

要旨

超伝導体 (S) の両側を強磁性体 (F)、または強磁性体と常磁性金属 (N) を用いて挟み込んだ F/S/F、F/S/N 2重トンネル接合系において両端の F (N) 層間に電圧をかけてトンネル電流を流す場合、これは超伝導体へのスピン配向準粒子の注入となることが知られている。特に S 層がスピン拡散長 (数十 nm~数 μm 程度) に比べ十分薄く、かつ両側の層の各スピンに関する状態密度が異なる場合、真中の S 層内部には up と down のスピンを持った電子の数が違う非平衡状態 (スピン蓄積状態) が実現され、これによってクーパー対が破壊されることが理論的に示されている。この現象はスピン注入によって超伝導が制御可能であることを意味する。実験的にはこれまで、スピン注入により超伝導体の臨界電流や超伝導ギャップエネルギーが低下することや、超伝導体の中でのスピン拡散の様子が報告されている。しかし、スピン蓄積による超伝導状態から常伝導状態への相転移についてはまだ詳しく調べられてはいない。

本研究ではバルク状態で分極率 P が 100% 近い値を示すマンガン酸化物、およびこれと結晶構造が類似してヘテロ接合を作りやすい銅酸化物高温超伝導体を用いて $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y/\text{Au}$ (LCMO/YBCO/Au) の F/S/N 2重トンネル接合膜を作製した。スピン注入電流の経路が薄膜の厚み方向になるようなデバイス構造を考案し、そのトンネル特性を測定することにより、この系での超伝導状態から常伝導状態への相転移について調べた。

実験で用いたデバイス構造はスパッタ法、フォトリソグラフィ法、ケミカルエッチング法、リフトオフ法を組み合わせることにより作製した。試料の断面概略図を図 1 に、上方向から撮った写真を図 2 に示す。まず 3 元スパッタ装置を用いて SrTiO_3 基板の上に LCMO、 LaAlO_3 、YBCO の順でヘテロエピタキシャル成長させることによって LCMO/YBCO のトンネル接合膜を作成した後、YBCO 層の上に絶縁体であるアモルファスの a-

YBCO 層を積層させる。

YBCO/a-YBCO 層のみをフォトリソグラフィ法とケミカルエッチング法を用いて微細加工 (代表的なサイズとしては $200\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$) した後、その周りにアモルファス a-YBCO を成膜する。最後にパターン化された Au 層を a-YBCO 上にスパッタ成膜することにより

LCMO/I/YBCO/I'/Au (I : LaAlO_3 、

I' : a-YBCO) の 2 重トンネル接合膜を得た。各層の代表的な厚さは LCMO 層 240nm、 LaAlO_3 層 55nm、YBCO 層 60nm、a-YBCO 層 8nm、Au 層 30nm である。

図 3 に LCMO と Au の間にトンネル電流 (I_{inj}) を流した場合の YBCO と LCMO 間のトンネル電流電圧特性 $V_T(I_{inj})$ を示す。 T_c ($\cong 84\text{ K}$) 以上ではほぼ線形な振る舞いを示すが、温度の下降とともに非線形

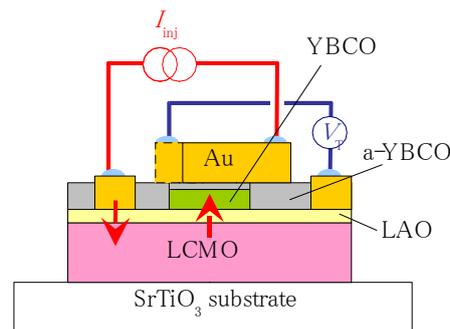


図 1 断面概略図.

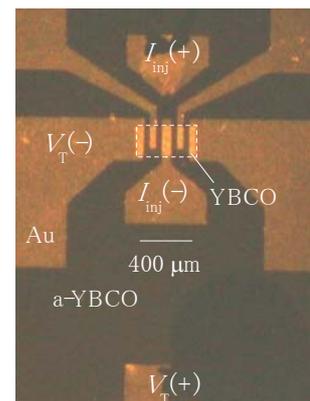


図 2 試料の写真.

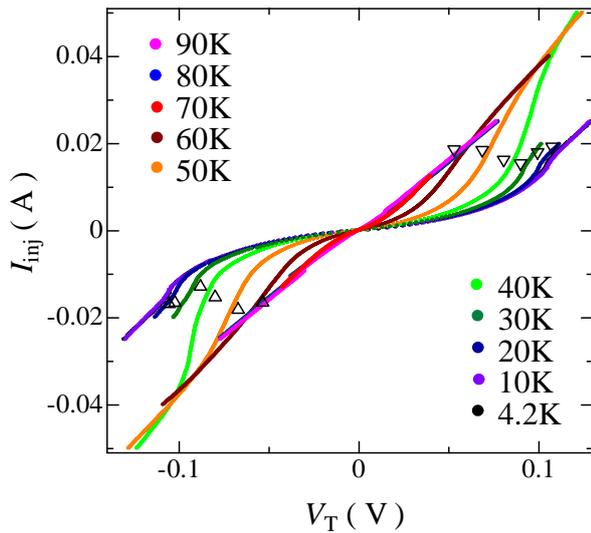


図3 $V_T - I_{inj}$ 特性.

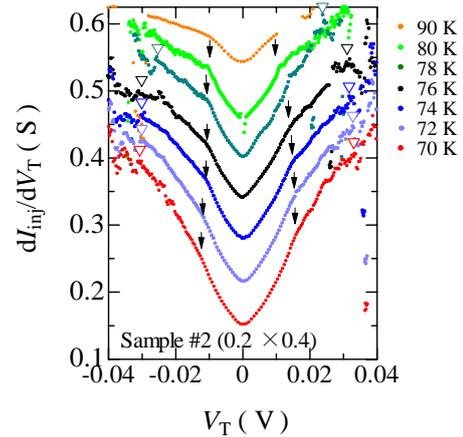


図4 dI_{inj}/dV_T vs V_T .

(80K を基準に 0.04S ずつ平行移動した)

な振る舞い（電流が正の領域では下凸、負では上凸の曲線）に変化する。これは超伝導ギャップの出現によるものと考えられる。実際、図3の低電圧側のデータを状態密度とエネルギーの関係に相当する dI_{inj}/dV_T vs V_T 特性にプロットしなおすと（図4）超伝導ギャップと思われるV字型の特性を示す。これより試料が良好なトンネル接合になっていることがわかる。図3で最も注目したいのは T_c 以下の温度の $V_T - I_{inj}$ 特性では V_T の増加とともに V_c （図3中三角印）で I_{inj} の急激な上昇が見られることである。この上昇は温度の下降とともに鋭くなり、特に50 K以下において”飛び”に近い変化となる。 V_c の値は10 Kにおいて105 mVに達することから、約20 mVと報告されているYBCOの超伝導ギャップの値とは異なる。 $V_T - I_{inj}$ 特性は高電圧側で、常伝導状態と同様にほぼ線形な振る舞いを見せるため、 V_c での急激な上昇はスピン蓄積による超伝導-常伝導相転移によるものの可能性が高い。スピン電流による相転移時の $V_T - I_{inj}$ 特性の変化に関しては、常伝導状態の線形的な振る舞いに連続的に近づく場合（2次相転移）と、不連続に飛ぶ場合（1次相転移）が理論計算により報告されている（前者はs波超伝導、後者は低温でのd波超伝導）。本研究の結果からは高温領域では前者に相当し、50K以下の低温領域では後者に相当するよう見える。このようなトンネル特性の変化を測定したのは本研究が初めてである。