

## 플라즈마 식각을 이용한 초전도 자속 흐름 트랜지스터 제작

### Fabrication of Superconducting Flux Flow Transistor using Plasma etching

강형곤\*, 임성훈\*, 고석철\*, 한윤봉\*\*, 한병성\*\*\*

(H-G Kang, S-H Lim, S-C Koh, Y-B Hahn, B-S Han)

#### Abstract

The channel of the superconducting Flux Flow Transistor has been fabricated with plasma etching method using ICP. The ICP conditions were 700 W of ICP power, 150 W of rf chuck power, 5 mTorr of the pressure in chamber and 1:1 of Ar : Cl<sub>2</sub>, respectively. The channel etched by plasma gas showed superconducting characteristics of over 77 K and superior surface morphology. The critical current of SFFT was altered by varying the external applied current. As the external applied current increased from 0 to 12 mA, the critical current decreased from 28 to 22 mA. Then the obtained  $r_m$  values were smaller than  $0.1\Omega$  at a bias current of 40 mA. The current gain was about 0.5. Output resistance was below  $0.2\Omega$ .

**Key Words** : Superconducting Flux Flow Transistor, Inductively coupled process, channel, plasma

#### 1. 서론

미래 첨단 산업은 몇 배 이상 배가된 성능과 초고속을 겸비한 기술을 요구하고 있다. 0 저항 특성을 가지는 초전도체는 이러한 기술적 요구에 부합하는 물질로서 실리콘으로 대표되는 반도체 산업의 다음 주자로서 주목 받고 있다. 초전도체는 현재 전력의 한계로 더 이상의 발전에 제동이 걸린 반도체의 대체 기술로 초전도 전자소자라는 새로운 응용분야를 열어 주었다. 우선 전기 저항이 0이라는 특성은 각각 분리된 칩 간의 신호 연결시 파생되는 처리 지연, 혼선, 분산 등의 손실을 초전도 미세선을 제작해 처리손실 제로에 가까운 테라헤르츠급 파형을 교환할 수 있다는 점과 조셉슨 접합이라는 능동소자를 이용해 1조분의 1초인 피

코초의 작동 속도를 가능하게 한다. 또한 이의 공정 기술은 반도체 기술에 비해 간단하다는 점 또한 초전도 전자소자가 가지는 경쟁력이다. 현재 초전도 박막을 이용한 많은 전자 소자가 개발되고 있다. 이러한 초전도 소자의 많은 연구 중에서 초전도 트랜지스터에 대한 연구는 현재 다른 초전도 응용디바이스와 비교하여 볼 때 빈약한 연구실정이다. 초전도 트랜지스터는 기존 반도체 트랜지스터와 같이 외부 제 3의 단자를 이용하여 전류의 흐름을 컨트롤한다는 개념하에 미국과 일본 중심으로 연구가 이루어지고 있다. 그동안의 연구결과 초전도 전계효과 트랜지스터(SuFET)<sup>[1, 2]</sup>, 초전도체 사이에 유전체를 삽입한 형태의 Dielectric Base Transistor (DBT)<sup>[3]</sup>, 기존의 반도체 트랜지스터에서 emitter 단자와 collector 단자를 초전도체로 대체한 형태 혹은 기존의 베이스 단자를 초전도체로 대체한 Superconducting Base Transistor (SBT)<sup>[4]</sup>, 그리고 혼합상태에서 발생한 상전도 vortex를 이용한 Superconducting Flux Flow Transistor (SFFT)<sup>[5]</sup> 등이 있다. 특히 SFFT는 다른 초전도 트랜지스터와는 달리 다층 박막의 제작

\* 전북대학교 전기공학과  
(전주시 덕진구 덕진동 664-14)  
Fax : 063-277-0918  
E-mail : joshuah@shinbiro.com

\*\* 전북대 화학공학과 교수

\*\*\* 전북대 전기공학과 교수, 공업기술연구소 소속

이 필요없이 제작이 쉽다는 장점이 있다. 본 연구에서는 SFFT의 핵심이라고 할 수 있는 채널을 기존의 습식방법, 또는 Focused ion beam 장비를 이용하는 방법과는 달리 ICP 장치를 이용하여 플라즈마 식각법으로 이를 제작하였다. 본 논문에서는 먼저 채널 제작을 위한 플라즈마 식각의 적합성을 소개하고 다음으로 이의 방법으로 제작된 소자의 특성을 I-V 곡선을 측정함으로써 플라즈마를 이용한 SFFT 트랜지스터의 제작 가능성을 보여 주었다.

