

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月7日現在

機関番号：26402

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760020

研究課題名（和文）ナノ欠陥を導入した希土類系高温超伝導薄膜のキャリア密度制御による高性能化

研究課題名（英文）Improvement of critical current properties for nano-defects-doped high- T_c superconducting films by controlling carrier density

研究代表者

春田 正和 (HARUTA MASAKAZU)

高知工科大学・環境理工学群・助教

研究者番号：90580605

研究成果の概要（和文）：液体窒素温度かつ磁場下において、実用レベルの臨界電流密度を有する希土類系高温超伝導(RE123)薄膜の作製を目指して、RE123 薄膜中にナノサイズの柱状欠陥(ナノロッド)を導入した。ナノロッド導入 RE123 薄膜の臨界電流特性は成膜温度(T_s)に強く依存しており、 T_s に依存したナノロッド形態と臨界電流特性の関係を明らかにした。また、臨界電流特性の T_s 依存性が超伝導母相組成によって異なることも明らかにした。さらに、超伝導母相に二種類の希土類元素を混合することにより、 T_s に依存しない臨界電流特性を有する RE123 薄膜の作製に成功した。

研究成果の概要（英文）：To fabricate rare-earth (RE) based high- T_c superconducting (RE123) films with high critical current density (J_c) under magnetic fields at 77 K, nanorods as columnar defects were introduced into the RE123 films. Critical current properties depended on T_s , and the relationship between J_c properties and morphology of nanorods were clarified. The T_s dependences of J_c properties were different according to the composition of the superconducting matrix. Moreover, T_s -independent J_c properties were achieved by the mixture of two different types of RE as the RE123 matrix using nanorod-doped RE123 films.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物性・結晶工学

キーワード：酸化物高温超伝導体、希土類系高温超伝導体、超伝導薄膜、臨界電流密度、臨界電流特性、パルスレーザ堆積、結晶欠陥、ナノロッド

1. 研究開始当初の背景

希土類系高温超伝導体 ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, RE123)は 90K 級の超伝導転移温度（臨界温度）を有しており、次世代の電力輸送ケーブルや磁場応用向け超伝導ケーブルの開発が進められている。高温超伝導ケーブルは薄膜型の線材として提供され、液体窒素温度(77K)での動作となる。高温超伝導線材の応用には十分な電流輸送能力（臨界電流密度、 J_c ）が達成されておらず、その向上が求められている。 J_c の向上には、以下の2つが設計指針と

なる。

- (1) 超伝導体内に侵入した磁束線を捕捉する欠陥（非超伝導相）の導入
- (2) 母相である超伝導体自身の特性（臨界温度、臨界磁場）の向上

RE123 薄膜においては、ナノロサイズの柱状欠陥(ナノロッド)の導入により J_c の向上に成功している。RE123 薄膜へのナノロッドの導入は磁場下での J_c 向上に有効であるが、 J_c は応用に十分な値に達していない。また一方

では、ナノロッドの導入により臨界温度が低下している。臨界温度の低下は磁束線の捕捉能力（ピン止め力）の低下に繋がり、 J_c が低下してしまう。つまり、臨界温度の低下を防ぐことにより、更なる J_c の向上が可能である。

2. 研究の目的

RE123線材の実用化のためナノサイズの欠陥を導入することにより電流輸送能力の向上が行われているが、臨界温度の低下を伴っている。臨界温度の低下により、十分な J_c の向上を果たすことが出来ないうえ、動作温度である液体窒素温度からの温度マージンが小さくなってしまふ。本研究課題では結晶化学的な立場から臨界温度の低下を改善し、液体窒素温度動作で且つ磁場下において革新的に高い電流輸送能力を有する RE123 線材の実現を目指す。

- (1) 超伝導母相の臨界温度を低下させないナノロッドの導入方法を確立し、RE123 薄膜の J_c 向上においてブレークスルーを引き起こす。
 - ① 超伝導結晶の格子歪みが少ないナノロッド材料を選定する。
 - ② 最適なキャリアドープ状態が得られるように超伝導母相の組成を制御する。
 - ③ 最適な酸素アニール条件を決定する。
- (2) ナノロッドを導入した RE123 薄膜において、数値目標として 10T を超える不可逆磁場を実現する。

