

Nb/Al₂O₃/Nb 조셉슨 접합의 임계전류밀도 제어

김규태,* 홍현권,** 이상길,* 이규원*
 *한국표준과학연구원
 **충북대학교

J_c control of Nb/Al₂O₃/Nb Josephson junction

Kyu-Tae Kim,* Hyun Kwon Hong, Sang Kil Lee, Kyu Won Lee
 *Korea Research Institute of Standards and Science
 **Chungbuk National University

e-mail : ktkim@kriss.re.kr

Abstract - Single Josephson junctions of 50 μm x 50 μm were fabricated for several oxidation conditions to investigate controllabilities of critical current density (J_c) with the standard KRISS processes. Considering the self-field effect suppressing the observed critical current (I_c) at high J_c region, we could reasonably estimate J_c values from I-V observations. The dependence of the estimated J_c as a function of exposure, which is equal to pressure(P) times time(t), was well fitted to a curve of J_c ~ (Pt)^{-0.36}. The maximum J_c value at the controllability margin was found to be 4 kA/cm² with the current equipment set up.

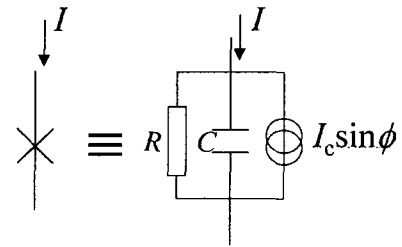


Fig.1. Equivalent circuit of a generic tunnel junction.

상전도 저항, C는 접합의 용량, φ는 두 초전도체를 기술하는 파동함수의 위상차, β는 (2eI_cR/ħ)RC, τ는 (2eI_cR/ħ)t, i는 I/I_c이다.

1. 서 론

Nb/AlO_x/Nb 조셉슨 접합은 초전도 디지털 응용소자를 구성하는 기초 재료로서, 접합 제작의 안정성과 재현능력은 응용소자개발의 성패를 좌우하는 필수 요건이다. 최근 차세대 디지털 전자소자로서 주목받고 있는 RSFQ (Rapid Single Flux Quantum) 소자는[1] 초전도회로에서 일어나는 자속양자를 조셉슨 접합을 이용하여 매우 빠르고 정확하게 제어함으로써, 수십 내지 수백 GHz 대역의 경이적인 속도로 대용량 정보를 처리할 수 있음에도 불구하고, 반도체에 비해 매우 낮은 전력을 소비하는 특징이 있어, 꿈의 컴퓨터라 할 수 있는 Petaflops 급 슈퍼컴퓨터, 초고속 대용량 Router, 고성능 이동통신 신호처리기 등을 비롯한 차세대 정보통신기술에 활용하기에 적합하다. RSFQ 소자의 주요 특징의 하나인 빠른 속도를 구현하기 위해서 조셉슨 접합 운동역학 방정식의 time scale을 결정하는 접합의 시정수들을 줄여야만 한다. 예컨대 그림 1의 RC 병렬 등가회로를 Stewart McCumber 모델[2]로 규격화시키면 (1)을 얻을 수 있다. 여기서 I는 접합에 흐르는 총전류, R은 접합의

$$\beta \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \frac{d\phi}{dt} + \sin(\phi) = i \quad (1)$$

따라서 접합은 2eI_cR/ħ가 클수록 더 빠른 특성을 갖게 되며, 결국 characteristic voltage, V_c=I_cR의 값을 크게 하는 것이 빠른 신호처리 특성을 얻기 위한 관건이 된다. 한편 McCumber 변수 β가 클수록 접합은 underdamping 하려는 경향이 커지며 평형에 도달하는데 더 많은 시간이 소요되므로 이를 줄이기 위해 접합 용량 C를 줄이는 것이 유리하다. 보통 터널 접합의 β는 매우 크므로 이를 인위적으로 줄이기 위해 외부 shunt 저항을 붙여 사용하지만, C는 J_c가 커질수록 감소하므로[3] 높은 속도를 얻기 위해서는 J_c를 높이는 것이 필요하다. 반면 J_c가 커질수록 I_c도 커지고 회로를 제어하는 바이어스 전류도 커져야 하므로 소비전력이 늘어난다. 따라서 접합의 면적은 J_c에 반비례하여 작아져야 한다. 본 논문에서는 높은 임계전류밀도를 안정적으로 제어하는 기술을 확립하고자, Al 접합장벽의 산화조건과 임계전류밀도의 관계를 실험을 통해 조사한 결과를 소개하고, 실험과정에서 나타난 접합의 크기효과에 의한 임계전류 억압현상에 관하여 논의하고자 한다.

