

원자힘 주사현미경 TiO 탐침을 이용한 고온 초전도 단일채널 자속 흐름 트랜지스터의 제작 및 특성 해석

고석철, 강형곤^{*}, 임성훈^{**}, 이종화, 이해성[§], 한병성

전북대 전기공학과, 전북대 기초과학지원연구원^{*}, 전북대 공업기술연구소^{**}, 한국기초과학지원연구원 전주분소[§]

Fabrication and Characterization of High- T_c Superconducting Single Channel Flux Flow Transistor using the Atomic Force Microscope TiO Cantilever Tip

Seokcheol Ko, Hyeong-Gon Kang^{*}, Sung-Hun Lim^{**}, Jong-Hwa Lee, Haesung Lee[§], Byoung-Sung Han
Chonbuk National Uni, BSRI Chonbuk Nat. Uni.^{*}, RCITERI^{**}, Jeonju Branch of KBSI[§]

Abstract

We have fabricated a channel of superconducting flux flow transistor (SFFT) using the voltage-biased atomic force microscope (AFM) TiO tip and performed numerical simulations for the SFFT controlled by the magnetic field with a control current. The critical current density in a channel of the fabricated SFFT was decreased with the applied current by a control line. By comparing the measured with theoretical results, we showed a possibility of fabrication of an SFFT with a nano-channel using AFM anodization process technique.

Key Words : AFM, SFFT, nano-channel, anodization process, numerical simulations

1. 서론

주사 터널링 현미경 (STM)과 원자힘 주사현미경 (AFM)과 같은 주사 근접형 현미경 (SPM) 기술의 사용은 원자단위, 나노단위의 표면을 변화시켜 나노 스케일의 전자 디바이스를 제작하기 위한 유용한 도구로써 보고되어 왔다[1]. AFM은 탐침을 사용하여 시료표면에 기계적인 스크래치를 가함으로써 매우 유용한 기능을 수행할 수 있다. 지금까지는 금속-유전체-반도체의 전계효과 트랜지스터 (FETs), 사이드 게이트 전계효과 트랜지스터 및 단전자 트랜지스터 (SETs)와 같은 Si 재료에 한정되어 AFM 탐침에 의한 산화라인들이 성장되는 것을 증명하기 위해 식각 마스크처럼 사용되어왔다[2]. 최근 송 그룹은 AFM 탐침의 강한 전계에 의해 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 초전도 스트립 라인의 표면변화가 전체적인 스트립 라인 위에 규칙적인 산화물 돌출 성장 및 위로 불룩하게 돌출되어 튀어나오는 크기를 제어할 수 있음을 발표하였다[3]. 또한,

AFM에 의해 변화되는 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 초전도 스트립의 조셉슨 자기 방사 특성 및 전류-전압 특성을 발표하였다.

초전도 자속 흐름 트랜지스터의 제작은 여러 층을 쌓지 않기 때문에 가장 간단하다. 그러나 재현성과 제어성을 충족시킬 수 있는 채널을 제작하기란 쉽지 않다. 약결합을 가지는 채널은 아브리코스브 볼텍스를 유기하고, 바이어스 전류와 인가된 자계에 의해 유기전압을 발생시킨다. 일반적으로 자속 흐름 트랜지스터의 채널은 인산과 브롬수 및 이소프로판올과 같은 습식식각 방법과 아르곤 이온밀링, focus 이온빔 및 유도 결합형 플라즈마와 같은 건식식각 방법에 의해 제작되어왔다.

본 논문에서는 AFM 나노-산화 처리에 근거를 바탕으로 인위적인 패턴 형성을 이용하여 자속 흐름 트랜지스터를 새롭게 제작할 수 있는 방법을 소개하고자 한다. 원자힘 주사현미경 탐침에 바이어스 전압을 인가함으로써 제작된 채널을 가지는

자속 흐름 트랜지스터로 구성된 분석적인 모델을 제안했다. 자속 흐름 트랜지스터 (SFFT)를 제작하기 위해서 컴퓨터를 이용하여 SFFT의 $I-V$ 특성을 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 산화된 채널 라인을 갖는 새로운 타입의 SFFT의 구조와 특성을 조사하였다. 본 연구는 AFM 방법에 의해 나노채널을 갖는 SFFT를 제작할 수 있는 가능성을 보여주었다.

