The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	バイクリスタル基板で作製したジョセフソン接合の表面欠陥と電気特性
Author(s)	牧, 哲朗; 中谷, 悦啓; 久保, 等 他
Citation	大阪大学低温センターだより. 2010, 151, p. 8-13
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/7175
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

「次世代電子デバイス教育研究開発拠点」

拠点リーダー：谷口　研二（工学研究科）

事業推進者

氏　名	所属・役職	GCOEでの役割
谷口　研二	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授	拠点リーダー、インテグレーション支援部門長
松岡　俊匡	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・准教授	インテグレーション支援部門 デバイスデザイン
尾崎　雅則	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授	材料開発支援部門長 教育実践支援室長
大森　　裕	先端科学イノベーションセンター・教授	材料開発支援部門 フレキシブルデバイス材料
北岡　康夫	工学研究科（フロンティア研究センター）・教授	材料開発支援部門　高品質結晶育成 連携推進支援室長　兼　産学連携担当
吉村　政志	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・准教授	材料開発支援部門 高品質結晶育成
森　　伸也	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・准教授	評価解析支援部門長
阿部　真之※	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・准教授	評価解析支援部門 極限計測評価
伊瀬　敏史	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授	パワーデバイス部門長
伊藤　利道	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授	パワーデバイス部門 半導体パワー
葛原　正明	福井大学工学研究科（電気電子工学専攻）・教授	パワーデバイス部門 パワーデバイス設計
片山　光浩	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授	センシングデバイス部門長 戦略研究推進室長
糸崎　秀夫※	基礎工学研究科（システム創成専攻）・教授	センシングデバイス部門 超伝導磁気センサー
青木　秀充	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・准教授	センシングデバイス部門 半導体バイオセンサー
斗内　政吉	レーザーエネルギー学研究センター・教授	センシングデバイス部門 テラヘルツイメージング
永妻　忠夫	基礎工学研究科（システム創成専攻）・教授	センシングデバイス部門 テラヘルツイメージング
奥野　弘嗣	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・助教	センシングデバイス部門 生体センサ
兒玉　了祐	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授	フォトニックデバイス部門長 連携推進支援室　国際連携担当
井上　　恭	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授	フォトニックデバイス部門 量子光デバイス
岡村　康行	基礎工学研究科（システム創成専攻）・教授	フォトニックデバイス部門 光制御デバイス
北山　研一	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授	フォトニックデバイス部門 フォトニックデバイス
近藤　正彦	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授	フォトニックデバイス部門 次世代レーザーデバイス
栖原　敏明	工学研究科（電気電子情報工学専攻）・教授	フォトニックデバイス部門 集積レーザーデバイス

※印：本号で紹介する研究者及び研究グループ関係者
太字：低温センターから支援を受けている事業推進者

バイクリスタル基板で作製した ジョセフソン接合の表面欠陥と電気特性

産業技術短期大学　電気電子工学科　†牧　哲朗
基礎工学研究科　中谷　悦啓
工学研究科　久保　等
工学研究科　阿部　真之
基礎工学研究科　糸﨑　秀夫
† E-mail: maki@cit.sangitan.ac.jp

1．はじめに

高温超伝導ジョセフソン接合の有用な作製方法のひとつにバイクリスタル結晶粒界を用いる方法がある。この方法は、ある接合角を持つバイクリスタル結晶基板上に超伝導薄膜をエピタキシャル成長させることにより、バイクリスタル結晶粒界ジョセフソン接合を形成するものである。作製プロセス工程が軽減でき、良好な接合特性が得られることが特徴である。我々は、**STO**バイクリスタル基板を用い**YBCO**薄膜ジョセフソン接合の作製を行い、これまで良好な**SQUID**（超伝導量子干渉素子）の作製を行ってきた。その過程で、同一基板上におけるジョセフソン接合の特性にばらつき［1－3］がみられることが明らかとなった。

本論文では、その問題点の原因を究明するために、**STO**バイクリスタル基板ならびにその上に堆積させた**YBCO**超伝導薄膜の結晶粒界を**FE-SEM**（電界放射形走査電子顕微鏡）や**AFM**（原子間力顕微鏡）を用いて観察した。さらに、同一基板上にジョセフソン接合アレイを作製し、その結晶粒界の表面モフォロジーと電気特性（電流－電圧特性、抵抗－温度特性）との関連について評価を行ったので報告する。

