

기판 냉각과 비냉각으로 제작된 Nb/Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb 조셉슨 접합 어레이의 특성

홍현권, 김규태\*, 박세일\*, 이기영  
 충북대학교 전자공학과, \*한국표준과학연구원

Characterization of Nb/Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb Josephson junction arrays fabricated With and Without cooling substrate

Hyun Kwon Hong, Kyu-Tae Kim\*, Se Il Park\*, Kie-Young Lee  
 Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University  
 \*Korea Research Institute of Standards and Science, Electric Lab.

**Abstract** - Josephson junction arrays of the type Nb/Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb were prepared by DC magnetron sputtering. The tunnel barrier was formed by in-situ thermal oxidation. Individual junctions were defined using selective niobium etching process(SNEP). The characteristic curves of Josephson junction arrays fabricated with and without cooling the substrate were represented. The junctions deposited without cooling showed poor characteristics(high leakage current, low gap voltage), and a high quality Josephson junction array of 2,000 junctions with high hysteresis was obtained with cooling and when operated at 74.6 GHz, it generated stable quantized voltage steps up to 2.2 V.

1. 서 론

조셉슨 전압표준기는 1962년 B. D. Josephson에 의해 최초로 예견된[1] 교류 조셉슨 효과를 기본원리로 하고 있다. 조셉슨 접합에 bias 전압  $V$ 를 인가하면 교류 조셉슨 효과에 의해  $I_f = 2eV/h$ 의 주파수를 갖는 진동파가 발생된다. 만일, 주파수  $f$ 을 갖는 외부 마이크로파가 인가되면 조셉슨 주파수  $f_J$ 의 위상구속이 일어나  $V_n = nf/(2e/h)$ 로 표현되는 안정한 전압스텝들이 나타나게 된다( $n$ 은 정수,  $h/2e$ 는 자속양자). 이와 같이 주어지는 전압스텝을 이용하면 뛰어난 재현성과 안정성을 지닌 전압표준을 매우 정밀하게 표현해 낼 수 있다. 따라서, 기본물리상수들의 비  $2e/h$  값만 SI와 모순이 없도록 정확히 정의해주면 전압을 주파수와 같은 수준의 높은 정확도로 구현할 수 있다. 이러한 바탕에서 CCE(전기자문위원회)와 CIPM(국제도량형위원회)은 1990년 1월 1일을 기해 조셉슨 상수  $K_J$ 로 명명된  $2e/h$  값으로 483 597.9 GHz/V를 사용할 것을[2] 권고한바 있고 대부분의 국가들이 이를 따르고 있다.

최초의 조셉슨 전압표준기가 1~2개 접합에 약 10 GHz 정도의 마이크로파를 가해서 얻어지는 약 1 mV 정도의 Shapiro 스텝에 기초하던 것과는 달리 현재 조셉슨 전압표준기는 M. T. Levinsen 등에 의해서 제안된 영전류 통과 스텝(zero crossing step)[3]을 이용하여 1,500~20,000개 접합 직렬 어레이로부터 1~10 V의 조셉슨 전압을 얻고 있다. 이러한 발전 뒤에는 finline antenna의 사용 및 접합 어레이를 직접 stripline으로 사용함으로써 마이크로파 수신 및 전송문제가 해결되었다[4].

고품질 Nb/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb 조셉슨 접합을 제작하는데 중요한 요인들을 살펴보면, 첫 번째로는 조셉슨 접합의 터널 장벽으로 사용되는 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막을 들 수 있다. 터널 장벽은 산화되지 않는 Al 박막의 근접효과에 의해 영향을 받는다. 따라서, 터널장벽으로 사용되고 있는 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 산화조건과 증착두께는 고품질 조셉슨

접합을 제작하는데 중요한 변수로 작용되고 있다. 또한, Al 박막은 Nb grain boundary로 쉽게 확산하는 성질을 갖고 있기 때문에 터널특성에 영향을 준다[9]. Nb/Al 경계면에 대한 조사에서 Nb grain boundary 내로 확산된 Al 깊이는 Nb 박막을 증착한 후 기판의 냉각시간(기판표면온도)에 의존한다고 보고되고 있다[7][9]. 두 번째로는 각각의 조셉슨 접합의 절연과 마이크로파의 소형 도파관의 매질로 사용되는 절연체 특성이다. 조셉슨 접합 어레이의 제작공정에서 사용되고 있는 절연체로는 낮은 온도에서 증착된 SiO와 SiO<sub>2</sub>가 일반적으로 사용되고 있다. SiO<sub>2</sub>는 SiO에 비해 누설전류가 적고 절연파괴(breakdown)가 높은 전압에서 발생하는 것으로 알려져 있다[8].