2. 실험 방법

TiO로 코팅된 AFM 탐침을 사용하여 $YBa_2Cu_3O_{7-δ}$ 초전도 SFFT 채널에 산화피막을 형성시키기 위해 광리소그라피 공정을 이용하여 다음과 같은 방법으로 초전도 시료에 전체적인 패턴을 형성시켰다. $LaAlO_3$ 기판위에 Laser ablation 방법으로 두께 약 300 nm 두께의 $YBa_2Cu_3O_{7-δ}$ 초전도체를 증착하였다. 증착된 초전도 박막의 임계온도는 대략 87 K 이었으며, 그림 1과 같이 10 μm 브리지 폭 및 5 μm 의 브리지 길이 등을 갖는 SFFT의 전체적인 패턴을 제작하기 위해 마스크를 설계하였다. 다음으로 H_3PO_4 와 Di water의 비율을 1:150으로 하여 에천트 용액을 만들었다. 제작된 박막 위에 spin coater를 사용하여 스피ن속도 1000 rpm으로 5초간, 고속인 4000 rpm으로 20초 동안 positive 포토레지스터 AZ 6612를 사용하여 1.5 μm 두께로 얇게 도포하였다. 90°C의 hot plate에 2분간 soft baking을 실시한 후 노광기에 18초 동안 마스크를 대고 자외선을 노출시켰다. 이렇게 제작된 시료를 다시 현상액에 7초간 담가 자외선에 노출된 포토레지스터를 제거하고, 인산수용액에 50초 동안 담가 초전도체를 제거하여 원하는 패턴을 형성시켰다. 이와 같이 리소그라피 방법에 의해 형성된 전체적인 패턴에 AFM 캔티레버 탐침에 바이어스 전압을 인가하여 그림 1과 같은 AFM 산화처리 방법으로 SFFT 채널에 산화피막을 형성시키고, 전체적인 표면 변화를 관찰하기 위해 준비된 시료를 AFM의 칩 캐리어 위에 올려놓았다. 탐침과 시료 사이에 바이어스 전압을 인가할 때 전류가 잘 흐를 수 있도록 전도성 테이프 (카본 테이프)를 초전도 스트립 라인 한쪽에 부착하였다. AFM 팁 홀더안에 스프링 클립을 들어올려 TiO로 코팅된 탐침을 끼워놓은 후 팁 홀더를 근접 탐침형 주사 현미경 (Scanning Probe Microscope : SPM) 헤드

에 삽입하였다. 레이저 정렬점을 조정한 후 광탐지기 거울 레버를 조절하여 수직, 수평값은 제로로, sum값이 최대가 되도록 하였다. 주위 온도는 25°C, 습도는 55% 이상으로 하기 위해 솜에 물을 적서 샘플에 가깝게 위치해 놓았다. 진동을 피하기 위해 알루미늄 캡을 씌워 anti-vibration system위에 올려놓았다. AFM 동작 모드는 10.47 nN 척력으로 contact mode로 전환하여 탐침을 시료에 천천히 접근을 시킨 후 광학 현미경을 사용하여 샘플과 탐침의 위치를 스캐너를 이동하여 근접하게 맞추고 바이어스 전압을 인가하기 전에 샘플 표면 이미지를 우선적으로 얻었다. 샘플 표면에 바이어스 전압을 가하고자 하는 부분을 스캔영역으로 설정해놓고 가하고자 하는 바이어스 전압과 스캔 크기를 입력하였다. 이와 같은 실험방법으로 캔티레버와 시료사이에 contact mode를 사용하여 탐침과 초전도 시료 사이에 -12V 바이어스 전압을 인가하여 초전도 SFFT의 채널부분에 산화피막을 형성시켰다. 스캔영역은 10 $\mu m \times 2.5 \mu m$ 이며, 바이어스 전압을 인가할 때의 스캔율은 14.71 $\mu m/s$ 였다. 본 연구에서 전도성 AFM 탐침은 30 nm 두께의 TiO로 코팅된 고농도로 도핑된 Si 캔티레버를 사용하였다.