2．バイクリスタル結晶粒界の観察

10×10 mm²(100)STOバイクリスタル基板（接合角**30°**）の結晶粒界表面を**FE-SEM**により観察した。観察結果を図**1**に示す。図に示す矢印は、結晶粒界の位置を示している。図**1(a)**より、接合境界に沿

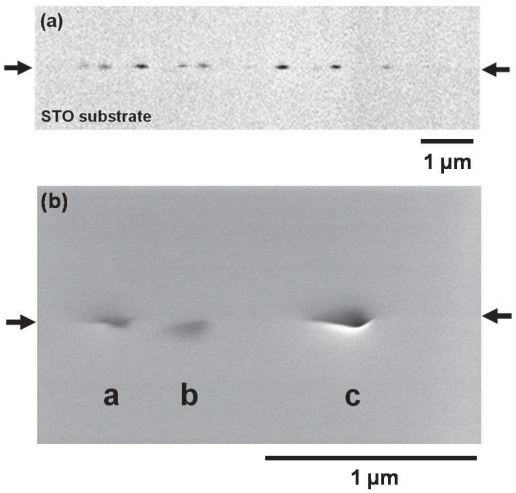

図**1**　**STO**バイクリスタル結晶粒界の**FE-SEM**像（接合角**30°**）

って約100 nm～400 nmの多数の欠陥（孔）が数100 nmの間隔で密集して観察された[4]。さらに拡大して観察すると図1(b) c にみられるように、基板の接合角を反映した楔形形状が観察された。この種の欠陥の深さは約10 nm～40 nmであった。

この基板上に、PLD（パルスレーザー堆積）法を用いて、YBCO薄膜を約200 nm堆積し、結晶粒界に存在する欠陥をAFMにより観察した。YBCO薄膜結晶粒界に観察された欠陥は、大きく分けると、図2(a) に示す基板の接合角を反映した楔形粒界と、図2(b) に示す、蛇行状の粒界であった。図2(a) に示した楔形粒界の欠陥の大きさは、結晶粒界方向に沿って長さ約800 nm、幅約200 nmあたりから孔を形成しており、その深さは30 nm程度であった。

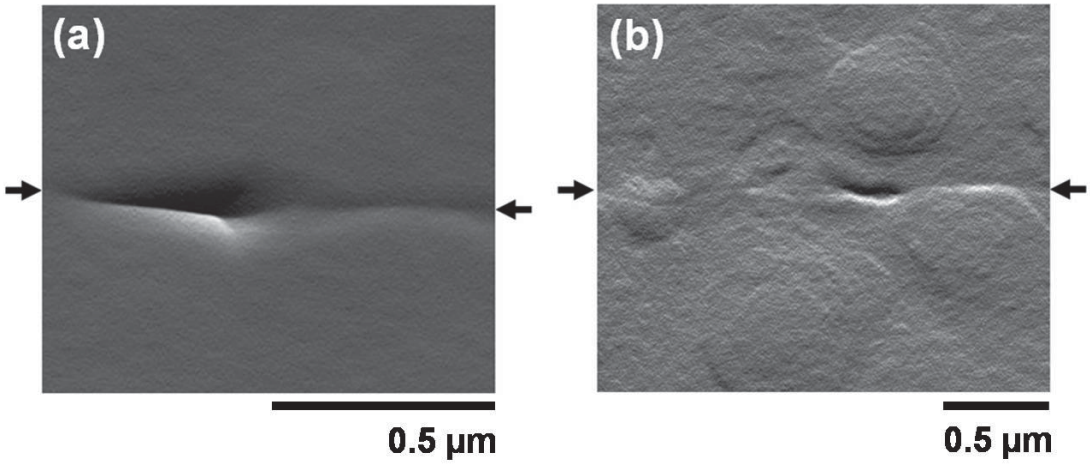

図2　STOバイクリスタル基板上に堆積させたYBCO薄膜の結晶粒界（AFM微分像）。(a) 基板の接合角を反映した楔形粒界。(b) 蛇行した粒界。（接合角30°）

