

Fabrication of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{SrTiO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ multilayer structure for ground plane of single flux quantum digital circuit.

단자속 양자 디지털 회로의 접지면을 위한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{SrTiO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 다층 구조의 제작

Ju-Eok Jang, Young-Hwan Kim, Chang-Hoon Kim, Jong-Min Lee,
Jong-Hyeog Park, Joon-Hee Kang*, Sang-Sam Choi, and Taek-Sang
Hahn

장주익, 김영환, 김창훈, 이종민, 박종혁, 강준희*, 최상삼, 한택상

P.O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea,
Superconductivity Research Laboratory, Korea Institute of Science and Technology
*University of Incheon

서울특별시 청량리 우체국 사서함 131호, 한국과학기술연구원 초전도 연구팀
*인천대학교

We have fabricated high- T_c superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{SrTiO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO/STO/YBCO) multilayer structure on (001) SrTiO_3 substrate by using pulsed laser deposition technique for applying to ground plane of single flux quantum digital circuits. In this structure, the top and bottom YBCO layers were connected through the holes in the STO insulating layer. The critical temperature of the two YBCO layers connected each other was 86 K after annealing at 500 °C in O_2 atm for about 60 hr. This result shows that the annealing process is very important in fabricating YBCO/STO/YBCO multilayer structure. An experiment to optimize the fabrication process of YBCO/STO/YBCO multilayer structure with good quality is in progress.

1. 서 론

고온 초전도체를 이용한 Single Flux Quantum(SFQ) digital 소자는 빠른 스위칭 속도 및 매우 낮은 전력 소모로 인해[1] 많은 연구가 이루어지고 있다. SFQ digital 소자 제작을 위해서는 재현성 있는 다층박막 제작 기술 및 특성이 우수한 조셉슨 접합 제작 기술이 필요하다. 조셉슨 접합 회로를 고속으로 동작시키기 위해서는 높은 임계전류값과 낮은 회로 인덕턴스값이 요구

된다. 특히 낮은 회로 인덕턴스값을 얻기 위해서는 초전도 접지면(ground plane)이 필수적인데 이는 다층 박막 제작에서 가장 기본이 되는 부분이다. SFQ digital 소자를 만들기 위한 방식은 여러 가지가 있지만 그 중에서 YBCO 접지면과 결합된 구조를 가지는 경사형 모서리(ramp-edge) 조셉슨 접합에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.[2-5]

경사형·모서리 조셉슨 접합은 장벽의 두께나 장벽물질을 변화시켜 접합특성을 조절할 수 있고

복잡한 회로를 다양하게 설계할 수 있는 장점으로 인해 SFQ digital 소자 제작에 가장 적합한 것으로 알려져 있다. 그러나 이 접합은 제작 공정이 매우 복잡하며 박막간의 계면저항으로 인해 재현성 있게 제작하는 것이 어렵다는 단점이 있다. 본 연구에서는 YBCO 접지면의 특성 실험을 위해 YBCO/STO/YBCO 의 다층박막을 제작하여 전기적 특성을 알아보았다. 또한 열처리 시간과 STO 층의 홀의 크기에 따른 특성을 알아보았다.

2. 다층구조의 박막 제작

접지면과 결합된 경사형 모서리 조셉슨 접합을 구현하기 위해서는 다층박막을 epitaxial 하게 증착하는 것이 중요하다. 또한 각각의 박막층 간의 접합성이나 박막 각각의 전기적인 특성이 우수해야 한다. 본 실험에서는 YBCO 접지면과 결합된 경사형 모서리 조셉슨 접합을 제작하기 위한 기초 단계로서 YBCO/STO/YBCO 다층구조의 박막을 제작하여 접지면 역할을 하는 하부 YBCO와 경사형 접합의 base 전극 역할을 하는 상부 YBCO 사이의 전기적인 연결 특성을 알아보았다. 두 YBCO 박막은 그들 사이에 위치하는 STO층에 형성된 여러 가지 크기의 홀을 통해 서로 전기적으로 연결된다. 그림 1에 이를 개략적으로 나타내었다.

STO 1X1 cm² 기판 위에 PLD 방식을 사용하여 하부 YBCO 박막(접지면 역할을 함)을 200 nm의 두께로 증착하였다. 증착조건은 에너지 밀도 2 J/cm², 산소압력 400 mTorr, 기판온도 740 °C, 기판-타겟 사이의 거리 5 cm로 하였다. 다층박막 구조에서 단일층 박막의 균일한 두께 분포는 매우 중요하다. 두께가 균일한 박막을 얻기 위해

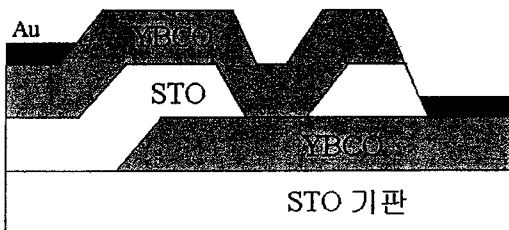


그림 1. 접지면의 특성 실험을 위해 제작된 다층구조 박막의 단면도.

