

Nb/Al SUPERCONDUCTING TUNNEL JUNCTION의 제작

조성익^{1,3}, 박영식¹, 박장현^{1†}, 이용호², 이상길², 김석현³, 한원용¹

¹한국천문연구원

²한국표준과학연구원

³연세대학교 천문우주학과 우주광학연구소

FABRICATION OF Nb/Al SUPERCONDUCTING TUNNEL JUNCTION

Sung-Ik Cho^{1,3}, Young-Sik Park¹, Jang-Hyun Park^{1†}, Yong-Ho Lee²,
Sang-Kil Lee², Sug-Whan Kim³, and Wonyong Han¹

¹Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea

²Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600, Korea

³SOL, Dept. of Astronomy and Space Science, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

E-mail: wingstar@galaxy.yonsei.ac.kr, jhpark@kao.re.kr

(Received November 11, 2004; Accepted November 30, 2004)

요 약

Nb/Al Superconducting Tunnel Junction(STJ) 소자를 제작하여 I-V 특성곡선을 측정하고 제작된 STJ 소자의 초전도체 특성 및 성능 파라미터 값들을 구하였다. 크기가 각각 20, 40, 60, 그리고 80 μm 인 4종류의 STJ소자를 제작하였으며 각 소자는 총 5층의 Nb/Al/AlOx/Al/Nb 다결정(polycrystalline) 박막으로 구성된 SIS(Superconductor Insulator Superconductor) 방식의 조셉슨 접합 구조를 갖는다. 이 연구에서 제작한 STJ 소자는 TannerTM L-Edit 8.3 프로그램으로 설계하였으며 한국표준과학연구원의 SQUID 제조실험실에서 제작하였다. 5층의 STJ 박막은 DC magnetron sputtering, reactive ion etching, CVD(Chemical Vapor Deposition) 장비를 이용해 생성되었다. 제작된 STJ 소자는 액체헬륨으로 냉각(4K)시킨 후 I-V 특성곡선을 측정하여 초전도 특성을 확인하였고, STJ 소자의 성능을 결정하는 파라미터인 energy gap, normal resistance, normal resistivity, dynamic resistance, dynamic resistivity, 그리고 quality factor를 계산하였다. Nb/Al STJ 소자의 FWHM 에너지 분해능 계산 결과, 순수 Nb STJ 소자보다 11% 우수한 에너지 분해능 특성을 확인하였다.

ABSTRACT

We report the successful fabrication and I-V curve superconductivity test results of the Nb/Al-based superconducting tunnel junctions. STJs with side-lengths of 20, 40, 60 and 80 μm were fabricated by deposition of polycrystalline Nb/Al/AlOx/Al/Nb 5-layer thin films incorporated on a 3-inch Si wafer. STJ was designed by TannerTM L-Edit 8.3 program, and fabricated in SQUID fabrication facility, KRISS. 5-layer STJ thin-films were fabricated using UV photolithography, DC magnetron sputtering, Reactive ion etching, and CVD(Chemical Vapor Deposition) techniques. Superconducting state test for STJ was succeeded in 4K with liquid helium cooling system.

[†]corresponding author

Their performance indicators such as energy gap, normal resistance, normal resistivity, dynamic resistance, dynamic resistivity, and quality factor were measured from I-V curve. Fabricated Nb/Al STJ shows 11% higher FWHM energy resolution than genuine Nb STJ.

Keywords: astronomical detector, superconducting tunnel junction

1. 서 론

STJ(Superconducting Tunnel Junction) 소자는 광자의 에너지 분해능력과, 넓은 파장대역, 높은 양자효율, 그리고 빠른 시간 분해능을 가지는 특성으로 인해 기존의 CCD를 대체할 차세대 영상소자로 많은 주목을 받고 있다. 2015년 ESA에서 발사에정인 X-ray 관측위성 XEUS를 비롯하여 다수의 우주망원경 검출기에 STJ 소자가 장착될 예정으로 현재 유럽, 일본, 미국을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다.

Twerenbold(1986)가 Sn-based STJ 센서를 이용하여 6keV X-선 광자를 검출하는데 성공한 것과 더불어 Peacock 그룹에서 1993년 Nb/Al STJ를 이용하여 가시광선 광자를 검출하는데 성공함으로써(Perryman et al. 1993) STJ 소자의 천문관측에 대한 실험이 본격적으로 시작되었다. 또한, Peacock 그룹은 6×6 Ta/Al-based STJ array(S-Cam 2)를 개발하여(Perryman et al. 1999, 2001) 초당 30회 이상 회전하는, 주기가 매우 빠른 중성자별인 Crab pulsar를 관측하는데 성공하였다(Rando et al. 2000). 현재는 10×12 Ta/Al-based array인 S-Cam 3의 시험제작에 성공하였다(Martin et al. 2004). 일본의 경우 이화학연구소(RIKEN)를 중심으로 몇몇 대학들이 컨소시엄을 형성하여 연구를 수행하고 있으며 2000년에 Nb/Al-based STJ의 개발에 성공하였다(Sato et al. 2000). 2003년에는 Nb/Al-based STJ를 이용한 가시광 영역의 광자 검출에 성공하였고(Shiki et al. 2004b), 2004년에는 단일화소의 STJ 소자를 소형 망원경에 직접 연결하여 천체관측을 수행하였다(Shiki et al. 2004a).