2. 임계전류밀도의 제어

2.1 접합 제작

KRISS(한국표준과학연구원)의 Nb 접합 제작 장비에서 산화 조건과 임계전류밀도의 관계를 조사하기 위해 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 크기의 cross type 단일접합을 여러 가지 산화조건으로 제작하였다. 그림 2는 단일접합의 레이아웃을 보여준다. 제작은 KRISS의 표준 제작방식으로 제작되었다.[4] 그림 3은 전형적인 접합 제작과정을 보여주고 있다. 여기서 Nb는 dc sputtering으로, SiO_2 는 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)을 이용하여 증착하였으며, Nb 식각에는 RIE(Reactive Ion Etching)을 사용하였다.

2.2 임계전류밀도의 분석

제작한 접합은 KRISS의 표준 측정장치[4]를 이용하여 임계전류를 측정하였다. 그림 4는 그 중 대표적인 특성 사진을 보여준다. 그림 5에서 (a)의 경우 산소분압 P 와 산화시간 t 의 곱으로 정의할 수 있는 산화노출량 Pt 는 약 2.3×10^7 , (b)의 경우 $Pt = 1.6 \times 10^4$, (c)의 경우 $Pt = 1.1 \times 10^3$ 였다. 산화노출량이 감소함에 따라 임계전류밀도가 증가함을 알 수 있다.

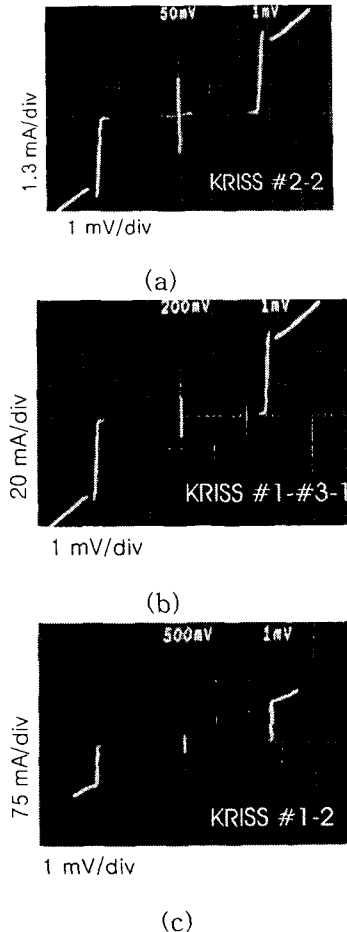


Fig.4. Typical I-V characteristics of single junctions: $J_c=0.1\ \text{kA}/\text{cm}^2$ (a), $1.5\ \text{kA}/\text{cm}^2$ (b), $3\ \text{kA}/\text{cm}^2$ (c).

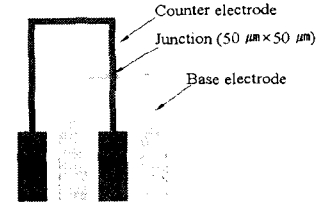


Fig.2. Layout of the single Josephson junction.

