

77K에서 트랜지스터 특성을 나타내는 링크의 제작

Fabrication of the weak link with the the Transistor Characteristics in 77 K

강형곤*, 임성훈* 고석철** 주철원*** 한병성****

(Hyeong-Gon Kang, Sung-Hun Lim, Seok-Cheol Ko, Chul-Won Ju, Byoung-Sung Han)

Abstract

The link for the Superconducting Flux Flow Transistor (SFFT) which is based on the flux flow has been fabricated by the ICP etching methods. The channel width and the thickness of the SFFT were a 3 μm and about 300 nm, respectively. The superconducting characteristic of the link was measured by the x-ray diffraction and the E.D.S.. The SFFT etched by ICP showed an I-V characteristic like the three terminal transistor.

Key words : Superconductor, ICP etching, channel, Superconducting Flux flow Transistor

1. 서론

고온 초전도체가 발견된 이후로 초전도체를 이용한 전자 디바이스로의 응용에 대한 관심이 증가되게 되었다. 고온 초전도체의 응용은 선재를 이용하는 부분과, 박막을 이용한 부분으로 나눌 수 있는데 선재를 이용하여서는 초전도 케이블, 변압기, 초전도 마그넷 등을 제작할 수 있으며, 박막을 이용하여서는 안테나, 필터, 전류제한기, 초전도 트랜지스터 등을 제작할 수 있다. 특히 초전도 박막을 이용한 디바이스의 연구 중에서 초전도 트랜지스터에 대한 연구는 다른 초전도 응용디바이스와 비교하여 볼 때 빈약한 연구실정이다. 초전도 트랜지스터는 외부의 인가전계에 따라 초전도 층의 캐리어 농도를 변화시키는 초전도 전계효과 트랜지스터(SUFET)[1, 2], 초전도체 사이에 유전체를 삽입한 형태의 Dielectric Base Transistor (DBT)[3], 기존의 반도체 트랜지스터에서 emitter 단자와 collector 단자를 초전도체로 대체한 형태 혹은 기

존의 베이스 단자를 초전도체로 대체한 collector 단자를 초전도체로 대체한 형태 혹은 기존의 베이스 단자를 초전도체로 대체한 Superconducting Base Transistor (SBT)[4], 그리고 혼합상태에서 발생한 상전도 vortex를 이용한 Superconducting Flux Flow Transistor (SFFT)[5] 등이 있고, 이외에도 여러 가지 초전도 트랜지스터의 모델이 연구되고 있다. 이중 초전도 자속 흐름 트랜지스터는 초전도체의 약결합을 인위적으로 만들어 이를 채널층으로 사용하여 트랜지스터 특성을 얻는 트랜지스터로서 재현성 있는 채널 제작이 핵심기술이라고 할 수 있다. 기존의 질산이나 인산과 같은 강산을 이용한 채널 제작은 임계온도 및 초전도 특성을 크게 떨어뜨리는 문제가 있으며, 이를 극복하기 위해 불 친수성 Br을 이용한 연구결과도 발표되기도 하였다[6]. 본 논문에서는 새로운 반도체 식각 장비인 ICP장비를 이용하여 채널을 제작하여 I-V 특성을 관찰하였다. 이 ICP장치를 이용한 식각 방법은 이온의 강한 직진성으로 인해 기존 습식에칭에서 발견되는 under cut 현상이 감소될 뿐만 아니라[7] 고밀도 플라즈마를 이용함으로써 인해 기존의 RIE 장비와 같은 건식 식각 방법들에 비해서 플라즈마 발생시 하부전극에 생기는 self-bias 전압이 낮기 때문에 시료표면에 손상을 거의 주지

* 전북대학교 전기공학과 박사과정
** 전북대학교 전기공학과 석사과정
*** 전자통신 연구소
**** 전북대학교 전기공학과 교수

않고서 시각을 진행할 수 있는 장점도 있다. 여기에서는 이 ICP 장비를 이용하여 SFFT의 채널을 제작 이 채널의 초전도 특성을 x-ray를 이용하여 분석해 보았고, 또 SFFT의 제작을 통해 이 채널의 외부 인가전류에 따른 I-V특성을 구하여 보았다.