우리나라의 경우 STJ의 기본이 되는 조셉슨 접합을 기초로 한 SQUID(Superconducting Quantum Interference Device)에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 조셉슨 접합을 영상소자로 이용하는 STJ 소자에 대한 연구는 처음이다. 하지만 세계적으로 볼 때 STJ 소자 연구는 초기단계일 뿐 만 아니라, 우리나라의 초전도 연구와 반도체 제작기술은 세계적인 수준이기 때문에 지금부터라도 STJ 소자에 대한 연구를 진행한다면 곧 세계적인 수준에 도달할 것으로 판단된다.

이 논문은 차세대 영상소자로 주목받고 있는 STJ 소자의 제작 및 제작된 STJ 소자의 초전도상태에서의 성능검증을 목적으로하고 있다. 다양한 크기의 STJ 소자의 특성을 비교분석하기 위해 한 변의 길이가 20, 40, 60, 80 μm 인 마름모 형태의 STJ 소자를 직접 설계, 제작, 실험하였다. 2장에서는 STJ 소자 특징 및 원리를 3장에서는 제작과정을 기술하였다. 4장에서는 제작된 STJ의 작동여부를 파악하기 위한 실험과정을 기술하였다. 초전도체로서의 특성을 확인하기 위해 I-V 특성곡선을 측정하였고 이 자료를 바탕으로 energy gap, normal resistance, dynamic resistance, FWHM 에너지 분해능을 계산하였다. 5장에서는 결과에 대한 토의 및 결론을 기술하였다.

2. STJ 소자의 특징 및 원리

2.1 STJ 소자의 특징

STJ 소자의 첫 번째 특징은 광자의 에너지, 즉 입사되는 빛의 파장을 영상소자에서 바로 측정할 수 있다는 점이다. 현재 널리 사용되고 있는 CCD는 분광이미지를 얻기 위해서는 필터, 프리즘, 회절 격자 등과 같은 부가적인 기기가 반드시 필요하다. STJ 소자는 CCD에 비해 등가에너지폭(equivalent energy resolution)이 천배 이상 높기 때문에 입사되는 광자의 에너지를 직접 측정할 수 있다. 따라서 STJ 소자를 이용하면 부가적인 분광장비 없이 충분한 정도의 분광관측을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다.

STJ 소자의 두 번째 특징은 반응대역이 매우 넓다는 것이다. STJ 소자는 X-선에서 전파영역까지 매우 넓은 파장의 빛에 반응한다. 물론 파장영역별 사용되는 광학계, STJ 소자의 초전도체 물질, 대기의 흡수 등에 의해 동시에 관측할 수 있는 파장범위는 제한된다. 그러나 STJ 소자를 이용한 검출기를 우주망원경에 장착한다면 동일한 광학계로 자외선에서 근적외선까지 동시 관측이 가능하다.

세 번째 특징은 매우 높은 양자 효율이다. 현재까지 측정된 파장영역에서 STJ 소자의 양자효율은 60~70% 이상으로 나타나고 있다. STJ 소자는 사용된 초전도 물질의 반사율에 영향을 받기 때문에 반사율이 낮은 초전도 물질을 사용하거나 무반사 코팅 등을 이용해 양자효율을 100% 가까이 높일 수 있다.

네 번째 특징으로 높은 시간 분해능을 들 수 있다. CCD의 시간 분해능이 보통 수천분의 일초인데 반해 STJ 소자는 약 10나노초까지 시간 분해능을 높일 수 있다. 따라서 STJ 소자는 주기가 매우 짧은 변광성 등을 관측하는데 매우 유용하다.

2.2 STJ 소자의 작동원리

BCS(Bardeen, Cooper and Schrieffer) 이론에 의하면 초전도체가 임계온도 아래로 내려가게 되면, 전자는 쌍으로 움직이는 경향을 가지게 되고 이렇게 전자-포논(phonon) 사이에 상호인력에 의해 생성되는 것을 쿠퍼쌍(Cooper pairs)이라 한다. 에너지 준위가 바닥상태인 쿠퍼쌍과 1차 여기상태의 깨진 쿠퍼쌍, 즉 준입자들(quasiparticles) 사이의 에너지갭은 CCD와 같은 일반 반도체의 밴드갭에 비해 수천배 정도 작은 값을 가진다. 광자가 초전도체에 흡수되면 초전도체 내부에서 준입자들이 생성되고 에너지갭(Δ)보다 큰 준입자들은 포논을 방출을 하게 된다. 이 때 포논의 에너지가 2Δ 보다 큰 경우 다른 쿠퍼쌍을 분리시켜 준입자들로 변화시키고 생성된 준입자들의 개수는 입사된 광자의 에너지에 비례하여 증가한다. SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor) 구조를 갖는 STJ 소자의 양쪽 초전도체에 바이어스 전압을 걸어주면 광자가 입사된 초전도체에서 생성된 준입자들이 반대편 초전도체로 터널링하여 전류가 흐르게 된다. 즉 입사된 광자의 에너지에 비례하여 전류가 흐르게 되기 때문에 전류의 양을 측정한다면 입사된 광자의 에너지를 측정할 수 있다.

