

銅酸化物超伝導体 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 薄膜の電気抵抗の異方性

日大生産工(院)¹, 日大生産工², 名大院工³, 名大 RCCME⁴
 ○守永 昂世¹ 飯田 和昌² 畑野 敬史³ 生田 博志^{3,4}

1. 緒言

銅酸化物超伝導体 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (以下, GdBCOとする) は, 超伝導転移温度 T_c が約90 K と高いため, 実用化に向けた研究が精力的に行われている. 中でも, 結晶構造を反映した物性の異方性を調べることは, 基礎・応用の両面において重要である. 基礎物性評価には, 従来, 単結晶を用いて行われるのが一般的だが, GdBCOを含むREBCO (RE: 希土類元素)は, c 軸方向に厚みを有する単結晶を作製するのが難しい上, 積層欠陥などが形成されやすい. そのため, 異方性の評価には単結晶材料は不向きと言える. そこで, c 軸方向に厚みが少なく, これら欠陥が少ない薄膜を用いて異方性を評価する方法が報告されている. 例えば, 薄膜の電気抵抗の異方性は, Fig. 1に示すように[001]が[100]方向に傾斜したオフ基板の上に薄膜を成長させ, 調べられている¹⁾. しかし, 基板のオフ角 α を系統的に変化させ, 異方性を調べた報告は少ない.

そこで, 本研究ではGdBCO薄膜をオフ角 α ($0^\circ, 1.5^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 10^\circ$) を有する SrTiO_3 (001)基板の上に成長させ, 電気抵抗の異方性を調べたので報告する.

2. 実験手法

GdBCO薄膜はKrFエキシマレーザーを用いたパルスレーザー堆積(PLD)法により成膜した. 成膜温度は $\alpha=0^\circ$ (通常の基板) のみ 790°C で行い, $\alpha=1.5^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 10^\circ$ においては 750°C にて成膜を行った. 成膜雰囲気はいずれのオフ角でも $p\text{O}_2=40$ Paとした. 成膜後, 薄膜をチャンバーから取り出し, 管状炉にて $p\text{O}_2=1$ atm下で

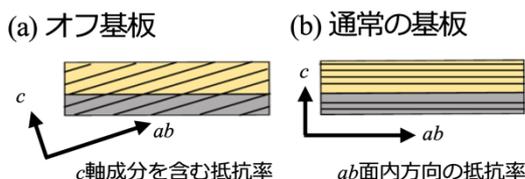


Fig. 1 Schematic illustration of (a) the vicinal cut and (b) the ordinary substrates, respectively.

400°C , 3時間の酸素アニールを行い, 酸素欠損量 δ を減らした. その後, レーザーカッターを用いて ab 面に平行な方向と, それに垂直な方向に細線を加工し, 電気輸送特性の評価を行った. なお, 細線の長さとは幅は両方向とも同じとした.

薄膜の不純物の有無, 及び格子定数を調べるため, X線回折装置 (rint2000, 理学電気) を用いた. X線源は $\text{Cu-K}\alpha$ (波長 1.542 \AA) を用い, 測定範囲は $0^\circ \leq 2\theta \leq 100^\circ$ とした.

測定試料は, 直流(DC)抵抗サンプルパックに固定した. ab 面に平行な方向と, それに垂直な方向の抵抗を同時に測定した. 磁場方位依存性の測定には, バイアス電流が常に外部磁場に垂直, すなわち最大ローレンツ力が細線に印加されるように試料を固定した. 電気抵抗の温度および磁場方位依存性は, 東京大学物性研究所にある物理測定システム PPMS(Quantum Design Japan)を用いて測定した.

3. 結果と議論

Figure 2にGdBCO薄膜のX線回折測定結果を示す. また図中に, 005反射の ω -scanから決定したGdBCO薄膜のオフ角 β を示す. いずれの薄膜も基板のオフ角と同程度であり, また c 軸配向しているのを確認した.

