンニング力を有するナノロッドにより磁束が効率よくピンニングされていることを示している。一方で、 Er710 では磁場の増加に伴い分布がブロードになっており、ナノロッドによるピンニングが有効に働いていない。 T_s によりナノロッドの形態 (直径、形状) が変化することにより磁束のピンニング特性が影響を受け、 J_{cl} 分布の振る舞いに変化することが明らかになった。この結果は REBCO 薄膜の作製において、ナノロッドの導入により高い磁場中 J_c を達成するためには、ナノロッドの密度、直径および形状を考慮した最適な成膜温度の選択が必要であることを示している。

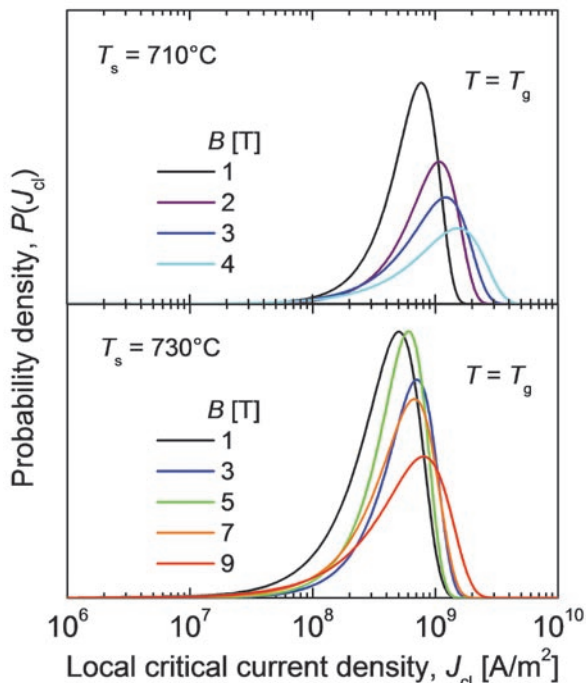


図 5. 二種類の異なる成膜温度で作製した 3.5 wt%-BNO 添加 ErBCO 薄膜の局所的臨界電流密度の分布

4. 結言

BNO ナノロッドを導入した ErBCO 薄膜において、臨界電流特性に対する成膜温度の影響を明らかにした。薄膜中に導入された BNO ナノロッドによる磁束のピンニングに起因して、不可逆曲線に磁束の Bose グラス状態による特徴的な振る舞いが現れた。また、 B_{cr} が T_s に依存しており、ナノロッドの密度や形態が T_s によって制御できることが示唆された。 E - J 特性のパーコレーション遷移モデルを用いた解析により、 J_{cl} の分布とその分布を特徴付けるピンニングパラメータを導出した。ピンニングパラメータ m の磁場依存性において、均一なピンニング力を有するナノロッドによる磁束のピンニングを反映した m のピークが見られた。この J_{cl} の分布は T_s に強く依存しており、臨界電流特性が T_s を反映して変化することが分かった。

これまで、ナノロッド材料の添加量によって J_c が変化することは報告されていたが、成膜温度による J_c の変化はほとんどわかっていなかった。本研究により、同一組成のターゲットを用いても成膜温度によってナノロッドの密度および形態が変化し、 J_c が変化することが明らかになった。成膜温度による J_c の振る舞いは、超伝導母相の希土類元素や導入するナノロッドの種類によって異なる可能性があり、REBCO 線材の製造において十分に考慮する必要がある。REBCO 線材の製造プロセスにおいて実用レベルの磁場中 J_c を実現するためには、適切なターゲット組成の選択や成膜温度の制御が非常に重要である。

謝辞

本研究に用いた試料を作製頂いた九州工業大学のメレ・パオロ博士および松本要教授、測定にご協力頂いた熊本大学の末吉哲郎助教および藤吉孝則教授に深く感謝いたします。

本研究の一部は科学技術振興機構・研究成果最適展開支援事業 (A-STEP) の助成を受けて実施したものである。

文献

- (1) S. R. Foltyn, L. Civale, J. L. Macmanus-Driscoll, Q. X. Jia, B. Maiorov, H. Wang, M. Maley, "Materials science challenges for high-temperature superconducting wire", Nat. Mater.,