한편, 쿠퍼쌍은 입사된 광자뿐만 아니라 열운동에 의해 자연적으로 분리가 될 수 있고 쿠퍼쌍 자체가 터널링되기도 하는데 이러한 현상들은 잡음으로 나타나 신호측정에 방해가 된다. STJ 소자의 동작온도를 초전도체의 임계온도의 1/10 수준으로 낮추면 열에 의해 생성되는 준입자들은 거의 없어지기 때문에 대부분의 열잡음을 제거할 수 있다. 그림 1은 자기장과 STJ 소자 배선의 영향을 피하기 위해 소자의 앞면이 아닌 뒷면의 투명도가 높은 사파이어 웨이퍼를 향해 빛을 입사시키는 일반적

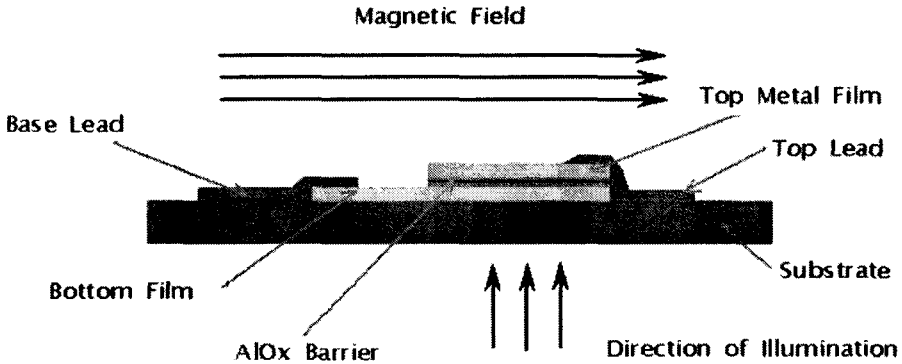


그림 1. 노이즈로 작용하는 조셉슨 전류를 억제하기 위해 STJ소자 위에 자기장을 걸어주고, 광자의 투과율이 높은 사파이어 웨이퍼를 사용하여 아래쪽에서 광자를 입사시키는 일반적인 STJ 소자의 단면도이다.

표 1. 물질의 박막 생성률.

	Deposition Rate	Sputtering Power
Nb	100 nm/70 sec	1.4A, 276V: 6.4kW
Al	10 nm/ 50 sec	0.15A, 244V : 0.05kW

인 STJ 소자의 구조도이다. 여기서 접합소자에 평행하게 자기장을 걸어준 이유는 쿠퍼쌍이 직접 터널링 현상을 일으켜서 발생하는 조셉슨 전류를 억제하기 위해서이다. 따라서 STJ 소자를 광자 검출기로 사용하기 위해서는 열적으로 생성되는 준입자들이 거의 0이 되는 온도(Nb-based STJ의 경우 1K 미만)로 냉각시키고, 쿠퍼쌍의 터널링 현상을 억제시키기 위한 자기장을 걸어주어야 한다. 그러나 이 연구에서는 STJ 소자의 초전도특성 검증이 목적이기 때문에 광자입사 및 자기장은 제외하였고 웨이퍼도 사파이어 대신 실리콘을 사용하였다.

3. STJ 소자 제작

3.1 STJ 소자의 설계

이 연구는 STJ 소자 제작 및 제작된 STJ 소자의 초전도 특성 조사를 주목적으로 하고 있다. 이 점을 고려하여 I-V 특성곡선 실험을 위한 I+, I-, V+, V- 단자를 연결할 수 있도록 하나의 STJ 소자에 대하여 4개의 입출력 패드를 만들었다. 각 패드의 크기는 PCB와의 와이어 본딩 작업을 용이하게 하기 위해 폭 0.5mm의 직사각형 형태로 설계하였다. STJ 소자는 그 형태에 따라 외부 자기장에 따른 임계 전류값이 변화한다(Gijsbertsen 1995). 정사각형의 형태로 제작할 경우 외부 자기장(B)에 대해 1/B 그래프 형태로 임계 전류가 감소하고, 다이아몬드 형태인 경우에는 1/B² 그래프의 형태로 감소한다. 따라서 향후 광자검출실험에 대비하기 위한 FWHM 에너지 분해능의 이론적인 값을 계산하기 위해 외부 자기장으로 효율적인 조셉슨 전류 억제가 가능한 다이아몬드, 즉 마름모 형태로 STJ 소자를 설계하였다. STJ 소자 설계는 포토 마스크 설계에 일반적으로 많이 쓰이는 TannerTM L-Edit 8.3 프로그램을 사용하였다.

표 2. Positive Photoresist(PR)을 사용한 photolithography 공정.

Process	Recipe	Remark
Spin Coat	400 rpm, 30sec, AZ5214	Photoresist를 wafer에 균일하게 도포
Soft Baking	90°C, 20mins	Photoresist(PR) 접착성 증가
UV Exposure	36 sec	Mask design 부분만 PR 특성 변화
Chlorobenzene Soaking	5mins	PR 윗부분 경화성 증가(overhang 구조)
Develop	150%	노광된 부분의 PR 제거

표 3. Image reverse 방식의 photolithography 공정.

Process	Recipe	Remark
Spin Coat	400 rpm, 30 sec, AZ5214	Photoresist를 wafer에 균일하게 도포
Soft Baking	90°C, 20min	Photoresist(PR) 접착성 증가
UV Exposure	10 sec 10 min at room temperature	PR(Positive → Negative) 물성 변화
Baking	110°C, 10min 10 min at room temperature	Mask design의 부분 PR 특성 변화
UV Exposure	60 sec	노광되지 않은 부분의 PR 제거
Develop	150%	







-  Nb Electrode : 50nm
-  SiO₂ Insulator : 275nm
-  AlO_x : 1nm
-  Al : 10nm
-  Nb : 150nm
-  Si Wafer



그림 2. 이 연구에서 설계한 STJ 소자의 단면도. 박막의 보호와 절연을 위해 SiO₂ 절연층을 STJ 소자 접합에 형성시켰다. 위의 범례는 아래부터 차례대로 박막층이 형성되는 두께와 순서를 의미한다.

