

ICP 장치를 이용한 초전도 자속 흐름 트랜지스터의 링크 제작

論 文
50C - 10 - 3

Fabrication of the link of the Superconducting Flux Flow Transistor Using the ICP Etching Method

姜亨坤* · 林然浩** · 林成勳* · 崔孝祥*** · 韓允奉[§] · 韓秉誠^{§§}

(Hyeong Gon Kang · Yeon Ho Im · Sung Hun Lim · Yoon Bong Hahn · Byoung Sung Han · Hyo Sang Choi)

Abstract - The effects of accelerated Ultraviolet (UV) radiation on High temperature vulcanized (HTV), Room temperature vulcanized (RTV) silicone rubber and two types of ethylene propylene diene terpolymer (EPDM) used for composite insulator were investigated by hydrophobicity class (HC), surface voltage decay after corona charging, SEM-EDS, FTIR and XPS. The contact angle in two kinds of silicone rubber was scarcely change, but EPDM occurred to the loss of hydrophobicity followed by surface cracking and chalking. The surface voltage decay on UV-treated silicone rubber and EPDM showed a different decay trend with UV treatment. EDS and XPS analysis indicated that the oxygen content increased with UV treatment time in all samples. For silicone rubber, the oxidized groups of inorganic silica-like structure increased with UV treatment time. The oxidized carbon of C=O, O=C-O in EPDM increased. These oxidized surface for each material had different electrostatic characteristics, so deposited charges were expected to have different impacts on their surface hydrophobicity. The degradation mechanism based on our results was discussed.

Key words : Superconductor, ICP etching, channel, ICP power, rf power, pressure of ICP, Superconducting Flux flow Transistor

1. 서 론

고온 초전도체가 발견된 이후로 초전도체를 이용한 전자 디바이스의 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 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 vortex 들을 형성할 수 있는 약결합을 인위적으로 만들어 이를 채널층으로 사용하는 트랜지스터로서 재현성 있는 채널 제작이 핵심기술이라고 할 수 있다.

기존의 질산이나 인산과 같은 강산을 이용한 채널 제작은 임계 온도 및 초전도 특성을 크게 떨어뜨리는 문제가 있으며, 이를 극복하기 위해 소수성 Br을 이용한 연구결과도 발표되기도 하였다[6]. 본 논문에서는 새로운 반도체 식각 장비인 ICP장비를 이용하여 채널을 제작하여 이의 특성을 조사하였다. ICP장치를 이용한 식각 방법은 이온의 강한 직진성으로 인해 기존 습식에칭에서 발견되는 under cut 현상이 감소될 뿐만 아니라[7] 고밀도 플라즈마를 이용함으로써 기존의 RIE 장비와 같은 건식 식각 방법들에 비해서 플라즈마 발생시 하부전극에 생기는 self-bias 전압이 낮음으로 시료표면에 손상을 거의 주지 않고서 식각을 진행할 수 있다. 또한 채널의 두께 조절 또한 습식 에칭에 비하여 용이한 장점도 있다. 본 논문에서는 여러 가지 ICP 장비의 조건에 따른 식각률을 조사하였으며, 얻어진 조건을 근거로 하여서 초전도 자속 흐름 트랜지스터(SFFT)의 채널을 제작하였다. 또한 이 채널의 특성을 x-ray 와, E.D.S. 분석을 통하여 조사하였다.

2. 이 론

제 2종 초전도체는 1종 초전도체와는 달리 상부와 하부라 하는 두 개의 임계자계를 가지고 있다. 1종 초전도체는 임계자계 이상의 자계가 가히지면 곧 바로 초전도성을 잃어버리지만 제 2종 초전도체는 하부 임계자계 이하의 자계까지는 계속하여 초전도성을 유지

* 正 會 員 : 全 北 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
** 準 會 員 : 全 北 大 化 學 工 學 科 博 士
*** 正 會 員 : 韓 國 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員
§ 準 會 員 : 全 北 大 化 學 工 學 科 教 授
§§ 正 會 員 : 全 北 大 電 氣 工 學 科 教 授
接受日字 : 2001年 6月 20日
最終完了 : 2001年 8月 30日

