

미세도량구조형 고온초전도박막조셉슨이음제작과 그 특성

유광동, 김려명

초전도조셉슨소자는 고감도초전도수자장치들과 양자컴퓨터의 핵심부분인 SQUID의 기본요소이다.

현재 고온초전도조셉슨소자를 리용하여 국제전압표준, 초전도론리회로, SQUID, 초전도량자컴퓨터 등의 여러가지 첨단기구들이 제작되어 리용되고있다.[2, 3]

초전도조셉슨소자는 두 초전도체사이에서 형성된 나노포텐셜장벽에서 생기는 거시량자 굴절효과에 기초한 나노전자소자이다. 고온초전도박막에서 이것을 실현시키자면 반도체전자기술에서와는 달리 수nm(고온초전도체의 양자간섭성길이)정도의 두께를 가지는 포텐셜장벽형성기술이 요구된다. 현재 이 문제해결을 위한 여러가지 기술수법들이 연구개발되어있다.[1]

본문에서는 미세도량구조형조셉슨이음을 자체의 기술로 실현시키기 위한 연구를 진행하였다.

실험 방법

먼저 이온부식장치(《LKJ—1C》)로 STO(100)단결정기판위에 길이 $120\mu\text{m}$, 너비 $10\mu\text{m}$, 깊이 $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ 인 미세도량을 만들고 마그네트론비산장치를 리용하여 그위에 YBCO고온초전도박막을 성장시켰다. 박막성장조건은 다음과 같다.

초기진공도 10^{-3}Pa , 기체조성 $\text{Ar}:\text{O}_2=2:1$, 방전진공도 20Pa ,
기판온도 650°C , 기판가열속도 400°C/h ,
방전전압과 전류 150V 와 500mA , 방전시간 60min ,
산소처리압력 $1.2\times 10^5\text{Pa}$, 산소처리온도 550°C ,
산소처리시간 60min , 냉각속도 400°C/h

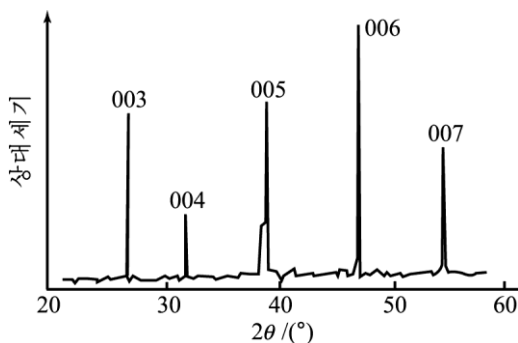


그림 1. YBCO/STO(100)고온초전도박막의 X선회절도

성장된 박막은 약간 투명한 검은밤색을 띠었으며 두께는 $1\mu\text{m}$ 정도였다. 박막은 완전C축배향되었고(그림 1) 그것의 초전도림계온도는 90K (그림 2), 림계전류밀도는 $1.8\times 10^6\text{A/cm}^2$ ($T=77.8\text{K}$)였다. X선측정결과와 림계전류밀도값을 통하여 YBCO고온초전도박막이 단결정성장되었다는 것을 알 수 있다.

다음 집적회로제작공정에 따라 양화부식방법으로 너비가 $8\mu\text{m}$ 인 초전도박막이음부가 기판위의 도량을 가로지나가도록 도형새김을 진행하였다. 제작된 고온초전도박막조셉슨이음의 전자현미경(《FEI QUANTA 200》)사진은 그림 3과 같다.