3.2 STJ 소자의 제조공정

STJ 소자는 2004년 10월 7일부터 13일까지 한국표준과학연구원 생체자기연구실 부속 SQUID 실험실에서 제작하였다. 그림 2는 STJ 소자의 단면도이다. STJ의 I-V 특성곡선 측정만을 고려하여 제작하였기 때문에 광자 검출실험을 위해 필요한 투명도가 높은 사파이어 웨이퍼를 사용할 필요가 없다. 따라서 웨이퍼는 사파이어가 아닌 가격이 저렴하고 제작이 용이한 실리콘으로 대체하여 제작하였다. 그림 3은 각 마스크의 해당 공정과 형태 그리고 제작 과정의 STJ 박막구조의 단면도를 정리한 것이다. STJ 소자 제작에는 반도체 제작에 일반적으로 사용되는 3가지(photolithography, DC magnetron sputtering, reactive ion etching) 공정이 적용되었다. 사진식각(Photolithography) 기술

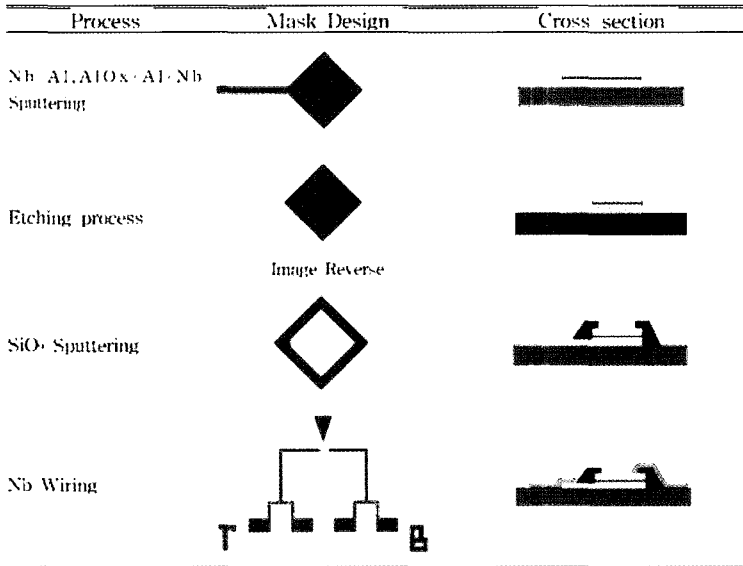


그림 3. STJ 소자의 제작공정과 각 공정에 해당하는 mask 설계, 그리고 STJ 소자의 제작 진행 상황의 단면도이다. Mask 설계에서 도형으로 표시된 부분이 UV exposure시 UV가 통과하는 부분이다.

은 웨이퍼 위에 직접 STJ 소자의 회로패턴을 그리는 공정과, STJ 소자 보관시 박막 보호용 코팅을 위해 사용되었고, DC 마그네트론 스퍼터링 기술은 박막을 직접 실리콘 웨이퍼 위에 입히는 데 사용하였다. 설계상 박막을 제거해야하는 부분의 작업을 위해 RIE(Reactive Ion Etching) 기술을 이용하였다. STJ 소자의 제작 순서는 그림 3의 순서대로 진행되었으며 그림 4는 각 공정의 진행과정별 STJ 실물 사진이다.

1단계: Nb/Al,AlO_x/Al/Nb 스퍼터링

STJ 소자를 구성하는 SIS 박막을 제조하는 공정이다. 사진식각기술을 이용하여 박막이 형성될 위치와 형태를 웨이퍼 상에 현상한다. 표 2에 사진식각 공정을 정리하였다. 포지티브 포토레지스트(Positive photoresist)를 사용하기 때문에 그림 2에서 도형으로 표시된 부분의 PR(photoresist)은 현상과정에서 제거되고, 그 자리에 박막이 형성되게 된다. 스퍼터링 장비를 이용하여 고진공(10^{-8} Torr) 상태에서 Nb/Al,AlO_x/Al/Nb 박막을 형성한다. 스퍼터링 작업에서 박막의 두께는 스퍼터링 출력과 시간에 의해 결정된다. 표 1은 STJ 제작에 사용된 스퍼터링 기기의 박막 생성률을 정리한 것이다. 스퍼터링 출력은 표준연 실험실의 기기의 스펙에 따른 설정치이다.

2단계: 에칭 공정

1단계 공정이 끝나면 SIS구조를 갖는 기본적인 STJ 소자의 접합형태가 완성된다. 그러나 이 상태로는 베이스 전극(base electrode)을 연결할 수 있는 방법이 없기 때문에 베이스 전극과 박막을 연결할 부분을 만들어주기 위해 형성된 박막의 윗부분을 제거해야한다. 박막이 제거될 부분은 1단계 공정의 마스크 형태에서 마름모꼴 옆으로 길게 나온 부분이며, 위쪽 Nb 박막을 제거하기 위한 RIE 공정과 Al 절연박막 부분을 제거하기 위한 현상액 에칭(developer etching) 공정으로 구분된다. 2단