한다. 그러나, 여기에서 상부임계자계 이하 하부 임계자계 이상으로 자계가 가해진 경우에는 초전도체 내부에 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 그림 1과 같이 외부 전류에 의한 자계가 인가되고, 또 초전도체내에 전류가 흐르게 되면 이 vortex들은 lorentz force를 받아 채널을 따라 움직이게 된다. 이 움직임은 곧 바로 저항을 유발 상전도로의 전이를 일으킨다. 이때 발생된 전압을 유도전압(V)라고 할 수 있고, 다음과 같이 표기 된다.

$$V = n\phi_0 v_r d$$

여기서 n 은 단위 면적당의 핵의 수로서 ϕ_0 는 각각의 핵속의 자속(fluxon)이고, v_r 는 핵의 운동의 옆방향 속도, d 는 전압 단자의 거리이다. 외부 자계의 크기에 따라 이 유도전압의 크기를 조절 트랜지스터의 특성을 얻을 수 있다. 이 vortex의 흐름은 초전도 선재에서 낮은 임계전류밀도의 원인이 되기도 하여 이의 pinning을 위해 초전도체를 제작할 때 상전도 물질을 소량 첨가하기도 한다[8].

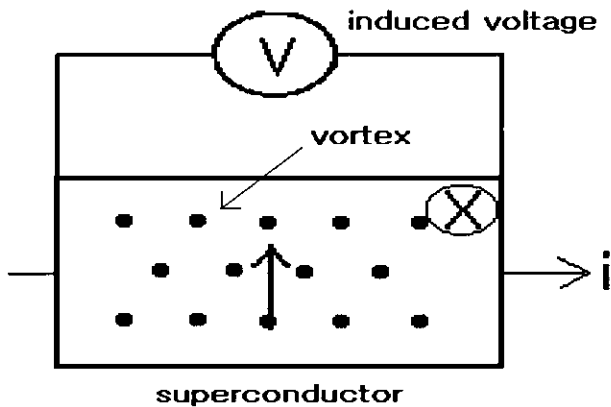


그림 1. 채널에서 유도된 전압
Fig. 1. Induced Voltage at channel

3. 실험 준비

1 cm × 1 cm × 0.5 mm 크기의 LaAlO₃ 기판 위에 laser ablation 법으로 제작한 두께 약 400 nm 의 초전도 박막을 독일의 Theva company에서 구입하였다. 이를 이용하여 그림 2와 같은 SFFT를 제작하였다. Control line의 폭은 20 μm, body line은 50 μm의 폭이며 길이는 1 mm 이다. 또한 body line 안에 있는 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. 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 μm까지 포토레지스터 층을 형성하였다. 이를 위해 스피ن 속도 4000 rpm로 35 초 동안 회전하며, 도포를 실시한 후 90 °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.

이렇게 제작된 패턴 위에 다시 폭 3 μm의 channel을 제작하기 위하여 그림 3과 같은 공정으로 align 에칭을 실시하였다. 이때 ICP 공정 조건이 표 2에 나타나 있다. 여기서 ICP power를 700 W에서 450 W로 감소시켰다. 이는 채널 층이 에칭 후에도 초전도 특성을 그대로 유지할 수 있도록 에칭면의 파괴를 최대한 줄이기 위해서다.