3．YBCO薄膜接合アレイの電流－電圧特性と接合部のFE-SEM観察

10×10 mm²(100)STOバイクリスタル基板（接合角30°）上にPLD法により、YBCO薄膜を約100 nm堆積した。その後、接合アレイをフォトリソグラフィによりパターニングし、Ar^+イオンミリングにより、YBCO薄膜をエッチングした。シャドーマスクを用い金属電極を形成して、YBCO薄膜ジョセフソン接合アレイを作製した[5]。作製したYBCO薄膜接合アレイ（接合A、B、C）の電流－電圧特性を計測した。計測結果を図3（測定温度3 K）および図4（測定温度20 K）に示す。図3から、接合Cは、接合A、Bに比べ、I_C（臨界電流値）およびR_n（常伝導抵抗値）が大きく異なっており、接合により、I_C、R_nにばらつきがみられた。測定温度の上昇に伴い、接合Aおよび接合Bは、I_Cの低下、R_nの増大が観測され

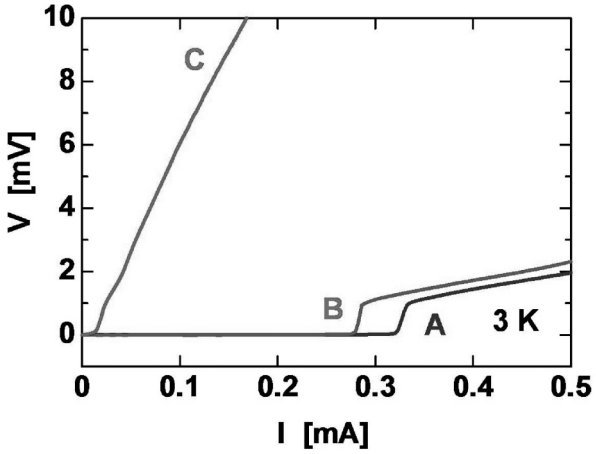

図3　YBCO薄膜接合アレイの電流－電圧特性（測定温度3 K）

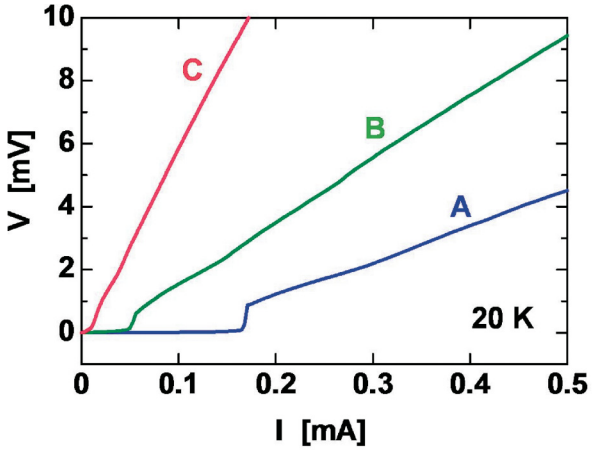

図 4　YBCO薄膜接合アレイの電流－電圧特性（測定温度20 K）

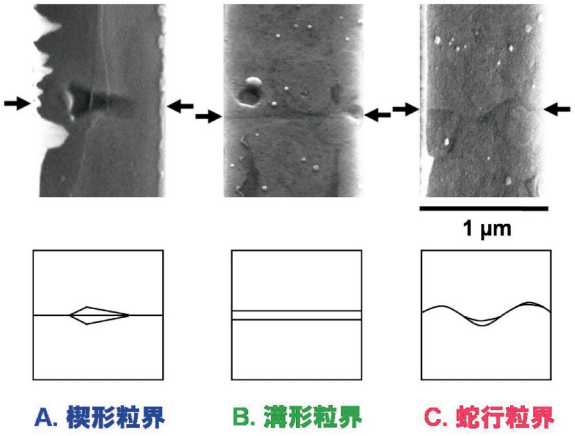

図 5　YBCO薄膜接合部結晶粒界のFE-SEM像と模式図

た（図 4 ）。また、温度上昇に伴う I_C、R_n の変化幅は接合によって大きく異なっており、接合Bは三種の接合の中では最も大きな変化幅を示した。

電流－電圧特性を評価した接合A、B、Cの結晶粒界近傍のFE-SEM像を図 5 に示す。接合A、B、Cはそれぞれ特徴的な形状を示しており、図に模式図も併せて示した。接合Aは基板の接合角を反映した楔形粒界、接合Bは結晶粒界に沿って直線的に、少し表面が陥没した形状の溝形粒界、そして接合CはS字形に蛇行した蛇行粒界と分類した。