不可逆磁場よりも低い磁場下では損失なく電気輸送が可能であり、実用的な臨界磁場を表している。この不可逆磁場の向上は J_c の向上を意味している。高温超伝導線材の応用である医療用 MRI や磁気浮上列車では 10T 以上の実用的臨界磁場を必要としており、臨界温度を低下させないナノロッドの導入によりこれを達成する。

3. 研究の方法

Nd:YAG レーザを用いたパルスレーザー堆積 (PLD)法により RE123 薄膜を作製する。PLD 法による RE123 薄膜の作製はエキシマレーザーを用いたものが主流であるが、装置の初期導入コストおよびランニングコストが高いといった欠点がある。一方、本研究で用いる YAG レーザは比較的初期導入コストも低く、ランニングコストも安いといった特徴がある。

PLD 法による成膜には、ナノロッド材料を添加したターゲットを用いる。成膜過程において、自己組織化により RE123 薄膜中にナノロッドを形成させる。この、ナノロッドを導入した RE123 において以下の点に着目する。

- (1) ナノロッド導入 RE123 薄膜作製条件の最適化

ナノロッド導入 RE123 の J_c 特性は成膜条件に依存していることが分かかってきており、本研究では特に成膜温度(T_s)に着目した。成膜温度を変化させて作製した薄膜の、 J_c 特性とナノロッド形態の関係を明らかにする。

- (2) ナノロッド導入 RE123 薄膜のアニール処理

ナノロッド導入 RE123 薄膜の臨界温度低下には、超伝導/ナノロッド界面における格子歪が影響していると考えられる。格子歪に起因して、酸素量が低下し、臨界温度の低下を招いている可能性がある。このため、酸素雰囲気中でアニール処理を行うことにより、臨界温度の改善を図る。

- (3) RE/Ca 置換によるキャリア密度制御

前述のように、ナノロッド界面では酸素量が低下している可能性がある。酸素量の低下は、超伝導キャリア密度の減少を意味している。この超伝導キャリア密度の減少に対して、RE サイトに Ca 置換を行うことによりキャリアを注入し、臨界温度の改善を図る。

- (4) 超伝導母相組成制御

これまであまり関心が寄せられていなかった、ナノロッドを導入した超伝導“母相”の組成に着目する。異なる超伝導母相組成において、 J_c 特性およびナノロッド形態を詳細に調査し、 J_c の最大化を図る。

- (5) ナノロッド材料の選択

格子定数の異なるナノロッド材料を選択し、母相中でどのような形態のナノロッドを形成するか調査する。また、ナノロッド形態と J_c 特性の関係を明らかにし、最適なナノロッド導入の指針を得る。

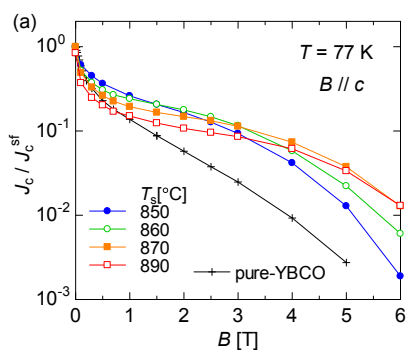
4. 研究成果

安価な Nd:YAG レーザを用いた PLD 法により Y123 薄膜を作製した。成膜条件の最適化により、エキシマレーザー PLD 法により作製した Y123 薄膜と同等の高品質な特性の薄膜が得られた(Haruta *et al.*, Physics Procedia, 2012)。BaNb₂O₆(BNO)を添加した Y123 ターゲットを用いて PLD 成膜を行うことにより、BNO ナノロッドを形成させた。これにより、磁場中 J_c が向上した。