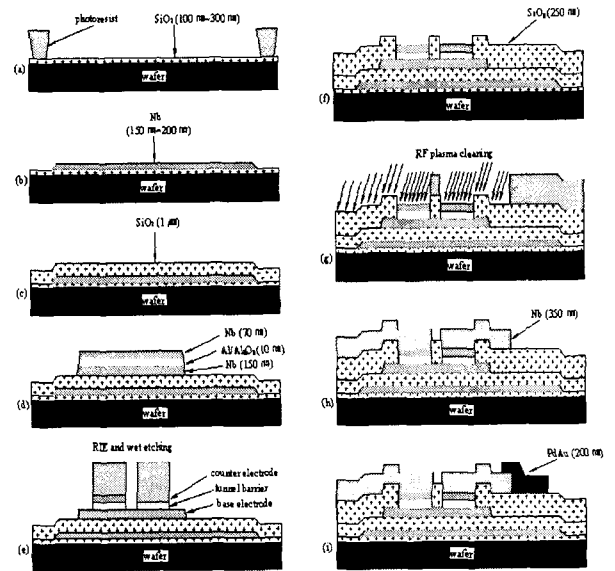


Fig.3. Fabrication process of Josephson junction:(a) PR for lift-off of ground plane, (b) Ground plane (Nb) formation, (c) Dielectric layer (SiO_2) deposition, (d) SIS sandwich formation by lift-off, (e) Dry etching of Nb counter electrode and wet etching of $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$, (f) Self-aligned deposition of SiO_2 insulation, (g) PR patterning for lift-off of Nb wiring and surface cleaning of counter electrode, (h) Nb wiring layer deposition, (i) Resistive termination (PdAu) deposition.

그런데 J_c 가 큰 접합일 수록 관측된 I_c 값이 BCS 이론에서 예상되는 값,[5]

$$I_1 = \frac{\pi}{2} \frac{\hbar \Delta}{eR} = \frac{\pi}{4} \frac{V_g}{R} = 0.78 \frac{V_g}{R} \quad (2)$$

(Δ 는 Nb의 에너지갭 각주파수,
 V_g 는 접합의 갭전압)

보다 더 적게 나타나는 현상이 발견된다. 이것은 J_c 가 커짐에 따라

$$\lambda_J = \left(\frac{\hbar}{2e\mu_0 J_c (2\lambda_{\text{Nb}} + t)} \right)^{1/2} \quad (3)$$

(μ_0 는 진공의 투자율, λ_{Nb} 는 Nb의 London 투과깊이, t 는 접합장벽의 두께)

같은 다른 원소의 영향 때문으로 추측된다.

로 표현되는 조셉슨 투과깊이가 접합의 크기예 비해 작아지고, 접합면을 따라 J_c 의 불균일한 분포가 생기기 때문이다. 정사각형 접합의 이러한 효과에 대한 정량적 분석은 Vaglio[6]에 의해 이루어진 바 있다. 이에 의하면 접합의 길이 W 가 $4\lambda_J$ 보다 훨씬 큰 경우 외부 자장 없이 얻을 수 있는 최대 임계전류, I_c 는 $2W\lambda_J J_1$ 로 주어진다. 여기서 J_1 는 small junction 즉 $W \ll \lambda_J$ 를 만족하는 경우 (2)로부터 얻어지는 BCS 이론의 임계전류밀도이다. KRISS 제작장비에서 얻어지는 Nb 박막의 경우 λ_{Nb} 는 80 nm[4], t 는 약 10 nm이므로 $J_1=1.5$ kA/cm²인 그림 4 (b)의 경우 λ_J 는 10 μ m가 되고 $J_1=3$ kA/cm²이 되는 그림 4 (c)의 경우 λ_J 는 7 μ m가 된다. 두 경우 $W \gg \lambda_J$ 를 만족하므로 Vaglio의 계산식을 적용하여 I_c 를 계산해보면 각기 15 mA 및 21 mA를 얻는다. 이 값은 그림 4 (b) 및 그림 4 (c)에서 볼 수 있는 임계전류의 값과 잘 일치한다.

