

要旨

1. 背景と目的

超伝導体を強磁性体で挟んだ強磁性体/超伝導体/強磁性体(F/S/F) ヘテロ構造において、近接効果やスピンの蓄積効果を用いることにより、S 層の超伝導性が抑制出来る可能性が理論的に示されている。この抑制効果は、両側の F 層に用いる物質の分極率によって、磁化が反平行になる時に最小になる場合(分極率小[1])と最大(分極率大[2])になる場合の両方が理論的に予測されている。実験的にも、F 層に分極率の大きな $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(\text{Py})$ 、S 層に従来型超伝導体の Nb を用いた実験[3]では、F 層の磁化が反平行の時最も大きな T_c の減少が起きるが、逆に、F 層に分極率の小さな CuNi、S 層に Nb を用いた実験[4]では、F 層の磁化が反平行の時に T_c が増加する効果が報告されている。これらの従来型超伝導体を用いた系では、超伝導近接効果と準粒子スピン蓄積効果の両方を intrinsic に含んでいるため、その競合によってこのような違いが起これと考えられる。そこで、本研究では S 層としてコヒーレンス長 ξ が短く、近接効果の影響の小さい銅酸化物高温超伝導体の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ を、F 層として $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ と同じペロブスカイト構造を持ち、バルクでの分極率 P が 100%に達する Mn 酸化物強磁性体の $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_4$ を用い、F/S/F ヘテロ構造を作製することにより、この効果の検証を試みた。加えて本研究では、微細加工により薄膜の面内抵抗・面間抵抗の測定を両方行えるデバイス構造を作製し、それらの比較によりこの効果に対する知見を得ることを目的とした。

2. 実験

本研究では RF スパッタ法を用いて、 $\text{SrTiO}_3(100)$ 基板上に in-situ の状態で $\text{LCMO}(30\text{nm})/\text{YBCO}(19\text{nm})/\text{LCMO}(45\text{nm})$ ヘテロ構造を作製し、その後、フォトリソグラフィ法、ケミカルエッチング法、リフトオフ法を多段階に組み合わせることで微細加工し、デバイス構造の作製を行った。微細加工では、まず最下層の LCMO を残し、上の YBCO/LCMO 二層のみを $200\text{ }\mu\text{m} \times 400\text{ }\mu\text{m}$ にエッチングする。続いて、その周りに LCMO の電極部を除いて絶縁層として SiO_x をスパッタリングし、最後に Au を端子の形状にパターニングしてスパッタリングした。図 1 (a),(b)に代表的な試料のデバイス構造の断面図と上方から撮った試料写真を示す。

この試料では、上下の LCMO 層の成膜温度、膜厚を変え、上下の LCMO 層に保磁力差を持たせている。そのため、外部磁場を調節することによって、上下の LCMO 層のスピンの方向の制御が可能である。

実験は、SQUID 磁束計を用いた磁化測定、図 1 (a)中の赤と青の 2 パターンの電流経路それぞれについて、直流 4 端子法で行った磁場中の輸送特性の測定を行った。それぞれの結果を比較することにより、スピンの方向と T_c の関係を調べた。なお、いずれの測定でも磁場は膜面に平行にかけた。