## 2. 실험 과정

1 cm × 1 cm × 0.5 mm 크기의 LaAlO<sub>3</sub> 기판 위에 laser ablation 법으로 제작한 두께 약 500 nm 의 초전도 박막을 기존의 습식식각 방법과, ICP 장치라는 플라즈마 식각 장비를 이용하여 SFFT의 채널을 제작하였다. 이때 Control line의 폭은 20 μm, body line은 50 μm의 폭이며 body line 안에 align 공정을 통해 제작한 채널은 약 3 μm 폭으로 설계하였다. 사용된 장치의 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<sup>[6]</sup>. 또한 인산, 소수성 용매인 Br 수 등에서도 초전도 박막의 표면 식각을 실시하여 ICP 장치를 사용한 플라즈마 식각과 비교하여 보았다.

## 3. 실험 결과 및 논의

그림 1에서 4은 ICP 장비의 ICP power, rf power, 챔버 내 압력 그리고 식각 가스의 비율에 따른 초전도 박막의 성분분포를 나타낸 그림이다. 이를 통하여 적절한 식각 조건을 구하였다. ICP power는 700 W, rf power는 150 W, 챔버내 압력은 5 mTorr, 그리고, Ar : Cl<sub>2</sub> 혼합가스의 비율은 1:1에서 Y:Ba:Cu 가 고온초전도체의 성분 비율인 1 : 2 : 3 을 유지함을 알 수 있었다. 그림 5는 일반적인 식각 방법인 인산, Br 수 또 플라즈마 식각 후 이들의 식각 표면의 거칠기를 AFM 사진으로 확인한 것이다. 원 샘플의 표면 거칠기는 rms 11.846 nm 이다. 소수성 에천트인 Br에서의 경우는 약 20.187 nm, 강산 용액인 인산에서는 약 48.791 nm, 그리고, ICP 장치를 사용한 플라즈마 식각인 경우에는 약 24.161 nm 였다. 특히 강산에 식각한 경우에는 매우 거친 표면을 보여준다. 비록

플라즈마 식각이 소수성 에천트인 Br 수에 비해서는 좀 거친 표면을 보여 주었지만 습식 식각인 경우 언더컷 현상이 있는 것을 감안할 때<sup>[7]</sup> ICP 장비를 이용한 플라즈마 식각은 SFFT 제작시 재현성 있는 채널을 제작할 수 있음을 보여 준다. 또한 플라즈마 식각 후 임계온도 또한 77K 이상을 유지함을 그림 6을 통해 알 수 있다. 그림 7은 제작한 SFFT의 I-V 곡선을 보여주는 그림이다. 전형적인 트랜지스터의 I-V 특성을 보여준다. 바이어스 전류의 증가에 따라 유도전압이 증가하였으며, 외부 컨트롤 전류가 0, 4, 8, 12 mA로 증가함에 따라 채널의 임계전류 또한 28, 26, 24, 22 mA로 일정하게 감소함을 알 수 있다 (그림 8). 이는 컨트롤 전류로 인한 외부 인가자계에 의하여 초전도체의 임계전류가 변하고 있음을 의미한다. 이때 저항이득은 40 mA의 바이어스 전류에서 약 0.1 Ω 이었으며, 출력 저항은 0.2 Ω 이하 였다.