- (1) 二軸配向した薄膜が得られる T_s 範囲 (850~890°C)において BNO ナノロッド導入 Y123 薄膜を作製した。図 1 に J_c の

磁場依存性を示すように、 J_c 特性は T_s に依存しており、 T_s が高いほど高い磁場中 J_c が得られた。なお、900°C 以上では膜の再蒸発が起きていた。このため、高い磁場中 J_c を有するナノロッド導入 RE123 線材の製造においては、正確な製造温度制御が重要となる。

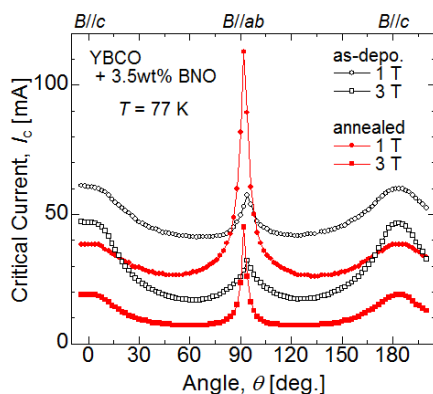
また、エキシマレーザー PLD 法にて作製したナノロッド導入 Y123 薄膜においても、YAG レーザ PLD 法で作製した Y123 薄膜と同様な J_c の T_s 依存性を示した。このため、 J_c の T_s 依存性はレーザー光源に関係なく、PLD 法にて作製したナノロッド導入 RE123 薄膜特有の現象であることを明らかにした。(Haruta *et al.*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 2012)



Haruta *et al.*, Physics Procedia, 2012

図 1. BNO ナノロッドを導入した Y123 薄膜における J_c の磁場依存性

- (2) BNO ナノロッドを導入により Y123 薄膜の磁場中 J_c は向上したものの、臨界温度が低下していた。この臨界温度低下に対して、酸素雰囲気中にてアニール処理を施すことにより臨界温度の改善を図った。350~450°C の間で、最適なアニール



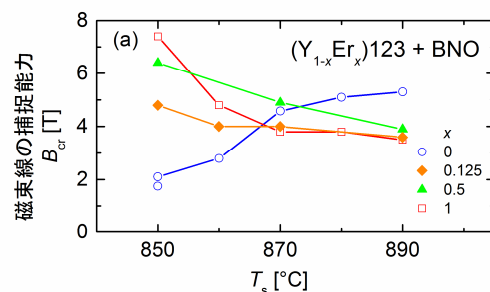
春田ら, 2011 年度春季低温工学・超伝導学会

図 2. BNO ナノロッド導入 Y123 薄膜のアニール前後における J_c の磁場角度依存性

ル条件 (アニール時間も検討) を探索したが、顕著な臨界温度の改善は得られなかった。しかしながら、図 2 に示すように J_c に大きな変化が見られた。しかも、磁場の印加方向によってアニール前後での J_c の変化に大きな違いが見られた。磁場を c 軸に平行に印加した場合の J_c は、アニールにより低下していた。一方、磁場を ab 面に平行に印加した場合の J_c は、アニールにより大きく向上していた (春田ら, 2011 年度春季低温工学・超伝導学会)。これは、アニールによる J_c の変化には異方性があることを示した重要な結果である。また、アニール条件の最適化により、臨界温度向上と更なる J_c 向上が見込まれる。

- (3) Y123 薄膜へのナノロッド導入による臨界温度低下に対して、超伝導キャリア密度制御の観点から、Y/Ca 置換を行った。Y サイトの 5% を Ca で置換した (Y,Ca)123 薄膜に BNO ナノロッドを導入した。その結果、ナノロッド導入 Y123 薄膜と比較して T_s の向上には至らなかった。すでに報告されているようにナノロッドを導入していないピュアな Y123 薄膜では、Ca ドープによって臨界温度が低下している。このため、ナノロッド導入 Y123 薄膜において臨界温度の改善を図るためには、Ca ドープ量の最適化を行うとともに、酸素アニール工程も加えるなどの工夫が必要であると考えられる。

- (4) 研究計画当初の予定では、酸素アニールや RE/Ca 置換によるキャリア密度制御により臨界温度を改善することにより、 J_c を向上させることに主眼を置いていた。しかしながら研究を進めていく中で、成膜温度によってナノロッド形態が変化し J_c 特性が変化すること、母相組成によってナノロッド形態の T_s 依存性が