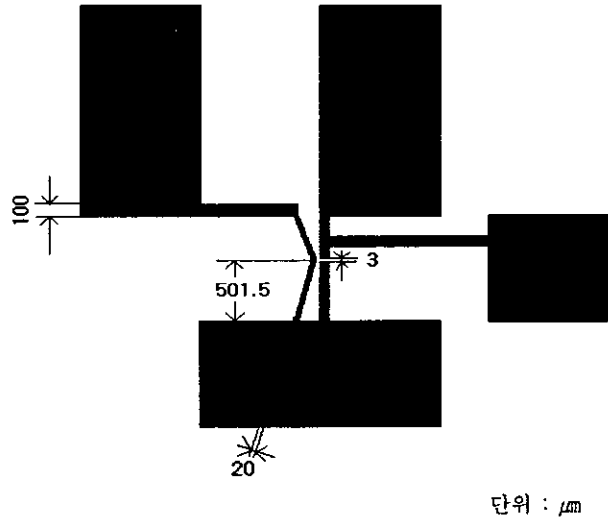


그림 2. 제안된 SFFT 모델
Fig 2. The model of the proposed SFFT

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

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

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

4. 실험 결과 및 논의

그림 4는 ICP power에 따른 식각율의 변화이다. ICP power가 증가함에 따라 식각율이 증가함을 알 수 있다. 이는 그림4의 b에서 보듯이 ICP power가 증가함에 따라 챔버내의 이온의 수가 증가되었음과 관계 있다. 이온 수의 증가는 그 만큼 시료를 빠르게 에칭시킬 수 있다. 그러나, 700W 이상에서는 이온 농도가 계속하여 증가되었지만 식각율의 증가에는 기여하지 못하고 있다. 이는 이온 농도의 증가는 상대적으로 이온의 움직임을 둔화시켜 식각율을 더 이상 증가시키지 못한 것으로 판단된다.

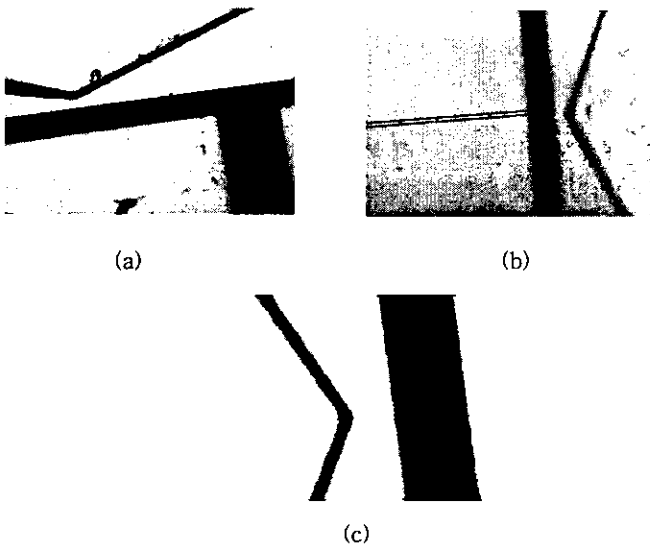


그림 3. SFFT의 제작 과정

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

Fig. 3. Fabrication process of the SFFT

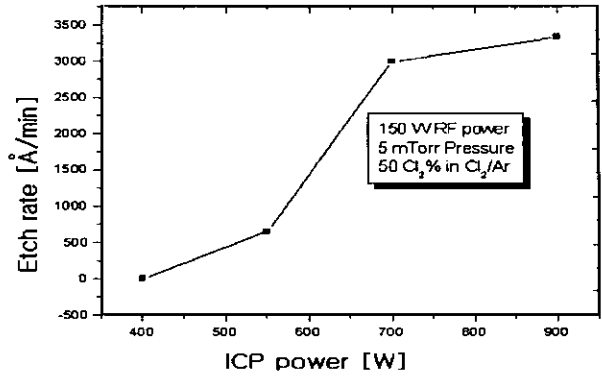
- (a) etched pattern
- (b) align for the fabrication of channel
- (c) SFFT with 3 μm channel

그림 5는 rf power에 따른 식각율의 변화이다. rf power가 증가함에 따라 식각율이 증가하였다. 이는 강한 rf power는 ICP 코일에 의하여 생성된 이온들을 기관 쪽으로 강하게 끌어당김으로 인해 식각율이 증가하였다고 이야기 할 수 있다. 150 W 이상부터는 포화 상태에 이르러 더 이상의 rf power의 증가는 의미가 없다.