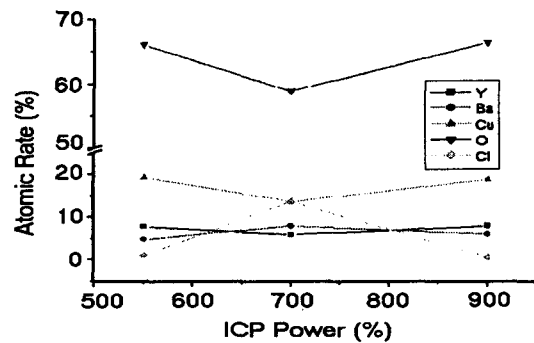


그림 1. ICP power에 따른 성분분포

Fig. 1. Composition rate along ICP power

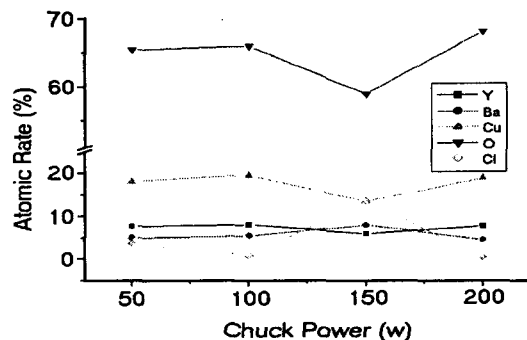


그림 2. Chuck power에 따른 성분분포

Fig. 2. Composition rate along Chuck power

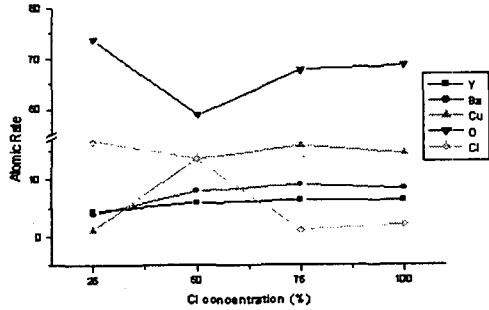


그림 3. Cl<sub>2</sub> 양에 따른 성분분포  
 Fig. 3. Composition rate along Cl<sub>2</sub>

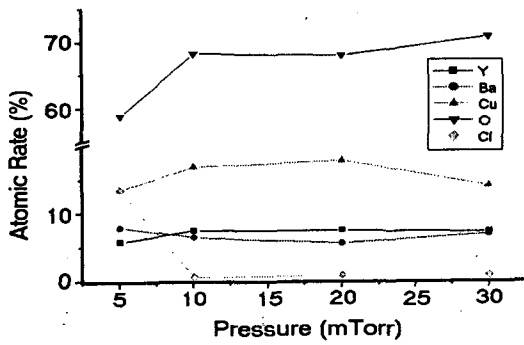


그림 4. 챔버 내 압력에 따른 성분분포  
 Fig. 4. Composition rate along pressure in the chamber

#### 4. 결과

ICP 장치를 이용하여 성공적인 SFFT 채널을 제작하였다. 이때 ICP의 조건은 ICP power 700 W, rf chuck power 150 W, 챔버내 압력 5 mTorr, 그리고, Ar : Cl<sub>2</sub> 혼합가스의 비율 1:1이었다. 이때 77 K 이상의 임계온도와 우수한 표면 균일도를 갖는 SFFT 채널을 제작할 수 있었다. 0, 4, 8, 12 mA의 외부 인가전류에 따른 SFFT 채널의 임계전류 변화는 28, 26, 24, 22 mA이었다. 일반적인 트랜지스터의 특성을 갖는 I-V 곡선을 구할 수 있었다. 그때 저항이득은 40 mA의 바이어스 전류에서 약 0.1 Ω 이었으며, 출력 저항은 0.2 Ω 이하였다.

