

## 論文の内容の要旨

論文題目 高温超伝導体  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  薄膜と常伝導体  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  薄膜  
による積層型ジョセフソン接合の作製と特性

氏 名 佐 藤 睦

### 1. 研究背景

近年、ジョセフソン接合の集積化においては、界面改質ランプエッジ接合が優れた特性（特性の指標となる超伝導電流値と常伝導状態での抵抗値の積 ( $I_c R_n$  積値) = 2~3 mV、接合 100 個の特性のばらつき  $1\sigma = 8\%$ ）を持つことが報告されている。但し、この接合はその電流・電圧特性がヒステリシスを示す超伝導層/絶縁層/超伝導層 (S-I-S) 型の接合である。

一方、超伝導論理回路作製を念頭に置いた回路設計においては、単一磁束量子 (Single Flux Quantum: SFQ) を利用した回路が、その低消費電力・高速性・動作反復安定性において、従来のジョセフソン接合集積回路よりも優れていることで、注目されている。SFQ 回路はジョセフソン接合を含むループ内に磁束量子が存在する場合をデジタル値 1、しない場合を 0 とする回路である。この SFQ 回路作製には、その電流・電圧特性がヒステリシスを示さない超伝導層/常伝導層/超伝導層 (S-N-S) 型のジョセフソン接合の利用が有利とされている。(ヒステリシスを示す S-I-S 型ジョセフソン接合では、回路を元の状態に戻すために、毎回、電圧を 0 の状態にする必要があるためである。)

S-N-S 型ランプエッジ接合の候補としては、主に  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ /  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ /  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  接合などのジョセフソン接合が研究対象となってきたが、まだ優れたジョセフソン効果を示す有力な適用材料は確立していないのが現状である。

## 2. 研究目的

本研究では、SFQ回路に適用するS-N-S型ランプエッジ接合を作製するための有力な材料を選択するため、格子整合性の良いNdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>/PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>の組合せを提案し、その組合せによる積層型ジョセフソン接合の特性の測定を通じて、上記材料のS-N-S型接合への適用性の評価を行うことを目的とした。

## 3. 実施内容

ランプエッジ接合作製においては、その製作プロセスが複雑であり、プロセス中の材料特性の改質が懸念されるため、本研究では、比較的製作プロセスが簡易で材料の特性を直接、接合特性に反映し易いと考えられるトライレイヤー接合を作製することにより、超伝導層NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>と常伝導層PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>による積層型ジョセフソン接合の特性を測定し、材料の適用性評価を行った。

### 3. 1 a軸配向性トライレイヤージョセフソン接合の作製と特性評価

ランプエッジ接合では、主に材料のa軸方向にジョセフソン電流が流れる構成となっているため、本研究では、a軸配向性トライレイヤー接合を主な研究対象としてプラズマスパッタリング法により作製し、特性評価を行った。また、本研究でのa軸配向性PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>薄膜は抵抗率が小さく、バリア層としての機能が弱いことが懸念されるため、バリア層として、PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>と比べ格子定数の変化が小さく、抵抗率の増加が大きいa軸配向性CoドーピングPrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>薄膜(PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>2.8</sub>Co<sub>0.2</sub>O<sub>7-δ</sub>薄膜)を採用した。

### 3. 2 c軸配向性トライレイヤージョセフソン接合の作製と特性評価

c軸方向のジョセフソン効果を利用することは、回路設計をより柔軟にする。ここでは、NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>/PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>の組合せによるc軸方向ジョセフソン効果を評価するため、c軸配向性トライレイヤー接合をパルスレーザー蒸着法により作製し特性評価を行った。

## 4. 実施内容の結果と評価

### 4. 1 a軸配向性トライレイヤージョセフソン接合の作製と特性評価

a軸配向性NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>/PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>2.8</sub>Co<sub>0.2</sub>O<sub>7-δ</sub>/NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>トライレイヤー接合において、以下の評価結果が得られた。

- 1) 電流・電圧特性は、S-N-S型で、リーク電流を含まない Resistively Shunted Junction(RSJ)-type の特性を示し、 $I_c R_n$  積値はバリア層の膜厚 50 nm の時、4.2 K で 30 μV (15 μA x 2.0 Ω)であった。この結果は、他文献(H. Akoh et al.)による(103)方向のYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>/PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>トライレイヤー接合の  $I_c R_n$  積値

の結果と良く一致する。(103)方向が a 軸方向と c 軸方向の両方向の電気特性を反映していることを考慮すると、同じバリア層の膜厚では、膜厚が薄くなるほど、 $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{PrBa}_2\text{Cu}_{2.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{7-\delta}$ による a 軸配向性トライレイヤー接合の方が、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ による a 軸配向性トライレイヤー接合より、 $I_c R_n$  積値が増大していくと判断される。

- 2) 超伝導電流密度  $J_c$  と  $I_c R_n$  積値の相関では、 $I_c R_n$  積値が  $J_c$  の 1/2 乗に比例する傾向がみられた。 $J_c$  がバリア層の膜厚に強く依存することを考慮すると、バリア層の膜厚調整により、 $I_c R_n$  積値の増大が可能である。
- 3) マイクロ波照射に対し、良く発達したシャピロステップが観測され、そのステップ幅のマイクロ波電力依存性も明確な変化を示し、理論値  $J_n(2eV/hf)$  と良い一致を示していることから、安定したジョセフソン効果が生じていると言える。
- 4) 超伝導電流の磁場依存性は、理想的なフラウンホーファーパターンを示し、接合面に対し均一に超伝導電流が流れていることを示唆しており、不均一な流れを示す場合の多い  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  接合より優れている。

#### 4. 2 c 軸配向性トライレイヤージョセフソン接合の作製と特性評価

c 軸配向性  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  トライレイヤー接合において、以下の評価結果が得られた。

- 1) 電流・電圧特性は、S-N-S 型で、 $I_c R_n$  積値はバリア層の膜厚 40 nm の時、4.2 K で 1.6 mV (0.5 mA x 3.2  $\Omega$ ) であり、他文献(H. Akoh et al.)による  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  による c 軸配向性トライレイヤー接合より、 $I_c R_n$  積値が大きい。
- 2) マイクロ波照射に対し、安定したシャピロステップが観測され、そのステップ幅のマイクロ波電力依存性も明確な変化を示し、理論値  $J_n(2eV/hf)$  と良い一致を示していることから、安定したジョセフソン効果が生じていると言える。
- 3) 他文献(G. A. Alvarez et al.) では同接合が S-I-S 型電流・電圧特性を示しており、今回、S-N-S 型特性が得られた結果とは異なっている。この相違の原因として、S-I-S 型特性が得られた他文献の接合では、 $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  層が、Pr-Ba の組成のずれにより抵抗率が増大し、絶縁層的な特性を示していることが考えられる。

#### 5. 結論

上記の評価結果により、a 軸及び c 軸両方向の  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  接合は、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  接合より、大きな  $I_c R_n$  積値を持つポテンシャルを有し、マイクロ波応答性、磁場応答性もより優れているため、ジョセフソン効果全般の観点より、S-N-S 型ランプエッジ接合適用性において優れた特性を有すると判断される。

以上