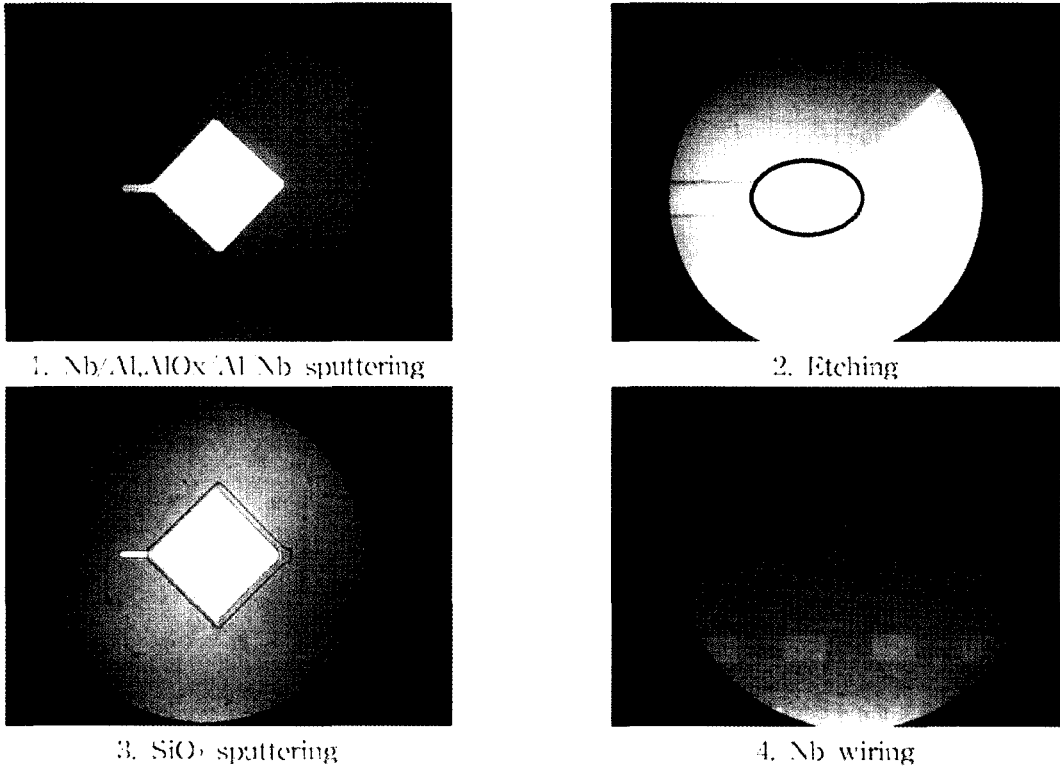


그림 4. 각 공정별 STJ 실제 형태를 나타낸 것이다. 2번 etching 공정에서 원으로 표시된 부분이 etching된 곳이다. 3번 SiO₂ sputtering 공정에서 STJ의 테두리로 보이는 것이 SiO₂ 절연층이다.

계 에칭 공정은 사진식각 과정도 다른 공정과 달리 이미지 리버스 방식을 사용한다. 표 3에 이미지 리버스 방식의 사진식각 공정을 정리하였다. 10초 자외선 노광에 이은 110°C 베이킹 공정은 PR의 물성이 180도 변화하는 핵심적인 부분이다. 방식은 마스크 설계에서 진하게 표시된 부분만 PR을 남긴다.

3단계: SiO₂ 스퍼터링

형성된 박막이 단락되지 않고, 박막의 경계면을 보호하기 위해 절연층을 입히는 공정이다. SiO₂ 절연층을 올리기 위해서 PECVD 장비를 사용한다. SiO₂ 절연층의 두께는 1단계 스퍼터링 공정과 마찬가지로 PECVD 장비의 출력과 박막 형성 시간에 의해 결정된다. 이 연구에 사용된 표준연 PECVD 장비의 SiO₂ 절연층 생성률은 11min/2750Å이다.

4단계: Nb 와이어링

완성된 STJ 집합을 리드아웃(readout) 기기와 연결하기 위한 배선작업공정이다. Nb 박막을 올리는 과정과 동일하기 때문에 1번 공정을 그대로 반복한다. 마스크 윗부분의 역삼각형 모양은 STJ 소자의 집합 위치를 쉽게 확인하기 위한 표시이며, 아래의 와이어 본딩용 패드의 알파벳(T, B)는 각각 Top electrode, Base electrode를 의미한다. 2단계 이후의 공정에서 사진식각 작업시, 특히 UV 노

표 4. I-V 특성곡선을 통해 측정된 STJ 소자의 특성 파라미터.

	20 μm	40 μm	60 μm	80 μm
Energy gap(Δg) (μeV)	1500	1300	1250	1200
Critical current (I_c) (μA)	60	80	100	400
Normal resistance (R_c) (Ω)	16.67	4.62	2.22	
Normal resistivity (ρ_{nn}) ($\mu\Omega\text{cm}^2$)	66.67	73.85	80	
Dynamic resistance (R_d) (Ω)	88.89	25	13.04	13
Dynamic resistivity (ρ_d) ($\mu\Omega\text{cm}^2$)	355.56	400	469.57	832
Quality factor (Q_f)	5.33	5.42	5.87	

광작업시 포토마스크와 제작중인 웨이퍼를 정렬(alignment)하는 문제가 매우 중요하다. 이 과정이 잘못되면 STJ 소자가 제대로 와이어링 되지 않기 때문에 수율이 매우 낮아진다.

