強磁性体/超伝導体構造の製作とその特性に関する研究*

江原 祐樹^{*1}・日高 一幸^{*1}・岸田 悟^{*1}

Preparation and Characterization of Ferromagnet/Superconductor Structures

Yuki EBARA^{*1}, Kazuyuki HIDAKA^{*1} and Satoru KISHIDA^{*1}^{*1}Tottori University 4-101, Koyama-Minami, Tottori 680-8522, Japan

(Received October 28, 2004, Accepted January 8, 2005)

We deposited the ferromagnetic films, Ni or Fe, on the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO) thin films by rf magnetron sputtering technique, and investigated the effects of ferromagnetic films on superconducting characteristics in Ni or Fe/YBCO specimens. From the results, we found that the superconducting transition temperature decreased with increasing the thickness of the magnetic films, in other words superconducting characteristics were degraded by depositing the magnetic films on the high- T_c cuprate superconductors. This indicates that it is possible to fabricate weak electric coupling for Josephson junctions based on the cuprate superconductors by depositing the magnetic films on them.

1. はじめに

超伝導が発見されて以来、その応用に関する研究が活発に行なわれている。これは超伝導応用が、電力や医療、輸送、通信などの様々な分野にわたって高いポテンシャルを秘めているからである。その中で、超高感度磁気センサーとして利用される超伝導量子干渉素子 (SQUIDS) や単一磁束量子素子といった超伝導デバイスの分野においては、その基本素子となる Josephson 接合の製作が研究対象の一つに挙げられる。それは、接合の品質がデバイスの性能を大きく左右するためである。接合形成技術の条件としては主に、接合の特性が高いこと、再現性がよいこと、集積化する際に接合特性の歩留まりが大きいことなどが挙げられる。

金属超伝導体を用いた Josephson 接合においては、その接合技術はすでに確立されており、現在実用化に向けた研究段階にある^{1,2)}。一方、銅酸化物超伝導体を用いた Josephson 接合の製作方法については、現在研究されている主なものとして、粒界接合型³⁾、超伝導層/絶縁層/超伝導層 (SIS) 積層型⁴⁾、ramp edge 型⁵⁾などがある。これら銅酸化物超伝導体の Josephson 接合は高度な技術と複雑な作製工程を必要とするため、再現性などの課題を多く抱えている。

ところで、超伝導性は、超伝導体/非超伝導体界面で生じる近接効果によって抑制される。過去にこの効果を利用して金属超伝導体の Josephson 接合を形成した例⁶⁾がある。この方法は、非超伝導体を超伝導体上に堆積するのみであるため、積層型や ramp edge 型に比べ、非常に簡便である。銅酸化物超伝導体における近接効果についても、ペロブスカイト強磁性体/銅酸化物超伝導体超格子構造^{7,8)}や金/銅酸化物接合⁹⁾を用いた研究報告がある。

我々は、銅酸化物超伝導体上に堆積させる物質として単体元素の強磁性膜を用い、強磁性体/銅酸化物超伝導体構造の超伝導特性について調べた。

Fig. 1 Schematic picture of a ferromagnet/YBCO specimen.

2. 実験方法

Fig. 1 に、本研究で用いた強磁性体/ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO) 構造の模式図を示す。YBCO 薄膜上に堆積させる強磁性体には、Ni 及び Fe を用いた。c 軸配向した YBCO 薄膜 (THEVA 社製) の膜厚、ゼロ抵抗遷移温度、臨界電流密度はそれぞれ、300 nm, 93 K, 2.6 MA/cm² (at 77 K, self-field) であった。磁性膜は、rf マグネトロンスパッタリング法により堆積した。堆積条件は、ターゲット-基板間距離: 5 cm (on-axis), スパッタガス: Ar, ガス圧: 0.6665 Pa, rf 出力: 100 W 及び 50 W とした。尚、基板の加熱は行っていない。試料のゼロ抵抗遷移温度 T_c 及び臨界電流 I_c をそれぞれ、四端子法を用いて測定した抵抗-温度 (R-T) 特性及び電流-電圧 (I-V) 特性により評価した。R-T 特性の測定は、プローブ電流 1 mA で行い、また I-V 特性の測定は、77 K 及び 65 K, 自己磁場下で行った。電極には銀ペーストを用い、銀ペースト/YBCO 薄膜間の接触抵抗を小さくするために、酸素中で 500°C, 10 分間アニールを行った。YBCO 薄膜上に堆積した磁性膜の膜厚は、走査型電子顕微鏡 (SEM) 像により評価した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 2(a) に、Ni/YBCO 構造における T_c 及び I_c の Ni 膜厚依存性を示す。図より、rf 出力が 100 W の時、 T_c は Ni の膜厚がある厚さ (約 1500 nm) まで変化はなく、その後

* 平成16年10月28日 第45回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 鳥取大学大学院 工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目101番地)

Fig. 2 Plots of superconducting transition temperature T_c and critical current I_c as a function of ferromagnetic film thickness in (a) Ni/YBCO and (b) Fe/YBCO specimens. “■”, “△” and “+” indicate the T_c , I_c when the rf power of 100 W and 50 W were used, respectively.