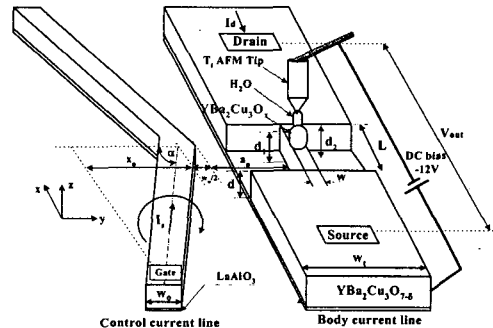


그림 1. 음극에 전도성 AFM 탐침을 사용한 AFM 산화처리 원리 및 약결합을 갖는 단일채널로 구성된 자속 흐름 트랜지스터의 구조.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2(a)는 습식식각 방법에 의해 바디전류라인의 채널을 제외하고 광리소그라피 공정에 의해 제작된 SFFT의 전체적인 형상을 광학현미경으로 이미지한 그림을 보여주고 있다. 그림 2(b)와 (c)는

AFM 탐침에 -12V 바이어스 전압을 인가하기 전과 인가한 후의 채널부분에서의 표면 변화된 AFM 분석 이미지를 보여주고 있다. -12V 바이어스 전압이 인가된 AFM 산화처리를 이용하여 얻어진 채널의 산화된 최대 돌출높이는 63.83 nm, 채널폭은 7.7 μm , 채널길이는 5 μm 인 SFFT를 제작하였다.

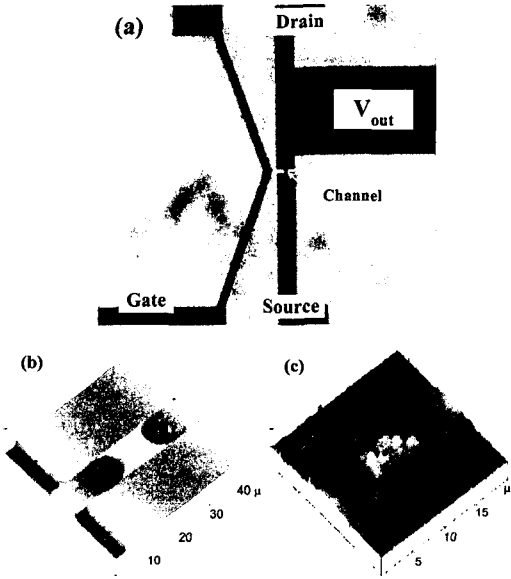


그림 2. (a) 초전도 자속 흐름 트랜지스터의 광학 현미경 이미지. (b) 음극인 AFM 탐침에 바이어스 전압을 채널부분에 인가하기 전의 3차원 표면 이미지. (c) 음극인 AFM 탐침에 바이어스 전압을 채널부분에 인가한 후의 3차원 표면 이미지.

그림 2는 단일채널을 갖는 초전도 자속 흐름 트랜지스터의 구조를 보여주고 있다. SFFT는 드레인 전류에 의해 바이어스 되는 마이크로 스케일의 채널부분과 자계를 발생하여 바디라인의 임계전류를 제어하는 게이트 라인으로 구성되어 있다. 자속 흐름 트랜지스터의 원리는 혼합상태에서 제어전류 I_g 에 의해 발생하는 자계는 채널 안으로 자속의 볼텍스들을 유발시킨다. 이 볼텍스들은 채널을 따라 핵력화되고 확산 과정 때문에 볼텍스 운동들이 일어난다. 이 볼텍스는 드레인 전류 I_d 로부터 로렌즈 힘에 의해 채널을 따라 움직이게 된다. 이 움직임은 곧바로 저항을 유발하여 상전도로 천이를

일으킨다. 이때 유기된 전압이 출력전압이다.

