

Employing Al Etch Stop Layer for Nb-based SNS Josephson Junction Fabrication Process

J. S. Choi^a, J. H. Park^{a,b}, W. Song^a, Y. Chong^{*,a}

^a Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

^b Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received 11 March 2011 revised or reviewed 6 April 2011 accepted 7 April 2011)

Al 식각정지층을 이용한 Nb-based SNS 조셉슨 접합의 제조공정

최정숙^a, 박정환^{a,b}, 송 운^a, 정연욱^{*,a}

Abstract

We report our efforts on the development of Nb-based non-hysteretic Josephson junction fabrication process for quantum device applications. By adopting and modifying the existing Nb-aluminum oxide tunnel junction process, we develop a process for non-hysteretic Josephson junction circuits using metal-silicide as metallic barrier material. We use sputter deposition of Nb and MoSi₂, PECVD deposition of silicon oxide as insulator material, and ICP-RIE for metal and oxide etch. The advantage of the metal-silicide barrier in the Nb junction process is that it can be etched in SF₆ RIE together with Nb electrode. In order to define a junction area precisely and uniformly, end-point detection for the RIE process is critical. In this paper, we employed thin Al layer for the etch stop, and optimized the etch condition. We have successfully demonstrated that the etch stop properties of the inserted Al layer give a uniform etch profile and a precise thickness control of the base electrode in Nb trilayer junctions.

Keywords : Josephson junction, Etch stop, Reactive Ion Etch, Multilayer

I. Introduction

조셉슨 접합 기반의 초전도 직접회로 (Superconducting Integrated Circuit)는 양자전압표준, 초전도 양자간섭소자(SQUID) 및 초고속 단

자속양자(Rapid Single Flux Quantum; RSFQ) 회로 등의 응용에 따라 많은 연구자들에 의해 활발한 연구가 진행되어 왔다 [1, 2]. 특히 절연체를 이용한 터널접합 외에도 금속 장벽을 사용하여 전류-전압 곡선에서 이력(Hysteresis)을 보이지 않는 SNS(Superconductor-Normal metal-Superconductor) 접합은 다양한 초전도 집적소자의 기본적인 요소로 사용되고 있다. 대규모 집적회로뿐 아니라

*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5018

e-mail : yonuk@kriss.re.kr

높은 수율을 얻는 회로의 제작을 위해서는 신뢰성과 재현성 있는 SNS(Superconductor-Normal metal-Superconductor) 접합 제조기술이 필요하다.

여러 종류의 SNS 접합 중에서 우리는 MoSi₂ (Molybdenum disilicide)를 장벽 금속으로 사용한 나이오븀(Nb) 기반 조셉슨 접합 공정을 확립하려 한다. Nb/MoSi₂/Nb 접합을 비롯한, 여러 가지 금속규화물(metal-silicide) 장벽을 이용한 조셉슨 접합은 초전도 근접효과(proximity effect)의 훌륭한 모델 시스템일 뿐만 아니라 대규모의 조셉슨 집적회로 구현에 적합하기 때문에 최근 활발한 연구개발이 이루어지고 있다 [3-8].

금속규화물은 대부분 SF₆ 가스를 이용하는 RIE (Reactive Ion Etching)에서 Nb과 함께 식각할 수 있으므로, 식각공정을 단순화할 수 있는 장점이 있다. 그러나 Nb/MoSi₂/Nb 접합에서 Nb의 base electrode(BE)를 잘 정의하기 위해서는 매우 정밀한 식각 컨트롤로 정확한 위치에서 식각을 멈추어야 한다. 이는 BE의 두께특성이 접합에서 발생하는 열을 효과적으로 분산시키고 제어하기 위한 매우 중요한 변수 중 하나이므로 정밀한 제어가 필요하다 [9, 10].

고성능의 end point detector(EPD)가 갖추어진 RIE장비에서는 정밀한 식각 컨트롤 공정이 가능하지만, 현재 본 연구팀의 RIE는 EPD가 장착되지 않아 식각률과 식각 시간으로 end point를 잡기에 어려움이 있었다. 특히 Nb의 식각속도가 매우 빨라 재현성 있고 마진이 큰 공정을 확립하기에 어려움이 있다. 본 연구에서는 end-point로 사용될 Al층을 삽입하는 공정을 시도하여 Nb/MoSi₂/Nb tri-layer의 식각조건에 따른 특성변화에 대해 알아보았다.