4．YBCO薄膜接合アレイの抵抗－温度特性

電流－電圧特性を計測した接合A、B、Cの抵抗－温度特性を図 6 に示す。図から、接合Cは、薄膜が超伝導状態に転移した後も大きい残留抵抗値を示しており、接合C、B、Aの順に残留抵抗値が低くなる結果となった。

3 Kから20 Kにおける電流－電圧特性（図 3 、図 4 ）の変化と抵抗－温度特性（図 6 ）との関連を考察してみる。電流－電圧特性を評価した温度20 Kにおいて、接合Cはすでに大きな残留抵抗値を示しており、3 Kから20 Kの測定温度上昇に伴う I_C、R_n の変化にはほとんど差は出なかった。一方、接合A、Bは、20 Kにおいて、残留抵抗は共に生じていないが、接合Bの超伝導転移温度（T_C-B）が、接合Aの転移温度（T_C-A）よりも、より低い温度で始まるため、接合Aに比べると、接合Bの方が、測定温度上昇に伴う I_C、R_n の変化に大きな差が出たと考えられる。

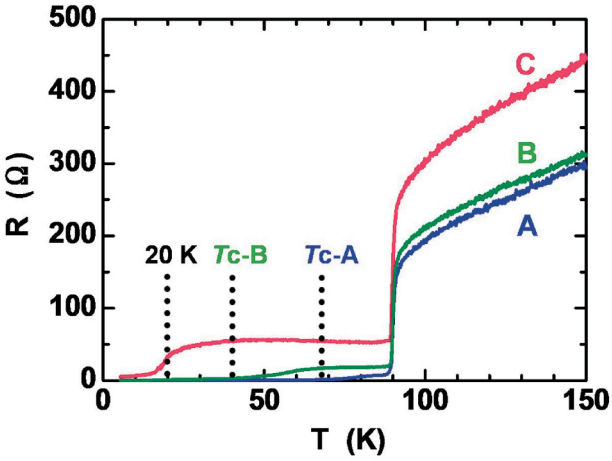

図 6　YBCO薄膜接合アレイの抵抗－温度特性

5．まとめ

接合A、B、Cの電流－電圧特性（I_C、R_n）、抵抗－温度特性（R_r（薄膜が超伝導状態に転移した温度における残留抵抗値））の各パラメータと接合部の表面モフォロジーとの関係を整理すると図7のようにまとめることができる。接合A（楔形粒界）、接合B（溝形粒界）、接合C（蛇行粒界）の順に従って、I_Cは低く、R_n、R_rは大きくなる結果となった。この理由について検討してみる。