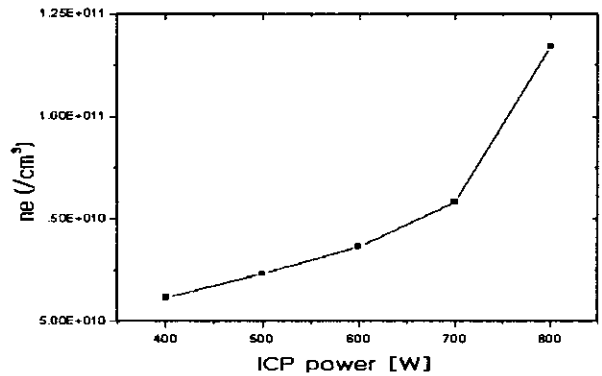
그림 6은 챔버내의 압력에 따른 식각율을 보여준다. 그림 6의 b를 보면 압력이 증가할 수록 이온의 농도가 약간 증가하였지만 10 mTorr 이상 부터는 챔버 내의 강한 압력으로 이온의 평균자유행정 길이가 짧아져 이온과 전자와의 결합을 증가시킴으로 이온 농도를 감소시켰다. 그림 6 a 의 식각율의 변화는 단순히 압력에 따른 이온 농도의 변화와 직접 연결 시켜 해석 할 수 없고, 압력으로 인한 주위의 여러 가지 조건의 변화들과의 연관 관계 속에서 해석해야 된다고 본다.

이상과 같은 결과를 토대로 표 1, 2와 같은 조건으로 초전도 자속흐름 트랜지스터의 링크를 제작하였다. 그림 7은 AZ 4620

포토리지스터를 이용하여 원하는 패턴을 ICP 장비를 이용하여 형성하고 다시 포토리지스터를 아세톤으로 제거한 후, 박막의 임계온도 특성을 측정한 결과이다[7]. 이때 약 87 K 정도의 임계온도를 나타내었다.



(a)



(b)

그림 4. ICP power에 따른 식각율의 변화

- (a) 식각율 변화 (b) 이온의 농도 변화

Fig. 4. The variance of etch rate with the ICP power

- (a) Variance of etch rate
- (b) Variance of the concentration of Ion

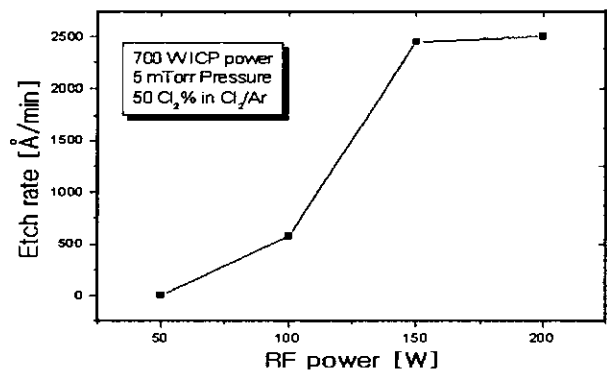
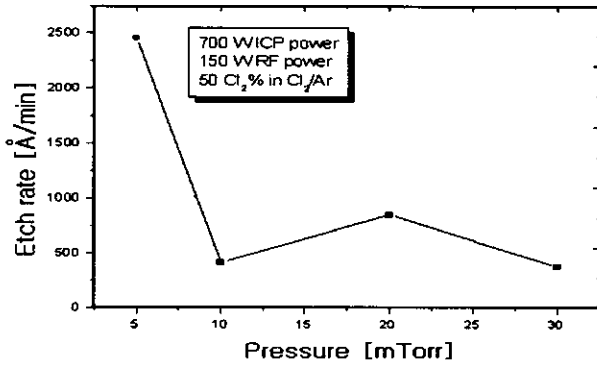


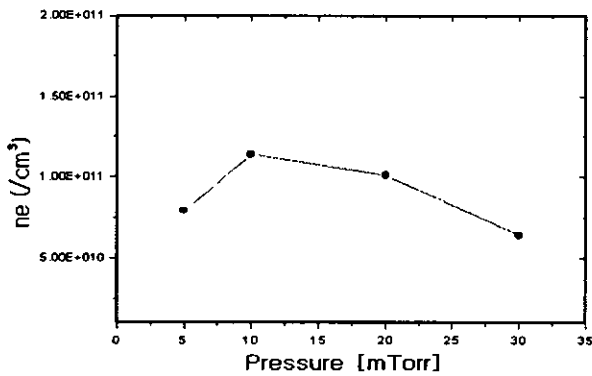
그림 5. RF power에 따른 식각율의 변화

Fig.5. The variance of etch rate with the rf power

이는 포토레지스터의 ICP dry etching 후에도 임계온도의 변화는 일어나지 않았음을 알려주는 결과이다. 또한 에칭 도중 패턴의 변형 같은 것이 일어나지 않았음을 그림 3의 a를 통해 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. 챔버 내 압력에 따른 식각율의 변화
(a) 식각율 변화 (b) 이온의 농도 변화