- vol.6, pp.631-642, 2007.
- (2) J. L. Macmanus-Driscoll, S. R. Foltyn, Q. X. Jia, H. Wang, A. Serquis, L. Civale, B. Maiorov, M. E. Hawley, M. P. Maley, D. E. Peterson, "Strongly enhanced current densities in superconducting coated conductors of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + \text{BaZrO}_3$ ", *Nat. Mater.*, vol.3, pp.439-443, 2004.
 - (3) A. Goyal, S. Kang, K. J. Leonard, P. M. Martin, A. A. Gapud, M. Varela, M. Paranthaman, A. O. Ijaduola, E. D. Specht, J. R. Thompson, D. K. Christen, S. J. Pennycook, F. A. List, "Irradiation-free columnar defects comprised of self-assembled nanodots and nanorods resulting in strongly enhanced flux-pinning in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films", *Supercond. Sci. Technol.*, vol.18, pp.1533-1538, 2005.
 - (4) M. Mukaida, T. Horide, R. Kita, S. Horii, A. Ichinose, Y. Yoshida, O. Miura, K. Matsumoto, K. Yamada, N. Mori, "Critical current density enhancement around a matching field in $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films with BaZrO_3 nano-rods", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.30, L952-L954, 2005.
 - (5) M. Haruta, T. Fujiyoshi, T. Sueyoshi, K. Dezaki, D. Ichigosaki, K. Miyahara, R. Miyagawa, M. Mukaida, K. Matsumoto, Y. Yoshida, A. Ichinose, S. Horii, "Flux pinning properties of $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ thin films with BaZrO_3 nanorods", *Supercond. Sci. Technol.*, vol.19, pp.803-807, 2006.
 - (6) P. Mele, K. Matsumoto, T. Horide, A. Ichinose, M. Mukaida, Y. Yoshida, S. Horii, R. Kita, "Ultra-high flux pinning properties of BaMO_3 -doped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films ($M = \text{Zr, Sn}$)", *Supercond. Sci. Technol.*, vol.21, p.032002, 2008.
 - (7) C. V. Varanasi, J. Burke, L. Brunke, H. Wang, J. H. Lee, P. N. Barnes, "Critical current density and microstructure variations in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + \text{BaSnO}_3$ films with different concentrations of BaSnO_3 ", *J. Mater. Res.*, vol.23, pp.3363-3369, 2008.
 - (8) S. Horii, K. Yamada, H. Kai, A. Ichinose, M. Mukaida, T. Teranishi, R. Kita, K. Matsumoto, Y. Yoshida, J. Shimoyama, K. Kishio, "Introduction of c-axis-correlated 1D pinning centers and vortex Bose glass in Ba-Nb-O-doped $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ films", *Supercond. Sci. Technol.*, vol.20, pp.1115-1119, 2007.
 - (9) S. Horii, H. Kai, M. Mukaida, K. Yamada, T. Teranishi, A. Ichinose, K. Matsumoto, Y. Yoshida, R. Kita, J. Shimoyama, K. Kishio, "Vortex Bose glass in $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ films with size-controlled nanorods", *Appl. Phys. Lett.*, vol.93, p.152506, 2008.
 - (10) H. Kai, S. Horii, A. Ichinose, R. Kita, K. Matsumoto, Y. Yoshida, T. Fujiyoshi, R. Teranishi, N. Mori, M. Mukaida, "The effects of growth temperature on c-axis-correlated pinning centers in PLD- $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films with $\text{Ba}(\text{Er}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$ ", *Supercond. Sci. Technol.*, vol.23, p.025017, 2010.
 - (11) K. Matsumoto, P. Mele, "Artificial pinning center technology to enhance vortex pinning in YBCO coated conductors", *Supercond. Sci. Technol.*, Vol.23, p.014001, 2010.
 - (12) K. Yamafuji, T. Kiss, "A new interpretation of the glass-liquid transition of pinned fluxoids in high- T_c superconductors", *Physica C*, vol.258, pp.197-212, 1996.
 - (13) T. Kiss, T. Matsushita, F. Irie, "Relationship among flux depinning, irreversibility and phase transition in a disordered HTS material", *Supercond. Sci. Technol.*, vol.12, pp.1079-1082, 1999.
 - (14) L. Krusin-Elbaum, L. Civale, G. Blatter, A. D. Marwick, F. Holtzberg, C. Feild, "Bose-glass melting in YBaCuO crystals with correlated disorder", *Phys. Rev. Lett.*, vol.72, pp.1914-1917, 1994.
 - (15) G. Blatter, M. V. Feigl' man, V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, V. M. Vinokur, "Vortices in high-temperature superconductors", *Rev. Mod. Phys.*, Vol.66, pp.1125-1388, 1994.
 - (16) A. Ichinose, H. Kai, M. Mukaida, S. Horii, R. Kita, K. Matsumoto, Y. Yoshida, "Growth mechanism of nanorods in $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ films (RE: rare-earth element)", *J. Cryst. Growth*, vol.312, pp.2914-2918, 2010.

Deposition Temperature Dependences of Critical Current Properties for Rare-Earth Based High- T_c Superconductors with 1D-Defects

Masakazu Haruta*, Shigeru Horii

(Received : May 15th, 2011)

*School of Environmental Science and Engineering, Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami city, Kochi 782-8502, JAPAN

E-mail:* haruta.masakazu@kochi-tech.ac.jp

Abstract: In order to achieve adequate critical current densities (J_{cs}) for practical applications in magnetic fields, nano-rods of second phase as one-dimensional-defects were introduced into rare-earth based high- T_c superconducting ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, REBCO) thin films. The effects of deposition temperature (T_s) on critical current properties, such as irreversibility lines (ILs) and spatial distributions of J_{cs} , were clarified. We found that the vortex-Bose-glass-like ILs emerged by the introduction of Ba-Nb-O based nano-rods into ErBCO thin films and their ILs were strongly affected by T_s . The spatial distributions of J_{cs} derived from current-voltage characteristics were also affected by T_s , which means that superconducting properties are changed by T_s . These results indicate that the density and morphology of nano-rods were varied by T_s . We found that T_s is very important factor for the production process of REBCO coated conductors containing nano-rods to achieve the high current transport capability in magnetic fields.