

Experimental Study on Microwave Attenuation in Josephson Junction Stripline

Hyun Kwon Hong*, Se Il Park⁺, Kyu-Tae Kim

Division of Electromagnetic Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

Received 20 August 2002

조셉슨접합 스트립라인의 마이크로파 감쇠에 대한 실험적인 조사

홍현권*, 박세일⁺, 김규태

Abstract

The attenuation of millimeter waves (70-100 GHz) propagating along Josephson junction stripline had been measured by pattern recognition near gap voltage and proximity current bump. Test series arrays of 2000, 3000, and 4000 Josephson junctions with the area of $12 \mu\text{m} \times 38 \mu\text{m}$ had two sub-arrays with 50 junctions at both ends. The arrays were fabricated with and without applying a plasma nitridation process to Nb ground plane. The effects of a nitridation process measured by the pattern recognition near gap voltage and proximity current bump were about 1.3-1.7 dB and 1.6-1.8 dB, respectively. This means that the last sub-arrays with a nitridation process receive 26-34 % more power than those without a nitridation process.

Keywords: Josephson junction, microwave attenuation, nitridation process

I. 서론

두 초전도체 사이에 터널장벽을 둔 조셉슨 접합에 직류전압을 인가했을 때 전압의 크기에 비례하는 주파수를 갖는 교류전류가 발생되는데, 이것의 역현상으로 외부에서 마이크로파를 인가했을 때 다음과 같은 직류전압이 발생하는 것을 역교류 조셉슨효과 [1]라고 한다.

$$V_n = n\hbar / K_{J,90}, n = \text{정수} \tag{1}$$

여기서 V_n 은 n 번째 전압스텝이고, 조셉슨 상수인 $K_{J,90}$ 은 기본 물리상수들의 비 ($2e/h$)로 483 597.9 GHz/V이다 [2]. 따라서, 외부 마이크로파의 주파수(f)에만 의존하는 전압스텝을 발생시킬 수 있다. 즉, 70-100 GHz의 마이크로파에 의해서 발생된 첫 번째 전압스텝은 145-207 μV 이고, 단일 접합당 약 1 mV까지 영전류 통과 스텝을 얻을 수 있으므로 [3] 2,000-20,000개 조셉슨접합 어레이의 7,000-70,000번째 정도에서 1-10 V의 전압스텝을 발생시킬 수 있다. 그리고, n 번째 전압스텝의 전류폭은 다음과 같이 주어진다 [4].

$$\Delta I_n = 2I_c |J_n(V_{rf}/V_I)| \tag{2}$$

*Corresponding author : skyhkh@hanmir.com

+contact author : seilpark@krissre.kr

여기서 I_c 와 J_n 는 임계전류와 n 번째 Bessel 함수이고, V_{n1} 와 V_{n2} 는 마이크로파의 전압진폭과 식 (1)에서의 첫 번째 전압스텝이다.

이와 같이 발생된 전압스텝으로 Zener 전압 표준기와 원활히 직접비교를 하기 위해서는 스텝의 안정도가 수 시간동안 유지되어야 하기 때문에 외부잡음에 의한 스텝 변동이 없어야 한다. 즉, 큰 전류폭과 안정도가 좋은 1-10 V 전압스텝이 발생되기 위해서는 2,000-20,000개 조셉슨접합들은 균일한 마이크로파를 수신해야 한다. 하지만, 실제로 조셉슨접합 어레이에서는 finline 안테나에서 수신된 마이크로파를 분배하기 위해 사용된 분기와 조셉슨접합들이 있는 스트립라인 등에서 마이크로파 감쇠가 일어나기 때문에 분기에 연결된 조셉슨접합들은 균일한 마이크로파를 수신할 수 없다. 따라서, 최대한 안정도가 높은 1-10 V 전압스텝을 발생시키기 위해서는 분기에 연결된 첫 번째 조셉슨접합과 마지막 조셉슨접합이 균일한 마이크로파를 수신할 수 있도록 마이크로파 감쇠를 줄여야 한다. 참고문헌 [5]에서는 분기당 6 dB이하일 때 안정도가 높은 전압스텝을 얻을 수 있다고 보고하고 있다.