2. 이론

제 2종 초전도체는 1종 초전도체와는 달리 상부와 하부라 하는 두 개의 임계자계를 가지고 있다. 1종 초전도체는 임계자계 이상의 자계가 가해지면 곧 바로 초전도성을 잃어버리지만 제 2종 초전도체는 상부 임계자계 이하의 자계까지는 계속하여 초전도성을 유지한다. 그러나, 여기에서 상부임계자계 이하 하부 임계자계 이상으로 자계가 가해진 경우에는 초전도체 내부에 그림 1과 같은 상전도 부분이 발생하게 된다. 이 때의 상태를 혼합상태라 한다. 이는 완전히 초전도 상태로 있는 경우 보다는 초전도상태와 상전도 상태가 동시에 존재하게 됨으로서 에너지학적으로 더 안정하기 때문이다. 이 혼합상태에서 외부 전류에 의한 자계가 인가되고, 또 전류가 흐르게 되면 이 vortex들은 lorentz force를 받아 채널을 따라 움직이게 된다. 이 움직임을 곧 바로 저항을 유발 상전도로의 전이를 일으킨다. 이때 발생된 전압을 유도전압이라고 할 수 있고, 외부 자계의 크기에 따라 이 유도전압의 크기를 조절할 수 있다 이 vortex의 흐름은 초전도 선재에서 낮은 임계전류밀도의 원인이 되기도 하여 이의 pinning을 위해 초전도체를 제작할 때 상전도 물질을 소량첨가하기도 한다[8].

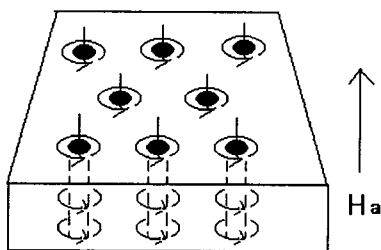


그림 1. 2종 초전도체에서의 혼합상태
Fig 1. The mixed state in the Π type superconductor

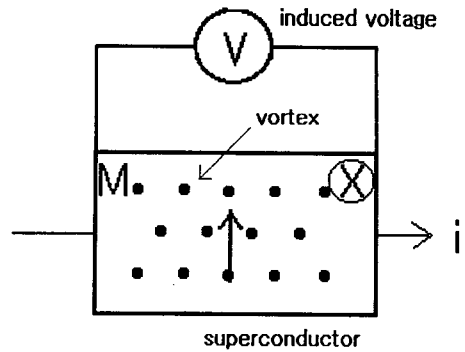


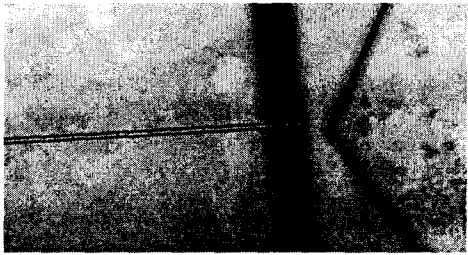
그림 2. 채널에서 유도된 전압
Fig. 2. Induced Voltage at channel

3. 실험 준비

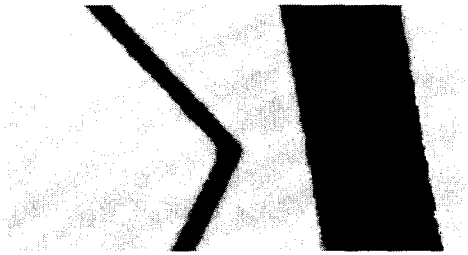
1 cm × 1 cm × 0.5 mm 크기의 LaAlO₃ 기판 위에 laser ablation 법으로 제작한 두께 약 400 nm의 초전도 박막을 이용하여 SFFT를 제작하였다. Control line의 폭은 20 μ m, body line은 50 μ m의 폭이며 길이는 1 mm 이다. 또한 body line 안에 있는 채널은 약 3 μ m폭으로 설계되어 있다. 본 실험에서 사용된 ICP장치의 ICP 공급 코일로는 13.56 MHz에서 작동하는 평판형 코일을 사용하였다. 그 구성은 반응기, 진공 배기 장치, 13.56 MHz ICP power 발생장치 및 평판형 유도코일, 하부전극, bias용 rf 발생장치, matching network, 기체 공급장치로 구성되어 있다. ICP dry etching을 위해서는 고밀도 플라즈마에서 견딜 수 있는 두꺼운 포토레지스터 층의 형성이 필요하다. 이를 위해 본 실험에서는 AZ 4620 포토레지스터를 사용하여 YBCO 박막 위에 두께 7 μ m까지 포토레지스터 층을 형성하였다. 이를 위해 스피ن 속도 4000 rpm로 35 초 동안 회전하며, 도포를 실시한 후 90 $^{\circ}$ C의 hot plate위에서 1분 동안 soft baking을 실시하였다. 다음으로 이를 자외선 노광기에서 4 분동안 충분히 노출을 실시하고, 현상액(AZ 400K 원액)에 담그어 빛에 노출된 부분의 포토레지스터를 제거하였다. 이렇게 제작된 샘플을 표 1에서와 같은 ICP 장치의 조건으로 샘플의 dry etching을 실시하였다. 에칭 후 패턴 위에 남아 있는 포토레지스터 층은 아세톤을 이용하여 제거하였다. 이렇게 제작된 샘플이 그림 3의 a에 나타나 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 3. SFFT의 제작 과정

