

高安定性 REBCO 超伝導導体に向けた 導電性酸化物エピタキシャル中間層の開発

[研究代表者] 一野祐亮 (工学部電気学科)

[共同研究者] 清家善之、森 竜雄 (工学部電気学科)

研究成果の概要

REBa₂Cu₃O_y (RE 系)超伝導線材を大電流超伝導機器に応用するために、RE 系超伝導線材を積層して臨界電流 (ゼロ抵抗で流せる最大の電流値) を高めた RE 系超伝導導体には、電流の不均一性と熱的不安定性の課題がある。これは、RE 系線材が絶縁性の中間層を持つために、積層導体において電流の分流・転流が生じないことに由来する。そこで導電性の中間層を導入することでこれを解決する試みも行われている。しかし、現状では n 型酸化物導電性中間層でしかその試みは行われていない。n 型材料は酸化雰囲気弱い、RE 系超伝導膜の成膜時に導電性が低下する致命的な問題点がある。そこで本研究では、パルスレーザー蒸着法 (PLD 法) を用いて (1) p 型導電性酸化物材料に着目して導電性中間層の検討を行うこととした。本課題では、p 型導電性酸化物のうち RENiO₃ (RNO) に着目し、そのエピタキシャル成長と電気特性を評価した。その結果、PLD 法で成膜する際の酸素圧力 50 Pa 下で 600~800°C の範囲でエピタキシャル成長し、かつ比較的低い抵抗が得られた。また、この RNO 導電性中間層の上に YBCO 薄膜がエピタキシャル成長できることも確認した。

以上から、RE 系超伝導線材の中間層に RNO を用いることで導電性を付与することができ、電流の均一性と熱的安定性に優れた RE 系超伝導導体を実現できる可能性が示された。

研究分野：電気電子材料 超伝導工学

キーワード：超伝導、エピタキシャル成長、導電性酸化物、超伝導線材

1. 研究開始当初の背景

REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE=希土類元素)超伝導体は超伝導転移温度(T_c)が 90 K 以上である。そのため、安価な液体窒素(沸点 77.3 K)でも超伝導状態を実現できる。また、非常に強力な超伝導電磁石を作れるため、超伝導リニアモーターカー、磁気画像診断装置(MRI)や核融合炉など超伝導機器への応用開発が進んでいる。

これらの超伝導機器に用いられる REBCO 超伝導体は主に RE 系超伝導線材の形に加工されている。RE 系超伝導線材は、ハステロイなどの金属テープ上に絶縁性の中間層を設け、その上に REBCO 層、そして保護の役割と故障電流バイパスの役割を持った金属安定化層が積層されたテープ形状をしている。REBCO は超伝導臨界電流密度 (J_c , ゼロ抵抗で流すことのできる最大の電流密度)に異方性があるため、エピタキシャル成長を利

用してテープ全長にわたって結晶軸方位を揃える必要がある。中間層は、金属テープと REBCO との化学反応を防ぐと同時に、REBCO がエピタキシャル成長するためのテンプレートとしての役割も持つ。そのため、中間層の結晶品質は RE 系線材の品質を決める重要なファクターである。

2. 研究の目的

RE 系超伝導線材を前述の超伝導応用機器に用いる場合、RE 系線材を積層して電流量を大きくした RE 系超伝導導体が用いられる(図 1(a))。しかし、RE 系線材は絶縁性の中間層を持つため、導体において電流の分流・転流が生じず、熱的安定性や不均一な電流分布による発生磁場の不安定性などの問題点がある。そこで、図 1(b)のように導電性の中間層を導入することでこれを

解決する試みも行われている。しかし、現状では n 型酸化物導電性中間層でしかその試みは行われていない。n 型材料は酸化雰囲気弱い、REBCO 膜の成膜時に導電性が低下する致命的な欠点がある。そこで本研究では、p 型導電性酸化物材料に着目して導電性中間層の検討を行うことを目的とした。

