

酸化物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

東北大学電気通信研究所 山下 努

アブストラクト

高温超伝導体における電界効果の主な研究対象となってきた<001>配向単結晶YBCO薄膜の場合、電界遮蔽長は高々数Åであり、当初から十分な電界効果発現のためには極薄膜あるいは何らかの弱結合の導入が必要と考えられてきた。本研究では、特にジョセフソン接合として機能するYBCO傾角粒界弱接合における電界効果という点に関して検討を進めてきた。その結果、STOバイクリスタル基板上に作製したYBCO人工粒界ジョセフソン接合にゲート電界を印加したときにキャリア密度の変調と同程度の I_c の変調を得ており、またこれとは別に接合の電流電圧曲線上に観測される自己共振ステップが電界によって大きく移動することを見出している。実験に供した粒界接合の共振周波数は数十GHzにあり、16keVの電界に対して二倍近い共振周波数の変化が観測されている。共振周波数が増える機構は、電界によって粒界の実効誘電率 ϵ_{eff} が変化したと考えるのが妥当であるが詳細は明らかでない。そこで自己共振現象と同じように粒界の誘電的性質を反映すると考えられる電圧電流特性に現れるヒステリシス現象に着目して、温度依存性を含めて粒界の誘電的性質について検討した。その結果、 ϵ_{eff} は4.2Kで30~40であり、その温度依存性は基板であるSTOの誘電率($\epsilon_{STO} \approx 15,000 \sim 20,000$ at 4.2K)の影響だけでは説明できないことが判明した。

1. はじめに

低いキャリア密度と短いコヒーレンス長に特徴付けられる酸化物高温超伝導体における電界効果は、電荷輸送を電界効果によって制御するタイプのデバイス開発といった観点から有望視されるだけでなく、高温超伝導材料のキャラクタリゼーションの手段として精力的に研究されている⁽¹⁻⁸⁾。一方、酸化物高温超伝導体の傾角粒界は、弱接合として機能することからYBCOなどのc軸配向薄膜を用いてジョセフソン接合を実現する手段として広く用いられている。こういった人工粒界接合は、in-plane型であるため接合部に電界を印加する構造のデバイスに適用することが可能であり、単結晶薄膜に比べて大きな電界感受性が期待できる^(9,10)。こういった背景か

ら、本研究は電界効果型超伝導三端子デバイスの開発に資することを目的に、YBCO人工粒界の接合特性に及ぼす電界効果について基礎的知見を収集することを課題としている。まず超伝導粒子間の粒界を横切る常伝導電流に対する電界効果について検討した。これに加えてジョセフソン接合として機能するYBCO人工粒界の電流電圧特性や高周波特性に対する電界効果について研究をおこなった。

2. 人工粒界の電気伝導に及ぼす電界効果

最初に、常伝導状態のYBCO単結晶薄膜と人工粒界の電気伝導に及ぼす電界効果の差を検証することを目的に、図1に示すようなバイクリスタルSTO基板（粒界傾角、 $\theta=36.8^\circ$ ）を絶縁層とした逆MIS構造のデバイスを用いて常伝導状態のYBCO薄膜と、超伝導転移したYBCO薄膜粒子間にある人工粒界を横切って流れる常伝導電流に及ぼす電界効果を調査検討した。

超伝導状態のYBCO粒子間の粒界を横切って流れる常伝導電流に対する電界効果を測定した結果、膜厚約1000Å、粒界チャンネルの幅約300nmの試料に対して図2に示すように粒界の常伝導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ゲート電圧依存性を得た。この傾向は、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)密度が変調されたことを示唆している。図2のデータを基に、粒界の電気伝導が自由キャリアモデル $\sigma = ne\mu$ （但し、 σ : 電気伝導度、 n : キャリア密度、 e : 素電荷、 μ : 移動度）に従うとして電界によって誘導される電荷量 Δn と測定された粒界の抵抗の変化 ΔR から、粒界のキャリア密度、 n は、 $2 \sim 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ と見積もられた。このキャリア密度は、同様に電界効果から見積もられたYBCO粒子のそれ($n=3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$)に比べてほぼ一桁も小さい。キャリア密度の低下の原因として、粒界拡散によって粒界近傍の酸素欠損が単結晶粒子内部に比べて促進されることが考えられる。粒界のキャリア密度が小さいことが、電界効果の強調に貢献していると考えられ、粒界の電界感受性が優れていることが立証された^(11,12)。