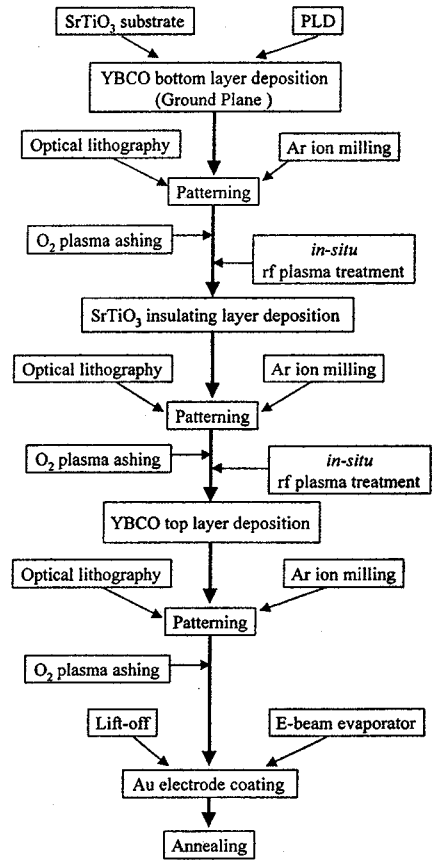


그림 2. 접지면 특성 실험을 위한 YBCO/STO/YBCO 다층구조 박막의 제작 공정도.

하부 YBCO

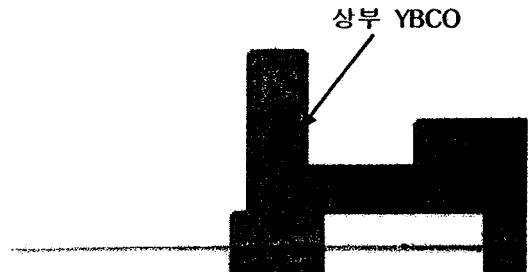


그림 3. 접지면 특성 실험을 위해 제작된 다층구조 박막의 현미경 사진. 가운데 정사각형이 STO 박막에 형성된 홀이다.

기판과 타겟 사이의 거리를 변화시키면서 임계온도 및 두께를 측정된 결과 거리가 5 cm일 때 고른 두께 분포를 가진 박막을 제작할 수 있었으며 이 박막의 임계온도는 88.7 K였다. 증착된 하부 YBCO 박막은 ECR Ar ion-beam을 사용하여 식각하였다. 식각 조건은 다음과 같다. Ar 이온 빔 에너지가 500 eV이고 beam의 입사 각도는 0°이며 시편 홀더는 15 °C로 냉각 및 회전시켰다. 식각 마스크로 포토리저스트(PR)를 사용하였는데 식각 후 이를 아세톤으로 제거하여도 박막의 표면에 미세하게 PR의 잔류물이 존재하므로 이를 완전히 제거하기 위하여 O₂ 플라즈마를 사용하였다. STO층을 증착하기 전에 박막 표면을 cleaning하기 위하여 Ar 플라즈마 처리를 하였고 또한 500 Torr의 산소 압력 하에서 500 °C에서 3 시간동안 열처리하였다. 패터닝 하부 YBCO 박막 위에 STO 절연층을 증착하였다. 증착조건은 다음과 같다. 에너지 밀도는 YBCO와 동일하게 2 J/cm²로 하였고 기판온도 700 °C, 산소압력 100 mTorr, 기판-타겟 사이의 거리 4 cm였다. STO 박막의 식각은 빔의 입사 각도를 제외하고 YBCO 박막의 식각 조건과 동일하게 하였다. STO 식각 시 빔의 입사 각도를 45°로 하였다. 이는 완전한 edge가 형성되게 하여 상부 YBCO 박막 증착 시 STO edge에 입계가 생성되는 것을 방지하기 위해서이다. 즉, 상부 YBCO 박막을 증착했을 때 초전도 전류가 a-b 면을 통해 하부 YBCO 박막으로 흐르게 하기 위해서이다.[6] 상부 YBCO 박막은 식각된 STO 박막 위에 하부 YBCO 박막과 동일한 조건으로 두께 150nm로 증착하였다. 상부 YBCO 박막을 증착하기 전에 STO 증착 전과 같이 O₂ 및 Ar 플라즈마 처리 및 열처리를 하였다. 상부 YBCO 박막을 식각한 후 Au 전극을 e-beam evaporation 및 lift-off 방법을 사용하여 증착한 후 열처리하였다. 그림 2에 전 공정을 도식적으로 나타내었다. 그림 3은 완성된 다층 박막의 현미경 사진을 나타내었다. 상부 YBCO 박막이 STO 박막에 형성된 정사각형 홀을 통해 하부 YBCO 박막과 연결되어 있음을 관찰할 수 있다.