II. Experimental setup

Nb/MoSi₂/Nb으로 구성된 조셉슨 접합의 형태는 Fig. 1과 같다 [11]. Table 1은 Nb/MoSi₂/Nb tri-layer의 제조공정에 사용된 공정변수들을 표기하였다. Base electrode (BE), junction barrier (BAR), counter electrode (CE), insulation (I), top wiring (W)으로 구성되어 있다.

신뢰성 있는 Nb/MoSi₂/Nb tri-layer를 제조하기 위해 DC 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용

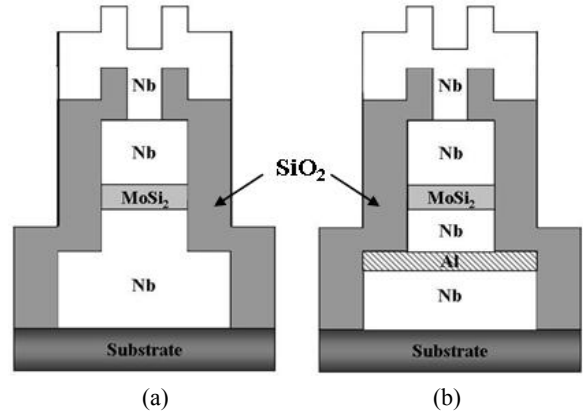


Fig. 1. Cross section of (a) Nb/MoSi₂/Nb tri-layer Josephson junction, (b) tri-layer junction with Al etch stop layer inserted in the base electrode Nb.

Table 1. Design parameters for the Nb/MoSi₂/Nb trilayer process.

| Layer | | Material | Thickness (nm) |
|-------|-------------------|-------------------|----------------|
| BE | Base electrode | Nb | 320 |
| BAR | Junction barrier | MoSi ₂ | 17.8 |
| CE | Counter electrode | Nb | 210 |
| I | Insulation layer | SiO ₂ | 500 |
| W | Wiring | Nb | 500 |

하여 박막을 증착하였다.

기판으로는 3인치 실리콘 웨이퍼를 사용하였으며 -10 °C의 냉각 척(cooling chuck)이 압력접지방법으로 기판을 냉각하였다. 냉각 척의 온도는 칠러를 통한 냉각수의 흐름으로 제어되었다. Nb의 증착은 5인치 sputter gun을 사용하였으며, 스퍼터링 시스템의 base pressure는 약 5 x 10⁻⁸ Torr이다. 스퍼터 건은 기판 위에 위치하여 수직방향의 증착(sputter-down) 구조를 가지고 있다. MoSi₂는 진공을 깨지 않은 상태에서 동일 챔버에서 증착된다. Nb과 MoSi₂의 각 물질의 증착률은 각 53.3 nm/min, 17.8 nm/min이다.

절연층(Insulation layer)으로 사용된 SiO₂는 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)법으로 200 °C에서 500 nm의 두께로 증착되었다.

Nb과 MoSi₂ 층의 식각을 위한 패터닝에 사

용된 포토레지스트는 AZ5214이고 식각 가스로는 Ar과 SF₆를 3:9의 비율로 혼합한 가스를 이용, ICP-RIE(Inductively Coupled Plasma-RIE)를 사용하여 tri-layer를 식각하였다. 식각 조건으로는 20 mTorr 압력에서 300 W 파워를 사용하였다.

전체적인 공정이 이루어진 후, 접합의 형태는 Fig. 1(a)와 같다. 이때 BE의 중간부분에서 정확하게 식각을 멈추어야 하는 식각 컨트롤이 필요하게 된다. 이러한 식각 컨트롤을 위하여 Fig. 1(b)의 경우와 같이 BE의 중간에 두께 < 10 nm의 얇은 Al layer를 증착하여 etch-stop으로 사용하였다.