引き続きジョセフソン接合として機能するバイクリスタル人工粒界の接合特性に及ぼす電界効果に関して研究を行った。

3. 人工粒界ジョセフソン接合の電界効果

図1と同構造のバイクリスタルSTO基板上に作製した膜厚600Å、接合の幅30nmの人工粒界ジョセフソン接合の4.2KにおけるI-V特性を図3に示す。一連の接合の $I_c R_n$ 積はこの接合同様に約0.3mV($I_c \approx 50 \mu\text{A}$, $R_n \approx 6 \Omega$ for this junction)程度であり大きなヒステリシスが特徴的である。

ゲート電圧を印加したときの I_c の変化は、図4に示すように僅か数%であるが、

負極性のゲート電圧によって上昇し、正極性のゲート電圧を印加したときには低下する傾向は、期待されるキャリア密度の変調 ($\Delta n/n$ 数%) とそれに付随するであろうオーダー・パラメータの変化と矛盾しない。

これとは別に本研究では、電界によって粒界接合の誘電的性質が大きく変化することを見出した。例えば、粒界ジョセフソン接合のI-V特性には、図5に示したようなcoplanar slot型共振器と見なせる粒界の構造と交流ジョセフソン効果に伴う自己共振構造(Fiske Steps)が現れる⁽¹³⁾。接合に電界を印加すると図6と図7に示したdV/dI-V特性の変化からも明らかなようにステップ電圧すなわち共振周波数が大幅に変化する。共振ステップ電圧 V_n は次式で与えられる。

$$V_n = n \frac{h}{2e} \frac{c}{2w} \sqrt{\frac{l}{e_{eff}^2 d}} \quad (1)$$

ここに、 w は接合の幅、 d は粒界の幅、 e は素電荷、 c は光の速度、 h はプランク定数、 e_{eff} は粒界の実効誘電率そして $l = d + 2\lambda$ (但し、 λ は磁場侵入長) である。粒界の幅 d を 10\AA とすると図5に見られる共振ステップの電圧 V_n から電界が印加されていないときの粒界の実効誘電率 e_{eff} は約40と見積もられ、Mannhart et alの得た値5000とは一致しない⁽¹⁴⁾。電界による共振ステップ電圧の変化は e_{eff} の変化が主な原因と考えられ、その結果、 e_{eff} は約 16 kV/cm ($V_g = 80\text{V}$)の電界強度に対してゼロ電界のときの約半分にまで低下すると想像される (Fig.8)。

この他にも粒界接合に電界を印加すると接合の静電容量が変化するために図3に見られるようなI-V特性のヒステリシスが変化する。McCumberパラメータ $\beta_c = 2eI_c R_n^2 C / h$ から粒界接合の静電容量 C を求め粒界の実効誘電率 e_{eff} を評価した (Fig.8)⁽¹⁵⁾。その結果、電界が印加されていない場合の e_{eff} は約30と求められ、また、約 16 kV/cm の電界によってやはり半分近くまで低下することが示唆された。誘電率を評価する2つの方法の周波数領域が全く異なっているにもかかわらず、これらの値はよく一致している。