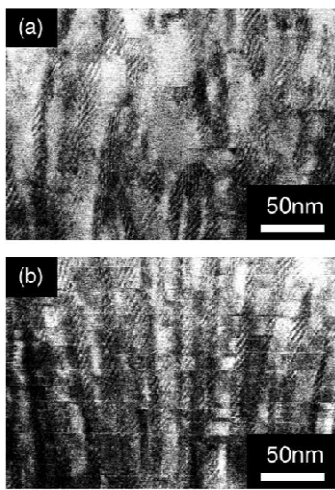


Haruta *et al.*, Appl. Phys. Exp., 2012

図 3. BNO ナノロッド導入 (Y_{1-x}Er_x)123 薄膜における磁束線補足能力の成膜温度依存性

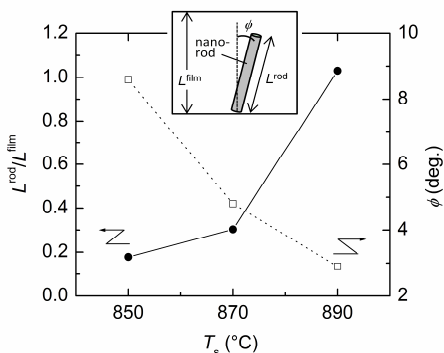
異なるなど新たな発見があったため、以下の内容に研究の主軸を移していった。

前述のように BNO ナノロッドを導入した Y123 薄膜では、 T_s が高いほど J_c 特性が向上していた。図 3 に磁束線の捕捉能力($\propto J_c$)の T_s 依存性を示すように、 T_s が高いほど磁束線補足能力(J_c)が高いことを示している。一方 BNO ナノロッドを導入した Er123 薄膜では、成膜温度の低下に伴い J_c 特性が向上しており、Y 系とは全く逆の振舞いを示した。このように、ナノロッドを導入した RE123 薄膜においては、母相組成により J_c 特性の成膜温度依存性が異なることを明らかにした。なお、77K における不可逆磁場はナノロッド導入 Y123 薄膜の場合約 9T であったのに対し、Er123 の場合約 13T と高



Haruta *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., 2013

図 4. BNO 添加 Y123 薄膜の透過電子顕微鏡写真：(a)成膜温度=850°C、(b)890°C



Haruta *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. (2013)

図 5. BNO 添加 Y123 薄膜におけるナノロッドの長さ(L^{rod}/L^{film})と傾き(ϕ)の成膜温度依存性

い値を示した。

BNO ナノロッド導入 Y123 および Er123 薄膜の透過電子顕微鏡観察によりナノロッド形態の成膜温度に対する変化を明らかにした。図 4 に BNO 添加 Y123 薄膜の透過電子顕微鏡写真を示す。Y 系において、低温成膜(図 4a)ではナノロッドが短く傾いて成長しているのに対し、高温成膜(図 4b)ではナノロッドは長く垂直に成長していた。図 5 にナノロッドの長さ (L^{rod}/L^{film}) および傾き(ϕ)の T_s 依存性を示すように、ナノロッド形態が T_s に強く依存していることが分かった。一方、Er 系では T_s に対してナノロッドの形態はあまり変化しないが、 T_s の増加に伴いナノロッドの密度が増加した。このような T_s に対するナノロッドの形態および密度の変化に起因して、 J_c 特性が成膜温度に依存することが明らかとなった。このため、RE123 線材の製造においてナノロッド導入により高い J_c 特性を得るためには、母相組成とナノロッド材料の組み合わせを考慮したうえで、製造温度を精密に制御する必要があることが明らかとなった。