Fig. 6. The variance of etch rate with the pressure of chamber

- (a) Variance of etch rate
- (b) Variance of the concentration of Ion

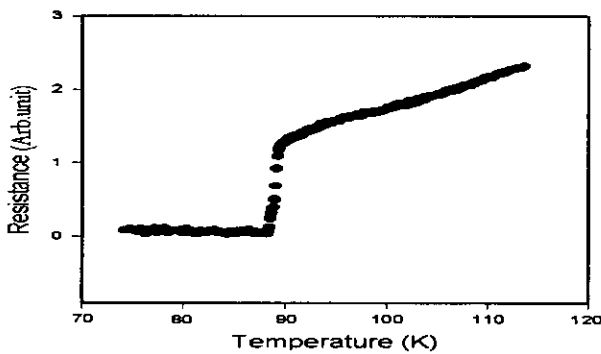


그림 7. ICP 에칭 후의 임계온도 측정결과

Fig. 7. The critical temperature of sample after the ICP etching

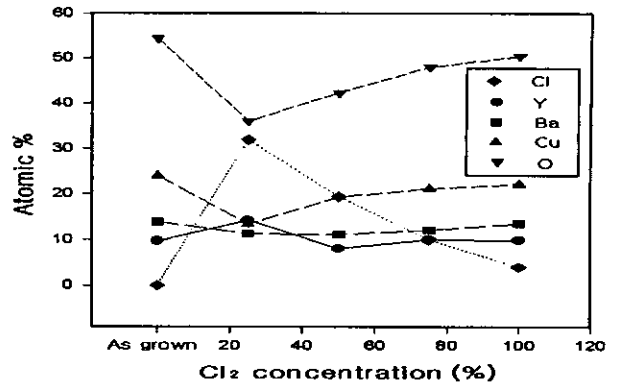
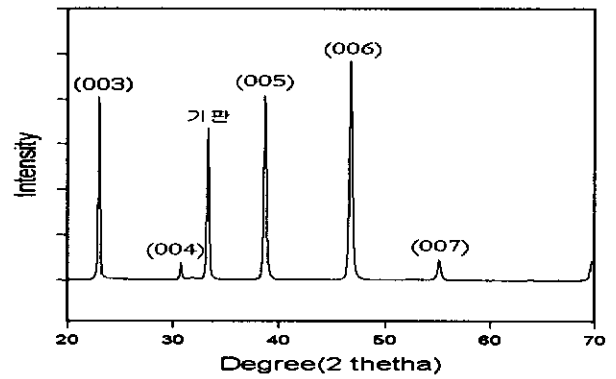
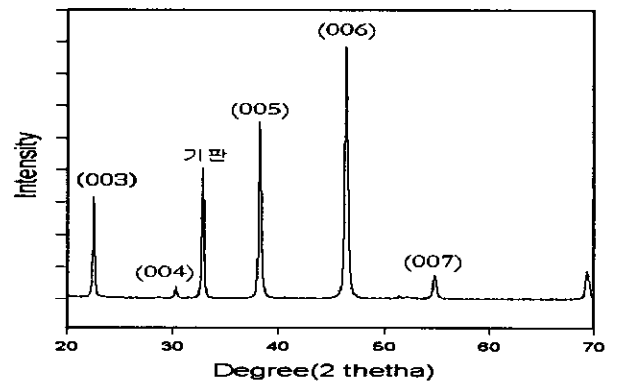


그림 8. 염소가스의 농도에 따른 성분분포

Fig. 8. Component distribution of YBaCuO thin film with Cl₂ concentration



(a)



(b)