4. まとめ

人工粒界ジョセフソン接合における電界効果について調査・研究を行った。その結果、電界効果によって期待されるキャリア密度の変調と同程度の I_c の変調を確認した。またその他に、電界によって粒界の誘電的性質が変化し、粒界の高周波共振特性が大きく変化することを見いだした。高周波共振周波数とI-V特性のヒステリシスから評価した実効誘電率 e_{eff} の電界依存性は、 e_{eff} に対するSTO基板の寄与を想像させるが、STOの非常に大きな誘電率 ($\epsilon_{STO} \approx 15,000 \sim 20,000$ at 4.2K ⁽¹⁶⁾) を考えると、 $e_{eff} = 30 \sim 40$ という値はどちらかというところまで報告されているYBCOの誘電率そのものに近い^(17,18)。粒界の誘電率は、粒界ジョセフソン接合の応用面から重要なパラメータであると考えられ、実効誘電率の電界依存性等について更に検討を進め

る必要がある。

参考文献

- (1) A.T.Fiory, A.F.Hebard, R.H.Eick, P.M.Mankiewich, R.E. Howard, and M.L.O'Malley:Phys.Rev.Lett., 65, 3441(1990).
- (2) U.Kabasawa, K.Asano, T.Kobayashi, Jpn.J.Appl.Phys., 29, L86(1990).
- (3) A.Levy, J.P.Falck, M.A.Kastner, J.Appl. Phys. , 69, 4939(1991).
- (4) J.Mannhart, J.G.Bednorz, K.A.Muller, and D.G.Schlom, Z.Phys.B, 83, 307(1991).
- (5) J.Mannhart, Modern Phys. Lett B6, 5555-571(1992).
- (6) X.X.Xi, Q, Li, C.Doughty, C.Kwon, S.Bhattacharya, A.T. Findikoglu, and T.Venkatesan, Appl. Phys. Lett., 59, 3470-3472(1991).
- (7) X.X.Xi, D.A. Walkenhorsts, S.N.Mao, Q.Li, and T.Venkatesan: Appl. Phys. Lett., 61, 2353(1992).
- (8) A.Walkenhorst, C.Doughty, S.N.Mao, X.X.Xi, Q.Li, and T.Venkatesan, IEEE trans. on Applied. Supercond., 3, 2929(1993).
- (9) I.Burlachkov, I.B.Khalfin, B.Y.Shapiro, Phys. Rev. B48, 1156-1159(1993).
- (10) J.Chen, T.Yamashita, H.Sasahara, H.Suzuki, H.Kurosawa, and Y.Hirotsu: IEEE Trans. on Applied. Supercond., 1, 102(1992).
- (11) X.X.Xi C.Doughty, A.Walkenhost, C.Kwon, Q.Li, and Venkatesan, Phys. Rev. Lett., 68, 1240(1992).
- (12) H.Takagi, S.Üchida, H.Iwabuchi, S.Tajima, and S.Tanaka: Jpn. J.Appl. Phys, Series 1, 6, 171(1988).
- (13) A.Barone and G.Patemo, Physics and Application of the Josephson Effects, John Wiley and Sons, New York, (1989).
- (14) J.Mannhart, R.Gross, K.Hipler, R.P.Huebener, C.C.Tsei, P.Chaudhari, and D.Dimos, Science, 245, 839(1989).
- (15) D.E.McCumber, J.Appl.Phys., 39, 3113(1968).
- (16) H.E.Weaver, J.Phys. Chem. Solids, 11, 274(1959).
- (17) Z.Trybula, J.Stankowski, and Baszynski, Physica C, 156, 485-488(1988).
- (18) D.C.Tiwari and Rashmi Gupta, Mod. Phys. Lett. B,7,1153(1993).