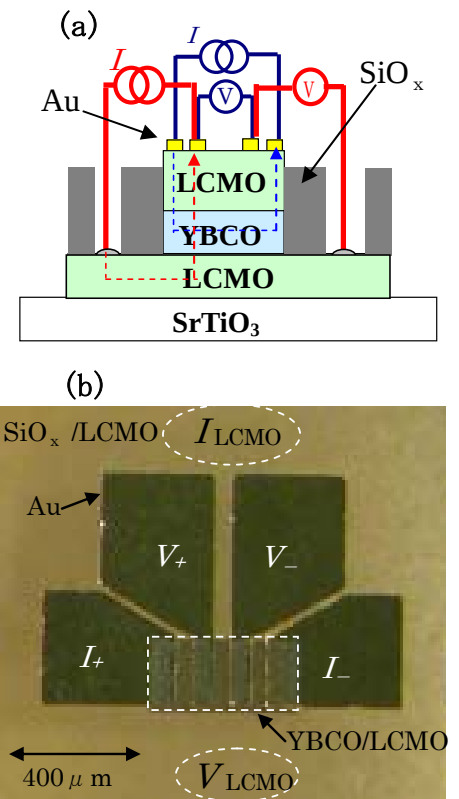


図 1 (a) 試料のデバイス構造の断面図。
(b) 上方からの試料写真

3. 測定結果と考察

図2に磁化の磁場依存性 $M(H)$ と、面内(CIP : current in-plane)で測定した電気抵抗の磁場依存性 $R_{CIP}(H)$ を重ねて示す。測定温度はどちらも 40 K であり、S 層の超伝導転移の midpoint である。 $M(H)$ 曲線には、およそ 200 ~ 300 Oe の磁場で小さなステップ状の振る舞いが観測された。このステップが現れる磁場で、上下の F 層の磁化が反平行になっていると考えられる。注目したいのは、この $M(H)$ のステップが起こる磁場で、 $R_{CIP}(H)$ に大きなピークが観測されることである。転移前においても、通常の LCMO 層間の GMR 効果によって同じ位置に僅かながらピークが観測され、その寄与も僅かながら含まれていると考えられる。しかし、LCMO 層と YBCO 層の抵抗率を用いて、3 層が並列になっていると仮定した計算では、LCMO 層のみの寄与によってこの転移中のピークを説明することは不可能であった。よってこのピークは S 層の超伝導が抑制され抵抗が上昇するためにおこる現象である。

図3には図2と同様に、40 K における磁化の磁場依存性 $M(H)$ と、面間(CPP : current perpendicular-to-plane)で測定した電気抵抗の磁場依存性 $R_{CPP}(H)$ を重ねて示す。 $M(H)$ 曲線にステップ状の振る舞いが現れる 200 ~ 300 Oe の磁場領域付近に着目すると、 $R_{CPP}(H)$ は一旦ピークをとった後、急激に減少し dip 状の振る舞いを示す。この dip は超伝導転移前では現れず、転移が進むに従って鋭くなっていくため、S 層の超伝導性に関与したものであると考えられる。面間の測定でこのような dip が現れるのは、F 層の磁化が反平行の時に、S 層の超伝導がスピン蓄積効果により抑制され、トンネルコンダクタンスが常伝導状態のものに近づいたと考えれば説明が付く。

本研究で行った CIP と CPP の測定は、F 層のスピンの方向の調節により、超伝導を制御できる可能性があることを示している。

参考文献

- [1] L. R. Tagirov, Phys. Rev. Lett. **83**, 2058 (1999)
- [2] A. I. Buzdin, et al., Europhys.Lett. **48**, 686 (1999)
- [3] A. Yu. Rusanov, et al., Phys. Rev. B **73**, 060505(R) (2006)
- [4] J. Y. Gu, et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 267001 (2002)

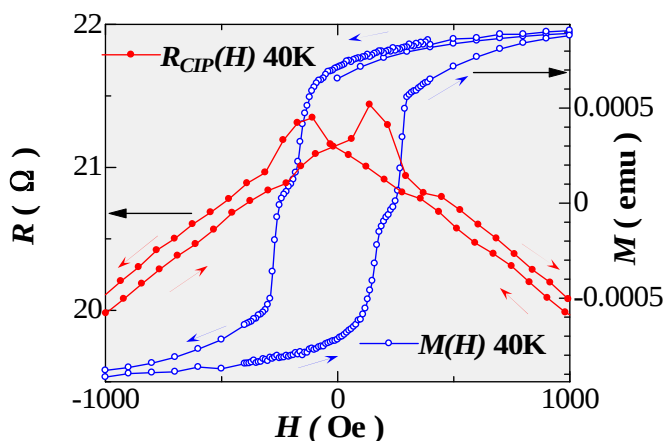


図2 40Kにおける、磁化の磁場依存性 $M(H)$ と、面内で測定した電気抵抗の磁場依存性 $R_{CIP}(H)$

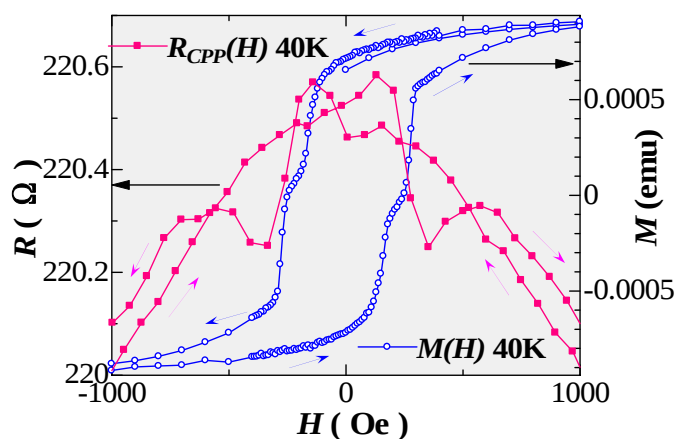


図3 40Kにおける、磁化の磁場依存性 $M(H)$ と、面間で測定した電気抵抗の磁場依存性 $R_{CPP}(H)$