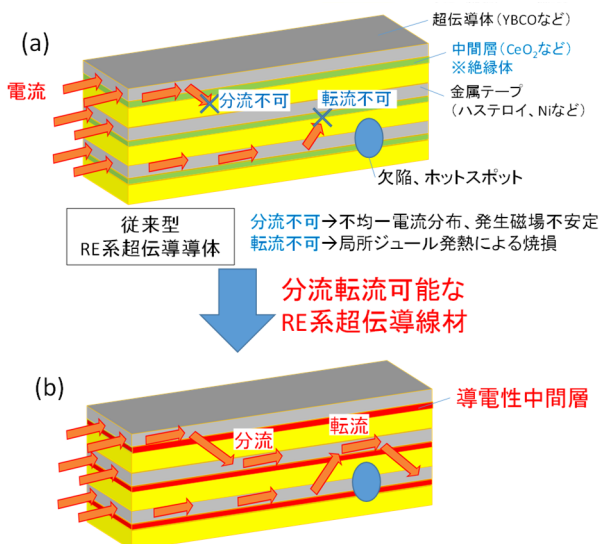


図1 RE系超伝導体の構造模式図。(a) 従来型 RE系超伝導体、(b) 本研究で目指す RE系超伝導体の構造。

3. 研究の方法

n 型導電性中間層しか検討されていない理由は主に REBCO との格子不整合性にある。前述の通り、大きな J_c のためには REBCO をエピタキシャル成長させる必要があり、そのためには中間層を構成する結晶の格子定数と REBCO の格子定数が近い、つまり格子不整合性が小さい必要がある。そこで、本課題では p 型導電性酸化物である RENiO_3 (RNO, RE=希土類)に着目し、PLD 法を用いてエピタキシャル成長する条件を探索した。RNO は歪んだペロブスカイト構造を持ち REBCO と類似の結晶構造である。格子不整合性も数%と比較的小さく、良質な REBCO のエピタキシャル成長が期待できる。しかし、これまで RNO のエピタキシャル膜の報告は極めて少ない。

本課題では、パルスレーザー蒸着 (PLD) 法を用いて RNO がエピタキシャル成長する条件を探索した。RNO 膜は SrTiO_3 (100)単結晶基板に、種々のヒーター温度 (T_H)、酸素圧力 (p_{O_2})で作製した。作製した薄膜のエピタキシャル成長(結晶配向性)は X 線回折法 (XRD)、抵抗-温度特性は冷凍機冷却直流四端子法で評価した。

4. 研究成果

図2に、 T_H と p_{O_2} に対する RNO のエピタキシャル成長の評価結果を示す。図から、 $p_{\text{O}_2} = 50 \text{ Pa}$ では全ての T_H でエピタキシャル膜を得ることができた。しかし、 $p_{\text{O}_2} = 10 \text{ Pa}$ では高い T_H でなければエピタキシャル成長は得られなかった。この結果から、RNO は低い p_{O_2} で安定相では無いことが示唆される。図には室温における RNO 膜のシート抵抗を示している。シート抵抗が低いほど導電性酸化物中間層として適している。図から、エピ成長した試料ではシート抵抗が低く、本研究では $p_{\text{O}_2} = 50 \text{ Pa}$, $T_H = 800^\circ\text{C}$ で最も低いシート抵抗が得られた。

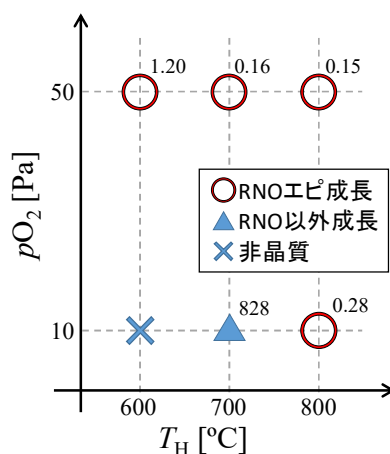


図2 ヒーター温度(T_H)と酸素圧力(p_{O_2})に対する RNiO_3 (RNO) のエピタキシャル成長。右肩の数字はシート抵抗 [$\text{k}\Omega/\text{sq}$]。

図3に、 $T_H = 800^\circ\text{C}$ 、 $p_{\text{O}_2} = 50 \text{ Pa}$ で作製した RNO エピ膜の温度-抵抗特性を示す。なお、RNO 膜の膜厚が測定できていないため、縦軸は測定時の生データのままである。通常の酸化物膜では、一部をウェットエッチングしてその段差を測定することで膜厚を測定している。し

