

Electrical Characteristics and Microwave Properties of MgO Bicrystal Josephson Junction with Polyvinylidene Fluoride Gate Electrode

Yongju Yun ^{a,b}, Hyeoungmin Kim ^a, Gwangseo Park ^{*,a}, Jin-Tae Kim ^b

^a Sogang University, Seoul, Korea

^b Korea Research Institute of Standards and Sciences, Taejon, Korea

Polyvinylidene Fluoride 를 게이트 전극으로 이용한 MgO bicrystal Josephson junction 의 전기 특성 및 마이크로파 특성 연구

윤용주 ^{a,b}, 김형민 ^a, 박광서^{*,a}, 김진태 ^b

Abstract

We have fabricated a high-Tc superconductive transistor with polyvinylidene fluoride (PVDF) gate electrode on MgO bicrystal Josephson junction by spin-coating method. The PVDF ferroelectric film is found to be suitable for a gate electrode of the superconductive transistor since it has not only small leakage current but also high dielectric constant at low temperature. For the application of superconducting-FET, we investigated millimeter wave properties (60 GHz band) of the Josephson junction with PVDF gate electrode.

Keywords : Superconductive transistor, Millimeter wave, PVDF ferroelectric material.

I. 서론

1950년대 중반 이후 초전도 삼단자 소자 (superconducting three terminal devices)의 연구개발이 시작되었는데 그 중 트랜지스터가 전류 증폭과 전압 이득을 얻을 수 있다는 장점 때문에 초전도 트랜지스터가 중요시되었다. 초전도 전자 소자는 마이크로파 소자, SQUID, 조셉슨

컴퓨터(Josephson computer) 등으로 응용 가능성이 큰데, 이들 소자와 함께 사용할 수 있는 증폭소자가 필요하다. 초전도 트랜지스터는 이런 목적에 알맞는 소자라 할 수 있다.

초전도 트랜지스터는 기존의 반도체 소자에 비해 다음과 같은 장점을 가지고 있다[1].

첫번째로, 드레인-소스 채널(drain-source channel)에 초전도체를 이용하므로 저항으로 인한 손실이 없는 저 손실 (low loss), 고 이득 (high gain)을 얻을 수 있다. 두번째, 초전도체를 이용하므로 대용량으로 사용 가능하다. 세번째,

*Corresponding author. Fax: +82 2 703 7737

e-mail: gpark@ccs.sogang.ac.kr

높은 주파수 대역에서 양질의 특성을 나타내므로 마이크로파 회로에 적용 가능하다. 그리고, 초전도 트랜지스터는 기존의 초전도 전자소자와 같은 박막에서 공정이 가능하기 때문에 집적화가 용이하다는 장점이 있다.

최근에는 조셉슨 접합과 결합된 조셉슨 전계 트랜지스터의 연구 개발이 활발한데[2], 향후 조셉슨 발진기나 조셉슨 믹서 등 통신소자로서의 응용도 유망하며 증폭기, 변조기로서의 역할이 기대된다.

현재 연구중인 초전도 전계 트랜지스터에는 높은 임계 온도와 안정성으로 인해 구리계 산화물 초전도체인 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO)가 많이 쓰이는데, $SrTiO_3$ 는 YBCO의 기판으로는 최적의 조건을 가지고 있는 물질이기 때문에 게이트 유전물질로 많이 쓰인다[3] - [5]. 하지만 고온초전도 마이크로파 소자 제작에 사용되기에는 유전상수가 너무 큰 $SrTiO_3$ 는 부적당하다.

본 연구에서는 이를 대체할 수 있는 물질로 강유전체인 PVDF를 게이트 전극으로 사용하였다. PVDF는 여러 가지 형태의 분자결정구조를 갖는데 제작 과정 및 처리 조건에 따라 α , β , γ , δ 의 네 가지 종류의 상을 얻을 수 있다. 여기서는 네 가지상 중에서 dipole moment가 가장 큰 β 상을 게이트 전극으로 사용하였다.

본 실험에서는 PVDF가 트랜지스터의 게이트 전극으로 적합한 β 상을 형성하였는지를 X-ray diffraction(XRD) 실험하여 확인하였고, 게이트 전극으로 전류가 침투하는지 여부를 누설전류(leakage current) 측정을 통해 확인하였다.

II. 실험방법

고온초전도 트랜지스터를 제작하기 위해, MgO bicrystal 기판 위에 고온초전도 YBCO 조셉슨 접합을 제작한 후, spin-coating법을 이용하여 강유전체인 PVDF를 게이트 전극으로 제작하였다.