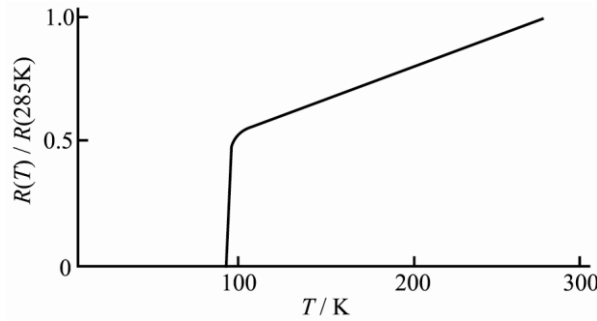
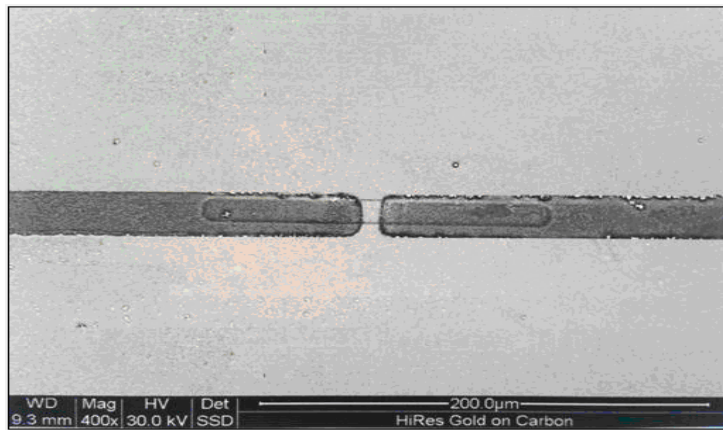
그림 2. YBCO/STO(100)고온초전도박막의 $R-T$ 특성

그림 3. 제작된 고온초전도박막조셉슨이음의 전자현미경사진

연한 부분은 YBCO초전도박막, 가운데부분은 너비가 $8\mu\text{m}$ 인 초전도미소다리

그런데 빛부식공정에서 초전도박막이 여러가지 화학물질, 탈이온수 등과 접촉하게 되므로 그것의 특성이 나빠진다. 실제로 초전도림계온도가 10K정도 낮아진다. 이것을 회복시키기 위하여 도형우에 남아있는 감광제를 아세톤으로 씻어내고 400°C , $1.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 의 산소분위기에서 60min동안 추가적인 산소처리를 진행하였다. 이러한 2차산소처리를 함으로써 초전도림계온도를 84K정도로 보장할수 있었다. 2차산소처리를 한 후 미소다리의 림계전류밀도는 $J_c = 2.4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ($T = 77.8\text{K}$)로서 량쪽박막에서보다 작아졌다. 이것은 YBCO박막미소다리의 도랑경계부위에 형성된 나노립계의 특성때문이다.

특성측정 및 결과해석

제작된 YBCO/STO도랑구조형조셉슨이음에서 측정한 저항-온도특성은 그림 4와 같다.

제작된 조셉슨이음의 직류 $I-U$ 특성측정결과는 그림 5와 같다. 이 측정결과를 보면 곡선모양이 RSJ모형의 결과와 대단히 유사하다.[1] 78K에서 이음부의 초전도림계전류값은 $I_c = 90\mu\text{A}$, 정상저항값은 $R_n = 0.67\Omega$ 였다.

다음으로 제작된 조셉슨이음의 교류 $I-U$ 특성을 측정하였다.