그리고, PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)로 증착된 SiO<sub>2</sub>는 기판의 온도에 따라 굴절률이 달라진다. 300 °C 이하에서 증착된 SiO<sub>2</sub>의 굴절률은 1.6~1.8이고, 300 °C 이상에서 증착된 SiO<sub>2</sub>는 1.48~1.52로 알려져 있다[8]. 따라서, ground-plane과 stripline 사이에 증착되는 산화막 특성은 마이크로파의 손실과 관계된다.

본 실험에서는 제작과정 중에 발생하는 열효과가 조셉슨 접합 어레이의 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 100 Å의 Al 박막을 고순도 산소 분위기에서 열산화(thermal oxidation)시켜 제작한 2,000개 직렬 Nb/Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb 조셉슨 접합 어레이에 대한 특성곡선을 관찰하였다. Nb 박막을 증착할 때 열효과는 글리세린이 들어있는 냉각장치를 이용하여 변화시켰다.

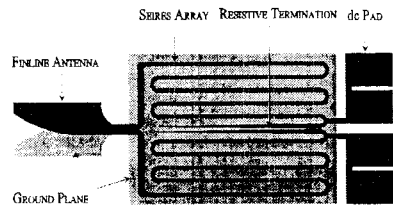


Fig. 1. Layout of a Josephson array of 2000 junctions(junction size: 14 μm×46 μm).

2. 본 론

2.1 1 V 조셉슨 접합 어레이의 구조

1 V 조셉슨 접합 어레이의 구조는 Fig. 1에 나타내었다. 2,000개 직렬 조셉슨 접합에 마이크로파를 효율적으로 수신하기 위한 finline antenna와 접합을 통과한 마이크로파를 반사없이 흡수시켜주는 resistive termination로 구성되어 있다. 그리고, finline antenna에서 수신된 마이크로파는 2분기로 나누어져 각각 1,000개가 직렬로 연결된 series array에 전달된다. 각각의 접합크기는 14 μm×46 μm이다.

## 2.2 실험 방법

본 실험에서 사용된 DC magnetron sputter에는 기판 온도를 측정할 수 있는 온도센서가 없기 때문에 기판의 온도 영향을 알아보기 위해서 증착률을 변화시켰다. 즉, 기판의 온도는 증착률에 의존한다는 가정으로 실시하였다.

기판을 냉각시켜 제작한 Nb 박막의 증착률은 분당 60 nm이고, 기판을 냉각시키지 않고 제작한 Nb 박막의 증착률은 분당 75 nm와 30 nm로 구분하여 제작하였다. 그리고, 1  $\mu\text{m}$  산화막을 SIS sandwich 위로 올려 증착하였다. 그때 Nb 박막의 증착률은 분당 30 nm이다. Table 1은 실험에 사용된 소자의 제작조건을 나타낸 것이다.

Table 1. Thermal conditions during fabrication of sample arrays.

시료	기판 냉각 여부	SiO <sub>2</sub> 두께 ( $\mu\text{m}$ )	Nb 증착률 (nm/min)	lift-off 여부	PR 표면 상태	추정온도
A	비냉각	1	75	불가능	.	고온
B	비냉각	1	30	불가능	.	↑ 기판 표면 온도
C	비냉각	0.1	30	불가능	.	표면 온도
D	냉각	1	60	가능	손상 있음	↓ 온도
E	냉각	1	60	가능	손상 없음	저온

## 2.3 조셉슨 접합 어레이의 전류-전압 특성

Table 1에서 시료 A, B, C의  $I$ - $V$  곡선은 Fig. 2, Fig. 3, 그리고 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)에 대한 74.7 GHz의 마이크로파가 인가된 곡선이고, Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)에 대한 75.2 GHz의 마이크로파가 인가된 곡선이다.