Pulsed laser deposition법으로 MgO 쌍결정 기판 위에 YBCO를 증착한 후 photolithography와

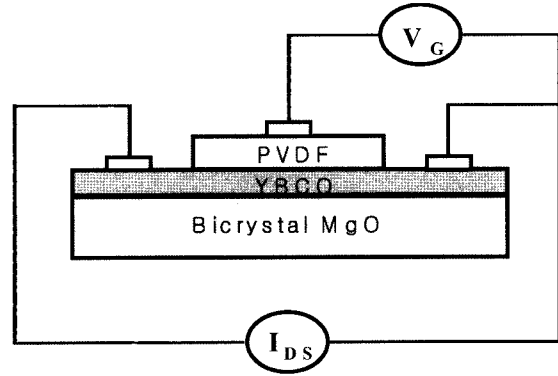


Fig. 1. Schematic diagram of High- T_c superconductive Transistor with the MgO bicrystal Josephson junction

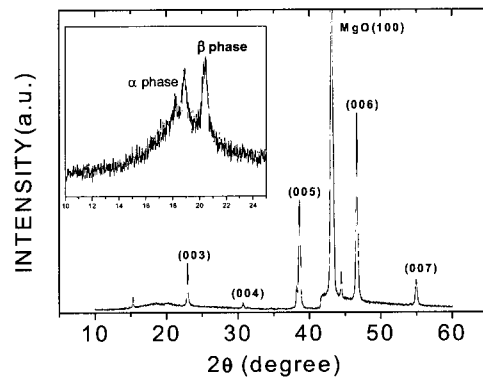


Fig. 2. XRD pattern of PVDF gated High- T_c superconductive transistor with the MgO bicrystal Josephson junction. The inset shows the XRD pattern of the ferroelectric PVDF material.

ion milling 을 통해서 고온초전도 조셉슨 접합을 제작하였다. 증착된 YBCO 박막의 임계온도는 87 K 였으며, 임계전류밀도는 15 K 에서 약 $10^6 \sim 10^7$ A/cm² 로 양질의 박막임을 알 수 있었다. 제작된 고온초전도 조셉슨 접합은 전기적인 특성인 임계전류와 상저항을 측정하였고, 밀리미터파 특성인 사피로 계단 등을 측정하였다. 측정된 임계전류(I_c)는 약 1 mA 이며, 상저항(R_N)은 0.22 Ω 이었다. 사피로 계단은 밀리미터파 대역인 60 GHz 의 전자기파를 발생하는 건다이오드(gunn diode)를 사용하여 측정하였고, 쪼여준 밀리미터파 세기는 0.02 mW ~ 64.5

mW 까지 증가시키며 측정하였다. 측정된 최대 발생 주파수는 약 360 GHz 임을 그래프를 통해 알 수 있었다.

강유전체인 PVDF를 고온초전도 트랜지스터의 게이트 전극으로 제작하기 위해 spin-coating 방법을 이용하였다. PVDF를 spin-coating 하기 위해 용매인 DMF (dimethylene flouride)와 혼합하여 사용하였다. 본 실험에서 적합한 β 상을 얻기 위해 여러 비율로 제작한 결과, PVDF powder 1.5 g : DMF 4.5 ml의 비율에서 XRD 및 leakage current 특성이 최적임을 알 수 있었다. PVDF powder와 용매 DMF는 진동형 stirrer를 이용해서 약 20분 혼합한 후, 24시간 동안 암실에서 stirrer를 이용해서 회전시켜 혼합하였다. 혼합이 끝난 후 제작된 MgO Bicrystal 조셉슨 접합의 국소부위에 spin-coating법을 이용해서 증착 한 후에 50 °C에서 24 시간 열처리 하여 용매를 제거하고, PVDF의 녹는점인 166 ~ 170 °C 보다 큰 200 °C에서 10 분 동안 열처리 해주었다. β 상을 형성하기 위해 냉각된 증류수를 이용하여, 급냉(얼려져 있는 증류수) 또는 서냉(상온 상태의 증류수)의 두가지 과정을 거쳤다. 급냉 및 서냉 과정 중 기판과 PVDF가 분리되는지는 SEM 측정을 통해 확인해 보았다. 그 후 120 ~ 160 °C 의 온도영역에서 10 °C 간격으로 한시간씩 열처리하는 과정을 가졌다. 제작된 고온초전도 트랜지스터는 Fig. 1의 형태로 제작하였다.

III. 결과 및 논의

Fig. 2는 고온초전도 트랜지스터 위에 제작된 PVDF의 X-ray 회절 분석 결과를 나타낸 것이다[6]. 그림에서 (001)방향의 peak는 고온초전도체인 YBCO 박막의 peak이며, 가장 큰 peak는 MgO 기판의 peak 임을 알 수 있었다. 상대적으로 강유전 물질인 PVDF는 peak의 세기가 너무 작아 왼쪽 위의 작은 창에 확대하여 나타내었다. 본 실험에서는 PVDF 1.5 g: DMF 4.5ml의 비율에서 dipole moment가 가장 큰 β 상을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. β 상 결정의 peak는 20.7 °에서 나타났으며, 이는 보고된

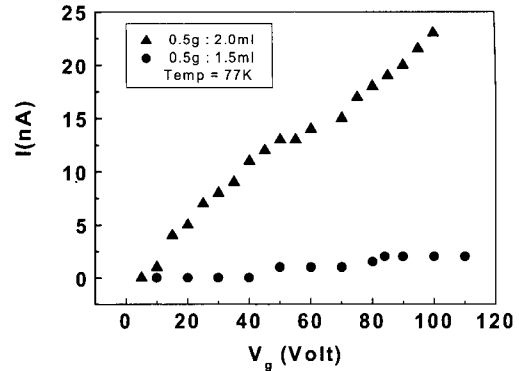


Fig. 3. Measurement of leakage current of PVDF film at different compound ratios of PVDF powder and DMF.