자속 흐름은 자속선 격자가 유동하는 손실영역이며, 손실은 거의 오음의 법칙을 따른다. 이는 전형적인 초전도체에서 전류가 임계치를 넘어설 때 나타나는 영역이다. 전형적인 초전도체에서 전류가 임계치보다 약간 작고, 온도가 충분히 크면 열적 요동이 자속선을 움직인다. 이 영역이 자속선 유동 영역이다. 이때 저항은 오음의 법칙을 따르지 않고 온도에 좌우한다. 결합이 있는 경우 전류-전압 특성 곡선에서 자속 열유동과 자속 흐름 사이의 경계점을 둘 필요가 없다. 만일 볼텍스들이 자유롭게 움직일 수 있으면 에너지 손실 없이 하부 임계 자기장 이상의 전류를 흐르게 할 수 없다. 따라서 한정된 임계전류를 흐르게 하려면 볼텍스들이 움직이지 않도록 핀고정을 해야한다. 결과적으로 단일 채널에 있어서 볼텍스들의 이동을 막아서 임계전류가 하부 임계 자기장에 의해 제한되지 않게 핀고정을 함으로써 SFFT의 동작을 가능하게 된다.

혼합상태에서 임계자기 이상으로 자장이 가해지면 새로운 볼텍스가 형성되어 드레인 전류는 이 볼텍스들을 이동시키기 때문에 에너지 소비가 발생된다. 볼텍스들이 바이어스 전류 I_d 가 흐르고 있고 산화피막이 형성된 두께 d_2 , 채널의 거리 L , 채널의 폭 w 을 가지고 있는 채널부분에서 거동할 때 채널부분의 단에서 유기되는 전압의 크기는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{out} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B \frac{\Delta S}{\Delta t} = B v_L L = \frac{N_{vortex}}{S} \phi_0 v_L L = n L v_L \phi_0 \quad (1)$$

여기서 Φ 는 채널에서의 자속이고, t 는 시간, B 는 자속밀도, S 는 채널의 단면적, N_{vortex} 는 볼텍스의 개수이다. n 은 볼텍스 표면 밀도이고, v_L 은 볼텍스 평균 속도이다. ϕ_0 는 자속의 최소단위인 양자속이다. 수정된 London 방정식으로부터 채널 부분의 가장자리 방향으로 볼텍스 표면 밀도는 식 (2)으로 나타낼 수 있다.

$$n\left(\frac{-w}{2}\right) = \frac{\mu_0 [I_d - I_{cro}]}{2\phi_0 d_2} + \frac{B}{\phi_0}, \quad (\text{if } I_d \geq I_{cro}) \quad (2)$$

여기서 I_{cro} 는 채널 부분의 초기 임계전류이고, 핵의 주위를 도는 영구전류의 볼텍스와 같다고 가정

할 수 있다. 또한, 자속 열유동 지역에서 볼텍스 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$v_L = \frac{2k_B T \delta}{\hbar} \exp(-E_p/k_B T) \times \sin h \left[\frac{I_d}{(w k_B T / (\delta \Phi_0))} \right] \quad (3)$$

여기서 \hbar 와 k_B 는 각각 플랑크 상수와 볼츠만 상수를 의미한다. 또한, T 와 E_p 는 절대온도와 핀고정 에너지를 의미한다. δ 는 각각 핀고정 에너지 거리를 나타낸다. 게이트 전류에 의해 바디전류 라인의 채널쪽으로 발생하는 자계를 Biot-Savart's 법칙에 의해 계산하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$B = \frac{\mu_0 \sin \alpha I_g}{2\pi} \left\{ \frac{1}{w_g} \sin \left[\tan^{-1} \frac{x_0 \tan \alpha}{w_g} \right] - \frac{1}{w_g + w} \sin \left[\tan^{-1} \frac{x_0 \tan \alpha}{w_g + w} \right] \right\} \quad (4)$$

여기서 $w_g = x_0 + 0.5w + a_0$ 이며 x_0 는 게이트 전류라인의 중심선으로부터 게이트 전류의 양끝까지의 직선거리이며 α 는 게이트 전류라인의 중심각을 의미한다.

