

조셉슨 소자구현을 위한 YBCO다층 박막 제작 및 특성

°이현수°, 박재윤°, 박상현°, 이동훈°, 박홍재°, 김영주°
 마산대학, 경남대학교°

Fabrication and Characterization of YBCO Multi-layer Thin Films for Josephson device

H. S. Lee°, J.Y. Park°, S.H. Park°, D.H. Lee°, H.J. Park°, Y.J.Kim°
 Masan college, Kyungnam Univ.

Abstract - In this thesis, Josephson junction using high-Tc superconducting multi-layer thin film has been fabricated by on-axis RF magnetron sputtering method. And, the characterizations were performed by X-ray diffraction, SEM and the measuring system of critical current density. The physical properties of multi-layer superconducting thin films were also analyzed with the measured results.

To fabricate the multi-layer superconducting thin films, the optimum partial pressure of Argon and Oxygen and the temperature of substrate were measured. Also, YBaCuO thin film was grown on MgO and SrTiO₃ substrates by rf-sputtering and LGO thin film of 30 Å was epitaxially grown on the YBaCuO thin film as a Josephson junction with the same condition.

The Schottky barrier at the contact surface between YBaCuO/LGO and YBaCuO/Au and the energy gap of 0.5 ~ 0.6 mV in Nb were observed from the dI/dV-V of YBaCuO/LGO/Au/Nb and YBaCuO/Au/Nb.

1. 서론

액체 질소 비등점인 77 K를 상회하는 임계점을 가진 고온초전도체는 전자소자, 전력기기, 에너지 저장 등 많은 분야에서 매우 큰 부가가치를 가지고 있으며 이러한 초전도 기술은 저온화 기술의 발전과 밀접한 연관을 가지고 있다. 80년대 이후 지속되었던 높은 임계온도를 갖는 고온초전도체 개발에 관한 연구는 임계 온도를 높여려는 기존의 연구에서 탈피, 산업체 응용으로 과감한 방향 전환을 시도하였다. 미래의 전자산업에 있어 큰 역할을 할 것으로 기대되고 있는 초전도 소자들로서는 조셉슨 접합을 기본 구성요소로 하여 초전도 양자 간섭장치(SQUID) 및 초고속 A/D 변환기를 비롯한 각종 스위칭 소자, 초고주파 소자 및 고속 계산을 위한 논리 소자 등을 열거할 수 있다.

금속계 저온초전도 물질은 간섭길이가 길어 초전도체/절연체/초전도체 형상의 터널 접합을 만들 수 있으나 실용화할 경우 고가의 액체 헬륨을 사용해야 한다는 점에서 많은 문제점을 갖고 있었다. 고온초전도체의 발견은 저온초전도 응용시 가장 큰 문제로 대두되었던 고가의 냉매 문제를 해결할 수 있다는 점에서 장점을 가지고 있지만, 초전도 전자 간 간섭 길이가 짧다는 것이 터널접합을 어렵게 하는 원인으로 되어 있다.

현재까지 SQUID와 같은 소자로서 응용을 위하여 여러 형태의 단층박막이 만들어져 왔고, 조셉슨 접합용으로는 주로 잡음특성이 좋고 재현성이 있는 이중결정형 박막과 이중적층형 박막이 연구되어 왔다. 그러나 이들 박막 역시 단층박막이므로 장벽의 위치가 중앙에만 위치해야 하는 제한적 요소를 갖는 단점 때문에 터널 접합을

만들어 조셉슨 소자로 응용하기 위해서는 다른 형태의 박막구조가 필요하다. 이러한 이유로 다층박막에 대한 연구가 집중되기 시작하였고, 다층박막은 위에서 언급한 단층박막의 단점인 장벽의 위치와 두께를 임의로 조절할 수 있으며 구조의 간편성과 특성상의 장점때문에 물성연구에 있어 중요할 뿐 아니라 응용 디바이의 제작면에서 우수한 특성을 갖고 있다.