3. 결과 및 논의

일반적으로 이온빔으로 박막을 식각한 후 그

위에 다른 물질을 증착할 때는 박막표면에 오염의 위험이 있으며, 표면이 구조적으로 손상될 수 있기 때문에 습식 식각에 의한 방법이 보고되기도 하였다.[7] 본 실험에서는 제작된 시편들의 전기적인 특성, 즉 상부 YBCO 박막과 하부 YBCO 박막의 전기적인 연결성을 알아보기 위하여 임계온도를 측정하였다. 그 결과 일부 시편은 절연체의 특성을 나타내었고 많은 경우 이종의 영저항 전이 곡선을 나타내었다. 절연체 특성이 나타나는 것은 STO 박막이 완전히 식각되지 않았거나 STO 박막 식각시 하부 YBCO 박막의 표면이 손상되었기 때문인 것으로 추측되고 이종의 영저항 전이 곡선이 나타나는 것은 상하부 YBCO 박막간의 전기적인 연결은 되었으나 하부 YBCO 박막의 특성이 많이 저하되었기 때문인 것으로 생각된다. 시편 제작 공정에서 전극을 증착한 후 500 °C에서 산소분위기로 15시간 동안 열처리하였으나 저하된 하부 YBCO 박막의 특성이 충분히 복원되지 않았을 것으로 생각되어 다시 500 °C에서 산소분위기로 48시간 동안 더 열처리하였다. 그 결과 임계온도가 86 K로 나타났고 하부 YBCO 박막의 특성이 많이 복원되었음을 관찰할 수 있었다. 이 결과를 그림 4에 나타내었다. 그러나 액체질소온도에서 임계전류값을 측정된 결과 매우 낮은 값이 나타났다. 이것은 두 YBCO 박막간의 전기적으로 연결되고 하부 YBCO 박막의 특성이 많이 복원되었지만 두

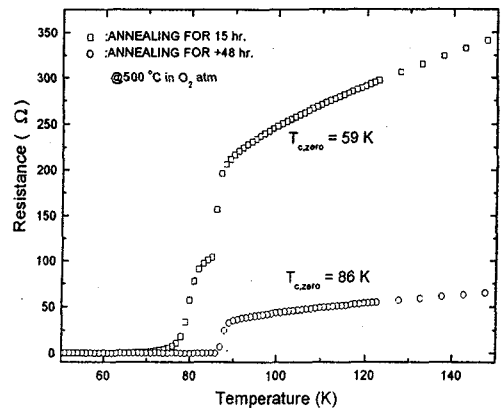


그림 4. YBCO/STO/YBCO 다층 구조의 박막 제작시 하부 YBCO 박막의 특성을 복원하기 위해서는 열처리 공정이 매우 중요함을 알 수 있다.

YBCO 박막 사이의 계면이 완전하지 않기 때문인 것으로 생각된다.

4. 요약

접지면을 가지는 경사형 조셉슨 접합을 제작하기 위한 기본 단계로 YBCO/STO/YBCO 구조의 다층 박막을 제작하였다. 상하부 YBCO 박막은 그 사이에 존재하는 STO 절연층에 형성된 홀을 통해 서로 연결되어 있으며 이것의 저항-온도 특성을 측정한 결과 임계 온도가 86 K로 나타났다. 이 결과는 시편을 매우 장시간동안 열처리한 후 얻은 결과로서 YBCO/STO/YBCO 다층 구조의 박막 제작시 하부 YBCO 박막의 특성이 많이 저하되고 이를 복원하기 위해서는 열처리 공정이 매우 중요함을 알 수 있었다. 현재 우수한 특성을 가지는 YBCO/STO/YBCO 다층 구조의 제작 공정을 최적화하기 위한 연구를 계속 수행 중에 있다.

참고문헌

- [1] K.K.Likharev and V.K.Semenov, IEEE Trans. Appl. Supercond. 1, 3 (1991)
- [2] B.D.Hunt, M.G.Forrester, J.Talvacchio, J.D.McCambridge, and R.M.Young, Appl. Phys. Lett. 68(26) (1996)
- [3] W.H.Mallison, S.J.Berkowitz, A.S.Hirahara, M.J.Neal, and K.Char, Appl. Phys.Lett. 68(26) (1996)
- [4] B.D.Hunt, M.G.Forrester, J.Talvacchio, R.M.Young, and J.D.McCambridge, IEEE Trans. Appl. Supercond. 7(2) (1997)
- [5] Tatsunori Hashimoto, Shinji Inoue, Toshiko Nagano, and Jiro Yoshida, Extended Abstracts of 7th Int. Superconductive Electronics Conference(ISEC'98)
- [6] D.H.A.Blank, G.J.H.M.Rijnders, IEEE Trans. Appl. Supercond. 7, 3325 (1996)
- [7] M.I.Falcy, U.Poppe, C.L.Jia, and K.Urban, IEEE Trans. Appl. Supercond. 5(2) (1995)