RE123 薄膜の J_c 特性はナノロッドの導入により改善することに成功したが、 T_s によってその特性は大きく変化していた。成膜温度による特性変化は、RE123 線材の製造において大きな問題である。この問題に対して、Y 系と Er 系では J_c 特性の T_s 依存性が異なることを利用して、Y と Er の二種類の希土類元素を混合した超伝導母相にナノロッドを導入した。図 3 に示すように、Y と Er の組成比を調整することにより T_s に依存しない J_c 特性を有する RE123 薄膜の作製に成功した。本研究結果により、多少の製造温度の変動に対しても空間的に均一で高い J_c 特性を有する長尺の RE123 線材の製造が可能になる。

- (5) ナノロッド材料として BNO 以外に、 $BaZrO_3$ (BZO)、 $BaSnO_3$ (BSO)を添加した Y123 薄膜を作製した。ナノロッドの種類により、ナノロッド形態およびナノロッド密度の T_s 依存性が異なっていた。ナノロッド導入 RE123 薄膜の微細組織と臨界温度の関係を調べた結果、ナノロッド密度と臨界温度に相関があることが分かった。さらに、ナノロッド—ナノロッド間隔が 5~8nm 程度になったとき急激に臨界温度が低下することが分かってきた。つまり、超伝導/ナノロッド界面から 5~8nm の領域では結晶格子がひずんでおり、この歪に起因して臨界温度が低下していると考えられる。このため

J_c を最大化させるためには、界面での格子歪が小さくなるような超伝導母相とナノロッド材料の選択が重要である。

これら研究成果により、以下に示す RE123 線材の実用化に向けた重要な知見が得られた。優れた磁場中 J_c 特性を有するナノロッド導入 RE123 線材を製造する際には、ナノロッド材料と母相材料の組合せを考慮したうえで成膜温度を精密に制御する必要がある。臨界温度の低下を防ぐためにはナノロッド超伝導/ナノロッド界面での格子歪が小さい材料を選択する。二種類の希土類を混合した母相にナノロッドを導入することにより T_s に依存しない J_c 特性が得られる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- [1] M. Haruta, K. Saura, N. Fujita, Y. Ogura, A. Ichinose, T. Maeda, S. Horii, "Relationship between vortex pinning properties and microstructure in Ba-Nb-O-doped $YBa_2Cu_3O_y$ and $ErBa_2Cu_3O_y$ films", *Physica C, in press*, 2013, 査読有, 10.1016/j.physc.2013.04.044
- [2] N. Fujita, M. Haruta, A. Ichinose, T. Maeda, S. Horii, "Dependence of critical current properties on growth temperature and doping level of nanorods in PLD- $YBa_2Cu_3O_y$ films", *Physica C, in press*, 2013, 査読有, 10.1016/j.physc.2013.04.052
- [3] M. Haruta, A. Ichinose, N. Fujita, K. Saura, T. Maeda, S. Horii, "Critical current properties in $REBa_2Cu_3O_y$ films with nanorods depending on growth conditions", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.23, 8000904(4p), 2013, 査読有, 10.1109/TASC.2012.2233541
- [4] M. Haruta, A. Ichinose, N. Fujita, Y. Ogura, T. Nakata, T. Maeda, S. Horii, "Growth-Temperature-Independent Nanostructure in $(Y_{1-x}Er_x)Ba_2Cu_3O_y$ Films with Ba-Nb-O Nanorods", *Appl. Phys. Exp.*, Vol.5, 073102(3p), 2012, 査読有, 10.1143/APEX.5.073102
- [5] M. Haruta, N. Fujita, Y. Ogura, T. Nakata, T. Maeda, A. Ichinose, P. Mele, and K. Matsumoto, "Relationship between critical current density and nanorod morphology in $REBa_2Cu_3O_y$ thin films", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol.1434, 2012, 査読有, 10.1557/opl.2012.1588
- [6] M. Haruta, N. Fujita, T. Maeda, and S. Horii,

"Influence of deposition temperature on critical current properties for Nd:YAG-PLD- $YBa_2Cu_3O_y$ thin films with nano-rods", *Physics Procedia*, Vol.36, pp.1576-1581, 2012, 査読有,