따라서, 본 논문에서는 단층박막의 단점을 해결·보완할 수 있을 것으로 예상되는 YBaCuO계 다층박막을 제작하여 그 특성을 조사·분석하였다.

2. 실험

2.1 RF-마그네트론 스파터

박막제작에는 많이 사용되고 있는 RF 마그네트론 스파터링법을 이용하였으며 박막제작장치는 기판-타겟 대향형인 on-axis 형태로 기판-타겟 사이의 거리는 가변으로서 최대 70 mm까지 조절이 가능하며, 타겟은 3개가 세팅된 in-situ로 최고 3종류 박막까지 동일 챔버 내에서 스파터링이 가능하다.

2.2 박막 제작

YBaCuO 박막 제작을 위하여 사용된 타겟은 Y₂O₃, BaCO₃, CuO를 혼합 소결한 분말 타겟이다. 타겟의 몰비는 c축 배향막의 경우는 Y : Ba : Cu = 1 : 2 : 2.5로, a축 배향막의 경우는 0.9 : 1.1 : 2.5로 혼합하였다.

소결전 Y, Ba, Cu를 유분으로 잘 혼합시켜 균일하게 회색 빛을 띠 때까지 혼합 분말을 잘 섞어 주었다. 골고루 섞이지 않은 혼합 분말로 사용할 타겟을 제작할 경우, 초전도 특성이 나타나지 않을 수 있으므로 이 과정은 타겟 제작에서 항상 유의해야 할 과정이다. 시료는 산소 분위기 중 전기로 내의 온도 980 °C에서 6시간, 450 °C에서 4시간 동안 소결한 후, 자연냉각에 의해 실온까지 냉각하였다. 그림 1은 시간에 따른 소결 공정을 나타낸 것이다.

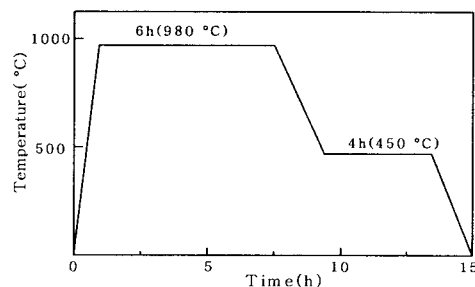


그림 1. YBaCuO타겟의 소결시간과 온도.
 Fig.1. Sintering time and temperature of YBaCuO target.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 YBaCuO 박막의 결정성

박막의 특성을 평가하는 항목으로는 결정성, 표면 결정 특성 및 전기적 특성 등이 있다. 본 논문에서는 결정성 평가를 위해 X선 회절특성(XRD), 표면 결정 특성 관찰을 위하여 주사형 전자현미경(SEM) 그리고 전기적 특성을 분석하기 위하여 온도-저항(T-R)과 전압-전류(V-I), dI/dV-V 특성을 측정하였다. 특히 XRD 패턴은 YBaCuO 박막의 결정 평가시 결정 배열의 균일성을 파악하는데 있어 매우 중요한 측정 방법으로 알려져 있다.

그림 2(a), (b)는 각각 a축 및 c축 배향 YBaCuO의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 이 패턴을 살펴보면 STO와 MgO기판 위에 YBaCuO 박막의 a축 배향지수(n00)와 c축 배향지수(00n)의 피크만이 나타나고 있다. 따라서 결정성이 좋고 배향 제어도 잘 된 YBaCuO 박막이 성장되어 있음을 알 수 있었다.