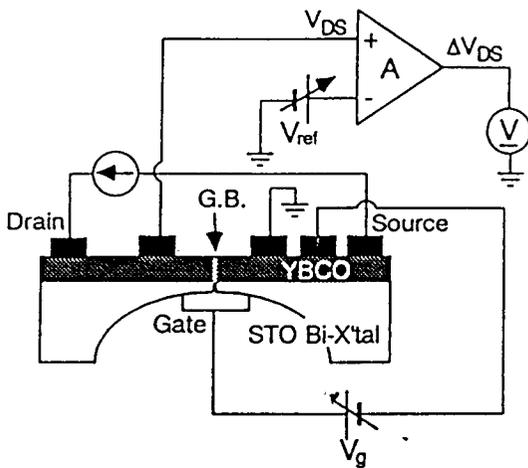


Fig.1 Schematic view of a sample and a circuit outline for field effect measurement.

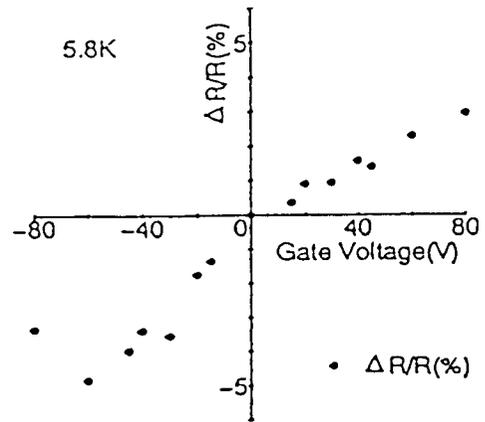


Fig. 2 Field effect modulation on normal-state resistivity of grain boundary although adjoining grains are in superconducting-state.

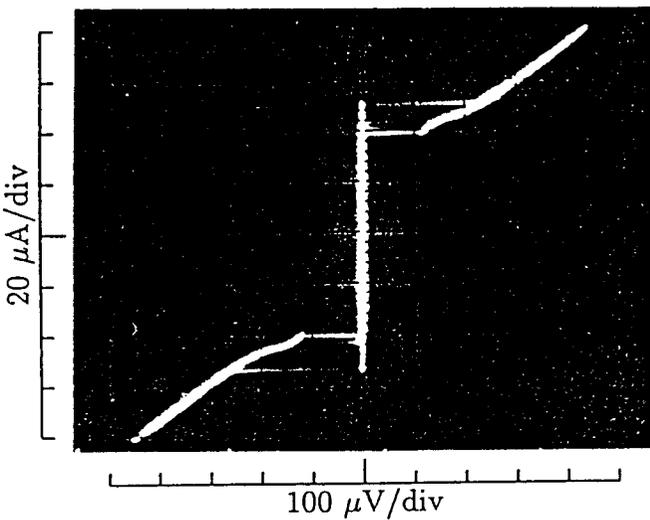


Fig. 3 Hysteretic I-V curve measured for the field effect Josephson junction with $V_g=0$ at 4.2K.