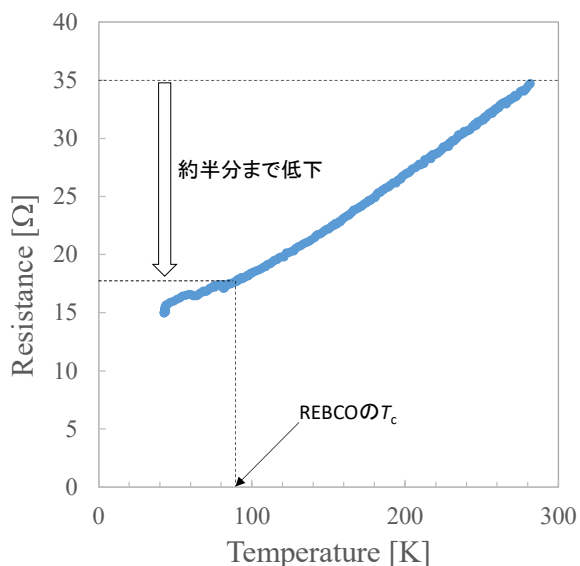


図3 RNO エピタキシャル薄膜 ($T_H = 800^\circ\text{C}$, $p\text{O}_2 = 50\text{ Pa}$)の温度-抵抗特性。

かし、RNO 膜はウェットエッチング（硝酸や塩酸エッチャント）に対して非常に安定であり、エッチングできない。膜厚の測定方法は現在検討中であるが、RNO 膜の電気輸送特性の概略を理解することは図3からでも可能であると考えられる。参考までに、想定される膜厚は300 nm程度であり、これから抵抗率を計算すると室温において数 $\text{m}\Omega\text{cm}$ 程度と、十分に低い値であった。

図3から、温度の低下に伴って電気抵抗も低下しており、RNO 膜が金属的な電気輸送特性を示すことがわかった。REBCOにおける $T_c = 90\text{ K}$ では、室温の約半分の抵抗まで低下しており、電流を金属テープに分流・転流させる機能を十分に果たすことができると期待される。

5. 本研究に関する発表

- (1) 橋本満敏、清家善之、森竜雄、一野祐亮、“高密度な直線的 BaHfO_3 ナノロッドを目指した Nd:YAG-PLD 法による YBCO 薄膜作製プロセスの開発”、2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会、東北大学川内キャンパス、21a-PA03-7、2022 年 9 月
- (2) 坂倉忠大、清家善之、森竜雄、一野祐亮、“複数種類の REBCO で構成された Nd:YAG レーザー法による超伝導薄膜の作製と超伝導特性の評価”、2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会、東北大学川内キャンパス、21a-PA03-8、2022 年 9 月
- (3) 大山航平、石塚敬太、一野祐亮、清家善之、森竜雄、“Nd:YAG レーザーを用いた金属テープ上への YBCO

超伝導エピタキシャル膜の作製に関する研究”、2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会、東北大学川内キャンパス、21a-PA03-9、2022 年 9 月

(4) 坂倉忠大、清家善之、森竜雄、一野祐亮、“混晶 REBCO 超伝導薄膜の Nd:YAG-PLD 法による作製と超伝導特性の評価”、電子情報通信学会 OME 研究会・電気学会誘電・絶縁材料研究会、DEI-23-016、愛知 日間賀島 アイランドホテル浦島、2023 年 1 月

(5) 石塚敬太、清家善之、森竜雄、一野祐亮、“大面積均一化 YBCO 超伝導エピタキシャル薄膜の作製技術開発”、電子情報通信学会 OME 研究会・電気学会誘電・絶縁材料研究会、DEI-23-017、愛知 日間賀島 アイランドホテル浦島、2023 年 1 月

(6) 大山航平、清家善之、森竜雄、一野祐亮、“Nd:YAG レーザーを用いた PLD 法による IBAD テープ上への YBCO エピタキシャル薄膜の作製に関する研究”、電子情報通信学会 OME 研究会・電気学会誘電・絶縁材料研究会、DEI-23-018、愛知 日間賀島 アイランドホテル浦島、2023 年 1 月

(7) 橋本満敏、清家善之、森竜雄、一野祐亮、“高密度な直線的 BaHfO_3 ナノロッドを導入した YBCO 薄膜の成膜プロセス及び超伝導特性の評価”、電子情報通信学会 OME 研究会・電気学会誘電・絶縁材料研究会、DEI-23-019、愛知 日間賀島 アイランドホテル浦島、2023 年 1 月

(8) (招待講演)一野祐亮、森竜雄、清家善之、“液相介在型薄膜結晶成長法を用いた酸化物超伝導薄膜作製時における不純物絶縁体の自己組織化挙動のシミュレーション”、電子情報通信学会 OME 研究会・電気学会誘電・絶縁材料研究会、愛知 日間賀島 アイランドホテル浦島、2023 年 1 月