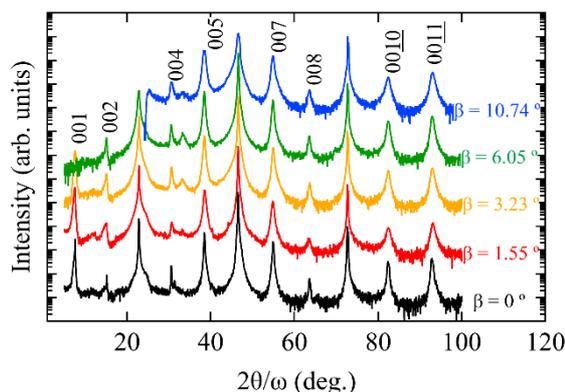


Fig. 2 X-ray diffraction spectrum of GdBCO grown on various SrTiO_3 having different offset angles α . The measured offset angles of GdBCO (i.e., β) are also shown.

Anisotropy of electrical resistance in copper oxide superconducting $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films

K Morinaga, K Iida, T Hatano and H Ikuta

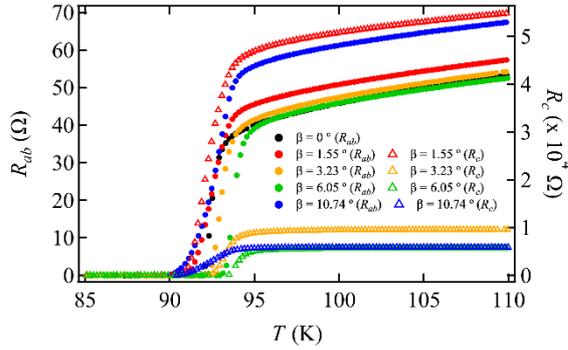


Fig. 3 The temperature dependence of the ab -plane and c -axis resistance for $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ grown on vicinal SrTiO_3 substrates with various β . The open and solid symbols represent R_c and R_{ab} , respectively.

Figure 3に $\beta=0^\circ, 1.55^\circ, 3.23^\circ, 6.05^\circ, 10.74^\circ$ の薄膜の ab 面に平行な方向と、それに垂直な方向の抵抗(それぞれ、 R_{ab}, R_T とする)から求めた c 軸方向の抵抗(R_c)の温度依存性を示す。なお、 c 軸方向の抵抗は $R_c = (R_T - R_{ab} \cos^2\beta) / \sin^2\beta$ を使って求めた²⁾。いずれの薄膜も、ゼロ抵抗は90~93 Kであった。また、異方性を反映して $R_{ab} < R_c$ であり、その差は約 10^3 のオーダーであった。

Figure 4に $\beta=1.55^\circ, 3.23^\circ, 6.05^\circ, 10.74^\circ$ の薄膜の常伝導状態の抵抗の異方性 $\gamma (=R_c/R_{ab})$ を示す。すべての試料は、温度が低下するにつれ、異方性 γ は増加した。また、オフ角が増大するにつれて異方性も低下した。

Figure 5に $\beta=6.05^\circ, 10.74^\circ, T=80\text{ K}, 86\text{ K}$ のGdBCO薄膜の抵抗の磁場方位依存性を示す。ここで θ は、外部磁場 H とGdBCOの c 軸とのなす角度である。すなわち、 $\theta \sim 180^\circ$ は $H \parallel c$ 、 $\theta \sim 90^\circ$ と 270° は $H \parallel ab$ である。 $\beta \leq 6.05^\circ$ 、測定温度 $T=80\text{ K}$ では、 $\theta \sim 180^\circ$ で抵抗の落ち込みが観測された(Fig. 5a)。これは、 c 軸に平行な磁束ピンの影響による。一般に、PLD法で作製されたREBCO薄膜には、螺旋転移が入ることが報告されている³⁾。この螺旋転移が c 軸相関ピンとして働く。この磁束ピンの影響は、 $T=86\text{ K}$ で弱まり、 $\theta \sim 180^\circ$

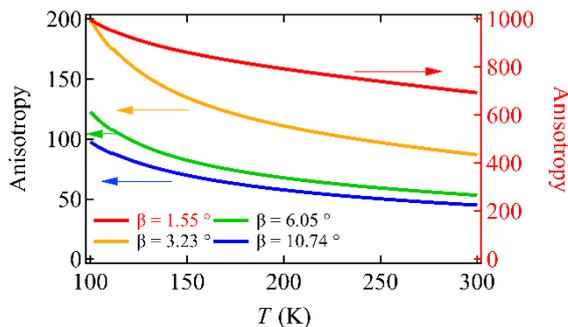


Fig. 4 The resistance anisotropy in the normal state for $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.

