

酸化物高温超伝導体を用いた電界効果型超伝導三端子デバイスの基礎研究

東北大学未来科学共同研究センター 山下 努

【はじめに】

高温超伝導体の発見以後もジョセフソン素子が超伝導エレクトロニクスを中心であることは言うまでもないが、それに加えて高温超伝導体を利用した三端子デバイスの研究も活発化している。その要因として、応用面から入出力分離に優れしかも利得の得られる能動素子の開発が望まれていること、高温超伝導体の低いキャリア密度($\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$)や金属的から半導体的まで変化する多様な電気伝導性制御の可能性等が挙げられる。戸の中で我々は電界による高温超伝導体のキャリア密度制御の可能性に着目し、電界効果型三端子デバイス(SuFET)の研究を行った。このデバイスは基本的にMIS(M:金属, I:絶縁体, S:半導体)FETの半導体を高温超伝導体で置き換えた構造をしており電界効果によってチャンネル(高温超伝導薄膜)に流れる超伝導電流あるいは常伝導電流を制御しようとするものである。我々の提案するデバイスの特徴は、ジョセフソン接合として機能する高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) の結晶粒界では酸素欠損によってキャリア密度が低下し電界効果が強調されることを利用しようとする点である。これにより単なる電界効果型デバイスにとどまらず高速低消費電力といったジョセフソン素子の特性と電界制御性を併せ持つ新しいタイプの能動デバイスへの応用が期待される。

【研究成果】

デバイスの概念図を図1に示す。電界効果チャンネルは、ソースおよびドレインとして機能する2つ超伝導YBCO粒子を人工粒界を横切って結ぶように配置される。チャンネルと誘電体層を挟んで相対するゲート電極に電圧を印加することによって粒界のキャリア密度を変調し、ドレイン-ソース間の電流を制御する。このデバイスを実現するためには、実際の人工粒界における電界効果を検証する必要がある。バイクリスタル SrTiO_3

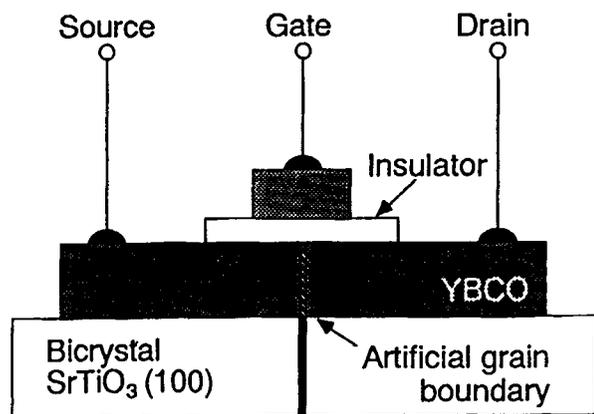


図1 粒界接合型超伝導電界効果型デバイスの概念図

基板を用いて人工粒界を持つYBCO薄膜を製作し、人工粒界における電界効果を実証すると共に粒界のキャリア密度などの基礎データの収集を行った。

5.8Kで測定した試作試料のチャンネル抵抗-ゲート電圧依存性を図2に示す。ドレインおよびソースのYBCO粒子は測定温度で超伝導転移している。しかし、図中に示したI-V曲線から分かるように粒界チャンネルでは超伝導電流は観測されず、したがって、このチャンネル抵抗は超伝導YBCO粒子に挟まれた常伝導粒界の電気抵抗を反映している。チャンネル抵抗が負極性のゲート電圧に対して低下し、逆に正極性のゲート電圧に対して上昇する傾向は、MIS(M:Metal, I:Insulator, S:YBCO)電界によってYBCO-STO界面に誘導された電荷によってYBCO層内のキャリア(正孔)密度が増減した結果として理解できる。図中に破線はYBCOのキャリア密度 n をバルク中の値と仮定して得たYBCO内の電界による誘導電荷密度 Δn の n に対する割合 $\Delta n/n$ である。これに比べてチャンネル抵抗の変化 $\Delta R/R$ が大きいのは常伝導状態にある人工粒界のキャリア密度がバルク中に比べて低いためで、 $\Delta R/R$ の実験値から粒界のキャリア密度 n_g として $2\sim 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ とバルクのYBCOに比べて約一桁低い値を得ている。

本研究では、人工粒界部分にチャンネルを設けることによってより大きな電界効果が得られることを明らかにした。本実験に供した試料はゲート絶縁層、YBCO層ともに厚いため基礎実験の域を出ないが、現在の成膜技術で十分到達可能なYBCO:10nm, STO:50nm素子が作製できれば、0.1V程度のゲート電圧で50%近いチャンネル抵抗の変調が得られることになる。また、薄膜化によるMIS電界の上昇は、YBCO人工粒界の常伝導特性だけでなく、臨界電流など超伝導特性の制御を可能にするものと期待され、現在引き続き研究を行っている。

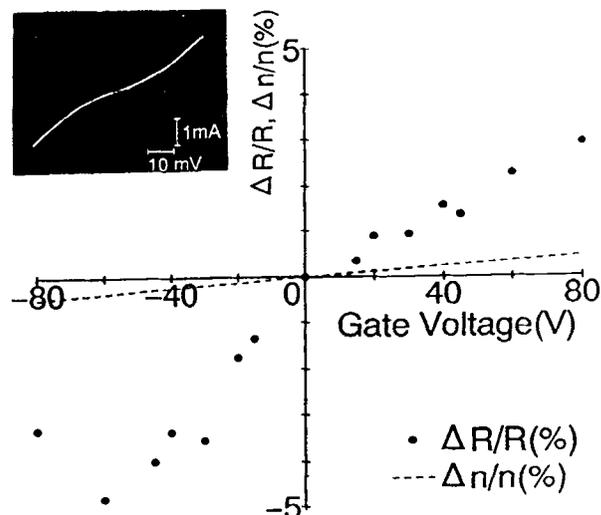


図2 5.8Kで測定した粒界の常伝導抵抗のゲート電圧依存性。挿入図は $V_g=0$ (V)のときのI-V特性