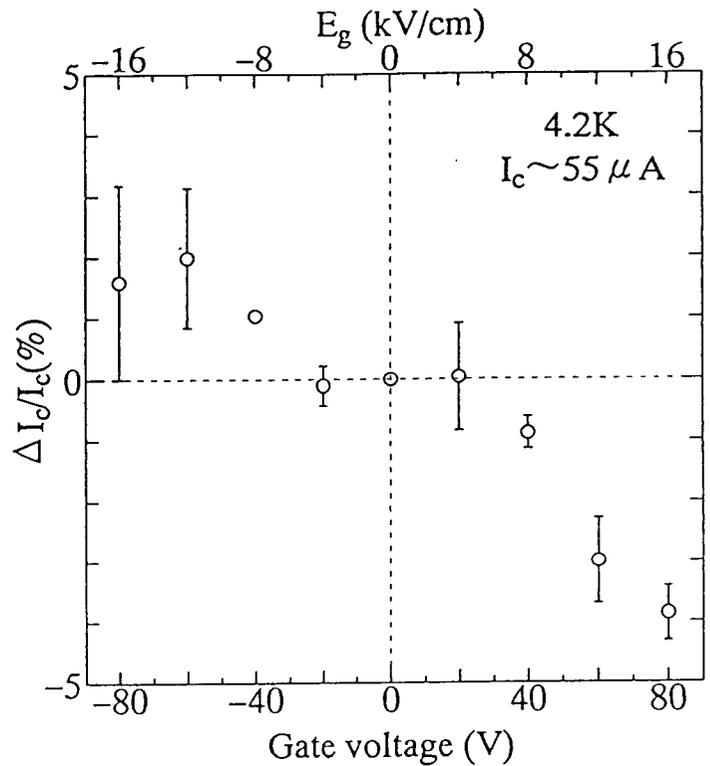


Fig. 4 Relative changes in the critical current I_c versus gate voltages.

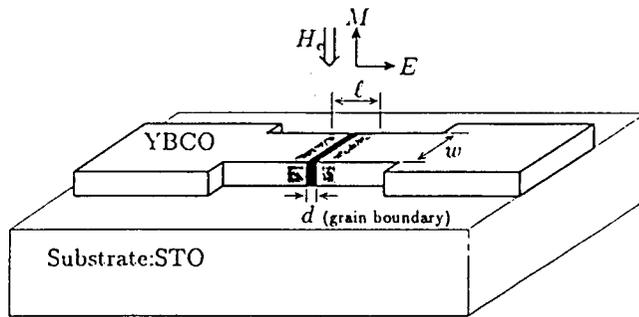


Fig. 5 Schematic drawing of the coplanar rf transmission line consist of the grain boundary

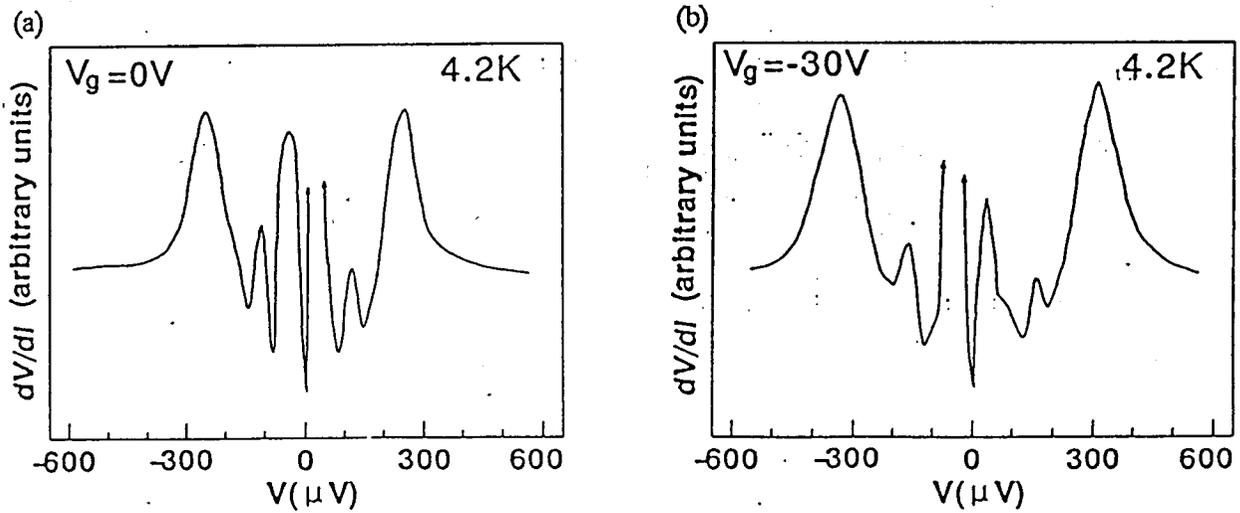


Fig. 6 dV/dI - V curves measured for the same sample of Fig.3 with (a) $V_g=0$ and (b) $V_g=-30V$