본 논문에서는 10 V 조셉슨접합 어레이를 개발하기 위해서 단일 분기의 2,000 및 3,000 그리고 4,000개 조셉슨접합 어레이를 제작하였고, 마이크로파가 인가된 $I-V$ 곡선에서 꺾임점 근처의 패턴인식과 knee 구조의 전류 bump 변화를 조사하여 마이크로파 감쇠를 정량적으로 조사하였다. 한편, 고온 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) 공정을 사용하여 도파관 매질로 쓰이는 $1 \mu\text{m}$ 두께의 SiO_2 를 증착시킬 때 Nb ground plane 박막으로 산소가 확산하여 초전도특성을 저하시킨다 [6]. 이것은 마이크로파 감쇠에 주요한 원인으로 작용할 수 있기 때문에 산소확산을 억제하기 위해서 [7] Nb 박막에 질화처리를 하였고, Nb ground plane의 질화처리 효과를 알아보았다.

II. 측 정

1. Test series array 설계

Fig. 1은 마이크로파 감쇠를 알아보기 위해

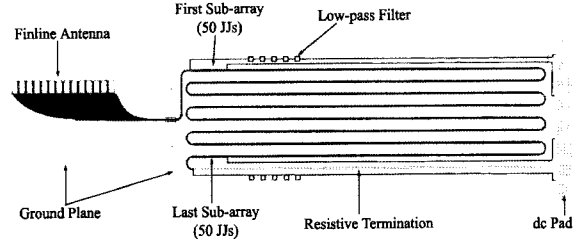


Fig. 1. Layout of a test series array with 4000 Josephson junctions, 50 junctions sub-arrays in both ends, and chip size of $17 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$.

설계된 test series array를 나타낸 것이다. 단일 분기에 조셉슨접합들이 직렬로 연결되어 있는 series array에 마이크로파를 효율적으로 수신하기 위한 finline antenna와 마이크로파를 반사 없이 흡수시켜주는 resistive termination로 구성되어 있다. 그리고, series array의 양쪽 끝에 마이크로파 (70-100 GHz)의 반파장 이상에 해당되는 first와 last sub-array가 있고, 각각 크기 $12 \mu\text{m} \times 38 \mu\text{m}$ 의 50개 조셉슨접합을 포함하고 있다.

초전도체 스트립라인에서의 마이크로파의 파장 ($\lambda_M = v_\phi / f$)은 Swihart와 Kautz [8],[9]가 유도한 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다.

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{B} \quad (3)$$

$$B = 1 + \frac{\lambda_a}{h} \coth\left(\frac{d_a}{\lambda_a}\right) + \frac{\lambda_b}{h} \coth\left(\frac{d_b}{\lambda_b}\right) \quad (4)$$

여기서, c 와 ϵ_r 은 광속도와 유전상수이고, $\lambda_{a,b}$ 와 $d_{a,b}$ 는 상하부전극의 London 침투깊이와 박막두께이다. 그리고, h 는 도파관 매질로 사용되는 산화막 (SiO_2)의 두께이다. 본 논문에서 사용한 test series array의 조건 ($\epsilon_r=3.5$, $\lambda_{a,b}=77 \text{ nm}$, $d_a=150 \text{ nm}$, $d_b=400 \text{ nm}$, $h=1 \mu\text{m}$)으로부터 70 GHz에서 반파장은 약 1.05 mm 이고, 이것은 50개 조셉슨접합이 직렬로 연결된 길이와 같다.