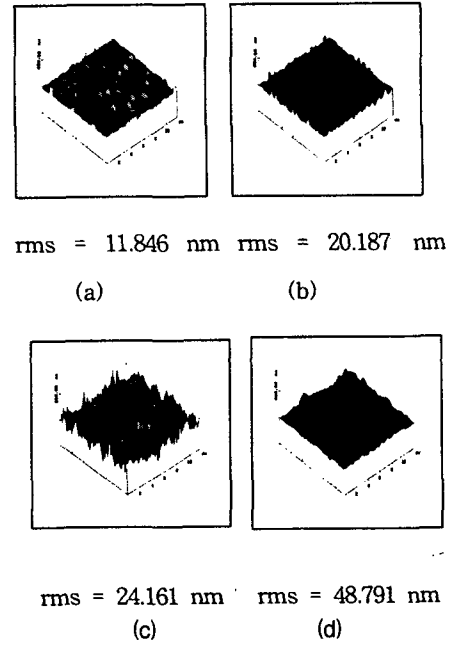


그림 5. 다양한 식각 방법에 따른 초전도 샘플의 AFM 사진  
 (a) 원 샘플 (b) Br 에 의한 식각  
 (c)인산에 의한 식각 (d) 플라즈마에 의한 식각  
 Fig. 5. AFM images of YBCO thin films with various etching methods  
 (a) Original (b) by Br  
 (c) H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (d) ICP

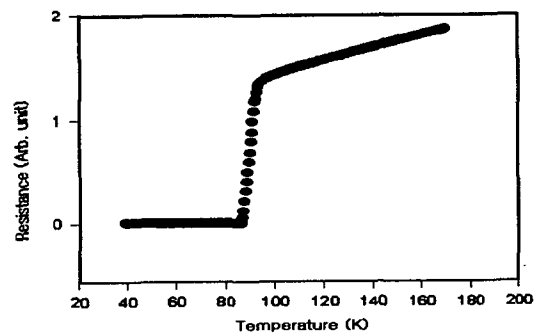


그림 6. 플라즈마 식각된 박막의 임계온도  
 Fig. 6. Critical temperature of thin film after ICP etching

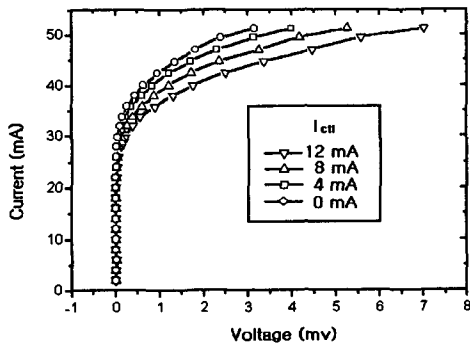


그림 7. 제작된 SFFT의 I-V 곡선  
Fig. 7. I-V curves of the SFFT

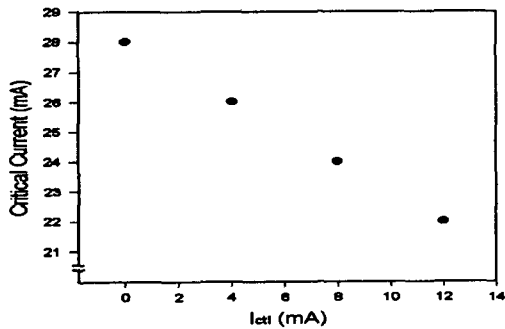


그림 8. 컨트롤 전류에 따른 임계전류 변화  
Fig. 8. Critical current of channel along the control current

#### 참고 문헌

- [1] S. S. "Theoretical study of electric field effects in high-Tc oxide superconductor using an ultrathin - metal - insulator superlattice model" *Physical Review B*, vol. 47, No. 14, pp 9042-9047, April 1993.
- [2] T. Fujil, K. Sakuta, T. Awaji, K. Matsui, T. Hirano, Y. Ogawa, and T. 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 suprcn.*, vol. 3, No.1, pp. 1957-1960, march 1993.
- [4] D. J. Frank, M. J. Brady and A. Davidson, "A new superconducting-base transistor" *IEEE trans. on mag.*, vol. Mag-21, No.2, pp. 721 -724, 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] 강형곤, 임성훈 외 4 "새로운 ICP 장치를 이용한 고온 초전도체의 dry etching과 기존의 Wet etching 기술과의 비교" *KIEEME*, Vol. 14, No. 2, pp. 158-162, Feb. 2001.
- [7] Y. H. Im, H. G. kang, B. S. Han, and Y. B. Hahn "High Density Plasma Etching of YBaCuO Superconductors" *Electrochemical and Solid State Letters*, Vol. 4, pp C77-C79, Oct., 2001.