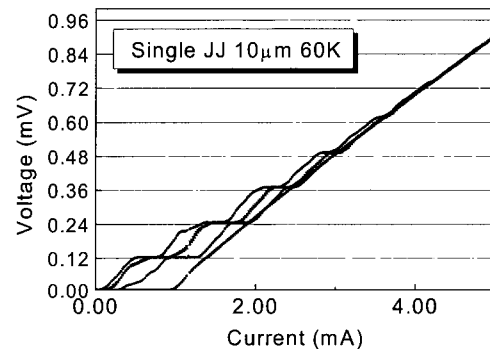


Fig. 4. Current-voltage characteristics of the Josephson junction with and without 60 GHz varying microwave radiation at 60 K.

결과와 일치하는 것이다.

Fig. 3은 PVDF powder와 용매 DMF의 비율에 따른 누설전류변화를 측정한 결과이다. 트랜지스터의 소스와 드레인 간에 흐르는 전류가 게이트로 침투되는지의 여부를 확인하기 위해 양극간에 전압을 인가해 주고 게이트 전극에서 누설전류가 흐르는지 측정하였는데, 0.5 g : 1.5 ml의 비율에서 약 2nA 이하의 전류만이 흐름을 확인할 수 있었다. 그러나 0.5 g : 2.0 ml의 비율에서는 전류가 증가함을 볼 수 있었는데, 이는 PVDF가 게이트 전극으로 형성되었을 때 전압이 증가할수록 점점 더 큰 전류가 누설됨을 보여주는 것이다.

Fig. 4는 MgO 쌍결정 기판(MgO bicrystal substrate)에 제작된 조셉슨 접합의 사피로 계단을 측정된 결과이다. 측정된 사피로 계단은 최대 6개 까지 측정되었는데, 이는 제작된 조셉슨 접합이 트랜지스터의 드레인-소스 채널(drain-source channel)로서의 역할을 충분히 해 줄만큼 잘 제작되었음을 알 수 있다. 측정에 사용된 조셉슨 접합은 단일 접합이며, 접합넓이는 $10 \mu\text{m}$ 로 온도 60K에서 측정된 결과이다.

IV. 요약

본 연구에서는 강유전 물질인 PVDF 를 게이트 단자로 이용하여, 조셉슨 접합의 전기적인 특성 및 마이크로파 특성을 변조하는 것이 최종목표이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 PVDF 물질이 게이트 단자의 역할을 할 수 있는 β 상이 형성되어야 되어야 한다. 위의 결과와 같이 X-ray 회절분석을 통해 β 상이 형성됨을 확인하였고, 누설전류 측정을 통해 게이트 전극으로의 적합한 조건을 확보하였다.

그리고, 사피로 계단 측정을 통해서 소스-드레인 역할을 하는 조셉슨 접합이 잘 제작됨을 확인할 수 있었다.

향후 본 연구실에서는 PVDF 게이트 전극의 전압 변화에 따른 조셉슨 접합의 I_C , R_N 및 사피로 계단의 변화 등을 관찰하고 있는 중이다.

감사의 글

본 연구비는 학술진흥재단 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] J. Mannhart, "High-Tc transistors" *Supercond. Sci. Technol.* **9**, 49 (1996)
- [2] K. Petersen, "Electric field effect on ultrathin YBCO grainboundary Josephson junctions" *Appl. Phys. Lett.* **67**(10), 1477 (1995)
- [3] J. Chen, T. Yamashita, H. Sasahara, H. Suzuki, H. Furosawa, and Y. Hirotsu, "Possible Three-Terminal Device with YBCO Angle Grain Boundary" *IEEE Trans appl. Supercond.* , **1**(2), 102 (1991)
- [4] T. Nakamura, H. Inada, M. Iiyama, "Superconducting field effect transistors with YBCO/STO/YBCO trilayer structure" *Physica C* **300**, 93 (1998)
- [5] Ken-ichi MATSUI, Takahiro AWAJI, Takashi HIRANO, Tatsuhiko FUJH, Ken SAKUTA and Takeshi KOBAYASHI, "Analysis on Electric Field Effect in Al/SrTiO₃/YBa₂Cu₃O_y Structure" *Jpn. J. Appl. Phys* **31** L1342 (1992)
- [6] J. B. Lando, H. G. olf and A Peterlin "NMR and X-ray determination of the structure of PVDF" *J. Polymer Sci, Part A-1* **4** :941(1966)