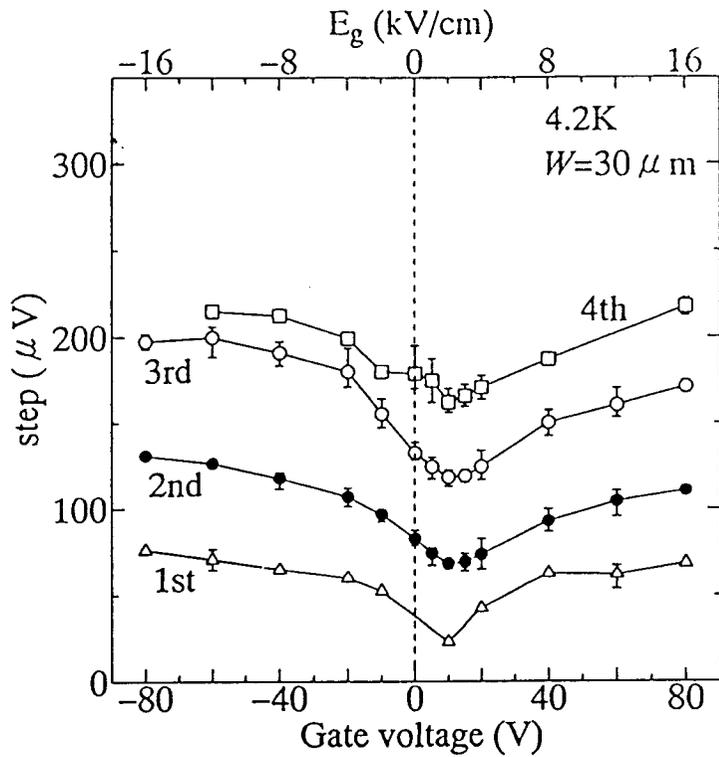


Fig. 7 Gate voltage dependence of step voltages corresponding to resonance frequencies of the grain boundary junction with the width of $30 \mu\text{m}$.

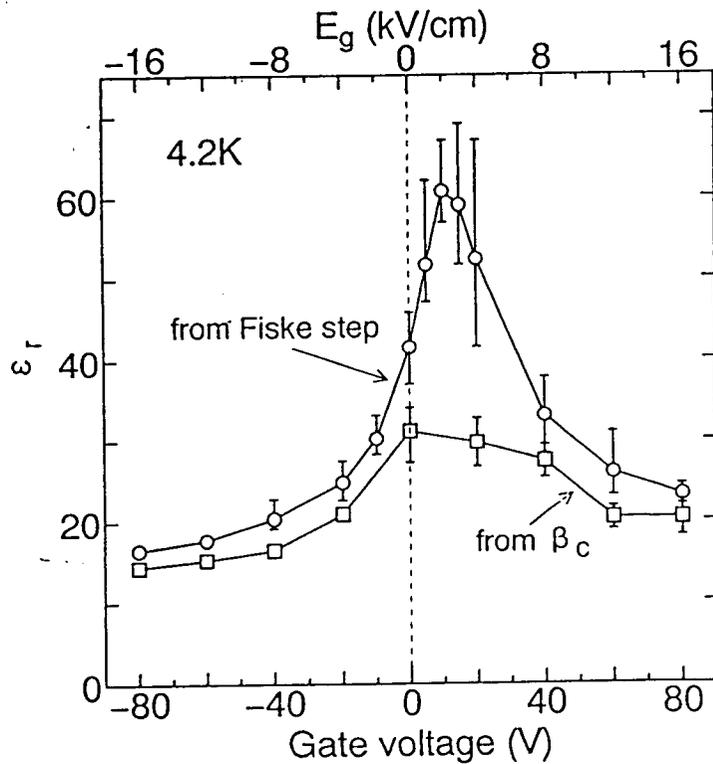


Fig. 8 Gate voltage dependences of effective dielectric constants obtained from of the second Fiske step and hysteresis of I-V curves.