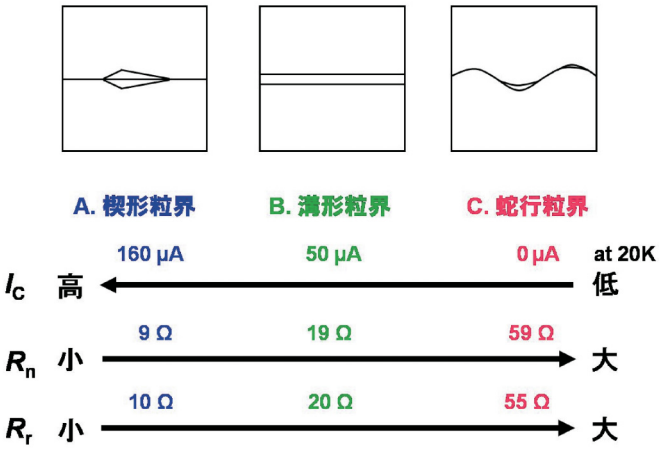

図7　YBCO薄膜接合部の表面モフォロジーと電気特性のパラメータ

結晶粒界の表面欠陥が形成される機構について図8をもとに考察する。図1に示した通り、YBCO薄膜を堆積する前のSTOバイクリスタル基板の表面は、結晶粒界に沿って、長さ100 nm～400 nm程度の、接合角を反映した楔形の欠陥（孔）が、数100 nmの間隔で存在している（図8上段）。もし、STOバイクリスタル基板結晶粒界表面に欠陥が無ければ、その上に堆積したYBCO薄膜結晶粒界にも欠陥は存在しないと推測できる（図8下段、左から1番目）。STO基板結晶粒界表面の欠陥がある程度小さい場合は、YBCO薄膜堆積の過程で欠陥（孔）は平坦化されるが、比較的大きい場合は、薄膜のエピタキシャル成長過程で欠陥の形状が継承され、結果としてバイクリスタル基板の接合角を反映した、A. 楔形粒界が形成される（図8下段、左から2番目）。ここで、STO基板結晶粒界表面の欠陥が連なっていたり、欠陥が比較的深い場合は、薄膜のエピタキシャル成長が結晶粒界で不完全となり、結晶粒界に沿って直線的に、少し表面が陥没した、B. 溝形粒界が形成される（図8下段、右から2番目）。一方、欠陥を含む基板接合境界を挟んで、両サイドより互い違いに島状結晶成長が進むと、オーバーグロースの結果、C. 蛇行粒界（図8下段、右から1番目）が形成されると推測できる。

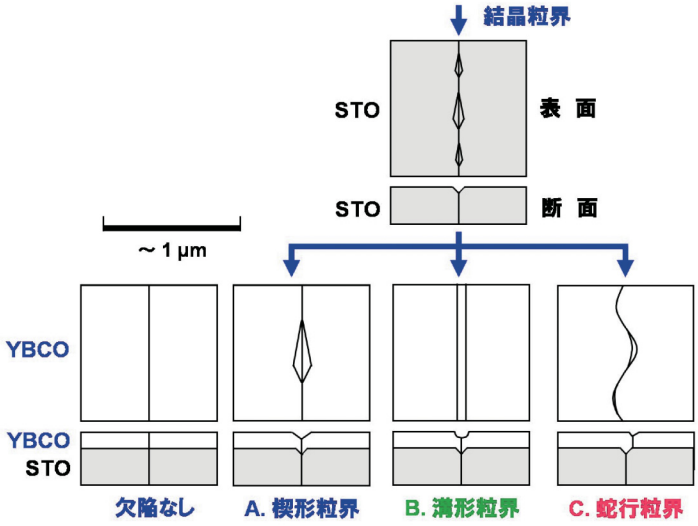

図8　YBCO/STOバイクリスタル結晶粒界の模式図

これらのYBCO薄膜結晶粒界形成過程を考えると、A. 楔形粒界は、基板表面の欠陥をエピタキシャル成長の過程で継承した結果であるため、エピタキシャル成長の不完全性から生じる、B. 溝

形粒界に比べ、特性への悪影響は比較的小さいと考えられる。一方、**C**. 蛇行粒界は、電流が流れる方向に対して、結晶粒界が斜めに横切ることになり、特性への影響に最も大きく現れやすいと推測できる。

以上の考察から、ジョセフソン接合結晶粒界のモフォロジーは電気特性に影響を与えている可能性があり、電流－電圧特性の I_C、R_n のばらつきの一因となっていることが推測できる。

謝　辞

本研究の一部はグローバル**COE**「次世代電子デバイス研究開発拠点」の補助を受けて行なった。

参考文献

［1］**E. B. McDaniel, S. C. Gausepohl, C.-T. Li, M. Lee, J. W. P. Hsu, R. A. Rao, and C. B. Eom, Appl. Phys. Lett., Vol.70, No.14, pp.1882-1884（1997）.**

［2］**C. H. Wu, U. C. Sou, J. C. Chen, K. L. Chen, H. C. Yang, M. H. Hsu, T. S. Lai, J. T. Jeng, Y. S. Tsai, and H. E. Horng, Appl. Phys. Lett., Vol.88, pp.102504-1-102504-3（2006）.**

［3］**H. W. Yu, M. J. Chen, H. C. Yang, S. Y. Yang, and H. E. Horng, Physica C, Vol.333, pp.163-169（2000）.**

［4］牧　哲朗，孔　祥燕，中谷悦啓，久保　等，阿部真之，糸﨑秀夫，信学技報，**Vol.108, No.420, pp.7-10（2009）.**

［5］牧　哲朗，孔　祥燕，中谷悦啓，関　天放，久保　等，阿部真之，糸﨑秀夫，信学技報，**Vol. 109, No. 141, pp25-28（2009）.**