식 (1)~(4)로부터 채널에 유기되는 전압방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$V_{out} = \left\{ \frac{\mu_0 L k_B T \delta \exp(-E_p/k_B T)}{d_2 \hbar} \times \sin h \left[\frac{I_d}{(w k_B T / (\delta \Phi_0))} \right] \times \left\{ I_d - \left[I_{cr} + \frac{\sin \alpha I_g}{\pi} \left(\frac{1}{w_g} \sin \left[\tan^{-1} \frac{x_0 \tan \alpha}{w_g} \right] - \frac{1}{w_g + w} \sin \left[\tan^{-1} \frac{x_0 \tan \alpha}{w_g + w} \right] \right) \times \left(\frac{\sqrt{2} \lambda \sinh(d_2/\sqrt{2} \lambda)}{1 + \cosh(d_2/\sqrt{2} \lambda)} + \frac{(k-2)d_2}{2} \right) \right] \right\} \right\} \quad \text{for } I_d \geq I_{cr},$$

$$V_{out} = 0, \quad \text{for } I_d < I_{cr}. \quad (5)$$

침투깊이는 임계전류 I_{cr0} , 채널두께 d_2 , 가간섭 길이 ξ , 채널폭 w 의 함수로 표현할 수 있다.

$$\frac{\{\mu_0 I_{cr0}\}}{\left\{ 4d_2 \left[\frac{1}{2} + \frac{\lambda}{d_2} \left(\frac{\sqrt{2} \sinh(d_2/\sqrt{2} \lambda)}{1 + \cosh(d_2/\sqrt{2} \lambda)} \right) \right] \right\}} = \left\{ \frac{[\Phi_0 / (4\pi \lambda^2)]}{\sqrt{\frac{\pi w}{4d_1}}} \right\} \times \ln \left(\frac{\lambda}{\xi} \right) \quad (6)$$

식 (6)으로부터 임계전류, 채널두께, 가간섭 길이, 채널폭이 주어지면 침투깊이를 계산할 수 있다. 일반적으로 가간섭 길이는 초전도 박막의 면에 비례하며, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 초전도체에서 1.5 nm 값을 가

진다.

그림 3은 제작된 SFFT의 드레인 전류-전압 특성 곡선을 보여주고 있다. 최대 전달저항값은 드레인 전류 10 mA, 게이트 전류 3 mA에서 0.06Ω이었으며, 출력 저항값은 드레인 전류 10 mA, 게이트 전류 3 mA에서 2.3Ω이었다.

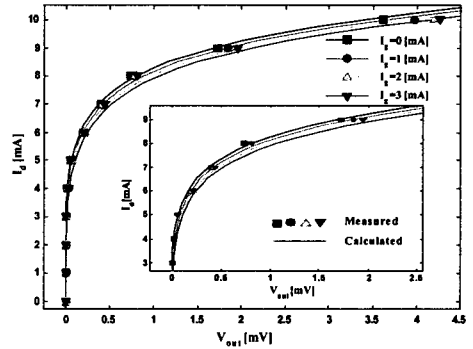


그림 3. 77 K 온도에서 SFFT의 게이트 전류 변화에 따른 드레인 전류-전압 특성 곡선. 내부 그림은 확대한 곡선.

4. 결론

AFM 산화 처리를 이용하여 SFFT를 성공적으로 제작하였다. 다른 공정처리에 의해 제작된 SFFT 보다 특성은 떨어지지만 AFM 리소그래피 공정을 이용하여 나노채널을 갖는 SFFT를 제작할 수 있는 가능성을 보여주었다.

참고 문헌

- [1] E. S. Snow and P. M. Campbell, "Fabrication of Si nanostructures with an atomic force microscope", Appl. Phys. Lett., Vol. 64, No. 15, p. 1932, 1994.
- [2] K. Matsumoto, "STM/AFM nano-oxidation process to room-temperature-operated single-electron transistor and other devices", Proceeding of the IEEE, Vol. 85, No. 4, p. 612, 1997.
- [3] I. S. Song, B. M. Kim, and G. S. Park, "Fabrication of a Josephson junction using an atomic force microscope", Appl. Phys. Lett., Vol. 76, No. 5, p. 601, 2000.