10.1016/j.phpro.2012.06.213

- [7] S. Horii, N. Fujita, Y. Ogura, T. Maeda, M. Haruta, "Fabrication and critical current properties in Nd:YAG-PLD $REBa_2Cu_3O_y$ (RE= Y and Er) thin films", *Physics Procedia*, Vol.27, pp.220-223, 2012, 査読有, 10.1016/j.phpro.2012.03.450

[学会発表] (計 24 件)

- [1] 春田正和, 一瀬中, 藤田夏斗, 佐浦啓介, 小椋裕太, 前田敏彦, 堀井滋, "ナノロッド導入 $REBa_2Cu_3O_y$ 薄膜における成膜条件に依存した局所的臨界電流密度分布", 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2012 年 3 月 29 日, 神奈川工科大学
- [2] 春田正和, 佐浦啓介, 藤田夏斗, 小椋裕太, 一瀬中, 前田敏彦, 堀井滋, "異なった組成のナノロッドを含む $YBa_2Cu_3O_y$ 薄膜の臨界電流特性", 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 27p-G2-6, 2012 年 3 月 27 日, 神奈川工科大学
- [3] M. Haruta, K. Saura, N. Fujita, Y. Ogura, A. Ichinose, T. Maeda, S. Horii, "Relationship between vortex pinning properties and microstructure in Ba-Nb-O doped $REBa_2Cu_3O_y$ films", 25th International Symposium on Superconductivity, December 4, 2012, Tokyo
- [4] N. Fujita, M. Haruta, A. Ichinose, T. Maeda, S. Horii, "Dependence of critical current properties on growth temperature and doping level of nanorods in PLD- $YBa_2Cu_3O_y$ films", 25th International Symposium on Superconductivity, December 4, 2012, Tokyo
- [5] S. Horii, N. Fujita, K. Saura, Y. Ogura, T. Maeda, M. Haruta, "Microstructures of $(Y,Er)Ba_2Cu_3O_y$ thin films with Ba-Nb-O nanorods", 25th International Symposium on Superconductivity, December 4, 2012, Tokyo
- [6] 藤田夏斗, 春田正和, 一瀬中, 堀井滋, "ナノ結晶欠陥導入による希土類系超伝導薄膜の高性能化", 高知工科大学ナノテクノロジーシンポジウム 2012, 2012 年 11 月 17 日, 高知工科大学
- [7] 春田正和, 佐浦啓介, 藤田夏斗, 小椋裕太, 一瀬中, 前田敏彦, 堀井滋, "Ba-Nb-O 添加 RE123 薄膜における成膜温度に依存したナノロッド形態の変化と局所的臨界電流密度分布の関係", 第 86 回低温