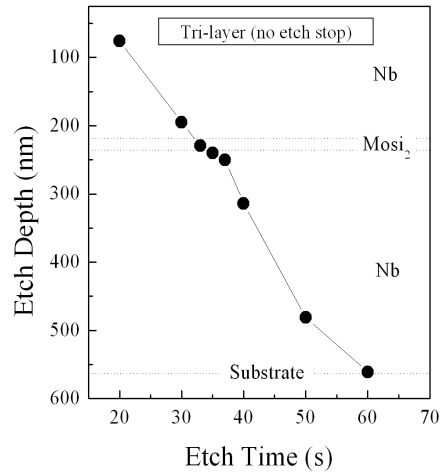
제작과정은 기판 위에 BE 증착을 두단계로 나누어 먼저 Nb 160 nm를 증착한 후, 동일 챔버에서 Al 10 nm를 증착하고 다시 Nb 160 nm를 증착하여 BE 증착을 완성하였다. 이후 박막 증착 공정은 Fig. 1(a)와 동일하다.

III. Results and discussion

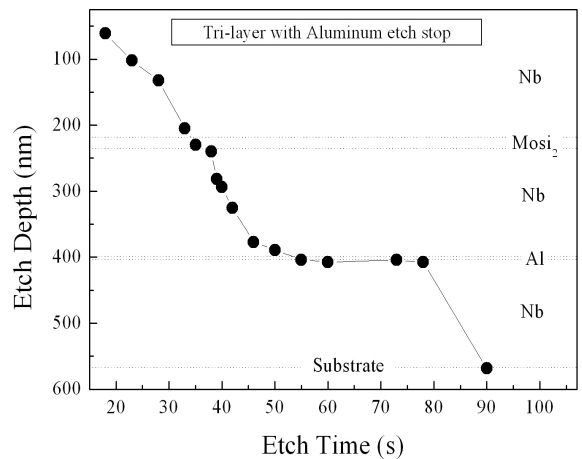
Fig. 2는 시간에 따른 식각 깊이를 α -step을 이용하여 측정한 결과이다. 기존의 Nb/MoSi₂/Nb tri-layer를 약 400 nm 깊이의 위치(BE의 중간위치)에서 식각을 종료하고 싶은 경우, 기존의 tri-layer(Fig. 1(a))에서는 Fig. 2(a)와 같이 최대 수 초 정도의 공정 마진이 있을 뿐이었다. 하지만 Al 층을 삽입함으로써(Fig. 2(b)) 약 20 초 이상의 공정 마진을 얻게 되어 식각 정지층의 역할을 매우 잘 수행함을 알 수 있다.

Aluminum은 SF₆ 가스에 의하여 거의 식각되지 않으므로, 매우 얇은 박막으로도 충분히 식각 정지층의 역할을 수행하였다. 또한 잘 알려진 근접효과에 의하여 10 nm의 Al 층은 초전도 현상에 거의 영향을 미치지 않으므로 [6] 소자의 전기적 특성에는 아무런 변화 없이 식각 공정을 컨트롤할 수 있는 매우 좋은 방법이 된다.

공정의 최적화 및 식각 정지층의 도입에서 확인해야 할 점은 RIE공정이 Nb/MoSi₂/Nb tri-layer를 수직방향으로 잘 식각하는가의 여부와, 식각이 멈추는 지점에서 수평방향의 식각이 급격히 증가하여 over-etch가 이루어지지 않도록 제어할 수 있는가 하는 부분이다.



(a)



(b)

Fig. 2. Etch depth of (a) Nb/MoSi₂/Nb tri-layer, (b) tri-layer with Al etch stop.

Fig. 3은 식각 정지층 유무에 따른 수직방향의 식각 단면을 전자현미경 (SEM)으로 관찰한 것이다. Fig. 3(a)는 식각 정지층이 없는 경우 BE의 중간 위치에서 식각을 멈춘 상태이다. 이 경우 식각 공정의 특성에 의해 접합구조 아래에 foot 구조가 생기게 되므로, MoSi₂ 층을 식각한 후에 일정량 이상의 BE Nb를 식각해야만 접합부위에서 수직 프로파일을 재현성 있게 얻을 수 있다. 한편 Fig. 3(b)처럼 식각 정지층이 있는 경우, MoSi₂ 층을 식각하면서도 접합부위에서 수직방향의 프로파일을 잘 유지하고 있는