기판의 표면온도가 높다고 추정되는 Fig. 2와 Fig. 3(a)에서는 특성왜곡이 심하게 일어났다. 갭전압 이하에서 누설전류가 크고, 갭전압 감소와 갭전압 근처의 "knee" 구조가 뚜렷이 나타나지 않았다. 그리고, Fig. 3(b)에서처럼 마이크로파 손실이 크게 일어났다. 이 현상은 한 개 조셉슨 접합에 대해 조사한 것과 비슷하다 [7][9]. 기판의 온도상승으로 Al이 Nb grain boundary로 확산하여 터널장벽의 손상을 일으켜 누설 전류가 증가하고, Nb 박막의 초전도 특성의 열화로 갭전압 감소가 일어난 것으로 보인다. 그리고, 1개 접합과는 달리 어레이 공정에서는 기판의 온도분포가 부분적으로 다를 수 있다고 생각한다. 그래서, 2000개 조셉슨 접합 어레이에서는 온도 영향이 접합에 따라 다르게 나타나서 각각의 조셉슨 접합의 임계전류의 불일치 정도가 크게 나타난 것으로 보인다.

Fig. 4(a)에서는 조셉슨 접합의 특성이 많이 개선되었지만 마이크로파 손실이 커서 Fig. 4(b)에 보이는 것처럼 1 V 이상의 스텝을 찾지 못했다. 얇은 산화막 위에 증착시켜 제작함으로써 기판이 받는 온도를 Fig. 3보다는 상대적으로 줄여 DC 특성곡선은 많이 개선되었다. 하지만, 완성된 조셉슨 접합 어레이 위에 PECVD로 100~120 °C에서 40분간 SiO<sub>2</sub>를 증착시켰기 때문에 Wiring Nb 박막으로 산소가 침투되어 Nb 박막의 초전도 특성에 영향을 준 것으로 보인다. Nb 박막의 산소 함유량이 증가하면 4.2 K에서 Nb 박막의 coherence 길이  $\xi$ 가 매우 작아지게 된다 [5][6]. 즉, 터널장벽에 가까이 위치한 쿠퍼쌍들을 감소시키고, 준입자들의 수를 증가시키는 원인이 된다 [10]. 또한, PECVD로 낮은 온

도에서 SiO<sub>2</sub>을 증착할 경우 SiO<sub>2</sub>의 굴절률이 커지기 때문에 [8] 2000개가 직렬로 연결된 조셉슨 접합에 마이크로파가 끝까지 전달되지 못하고 소멸된 것 같다.

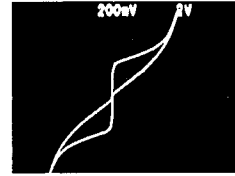
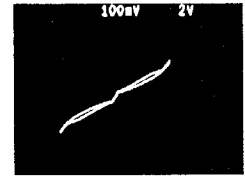
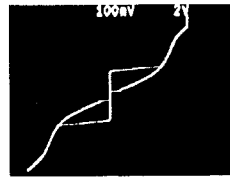


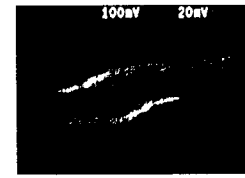
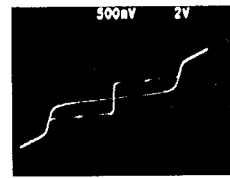
Fig. 2.  $I$ - $V$  curve of a Josephson junction array for sample A described in Table 1. horizontal scale: 2 V/div. vertical scale: 200  $\mu\text{A}/\text{div}$ . Junction size: 14  $\mu\text{m} \times 46 \mu\text{m}$ .



(a)

(b)

Fig. 3.  $I$ - $V$  curve of Josephson junction array for Sample B described in Table 1 in the absence of microwave radiation (a) and in the presence of 74.7 GHz radiation (b). (a)(b) horizontal scale: 2 V/div, vertical scale: 2.6 mA/div, junction size: 14  $\mu\text{m} \times 46 \mu\text{m}$ .



(a)

(b)

Fig. 4.  $I$ - $V$  curve of Josephson junction array for Sample C described in Table 1 in the absence of microwave radiation (horizontal scale: 2 V/div, vertical scale: 500  $\mu\text{A}/\text{div}$ ) (a) and in the presence of 75.2 GHz radiation (horizontal scale: 20 mV/div, vertical scale: 100  $\mu\text{A}/\text{div}$ ) (b). junction size: 23  $\mu\text{m} \times 54 \mu\text{m}$ .