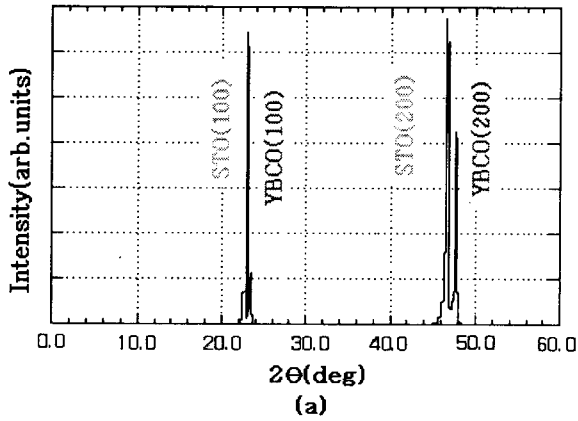


그림 2. YBaCuO 박막의 XRD 패턴.
(a) a축 배향 (b) c축 배향
Fig. 2. XRD patterns of YBaCuO thin films.
(a) a-axis orientation (b) c-axis orientation

3.2. LGO 박막의 결정성

그림 3(a)는 c축 배향 YBaCuO 단층막의 XRD 패턴을 나타낸 것이고, 그림 3(b)는 c축 배향 YBaCuO/LGO 적층막의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 그림 3(c)는 a축 YBaCuO/LGO 적층막의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. LGO 박막은 a축 또는 c축 배향 YBaCuO 박막 위에 에피택셜 성장을 하였을 때 격자정합성이 우수하기 때문에 YBaCuO와 같이 650 °C에서 만들어진 LGO 박막은 (100) 또는 (110)로써 배향될 것으로 예상된다. c축 배향 YBaCuO/LGO의 XRD 패턴에서 (003)면과 (006)면의 피크 세기가 일반적

인 YBaCuO 단층막보다 높게 관측되었다. 이것은 LGO 박막이 YBaCuO (003)면과 (006)면에 강하게 성장하고 있음을 잘 입증해 주고 있다.

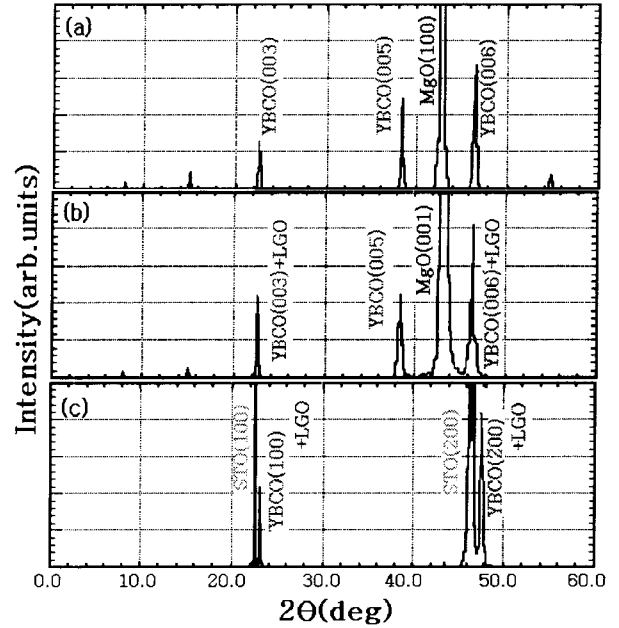


그림 3. YBaCuO/LGO 적층막의 XRD 패턴
(a) c축 YBaCuO 단층막
(b) c축 YBaCuO/LGO 적층막
(c) a축 YBaCuO/LGO 적층막
Fig. 3. XRD patterns of YBaCuO/LGO epitaxial grown layer
(a) c-axis YBaCuO
(b) c-axis YBaCuO/LGO
(c) a-axis YBaCuO/LGO