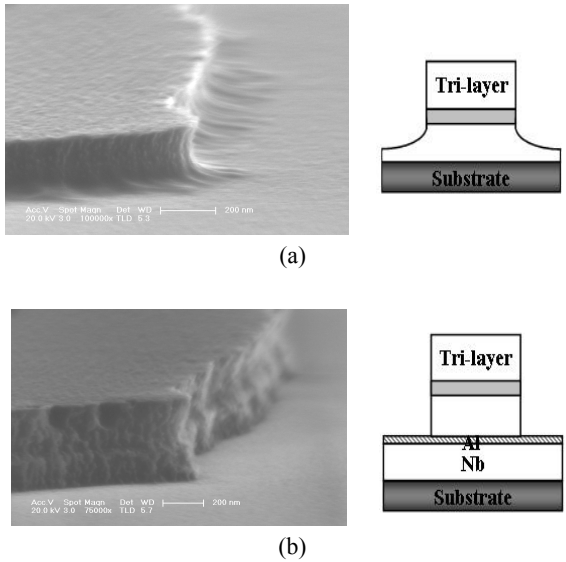


Fig. 3. SEM pictures of the etch profiles of (a) Nb/MoSi₂/Nb tri-layer (b) tri-layer with Al etch stop.

것을 알 수 있으며 Al 식각 정지층에서 식각이 멈춘 이후에도 수평방향으로의 심각한 over-etch는 이루어지지 않고 오히려 수직방향 프록파일의 잘 유지되고 있음을 알 수 있다.

최근 Nb-AlO_x-Nb 조셉슨 터널접합의 연구결과에서 집적회로의 패턴에 따라 임계전류 값의 산포와 특성 등이 예상하지 못한 방향으로 변화하는 것을 관찰하였고 이는 수소(Hydrogen) 불순물이 금속층을 스퍼터하는 과정에서 박막 안에서 확산(diffuse)하는 양태에 따라 소자 특성이 달라진다는 보고가 있었다. 이때 해결책으로 제시된 방법이 Al 등의 얇은 확산방지층(diffusion stop-layer)을 초전도 Nb 층 중간에 삽입하는 것이다 [12].

이는 본 연구에서 식각 공정을 제어하기 위해 삽입한 Al 층이 동시에 전기적인 특성 또한 조절할 수 있음을 보여준다.

이상의 공정으로부터 tri-layer를 식각하면서 접합의 형태를 잘 정의할 수 있고, 또한 BE의 두께를 적절하게 조절하며 식각을 정지할 수

있는 신뢰성있고 재현성있는 식각 공정을 확립하고 최적화하였다

Acknowledgments

This study was partly supported by the Original Technology Research Program for Brain Science (2010-0002143) through the National Research Foundation of Korea.

References

- [1] N. Yosikawa, F. Matsuzaki, K. Yoda, *Physica C*, Vol.378, 1454-1460, (2002).
- [2] S. P. Benz, C. A. Hamilton, *Proc. IEEE* 92(10), 1617 (2004).
- [3] Y. Chong, P. D. Dresselhaus, S. P. Benz, *Appl. Phys. Lett.* 86, 232505 (2005).
- [4] Y. Chong, N. Hadacek, P. D. Dresselhaus, C. J. Burroughs, B. Baek, S. P. Benz, *Appl. Phys. Lett.* 87, 222511 (2005).
- [5] B. Baek, P. D. Dresselhaus, S. P. Benz, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 16(4), 49 (2006).
- [6] P. G. de Gennes, *Superconductivity of Metals and Alloys*, W. A. Benjamin, New York, 225 (1966).
- [7] J. Clarke, *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **308**, 447 (1969).
- [8] K. A. Delin and A. W. Kleinsasser, *Supercond. Sci. Technol.* **9**, 227,(1996).
- [9] Y. Chong, P. D. Dresselhaus, S. P. Benz, *Appl. Phys. Lett.* 83, 1794 (2003).
- [10] S. P. Benz, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 2714 ,(1995).
- [11] Y. Chong K. T. Kim, S. I. Park, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 19(3), 238.-241. June 2009.
- [12] S. Tolpygo, ASC 2010 presentation. "Diffusion Stop-layers for superconductor integrated circuits and qubits with Nb-based Josephson junctions".