- 工学・超電導学会研究発表会，2012年11月9日，岩手
- [8] M. Haruta, A. Ichinose, N. Fujita, K. Saura, T. Maeda, S. Horii, “Critical current properties in REBa₂Cu₃O_y films with nanorods depending on growth conditions”, Applied Superconductivity Conference 2012, October 11, 2012, Portland, USA
- [9] (invited) M. Haruta, A. Ichinose, N. Fujita, Y. Ogura, T. Nakata, T. Maeda, S. Horii, “Nanostructure and critical current properties for different RE composition in REBa₂Cu₃O_y films with nanorods”, IUMRS-ICEM, September 25, 2012, Yokohama
- [10] 小椋裕太, 春田正和, 一瀬中, 堀井滋, 前田敏彦, “Nd:YAG-PLD法で作製したナノロッド導入 ErBa₂Cu₃O_y 薄膜の臨界電流特性”, 第73回応用物理学学会学術講演会, 2012年9月13日, 松山
- [11] 堀井滋, 春田正和, “酸化物系高温超伝導体の材料化研究: 配向組織制御とナノ構造制御”, 第73回応用物理学学会学術講演会 (「応用物理学会・中国四国支部における酸化物材料研究の紹介」の一環として常時展示), 2012年9月13日, 松山
- [12] 藤田夏斗, 春田正和, 一瀬中, 前田敏彦, 堀井滋, “Nd:YAG-PLD法によるナノロッド導入 YBa₂Cu₃O_y 薄膜の作製と臨界電流特性の成膜温度・ナノロッド添加量依存性”, 第73回応用物理学学会学術講演会, 2012年9月12日, 松山
- [13] (招待講演) 春田正和, 一瀬中, 堀井滋: “製造温度に依存しない臨界電流特性を有するナノロッド導入 REBCO 薄膜の作製と微細組織評価”, 第73回応用物理学学会学術講演会, 2012年9月11日, 松山
- [14] T. Maeda, M. Haruta, Y. Ogura, N. Fujita, T. Nakata, S. Horii, “Irreversibility behavior of REBa₂Cu₃O_y (RE: Y or Er) films prepared by Nd:YAG pulsed-laser-deposition method”, International Cryogenic Engineering Conference 24 / International Cryogenic Materials Conference, May 12, 2012, Fukuoka
- [15] M. Haruta, N. Fujita, Y. Ogura, T. Nakata, T. Maeda, A. Ichinose, P. Mele, K. Matsumoto, “Relationship between critical current density and nanorod morphology in REBa₂Cu₃O_y thin films”, 2012 MRS Spring Meeting, April 10, 2012, San Francisco, USA
- [16] 春田正和, 藤田夏斗, 小椋裕太, 中田貴大, 前田敏彦, 堀井滋, “製造温度に依存しない臨界電流特性を有するナノロッド導入 REBCO 薄膜の作製”, 第59回応用物理学関係連合講演会, 2012年3月17日, 早稲田大学
- [17] (招待講演) 堀井滋, Y系超電導薄膜における磁束ピンニング機構～ナノロッド導入効果～, 低温工学・超電導学会第3回材料研究会, 平成23年12月26日, 九州工業大学
- [18] 春田正和, 藤田夏斗, 小椋裕太, 中田貴大, 前田敏彦, 堀井滋, “薄膜型高温超伝導線材創製に向けたナノ欠陥制御技術の構築”, 高知工科大学ナノテクノロジー研究所シンポジウム 2011, 2011年12月3日, 高知工科大学
- [19] 春田正和, 藤田夏斗, 小椋裕太, 中田貴大, 前田敏彦, 堀井滋: “REBa₂Cu₃O_y 薄膜組成によるナノロッドの形態制御”, 第85回2011年秋季低温工学・超電導学会, 2011年11月10日, 金沢
- [20] S. Horii, N. Fujita, Y. Ogura, T. Maeda, M. Haruta, “Fabrication and critical current properties in Nd:YAG-PLD REBa₂Cu₃O_y (RE= Y and Er) thin films”, 24th International Symposium on Superconductivity, October 25, 2011, Tokyo
- [21] M. Haruta, N. Fujita, Y. Ogura, T. Maeda, S. Horii, “Deposition temperature dependent vortex-Bose-glass state in Nd:YAG-PLD REBa₂Cu₃O_y thin films with nano-rods”, 24th International Symposium on Superconductivity, October 25, 2011, Tokyo
- [22] M. Haruta, N. Fujita, T. Maeda, S. Horii, “Influence of deposition temperature on critical current properties for Nd:YAG-PLD-YBa₂Cu₃O_y thin films with nano-rods”, Superconductivity Centennial Conference (European Conference on Applied Superconductivity, EUCAS), September 20, 2011, Netherland
- [23] 春田正和, 藤田夏斗, 前田敏彦, 堀井滋, “Nd:YAG-PLD法を用いたナノロッド導入 YBa₂Cu₃O_y 薄膜における磁束ピンニング特性の成膜温度依存性”, 第72回応用物理学学会学術講演会, 2011年9月1日, 山形大学
- [24] 春田正和, 藤田夏斗, 小椋裕太, 北野弘典, 前田敏彦, 堀井滋, “Nd:YAG-PLD法による REBa₂Cu₃O_y 薄膜の作製と臨界電流特性”, 第72回応用物理学学会学術講演会, 2011年9月11日, 山形大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

春田 正和 (HARUTA MASAKAZU)

高知工科大学・環境理工学群

研究者番号: 90580605