Table 1에서 시료 D, E의  $I$ - $V$  곡선은 Fig. 5와 Fig. 6이다. Fig. 5와 Fig. 6에서 사용한 온도감지 방법은 PR 위에 증착된 박막의 표면을 보고 파악하였다. Fig. 5에서 나타난 조셉슨 접합 어레이에서 Nb 박막의 증착으로 인한 PR의 열손상이 조금 있었다. 하지만, lift-off가 가능한 것으로 보아 앞에서 제작된 것보다는 기판의 온도 상승이 적다고 추정한다.

앞에서 보여진 곡선과 Fig. 5를 비교하면 조셉슨 접합 어레이의 특성이 많이 개선되었다. 누설전류가 많이 줄고, 갭전압의 감소 현상이 없다. 그리고, 갭전압 부근에서 "knee" 구조가 뚜렷이 나타났다. 하지만, Fig. 5(b)에서처럼 1 V 이상의 스텝이 나타나지 않았다.

Fig. 6은 기판 냉각이 잘된 1 V 고품질 조셉슨 접합 어레이의  $I$ - $V$  특성곡선이다. 평균임계전류  $\langle I_c \rangle$ 와 접합들의 임계전류변화  $\Delta I_c / \langle I_c \rangle$ 은 대략 210  $\mu\text{A}$ 와  $\pm 14\%$ 이다. 그리고, 74.6 GHz의 마이크로파에서 최대 2.2 V까지 양자화된 스텝들을 얻을 수 있었다. 즉, 1개

조셉슨 접합당 1.1 mV의 양자화된 스텝들이 나타난다고 볼 수 있으며 접합당 에너지갭은 2.5 mV이다. Fig. 6(c)는 76.4 GHz의 마이크로파가 인가된 1.1 V의 정전압 스텝(스텝크기: 20  $\mu$ A)을 나타내고 있다.

지금까지 보여진  $I$ - $V$  곡선에 대해 온도에 의한  $R_{sg}$ (subgap resistance)의 변화와 갭전압  $V_g$ 의 변화를 Table 2에 나타냈다.

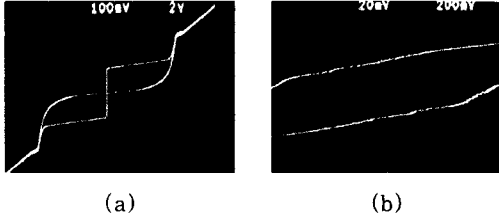


Fig. 5.  $I$ - $V$  curve of Josephson junction array for Sample D described in Table 1 in the absence of microwave radiation(horizontal scale: 2 V/div, vertical scale: 100  $\mu$ A/div) (a) and in the presence of 74 GHz radiation(horizontal scale: 200 mV/div, vertical scale: 20  $\mu$ A/div) (b). junction size: 14  $\mu$ m $\times$ 46  $\mu$ m.

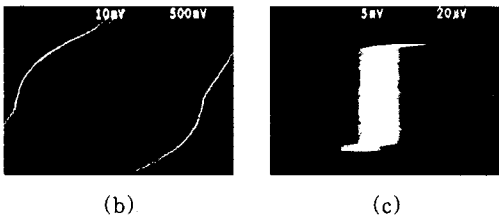
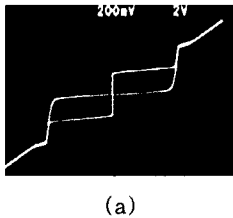


Fig. 6.  $I$ - $V$  curve of Josephson junction array for Sample E described in Table 1 in the absence of microwave radiation(horizontal scale: 2 V/div, vertical scale: 200  $\mu$ A/div) (a) and in the presence of 74.6 GHz radiation(horizontal scale: 500 mV/div, vertical scale: 10  $\mu$ A/div) (b) and constant voltage step at 1.1 V with microwave irradiation of 76.4 GHz(horizontal scale: 20  $\mu$ V/div, vertical scale: 5  $\mu$ A/div) (c). junction size: 14  $\mu$ m $\times$ 46  $\mu$ m.