2. 측정방법 및 결과

Fig. 2는 꺾임점 근방에서 패턴인식의 측정 방법 (Fig. 2(a))과 knee 구조에서 전류 bump의

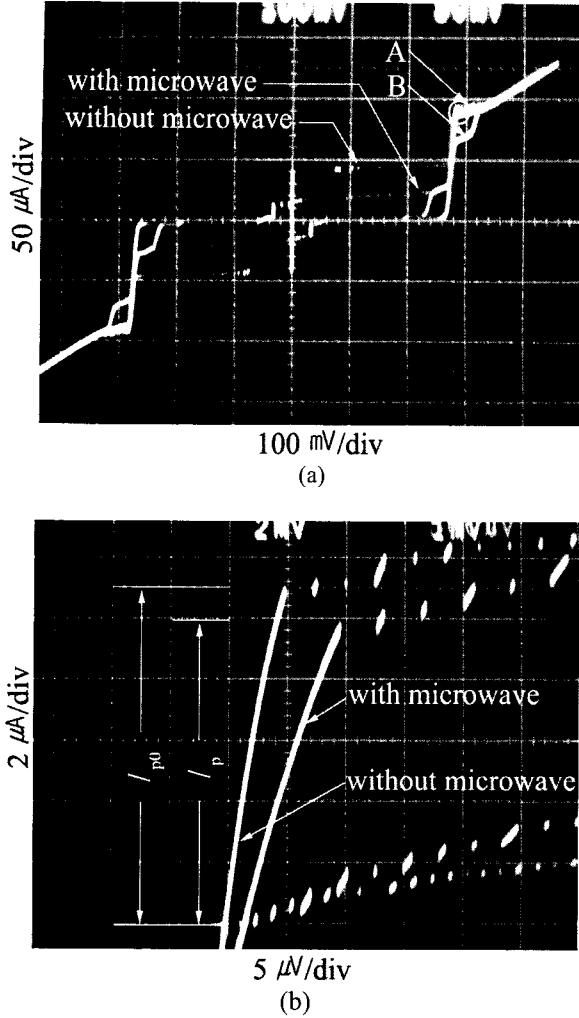


Fig. 2. Measurement methods of (a) the pattern recognition near gap voltage and (b) proximity current bump.

측정방법 (Fig. 2(b))을 나타낸 것이다.

Fig. 2(a)에 나타낸 것처럼 패턴인식 방법은 A로 표시된 지점이 70-100 GHz의 마이크로파에 의해 약 20 % 만큼 감소되도록 감쇠기를 조절하고, 감쇠기의 눈금을 전력측정기 (HP 437B)를 사용하여 마이크로파 전력을 측정한다. 이와 같은 방법으로 first와 last sub-array에 적용하여 마이크로파 전력차를 측정한다.

그리고, 전류 bump의 측정방법을 나타낸 Fig. 2(a)의 원으로 표시된 부분을 확대한 Fig. 2(b)에서처럼 마이크로파를 인가하지 않았을

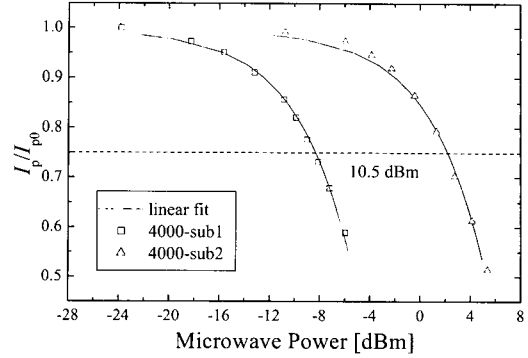


Fig. 3. Microwave-induced reduction of the smallest proximity current bumps in both sub-arrays. Here, sub1 and sub2 denote the first and last sub-arrays, respectively.

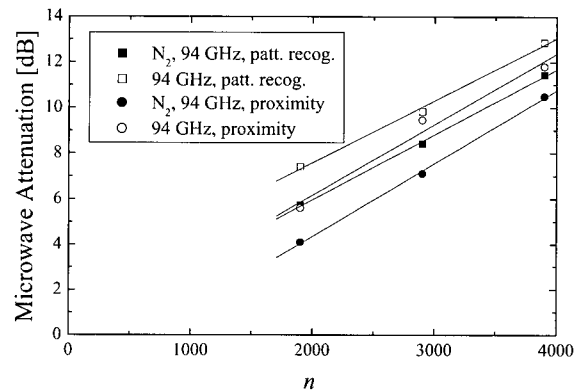


Fig. 4. Measured attenuations of the test arrays with/without a nitridation process by using the pattern recognition and the proximity current bump at 94 GHz. Here, the words of “patt. recog.” And “proximity” are the shortened forms of “pattern recognition” and “proximity current bump”.