3.3 YBaCuO/LGO/Au/Nb 박막

가. LGO 박막의 피복특성

그림 4는 LGO 박막의 두께와 저항과의 관계를 나타낸 것이다. LGO 박막 두께는 증착율과 시간에 의해서 결정되는데 LGO의 피복특성을 관찰하기 위하여 LGO 막 두께 0~10 Å, 20 Å, 30 Å의 3개 영역으로 나누어 두께와 저항과의 관계를 조사하였다. 0~10 Å에서는 저항이 $10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ 이하이므로 LGO 막이 YBaCuO 막을 완전하게 피복하고 있지 않는 것으로 생각된다. 30 Å에서는 $10^0 \sim 10^1 \Omega\text{cm}^2$ 정도의 안정된 저항값을 나타내고 있어 형성된 LGO 막이 YBaCuO 막을 완전히 피복하고 있음을 알 수 있다. 또한 LGO 막의 두께가 20 Å인 경우 저항은 $10^{-4} \sim 10^{-1} \Omega\text{cm}^2$ 으로 매우 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있으므로 20 Å에서 저항의 분포도는 약 10^3 정도의 차이를 갖고 있다. 이는 20 Å 정도에서 LGO 박막이 YBaCuO 박막을 충분히 피복하였음을 의미한다. 따라서 이를 근거로 LGO 박막 두께가 30 Å 일 때 LGO가 YBaCuO 박막 표면 위에 평활하게 완전히 피복되고 고 볼 수 있다.

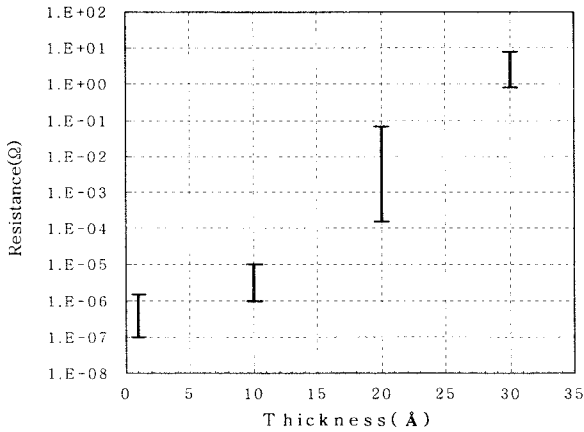


그림 4. LGO 막의 두께와 저항 관계.
Fig.4. Relation between film thickness and resistance on LGO thin film.

나. c축 YBaCuO/Au/Nb 박막

그림 5는 c축 YBaCuO/Au/Nb 박막에 대한 V-I 특성이다. V-I 특성을 살펴보면, 약 0.5 mV 부근에서 비선형적인 특성을 보이며, SIS 조셉슨 접합 형태의 RSJ적인 특성을 나타내고 있다.

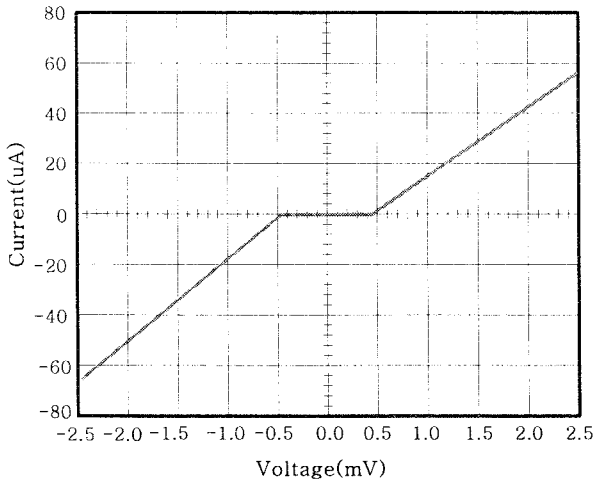


그림 5. c축 YBaCuO/Au/Nb 접합의 V-I 특성
Fig.5. V-I curve of c-axis YBaCuO/Au/Nb junction

그림 6은 c축 YBaCuO/Au/Nb 박막에 dI/dV-V 특성의 온도 의존성을 나타낸 것이다. dI/dV-V 특성을 살펴보면 0.5 ~ 0.65 mV 부근에서 에너지갭적인 비선형 특성이 나타내었다. 4.2 K에서 Nb의 에너지갭 전압인 Δ_{Nb} 는 약 0.55 ~ 0.65 mV 이지만 Nb의 초전도상 전이온도인 10 K에서는 소멸됨을 알 수 있다. 따라서, 이 비선형 곡선은 Nb의 에너지갭 구조를 반영한 특성으로 판단된다. 그리고 c축 YBaCuO/Au/Nb 박막이 낮은 바이어스에서 RSJ적인 특성을 나타내고 있기 때문에 YBaCuO 박막의 계면에 M(금속)층이 존재하지 않음을 의미한다. 즉, Nb 갭 전압 특성에서 YBaCuO 박막의 계면은 M층이 아닌 터널 장벽층이 존재하는 것으로 판단된다. 따라서, YBaCuO 계면에서 Au는 터널 장벽으로서 작용하고 있어, c축 YBaCuO/Au/Nb 박막은 SIS적인 터널 특성(터널링에 의한 조셉슨 효과)을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