### 3. 결 론

지금까지 나타난 현상들을 살펴보면 기판의 온도상승은 조셉슨 접합 어레이의 특성을 왜곡시킨다. 갭전압 이하에서 누설전류가 상승하고, 갭전압이 감소한다. 그리고, 갭전압 부근에서 "knee" 구조를 뚜렷이 찾아볼 수 없다. 그리고, 75 nm/min의 증착률로 Nb 박막을 증착하여 임계온도를 측정하였다. 그때, 임계온도값은 8.5 K으로 조사되었다. Nb 박막의 임계온도값은 9.3 K으로 알려진 값(8)과 비교해서 훨씬 낮게 나타났다.

우리가 사용한 2-in wafer는 2,000개와 16,000개

조셉슨 접합 어레이가 각각 4개가 있는 마스크를 사용하였다. 기판 냉각이 잘된 2-in wafer에서 2,000개 조셉슨 접합 어레이의 특성은 모두 Fig. 6과 같이 좋은 특성이 나타났다.

앞으로 냉각을 개선한 공정을 이용하면 16,000개 접합 어레이로부터 10 V 조셉슨 스텝을 충분히 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

Table 2. Values of  $R_{sg} \cdot A$ (subgap resistance $\times$  junction size) measured at 4 V and  $V_g$ (gap voltage) for  $I$ - $V$  curves of Fig. 2~Fig. 6.

시료	Figure	$R_{sg} \cdot A$ ( $\Omega$ cm <sup>2</sup> )	$V_g$ (mV)
A	Fig. 2	0.06	.
B	Fig. 3(a)	0.22	1
C	Fig. 4(a)	0.37	2.5
D	Fig. 5	0.64	2.5
E	Fig. 6(a)	0.86	2.5

### (참 고 문 헌)

- [1] B. D. Josephson, Phys. Lett., "POSSIBLE NEW EFFECTS IN SUPERCONDUCTIVE TUNNELING", Vol. 1, No. 7, PP.251-253, 1962. 7.
- [2] B. N. Taylor and T. J. Witt, "New International Electrical Reference Standard Based on the Josephson Quantum Hall Effect", Metrologia, Vol. 26, PP.47-62, 1989.
- [3] M. T. Levinsen, R. Y. Chiao, M. J. Feldmann, and B. A. Tucker, "An inverse ac Josephson effect voltage standard", Appl. Phys. Lett., Vol. 31, No. 11, PP.776-778, 1977. 12.
- [4] J. Niemeyer, J. H. Hinken, and R. L. Kautz, "Microwave-induced constant-voltage steps at one volt from a series array of Josephson junction", Appl. Phys. Lett., Vol. 45, No. 4, PP.478-480, 1984. 8.
- [5] C. C. Koch, J. O. Scarborough, and D. M. Kroeger, "Effects of interstitial oxygen on the superconductivity of niobium", Phys. Rev. B, Vol. 9, No. 3, PP.888-897, 1974. 2.
- [6] T. P. Orlando, E. J. McNiff, Jr., S. Foner, and M. R. Beasley, "Critical fields, Pauli paramagnetic limiting, and material parameters of Nb<sub>3</sub>Sn and V<sub>3</sub>Si", Phys. Rev. B, Vol. 19, No. 9, PP.4545-4561, 1979. 5.
- [7] K. Tanabe, H. Asano and O. Michikami, "Ellipsometric Study of Nb-Al-AlOx Layered Structure for All-Refractory Josephson Junctions", Japn. J. Appl. Phys., Vol. 25, No. 2, PP.183-188, 1986. 2.
- [8] S. Y. Lee, V. Nandakumar and B. Murdock, "PECVD SiO<sub>2</sub> DIELECTRIC FOR NIOBIUM JOSEPHSON IC PROCESS", IEEE Trans. Magn., Vol. 27, No. 2, PP.3129-3132, 1991. 3.
- [9] H. Asano, K. Tanabe, Y. Katoh, "Fabrication of All-Nb Josephson Junctions using Oxidized Zr Overlayers", Japn. J. Appl. Phys., Vol. 25, No. 3, PP.L261-L263, 1986. 3.
- [10] R. F. Broom, S. I. Raider, A. Oosenbrug, R. E. Drake, AND W. Walter, "Niobium Oxide-Barrier Tunnel Junction", IEEE Trans. elec. dev., Vol. ED-27, No. 10, PP.1998-2008, 1980. 10.