- (a) 에칭된 패턴
- (b) SFFT의 채널 제작을 위한 align
- (c) 채널 폭 3 μm를 갖는 SFFT

Fig. 3. Fabrication process of the SFFT

- (a) etched pattern
- (b) align for the fabrication of channel
- (c) SFFT with 3 μm channel

이렇게 제작된 패턴 위에 다시 폭 3 μm의 channel을 제작하기 위하여 align 에칭을 실시하였다. 채널 층 형성을 위한 포토레지스터 조건은 위에서와 같다. 표 2는 align 공정을 통해 포토레지스터가 입혀진 부분을 다시 ICP dry etching 하기

위한 조건이다. ICP power를 700 W에서 450 W로 감소시켰다. 이는 채널 층이 에칭 후에도 초전도 특성을 그대로 유지할 수 있도록 에칭면의 파괴를 최대한 줄이기 위해서다.

4. 실험 결과 및 논의

그림 4는 AZ 4620 포토레지스터를 이용하여 원하는 패턴을 ICP 장비를 이용하여 형성하고 다시 포토레지스터를 아세톤으로 제거한 후, 박막의 임계 온도 특성을 측정한 결과이다. 이때 임계온도는 약 87 K 정도의 임계온도를 나타내었다. 이는 포토레지스터의 ICP dry etching 후에도 임계온도의 변화는 일어나지 않았음을 알려주는 결과이다. 에칭 도중 패턴의 변형 같은 것은 일어나지 않았으며 양호한 형태의 패턴을 형성하였음을 알 수 있다.

그림 5는 ICP 장비를 이용한 에칭시 혼합가스의 비율에 따라 어떻게 초전도 성분의 에칭이 이루어지는 가를 보기 위한 E.D.S. 분석이다. 이 결과를 통하여 임계온도 77K 이상의 채널을 제작하기 위한 혼합가스 농도를 얻고자 하였다. 그림 5를 보면 Cl₂:Ar = 1:1 약 50 %의 Cl₂ 부터 Y, Ba, Cu의 비율이 고온 초전도체의 성분비인 1:2:3의 형태를 유지함을 알 수 있다. 이를 근거로 혼합가스의 비율을 표 2에서와 같이 10 Sccm : 10 Sccm으로 1:1 비율을 사용하였다. 그림 6은 ICP 파워에 따른 성분비이다. 700 W에서 750 W 정도까지가 일반적인 초전도 성분비인 1:2:3을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이렇게 ICP power 700 W, Cl₂:Ar = 1:1 약 50 %의 조건에서 제작된 샘플의 x-ray 분석을 보면 고온 초전도상이 에칭 전이나 후나 상의 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 77 K 이상의 초전도 성을 유지하고 있음을 의미한다. 이의 그림이 그림 7에 나타나 있다.