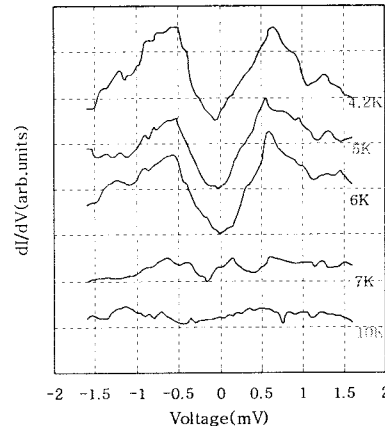


그림 6. c축 YBaCuO/Au/Nb 접합의 dI/dV-V 특성
Fig.6. dI/dV-V curves of c-axis YBaCuO/Au/Nb junction

4. 결 론

본 논문에서는 기관과 타겟이 대향형인 on-axis RF 마그네트론 스파터링법을 이용하여 고온초전도 다층 박막을 제작하였으며 제작된 박막의 XRD 패턴 분석과 SEM 영상은 물론, 다층 조셉슨 접합의 온도와 저항관계 등의 특성을 조사하였다.

조셉슨 접합의 절연층으로 YBaCuO 박막 제작 조건과 동일한 조건하에서 YBaCuO 박막층 위에 LGO 박막을 에피택셜 성장시켰으며, 층의 균일성은 XRD 분석을 통하여 확인하였고, SEM 관찰에 의해 LGO 박막은 표면 평활성이 높고, 균일하게 결정이 성장되었음을 확인하였다.

LGO 박막의 두께는 30 Å에서 저항이 균일하게 나타났기 때문에 YBaCuO 박막 위에 LGO 박막을 형성시킬 때 박막 두께를 30 Å으로 하는 것이 바람직하며, 제작된 YBaCuO/LGO/Au/Nb 박막의 dI/dV-V 특성에서 Nb의 에너지갭이 0.5~0.6 mV에서 관찰됨으로써 LGO가 터널 장벽으로 작용하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, YBaCuO/Au/Nb 박막의 dI/dV-V 특성에서 Nb의 에너지갭 전압이 0.5~0.65 mV에서 관찰됨으로써 YBaCuO/Au계면에 쇼트키 장벽이 존재하고 있음도 확인하였다. 또한, 이들 다층구조에서 터널링 전류가 흐르는 것으로 보아 YBaCuO/Au/Nb 박막이 SIS적인 조셉슨 접합을 하고 있음을 확인할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Z. Z. Sheng and A. M. Hermann, "Superconductivity In the rare-earth-free Ti-Ba-Cu-O system above liquid-nitrogen temperature", *Nature*, vol. 332, no. 3, pp. 55-58, 1988.
- [2] S. N. Putlin, E. V. Antipov, O. Chmaissem, and M. Marezio, "Superconductivity at 94k in HgBa₂CuO_{4+δ}", *Nature*, vol. 362, no. 3, pp. 226-228, 1993.
- [3] S. Kuriki and T. Kamiyama, "Characteristics of YBCO step-edge weak links and SQUIDS", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 3, no. 1, pp. 2461-2464, 1993.
- [4] A. B. Berezin, C. W. Yuan, and A. L. de Lozanne, "YBCO DC SQUIDS utilizing sapphire step edge junctions", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 3, no. 1, pp. 2457-2460, 1993.