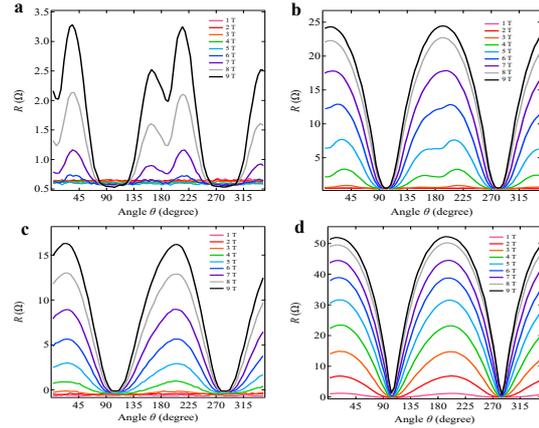


Fig. 5 The angular dependence of resistance for $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ grown on vicinal SrTiO_3 substrates with (a) $\beta=6.05^\circ$ at $T=80\text{ K}$, (b) $\beta=6.05^\circ$ at $T=86\text{ K}$, (c) $\beta=10.74^\circ$ at $T=80\text{ K}$ and (d) $\beta=10.74^\circ$ at $T=86\text{ K}$.

で観測された抵抗の減少が消失した(Fig. 5b)。一方、Fig. 5c, dに示すように $\beta=10.74^\circ$ の試料では、 c 軸相関ピンの影響が小さいことがわかる。そこで、異方的GLスケールモデル($H_{\text{eff}} = H\sqrt{\cos^2\theta + \gamma_m^{-2}\sin^2\theta}$)⁴⁾を用いて、有効質量の異方性 $\gamma_m (= \sqrt{m_c^*/m_{ab}^*})$ を求めた。Fig. 6に示すように $\gamma_m \sim 5$ で、全てのデータがスケールされる様子が見られる。緩和時間が一定の場合、常伝導状態における抵抗の異方性 γ は、 $\gamma = m_c^*/m_{ab}^*$ なので、 $\gamma = \gamma_m^2 \sim 25$ となる。この値は、実験値である ~ 100 に比べて小さい。この原因として、積層欠陥などにより c 方向の抵抗が増大した可能性が考えられる。

4. まとめ

銅酸化物超伝導体GdBCOの異方性を調べた。その結果、有効質量の異方性は約5程度で、常伝導状態の抵抗の異方性から評価した値に比べて小さかった。この原因の一つとして、積層

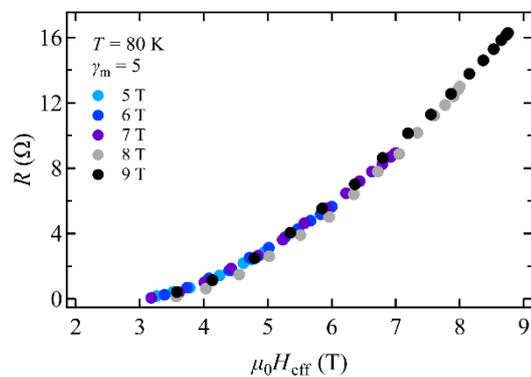


Fig. 6 The anisotropy of superconductivity for $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ grown on vicinal SrTiO_3 substrates with $\beta=10.74^\circ$ at $T=80\text{ K}$.

欠陥などにより c 方向の抵抗が増大したと考えられる。

参考文献

- 1) G. Heine *et al.*, *Nanomaterials* **11**, 675 (2021).
- 2) Th. Zahner *et al.*, *Physica C* **298**, 91 (1998).
- 3) B. Dam *et al.*, *Nature* **399**, 439 (1999).
- 4) G. Blatter *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 875 (1992).