표 1. ICP 에칭을 위한 조건

Table 1. The condition for the ICP etching

조 건	값
ICP power	700 W
RF chuck power	150 W
ratio of gas	Cl ₂ : (Cl ₂ +Ar) = 1 : 1
base pressure	10 ⁻⁶ Torr
process pressure	100 mTorr

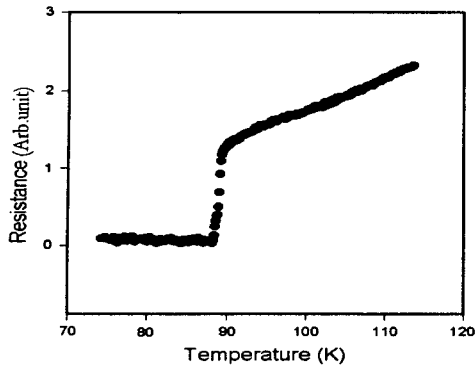


그림 4. ICP 에칭 후의 임계온도 측정결과
 Fig. 4. The critical temperature of sample after the ICP etching

표 2. 채널 형성을 위한 ICP 조건
 Table 2. The condition of the ICP for fabrication of channel

조건	값
ICP power	450 W
RF chuck power	150 W
혼합가스 비율	Cl ₂ : Ar = 1:1
chamber 압력	5 mTorr

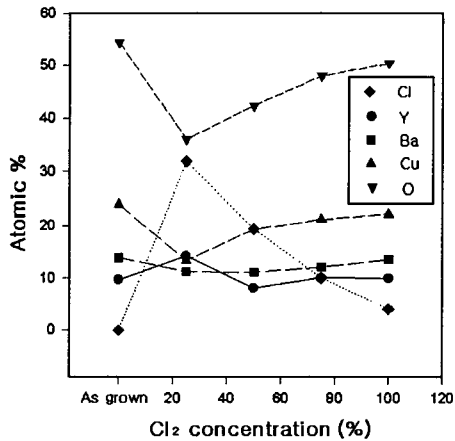


그림 5. 염소가스의 농도에 따른 성분분포
 Fig. 5. Component distribution of YBaCuO thin film with Cl₂ concentration

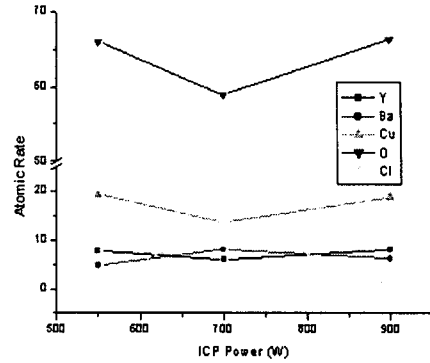
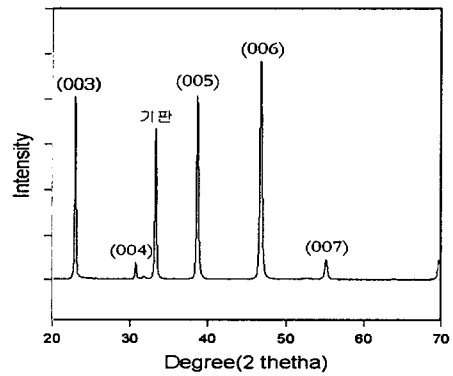
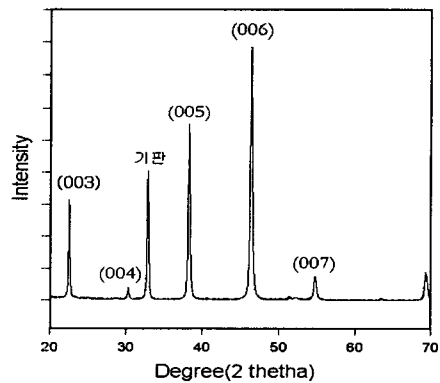


그림 6. ICP power에 따른 성분분포
 Fig. 6. Component distribution of YBaCuO thin film with the ICP power



(a)



(b)