그림 9. ICP 에칭된 단면의 X-ray

- (a) 에칭 전의 샘플 (b) 에칭 후의 샘플

Fig. 9. X-ray of etched feature by ICP method

- (a) before etching (b) after etching

그림 8은 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. $Cl_2:Ar = 1:1$ 약 50%의 Cl_2 부터 Y, Ba, Cu의 비율이 고온 초전도체의 성분비인 1:3의 형태를 유지함을 알 수 있다. 이를 근거로 혼합가스의 비율을 표 2에서와 같이 10 Sccm : 10 Sccm으로 1:1 비율을 사용하였다. 또한 그림 9에서와 같이 x-ray 분석 결과를 보면 제작된 채널의 고온 초전도성이 에칭 전이나 후나 상의 변화가 없음을 보여주고 있다. ICP 장비는 기존의 wet etching 방법에 비하여 under cut 현상이 없는 에칭을 실시할 수가 있는 장비이고, 또 RIE 건식 에칭 장비에 비해서도 고밀도 플라즈마를 이용함으로써 인체 샘플의 표면에 충격을 크게 가하지 않는다는 것을 고려하여 볼 때 이의 연구여하에 따라서는 좋은 특성의 SFFT도 제작할 수 있으리라 본다.

5. 결 과

반도체 에칭 장비인 ICP 장비를 이용하여 초전도자속흐름 트랜지스터(SFFT)의 약결합 링크를 제작하였다. ICP power의 증가는 챔버내 이온의 농도를 증가시켰으며, 챔버 내 압력의 증가는 이온들의 재결합의 증가로 인해 오히려 식각율이 감소하였다. rf power의 증가는 기판 쪽으로 이온을 강하게 끌어 당김으로 인해 식각율을 증가시켰다. 그러나, 150 W의 power를 기점으로 포화를 이루었다. 여기서 얻어지 조건들을 토대로 두께 약 300 nm, 채널 폭 3 μm 를 갖는 Superconducting Flux Flow Transistor(SFFT)의 약 결합 링크를 제작하였다. ICP 에칭 전과 후, 링크의 초전도 상태를 분석해 볼 때 Y, Ba, Cu의 비율인 1:2:3이 ICP power 450 W, rf power 150 W, Ar과 Cl의 혼합가스 비율이 1:1, 그리고 챔버내 압력이 5 mTorr 일 때 에칭 전과 후의 변화가 거의 없었다. ICP 장비에서의 양호한 이온의 직진성을 고려한다면 계속 된 연구를 통해 SFFT 채널의 제작에 있어 기존의 Br을 이용한 wet etching 법보다 향상된 trans-resistance를 얻을 수 있으리라 본다.

참 고 문 헌

- [1] Shigeki Sakai "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. Fujii, Ken Sakuta, T. Awaji, Ken-ichi 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] 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] 강형관, 임성훈, 임연호, 한윤봉, 황종선, 한병성 "새로운 ICP 장치를 이용한 고온 초전도체의 Dry etching 과 Wet etching 기술과의 비교" KIEEM vol.14, No.2, pp 158 Feb. 2001
- [8] 강형관, 임성훈, 박성진, 한병성 "MPMG법을 이용한 YBaCuO 초전도체의 임계특성에 영향을 미치는 파라미터" KIEE Vol. 48c, NO.4, pp221-225, Apr. 1999.

저 자 소 개



강형곤 (姜亨坤)

1967년 12월 생. 1995년 전북대 일반대학원, 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 박사 과정

Tel : 063-270-2396

E-mail : joshuah@shinbiro.com



최효상 (崔孝祥)

1994년 전북대 전기공학과 석사 취득. 2000년 8월 전북대 박사학위 취득. 현재 전력 연구원 선임연구원. 주관심 분야 초전도 전력 응용

Tel : 042-865-5947

E-mail : hschoi@kepri.re.kr



임연호 (林然浩)

1970년 5월 20일 생. 1994년 전북대 석사 취득. 2001년 전북대 박사학위 취득



한윤봉 (韓允奉)

1955년 5월 1일 생. 1980년 서울대 화학공학과 석사학위 취득 1988년 Utah 금속공학과 박사학위. 현재 전북대 화학공학과 부교수



임성훈 (林成勳)

1973년 11월 1일 생. 1996년 전북대 학사 졸업. 1998년 전북대 석사 졸업. 현재 동대학원 박사과정

Tel : 063-270-2396

E-mail : dolphine@shinbiro.com



한병성 (韓秉誠)

프랑스 루이파스퇴르대 박사 취득. 현재 전북대 전기공학과 교수. 주관심 분야 초전도공학

Tel : 063-270-2396

E-mail : hbs@moak.chonbuk.ac.kr