4. 실험 및 결과

4.1 초전도 실험

STJ 소자의 특성을 시험하기 위해서는 초전도 상태가 되기 위한 임계온도(T_c) 이하로 냉각이 가능한 냉각장치가 필요하다. STJ 소자의 제작에 사용된 Nb는 초전도 상태에 도달하기 위한 임계온도가 9.3K이다. 이번 실험의 목적은 초전도 상태에서의 I-V 특성곡선을 측정하는 데 있기 때문에 냉각장치로서 4K까지 냉각이 가능한 액체 헬륨을 사용하였다. 냉각 방법은 온도가 4K인 액체 헬륨에 STJ 소자가 부착된 콜드 핑거(Cold Finger)를 직접 집어넣어 냉각하는 방식을 사용하였다. 콜드 핑거는 I-V 특성곡선을 측정하는 데 필요한 I+, I-, V+, V- 4개의 단자를 STJ와 연결할 수 있는 커넥터가 연결되어 있다. STJ의 전류 소스 및, 전류(I), 전압(V) 측정은 일본 NITSUKI사의 SIS 믹서(mixer)기를 사용하였고, 믹서와 콜드 핑거를 연결하였다. I-V 특성곡선은 SIS 믹서의 I, V 출력단을 통해 나오는 STJ의 전류, 전압을 오실로스코프에 연결하여 X-Y 모드로 출력하였다. SIS 믹서에서 측정하는 STJ 전류, 전압의 신호가 매우 작기 때문에 측정을 용이하게 하기 위해 믹서 내부에서 이 신호가 증폭되어 출력된다. 증폭량은 전류의 경우 0.01V/ μA 이며, 전압은 0.1V/mV이다. 따라서 I-V 특성곡선으로부터 원하는 파라미터를 얻기 위해서는 오실로스코프로 출력되는 I-V 특성곡선상의 값에서 실제 STJ 소자에 흐르는 전류와 전압으로 변환시켜야 한다.

4.2 I-V 특성 곡선

I-V 특성곡선을 측정하는 것은 초전도체의 특성을 실험하는데 매우 유용한 방법이다. STJ 소자에 사용된 조셉슨 접합은 인가된 에너지가 두 박막의 에너지 갭(Δg)의 합을 넘어서게 되면, 초전도 특성을 잃어버리는 동시에 일반적인 저항 특성을 보이게 된다. 따라서 STJ 소자의 I-V 특성곡선 상에서 초전도 상태에서 일반 저항체 상태로 변이될 때에 보이는 급격한 수직선의 폭이 바로 두 Nb/Al 박막의 에너지 갭의 합을 의미한다. I-V 특성곡선 상에서 이 값은 전압축을 따라 I-V 그래프의 에너지 갭 영역으로 수렴하는 교차점으로부터 쉽게 구할 수 있다. 원점에서부터 일반 저항체 상태의 I-V 그래프를 연결한 선의 기울기를 구하면 STJ 소자의 R_n (normal resistance) 값을 구할 수 있다. 여기서 구한 R_n 값에 STJ 소자의 접합면적을 곱하면, 각각의 STJ 소자에 대한 ρ_{nn} (normal resistivity) 값을 얻는다.

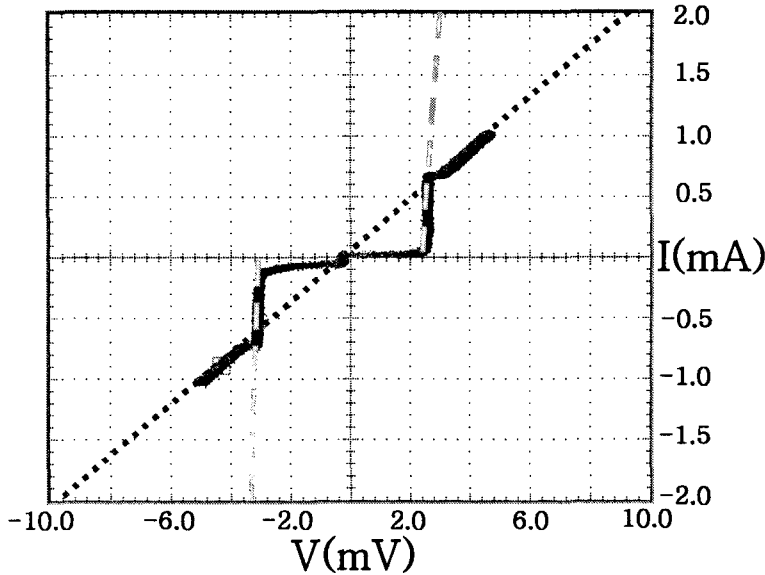


그림 5. 40 μm 소자의 I-V 특성곡선. 이 그래프에서 energy gap, normal resistance를 구할 수 있다. 가운데 전류가 거의 0인 수평한 부분이 초전도 상태를 의미한다.

실제 광자를 검출하는 실험을 하기 위해서는 STJ 소자가 초전도 특성을 가지는 범위에서 동작되어야 한다. I-V 특성곡선에서 인가되는 전압의 범위를 에너지 갭 이하로 좁혀 측정하면, 초전도 상태에서의 STJ 소자의 특성을 파악하는 동시에 R_d (dynamical resistance), ρ_d (dynamical resistivity) 값을 얻을 수 있다. 이 값들을 통해서 Qf(quality factor) 값을 구할 수 있다. 이 값은 $Qf = \rho_d / \rho_{nn}$ 식으로 구할 수 있으며 클수록 초전도체로서의 특성이 우수하다는 것을 의미한다.