Niの膜厚が増加するにつれて減少することがわかる。Ni (3800 nm)/YBCO 構造の T_c は約55 K となった。ここで、Ni(d_{Ni})/YBCO の d_{Ni} は、YBCO 薄膜上に堆積したNiの膜厚を表す。一方、 I_c はNi膜厚の増加とともに減少し、Ni (2800 nm)/YBCO 構造において、堆積前と比較して約2桁減少した。rf出力が50 Wの時では、Niの膜厚が増加しても、 T_c に変化はみられなかった。これらの結果から、100 Wと50 Wの結果にみられる違いは、ターゲットから叩き出された強磁性体の運動エネルギーの違いによるものと考えている。それは、スパッタガスArは、rf出力が大きくなるにつれて大きな運動エネルギーを持つため、Arによって叩き出された強磁性体の運動エネルギーも大きくなる。従って、強磁性体の堆積によってYBCO薄膜に与えるダメージは、rf出力が50 W時よりも、100 W時の方が大きいと考えられるからである。

Fig. 2(b)に、Fe/YBCO 構造における T_c 及び I_c のFe膜厚依存性を示す。 T_c 及び I_c のFe膜厚依存性は、Ni/YBCO 構造の場合と同様、膜厚の増加とともに減少する傾向を示した。

rf出力が50 Wの時では、強磁性膜堆積による超伝導の劣化が見られなかったため、非超伝導体/超伝導体間の近接効果は観測されていないことがわかる。この理由としては、強磁性膜/YBCO 薄膜界面が不均一、あるいは銅酸化物超伝導体のコヒーレンス長が非常に短い (<1 nm) ために、強磁

Fig. 3 Current-voltage characteristic of a Fe(2620 nm)/YBCO specimen at 77 K (solid line) and 65 K (dashed line). Critical current I_c at 77 K and 65 K were 120 mA, 850 mA, respectively.

性膜からYBCO薄膜への準粒子の侵入（染み出し）が小さいことが考えられる。

rf出力が100 Wの時、Fig. 2は2つの領域に分けてみることができる。 T_c が一定値（約93 K）を保ち、 I_c が大きく減少する領域(I)と強磁性膜が増加するにつれ、 T_c , I_c ともに減少する領域(II)である。領域(I)における I_c の大きな減少は、強磁性膜堆積がYBCO薄膜表面へダメージを与え、超伝導電流の断面積が減少したためと考えられる (I_c の減少割合から、ダメージを受けた部分は膜の約80%と見積もられる)。一方、領域(II)における T_c 及び I_c の減少は、スパッタ時の温度上昇に伴い強磁性体物質がYBCO薄膜内へと拡散し、YBCO薄膜中のCuと置換したことが原因と考えられる。また、Ni/YBCO及びFe/YBCOの結果を比較すると、 T_c が低下し始める強磁性膜厚や低下の傾きが僅かに異なる。前者については、強磁性体の固容量の違いによるものと考えられる (NiよりもFeの固容量は大きい¹⁰⁾)。後者については、強磁性体が置換するCuサイトの違いによるものと考えられる。Feは、Cu-O鎖及びCu-O面両方のCuと置換するのに対し、NiはCu-O面のCuと置換すると一般に考えられている¹¹⁾。銅酸化物の超伝導はCu-O面が重要な役割を担っている事を考えると、Ni/YBCOがFe/YBCOよりも T_c の低下が大きいことがこれで説明できる。

Fig. 3に、Fe(2620 nm)/YBCO 構造のI-V特性 (at 77 K及び65 K、自己磁場下)を示す。図より、試料の臨界電流 I_c は約120 mA及び850 mAであり、特性の構造は、接合形成を示すRSJ型ではなく、flux-creep型であった。

4. ま と め

我々は、銅酸化物超伝導体YBCO薄膜上に強磁性体を堆積し、強磁性体/超伝導体構造の超伝導特性について調べた。その結果、ゼロ抵抗遷移温度 T_c 及び臨界電流 I_c が、強磁性膜の膜厚を増加させるにつれ、減少することを明らかにした。これは、強磁性体によって与えられたYBCO薄膜へのダメージあるいは拡散によるものと考えている。今後、強磁性体堆積による超伝導の抑制に関する詳細な機構を明らかにするために、更なる研究が必要であると考えている。

〔文 献〕

- 1) S. Nagasawa, K. Hinode, M. Sugita, T. Satoh, H. Akaike, Y. Kitagawa and M. Hidaka: *Supercond. Sci. Technol.*, **16** (2003) 1483.
- 2) A. A. Joseph, S. Heuvelmans, G. J. Gerritsma and H. G. Kerkhoff: *Physica C*, **403** (2004) 103.
- 3) D. Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart and F. K. LeGoues: *Phys. Rev. Lett.*, **61** (1988) 219.
- 4) T. Kito, Y. Yoshinaga, S. Izawa, M. Inoue, A. Fujimaki and H. Hayakawa: *Physica C*, **378-381** (2002) 1322.
- 5) J. B. Barner, B. D. Hunt, M. C. Foote, W. T. Pike and R. P. Vasquez: *Physica C*, **207** (1993) 381.
- 6) H. A. Notarys and J. E. Mercereau: *J. Appl. Phys.*, **44** (1973) 1821.
- 7) Z. Sefrioui, D. Arias, V. Pena, J. E. Villegas, M. Varela, P. Prieto, C. Leon, J. L. Martinez and J. Santamaria: *Phys. Rev. B*, **67** (2003) 214511.
- 8) P. Przyslupski, I. Komissarov, P. Dluzewski, J. Pelka, E. Dynowska and M. Sawicke: *Physica C*, **387** (2003) 40.
- 9) Amos Sharoni, Itay Asulin, God Koren and Oded Millo: *Phys. Rev. Lett.*, **92** (2004) 017003.
- 10) J. M. Tarascon, P. Barboux, P. F. Miceli, L. H. Greene and G. W. Hull: *Phys. Rev. B*, **37** (1988) 7458.
- 11) Eiji Takayama-Muromachi, Yoshishige Uchida and Katsuo Kato: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26** (1987) 2087.