때 I_{p0} 에 대한 인가했을 때 I_p 의 비 (I_p/I_{p0})를 구한다. 참고문헌 [10]에서 I_p/I_{p0} 는 마이크로파 전력에 대해서 선형성을 가진다고 보고하고 있고, 본 논문에서 측정한 Fig. 3에서처럼 first와 last sub-array에 선형성이 있는 것으로 조사되었다. Fig. 3은 질화처리된 4000개 test series array로 $I_p/I_{p0}=0.75$ 지점의 first와 last sub-array의 마이크로파 감쇠는 약 10.5 dBm으로 조사되었다.

Fig. 4는 위에서 설명한 방법으로 측정한 2000-4000개 test series array의 마이크로파 감쇠를 나타낸 것이다. Fig. 4에서처럼 패턴인식과

전류 bump 방법으로 측정된 Nb 박막의 질소처리효과는 각각 약 1.3-1.7 dB와 1.6-1.8 dB 정도의 마이크로파 감쇠를 줄일 수 있는 것으로 조사되었다. 이것은 Nb 박막 (ground plane)에 질소처리를 함으로써 last sub-array에 전달되는 마이크로파를 약 26-34 % 정도 향상시킬 수 있다는 것을 말한다. 그리고, 패터닝으로 측정된 마이크로파 감쇠값은 전류 bump으로 측정된 감쇠값보다 약 1.1-1.3 dB 정도 높게 나타나는 것으로 조사되었는데, 이것은 참고문헌 [5]에서 조사한 패터닝 측정방법의 불확도 (± 1.5 dB) 내에 존재하는 것이다. 그리고, 94 GHz의 마이크로파에서 6 dB 이하의 마이크로파 감쇠를 나타내는 최대 직렬 접합수는 2500개이다 (질화처리된 전류 bump 방법).

III. 결론

마이크로파 감쇠를 조사하기 위해서 제작된 2000-4000개 test series array로부터 Nb 박막의 질소처리효과를 알아보았다. 고온 PECVD 공정에서 발생된 산소화산을 억제하기 위해서 ground plane에 질소 플라즈마 처리를 하여 26-34 % 정도의 마이크로파 감쇠를 줄일 수 있었다. 그리고, 분기당 6 dB 이하의 마이크로파 감쇠를 갖는 접합수는 2500개로 조사되었다. 이것은 향후 10 V 조셉슨 접합 어레이의 분기수 및 직렬 접합수를 결정하는데 중요한 자료이다.

참고문헌

- [1] M. T. Levinsen, R. Y. Chiao, M. J. Feldman, and B. A. Tucker, "An inverse ac Josephson effect voltage standard," *Appl. Phys. Lett.*, 31, 776-778 (1977).
- [2] B. N. Taylor and T. J. Witt, "New international electrical reference standard based on the Josephson quantum hall effect," *Metrologia*, 26, 47-62 (1989).
- [3] R. L. Kautz, "On a proposed Josephson-effect voltage standard at zero current bias," *Appl. Phys. Lett.*, 36, 386-388 (1980).
- [4] L. Solymar, "Superconductive tunnelling and applications," Chapman and Hall, London, 157-164 (1972).
- [5] Y. Sakamoto, "Experimental study on millimeter wave attenuation in Josephson junction striplines for voltage standards," *PTB-Mitteilungen*, 104, 151-157 (1994).
- [6] W. DeSorbo, "Effect of dissolved gases on some superconducting properties of niobium," *Phys. Rev.*, 132, 107-123 (1963).
- [7] T. Shiota, T. Imamura, and S. Hasuo, "Plasma nitridation process for superconducting Nb wiring to improve their annealing stability," *J. Appl. Phys.*, 70, 6958-6965 (1991).
- [8] J. C. Swihart, "Field solution for a thin-film superconducting strip transmission line," *J. Appl. Phys.*, 32, 461-469 (1961).
- [9] R. L. Kautz, "Picosecond pulses on superconducting striplines," *J. Appl. Phys.*, 49, 308-314 (1978).
- [10] F. Müller, J. Kohlmann, F. X. Hebrank, T. Weimann, H. Wolf, and J. Niemeyer, "Performance of Josephson array systems related to fabrication techniques and design," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 5, 2903-2906 (1995).