그림 7. ICP 에칭된 단면의 X-ray

- (a) 에칭 전의 샘플
- (b) ICP 에칭 후의 샘플

Fig. 7. X-ray of etched feature by ICP method

- (a) before etching
- (b) after etching

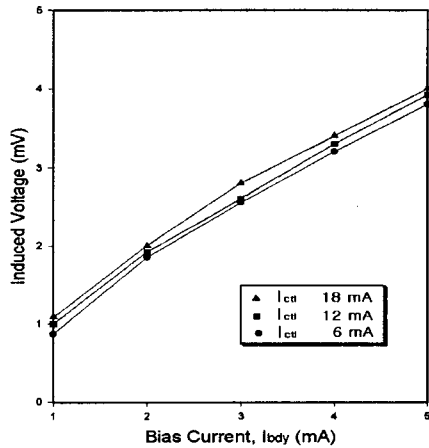


그림 8. ICP 에칭 장비에 의하여 제작된 SFFT의 I-V 특성

Fig. 8. I-V of the SFFT fabricated by ICP method

그림 8은 최종적으로 제작된 샘플을 액체 질소에 담그어 I-V 특성을 측정 한 결과이다. control 전류 (I_{cn})를 변화시키기에 따라 채널에서 유도된 전압이 어떻게 변화되는 가를 보였다. 여기서 current 전류의 증가는 초전도 채널안으로 인가되는 자계의 증가를 의미한다. 6, 12, 18 mA로 변화시킴에 따라 전압의 증가가 그림과 같이 있음을 알 수 있다. 이때 control 전류의 증가분에 대한 전압변화($\Delta V/\Delta I_{cn}$)를 trans-resistance(r_m)이라 하는데 약 18 m Ω 을 얻었다. 이는 최근이 외국 논문에 비하여 매우 적은 값이다. 그러나, 이 값은 서로간에 구현된 패턴 모양이 다르므로 절대비교는 할 수 없지만 ICP 장비를 이용하여 액체 질소 온도하에서 I-V 특성을 나타내었다는 데서 의미를 찾을 수 있다. 또한 ICP 장비는 기존의 wet etching 방법에 비하여 under cut 현상이 없는 에칭을 실시할 수가 있는 장비이고, 또 RIE 건식 에칭 장비에 비해서도

고밀도 플라즈마를 이용함으로 인해 샘플의 표면에 충격을 크게 가하지 않는다는 것을 고려하여 볼 때 이의 연구여하에 따라서는 좋은 특성의 SFFT도 제작할 수 있으리라 본다.

4. 결 과

실험을 통하여 77 K에서 I-V 특성을 보이는 SFFT를 제작하였다. etch rate 2500 - 3500 A/min. 의 ICP 조건을 통해 두께가 약 300 nm, 채널 폭 3 μ m를 갖는 Superconducting flux flow transistor (SFFT)를 제작할 수 있었다. 이때 ICP 파워는 700에서 750 W정도 이었고, 염소가스대 아르곤 가스의 비율은 1:1 정도 이었다. 기존의 반도체 에칭 장비인 ICP 장비를 이용해서 고온 초전도성을 파괴하지 않는 표면 에칭을 할 수 있음을 X-ray 분석을 통해 보여 주었다.

참 고 문 헌

- [1] Shigeki Sakai "Theoretical study of electric-field effects in high- T_c oxide superconductor using an ultrathin-metal-insulator super lattice model" *Physical Review B*, vol. 47, No. 14, pp 9042-9047, April 1993.
- [2] T. Fujii, Ken Sakuta, T. Awaji, Ken-ichi Matsui, T. Hirano, Y. Ogawa, and T.K.Kobayashi."Metal-insulator-superconductor field effect transistor" *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 31, No. 5B, pp L612-L615, May 1992.
- [3] Q.Huang, N.Yoshikawa and M.Sugahara, "Fabrication and characterization of HTS/semiconductor three terminal" *IEEE trans. on applied supercon.*, vol. 3, No.1, march 1993.
- [4] Yorktown Heights, "A new superconducting-base transistor" *IEEE trans. on mag.*, vol. Mag-21, No.2, March 1985.
- [5] J.S.Martens et al., "S parameter measurements and microwave applications of superconducting flux flow transistors." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, pp 2018-2025, December, 1991.

- [6] J.S.Martens et al., "S parameter measurements and microwave applications of superconducting flux flow transistors." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, pp 2018-2025, December, 1991.
- [7] 강형곤, 임성훈, 임연호, 한윤봉, 황종선, 한병성 "새로운 ICP 장치를 이용한 고온 초전도체의 Dry etching 과 Wet etching 기술과의 비교" *KIEME* vol.14, No.2, pp 158 Feb. 2001
- [8] 강형곤, 임성훈, 박성진, 한병성 "MPMG법을 이용한 YBaCuO 초전도체의 임계특성에 영향을 미치는 파라미터" *KIEE* Vol. 48c, NO.4, pp 221-225, Apr. 1999.