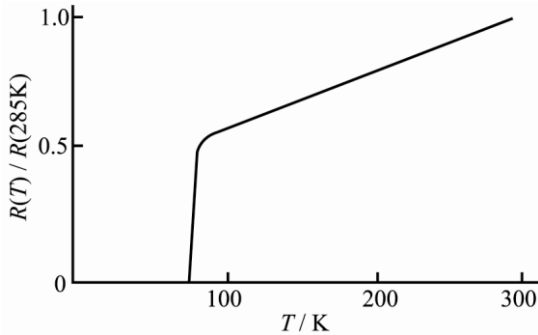


그림 4. 제작된 조셉슨이음의 저항-온도특성

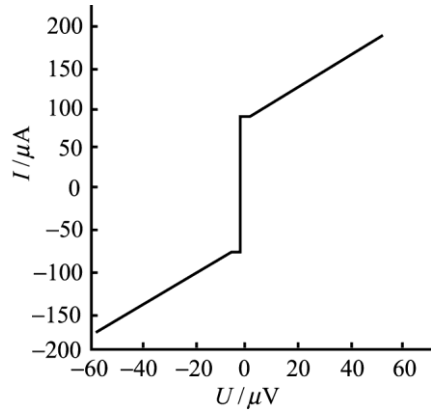


그림 5. 제작된 조셉슨이음의 직류 $I-U$ 특성

이음으로 흐르는 조셉슨전류는

$$I(t) = I_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)$$

모양으로 시간에 따라 변화된다. 여기서

$$\omega_0 = 2eU/\hbar$$

이며 φ 는 조셉슨위상차이다. 그러나 이러한 조셉슨전류는 주파수가 매우 높고 그 시간 평균값이 0으로 되므로 보통의 $I-U$ 특성에는 이것이 영향을 주지 못한다. 그러므로 교류조셉슨효과측정은 일반적으로 이음부위에 초고주파를 쏘여줄 때 나타나는 초고주파량자유도계단효과를 확인하는 방법으로 진행하고있다.

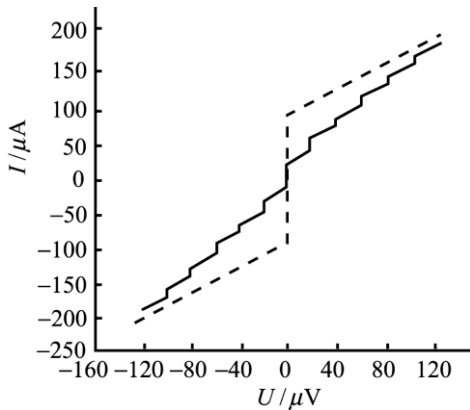


그림 6. 제작된 조셉슨이음의 교류 $I-U$ 특성

교류조셉슨이론에 따르면 조셉슨이음부에 주파수가 ν 인 초고주파를 쏘여줄 때 그것의 $I-U$ 특성곡선에서는 전압이

$$U_n = nh\nu/2e$$

인 위치들에서 전류의 양자적비약계단들이 나타나야 한다.[1, 4]

제작된 조셉슨이음부위에 9.8GHz 의 초고주파를 쏘여주면서 교류 $I-U$ 특성을 측정한 결과는 그림 6과 같다. 그림에서 점선은 대응하는 직류 $I-U$ 특성곡선을 보여준것이다.

측정결과에 의하면

$$U_1 = \pm 20.3\mu V, U_2 = \pm 40.6\mu V, U_3 = \pm 60.9\mu V, \dots$$

의 위치들에서 교류조셉슨량자유도계단들이 명백하게 관측되었다.

이 계단들의 위치를 판정하여보면 $\nu = 9.8\text{GHz}$ 인 경우에 $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 에 해당된다는것을 알수 있다.

이러한 측정결과들은 제작한 도량구조의 YBCO고온초전도박막이음부에서 거시량자적현상인 직류 및 교류조셉슨효과가 명백히 나타난다는것을 확증하여준다.

맺 는 말

도랑구조형 YBCO/STO(100)고온초전도박막조셉슨이음을 제작하기 위한 기술공정들을 확립하였다.

도랑구조형 YBCO/STO(100)고온초전도박막조셉슨이음을 제작하고 그 량자적특성들을 실험적으로 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 유광동 등; 초전도전자학, 김일성종합대학출판사, 36~101, 주체98(2009).
- [2] L. Solymar; Superconductive Tunnelling and Applications, London, 15~29, 2019.
- [3] F. Mitschker et al.; J. Appl. Phys., D 46, 49, 495201, 2013.
- [4] 集体编作; 超导隧道效应及其应用, 中国制冷学会, 74~160, 1981.

주체110(2021)년 3월 5일 원고접수

The Manufacture and Its Characteristics of the Josephson Junction of Micro-Trench Structure Type High-Temperature Superconducting Film

Yu Kwang Dong, Kim Ryo Myong

In this paper, we have made epitaxial growth of the YBCO high-temperature superconducting film on the SrTiO_3 (100) mono-crystal substrate with trench structure and manufactured the Josephson junction by using the nano grain boundary formed on the trench edge. We have clearly observed the DC and AC Josephson effects at the temperature of 78K.

Keywords: YBCO high-temperature superconducting film, Josephson junction