4.3 FWHM(Full Width Half Maximum) 에너지 분해능

FWHM 에너지 분해능(ΔE)은 에너지 갭에 반비례한다. ΔE 를 구하는 공식은 다음과 같다.

$$\Delta E(eV) = 2.355 \sqrt{1.7 \Delta_g (F + 1 + 1 / \langle n \rangle) E} \tag{1}$$

여기서 ΔE 는 FWHM 에너지 분해능을 의미하고, Δ_g 는 광자를 흡수하는 박막의 에너지 갭이다. E는 광자가 가지는 에너지이며, F(Fano factor)는 생성되는 전자당 흡수되는 에너지의 평균을 의미한다. $\langle n \rangle$ 은 준입자당 평균 터널링 개수를 의미한다. 제작된 STJ 소자와 같은 저온 초전도체의 경우 Fano factor는 0.22로 거의 일정한 값을 가진다(Brammertz 2003).

4.4 실험 결과

제작된 4종류의 STJ 소자를 크기별로 3개씩 12개 STJ 소자의 I-V 특성곡선을 측정하였다. 그 중 10개의 STJ 소자에서 초전도 현상을 확인할 수 있었고 각 소자 크기별로 Quality factor가 우수하고 I-V 특성곡선이 우수한 STJ 소자의 I-V 특성곡선으로부터 측정된 파라미터들을 표 4에 정리하였다. 그림 5는 40 μm 소자의 I-V 특성곡선으로 일반적인 초전도 특성을 보여주고 있다. 80 μm 소

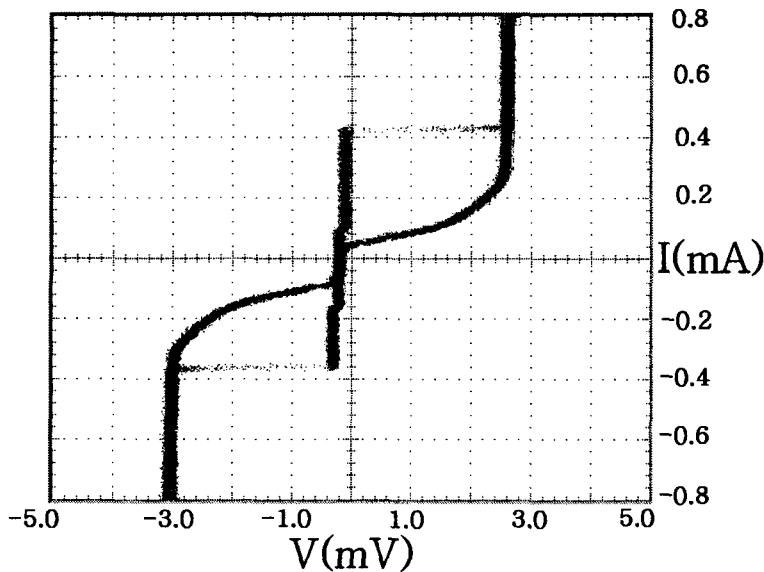


그림 6. $80\mu\text{m}$ 소자의 I-V 특성곡선. 측정 가능영역이 SIS Mixer의 출력에 의해 제한 받아 normal resistance를 측정할 수 없었고, 터널링 현상을 보이고 있다.

자의 경우, SIS 믹서의 스위핑 한계로 인하여 normal resistance를 측정 가능한 영역에서의 I-V 특성곡선을 얻지 못하였다. 따라서 normal resistance를 측정하여야만 구할 수 있는 normal resistivity, quality factor는 측정값이 없다. 표 4로부터 STJ의 소자의 크기가 커질수록 에너지 갭이 감소하고, 임계전류(critical current)가 증가하며, dynamic resistance가 감소함을 알 수 있다. 측정된 에너지 갭이 $1250, 1200\mu\text{eV}$ 인데 반해 이론적인 Nb의 에너지 갭(Δ)이 $1550\mu\text{eV}$ (Brammertz et al. 2004)이므로 STJ의 특성이 양호함을 확인할 수 있다. $80\mu\text{m}$ 소자의 I-V 특성곡선인 그림 6은 약간 다른 특성을 보이고 있다. 이는 과전류가 거의 0이 될 때까지 임계 전류 이하로 STJ 소자의 접합 사이에 계속 흐르는 터널링 전류에 의해 전압이 0으로 되돌아가지 않는 전압래치(voltage latch) 현상이 일어났기 때문이다(한병성과 황종선 2002).

표 5는 식 (1)로 계산한 FWHM 에너지 분해능 값을 정리한 것이다. Nb는 순수한 Nb로만 STJ 소자를 구성한 경우를 의미하며, 이 때 에너지 갭은 $1550\mu\text{eV}$ 이다. STJ $40\mu\text{m}$ 과 STJ $80\mu\text{m}$ 은 각각 I-V 특성곡선으로 에너지 갭을 측정한 소자이다. 제작된 두 STJ 소자 모두 순수한 Nb로만 STJ 소자를 제작한 경우보다 FWHM 에너지 분해능이 평균 11% 정도 더 우수하다. 이는 실제 제작된 STJ 소자는 에너지 갭이 Nb에 비해 10배 이상 작은 10nm 두께의 Al 박막이 STJ 소자에 포함되어있기 때문이다. 설계시 Al 박막층은 절연층인 Al_2O_3 층을 성장시키기 위해 10nm 정도 박막을 입힌 것이었지만, 전체 STJ 소자의 응답률에 영향을 준 것을 확인할 수 있다. STJ 소자의 크기에 따른 에너지 분해능의 차이를 살펴보면 $80\mu\text{m}$ 소자가 $40\mu\text{m}$ 소자에 비해 FWHM 에너지 분해능이 최대 2% 정도 우수하다. 따라서 에너지 분해능을 향상시키기 위해서는 STJ 소자의 크기를 키우는 것 보다는 에너지 갭이 낮은 초전도 물질을 사용하거나, 초전도체 박막과 절연체 박막 사이에 Al과 같이 낮은 에너지

표 5. FWHM 에너지 분해능(eV).

Photon energy (eV)	Nb	40 μ m	80 μ m
1000	4.221	3.790	3.714
2000	5.969	5.360	5.252
3000	7.310	6.565	6.432
4000	8.441	7.580	7.427
5000	9.437	8.475	8.304
6000	10.338	9.284	9.096
7000	11.166	10.028	9.825
8000	11.937	10.720	10.504
9000	12.662	11.370	11.141
10000	13.346	11.985	11.743

지 갭을 가지는 또다른 초전도체의 박막(두께 10nm 정도)을 더해주는 것이 더욱 효과적일 것으로 판단된다.

5. 토의 및 결론

차세대 영상소자로 주목받고 있는 Superconducting Tunnel Junction(STJ)을 직접 설계, 제작하고 그 특성을 테스트하였다. 한변의 길이가 20, 40, 60, 80 μ m인 마름모 형태를 가지는 4종류의 소자를 4개씩 하나의 mask에 집적시켜 3 inch 실리콘 웨이퍼에 총 16개의 STJ 소자가 만들어지도록 설계하였다. 1차로 제작된 16개의 STJ 소자 중에서 현미경 확인 결과 특성이 우수할 것으로 판단된 40 μ m, 80 μ m 소자를 선택하여 I-V 특성곡선을 측정하였다. 측정 결과 두 개의 소자 모두 Nb의 임계온도(9.3K) 이하인 4K에서 초전도 현상을 확인하였다. 에너지갭(energy gap), normal resistance, normal resistivity, dynamic resistance, dynamic resistivity, critical current, quality factor 값을 I-V 특성곡선 측정을 통해 얻을 수 있었고 energy gap으로부터 FWHM 에너지 분해능을 구하였다.

80 μ m 소자는 40 μ m 소자에 비해 초전도 상태에서 터널링이 많이 일어나기 때문에 STJ 소자를 이용하여 광자 검출 실험을 할 때에는 소자의 크기가 클수록 조셉슨 전류를 억제하기 위해서는 좀 더 센 자기장을 걸어주어야 한다는 사실을 확인할 수 있었다. STJ 소자의 크기가 클수록 에너지 갭과 dynamic resistance가 감소하는 경향을 보이고 있다. FWHM 에너지 분해능의 경우에도 소자의 크기가 큰 쪽이 좀 더 우수하지만, 면적이 4배가 증가하였을 때 FWHM 에너지 분해능은 2% 정도밖에 향상되지 않는다.

FWHM 에너지 분해능 값을 계산한 결과, 에너지 분해능을 향상시키기 위해서는 초전도체의 에너지 갭을 낮추는 것이 필수적이라는 사실을 확인하였고, 10nm 두께의 Al 박막에서 확인하였듯이 초전도체와 절연체 사이에 energy gap이 낮은 물질의 박막을 추가하는 것도 에너지 분해능을 향상시키는 좋은 방법이라는 사실을 알 수 있었다.

이후에는 STJ 소자의 크기에 따른 특성변화를 좀 더 자세히 분석하고, 광자 검출 실험에 대비해 사파이어 웨이퍼에서의 STJ 소자 제작기술과 조셉슨 전류를 억제하기 위해 냉각기 내에 자기장을 걸어주는 방법, 그리고 ADR(Adiabatic Demagnetization Refrigerator)과 같이 100mK까지 냉각이 가능한 냉각기에 대한 연구를 계속 진행할 예정이다.

참고문헌

- 한병성, 황종선 2002, 초전도공학 (서울: 동일출판사), pp.62-66
- Brammertz, G. 2003, PhD Thesis, Twente University
- Brammertz, G., Verhoeve, P., & Martin, D. 2004, Proc of SPIE, 5499, 269
- Gijsbertsen, J. G. 1995, PhD Thesis, Twente University
- Martin, D. D. E., Verhoeve, P., & Peacock, A. 2004, Nucl. Instrument Methods Phys. Res. A, 520, 512
- Perryman, M. A. C., Cropper, M., Ramsay, G., Favata, F., Peacock, A., Rando, N., & Reynolds, A. 2001, MNRAS, 324, 899
- Perryman, M. A. C., Favata, F., & Peacock, A. 1999, A&A, 346, L30
- Perryman, M. A. C., & Peacock, A. 1993, Nucl. Instrument Methods A, 325, 319
- Rando, N., Andersson, S., Peacock, A., & Verhoeve, P. 2000, Nucl. Instrument Methods A, 444, 441
- Sato, H., Takizawa, Y., & Ootani W. 2000, Jap. J. Appl. Phys., 39, 5090
- Shiki, S., Sato, H., Takizawa, Y., Kurakudo, M., & Shimizu, H. M. 2004a, Publ. Astron. Soc. Japan 56, L19
- Shiki, S., Sato, H., Takizawa, Y., Taino, T., Otani, C., & Shimizu, H. M. 2004b, Nucl. Instrument Methods Phys. Res. A, 520, 530
- Twerenbold, D. 1986, Phys. Rev. B, 34, 774