2.3 산화조건과 임계전류밀도

그림 5은 임계전류밀도와 산화노출량의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 검은 사각형은 관측된 J_c 를 나타내고 검은 삼각형은 관측된 $I-V$ 특성으로부터 (2)식을 적용하여 구한 J_1 값으로 접합의 크기효과가 없을 경우의 J_c 값 즉 J_1 값이며, 흰 사각형은 Sugiyama [7]등의 결과를 표시한 것이다. Sugiyama 등이 얻은 것에 비해 동일한

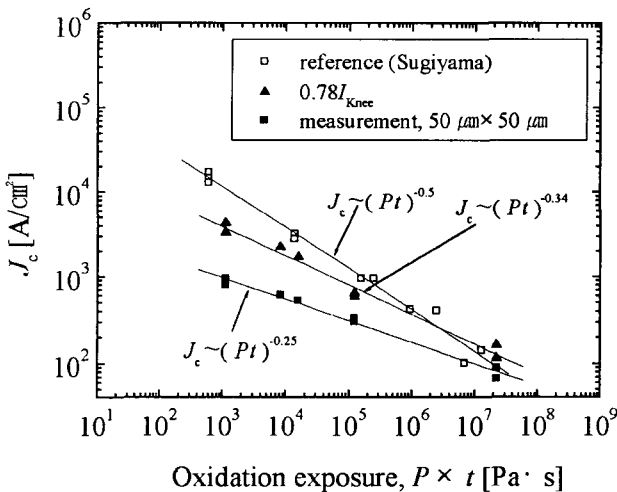


Fig.5. J_c vs. oxidation exposure relations. solid squares are experimental observations, solid triangles are estimated one from (2), empty squares are from reference [7].

노출량에 대해 더 낮은 J_c 가 얻어졌으며 이것은 KRISS 챔버에서 유효 산화가 더 잘 일어나는 것으로 생각되는 데 산소이외의 수소나 탄소와

3. 결 론

Nb 접합의 산화노출량(Pt)에 대한 임계전류밀도를 조사하였다. 접합의 크기 효과를 고려할 때 관측된 접합의 임계전류는 BCS 이론에서 예상되는 값과 잘 일치하였다. 이러한 크기효과를 고려하여 임계전류를 $0.78 V_g/R$ 로부터 계산하였을 때 제작된 접합의 임계전류밀도는 약 0.1 kA/cm² ~ 3 kA/cm²의 범위에서 $(Pt)^{-0.34}$ 에 비례하였다. 현재 KRISS 장비의 경우 최대 약 $J_1=3$ kA/cm²의 임계전류밀도를 얻었으며, 임계전류 제어의 재현 안정성 등은 앞으로 더 조사될 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. K. Likharev, "Rapid Single-Flux Quantum Logic", The New Superconducting Electronics, Kluwer Academic Publishers, NATA ASI Series, 1993.
- [2] K.-T. Kim, "Damping Effect on the Radio Frequency Induced Voltage Steps in a Josephson Tunnel Junction," Appl. Phys. Lett. Vol.66, pp.2567-2569, 1995.
- [3] M. Maezawa, M. Aoagi, H. Nakaga, and I. Kurosawa, "Specific capacitance of Nb/AlO_x/Nb Josephson junctions with critical current densities in the range of 0.1-18 kA/cm²", J. Appl. Phys., Vol.66, 2134, 1995.
- [4] H.K. Hong, K.-T. Kim, S.I. Park, K.-Y. Lee, "Fabrication of All-Nb Josephson Junction Array Using the Self-Aligning and Reactive Ion Etching Technique," Prog. in Supercond., Vol.3, No.1, pp.49-55, 2001.
- [5] A. Barone and G. Paterno, Physics and Applications of the Josephson Effect, Chap.3, John Willey & Sons, 1982.
- [6] R. Vagli, "Approximate Analysis for Stationary Current Flow in Two-Dimensional Josephson Tunnel Junctions," J. Low Temp. Phys., col.25, No.3/4, pp.299-315, 1976.
- [7] H. Sugiyama, A. Fujimaki, and H. Hayakawa, "Characteristics of high critical current density Josephson junctions with Nb/AlO_x/Nb trilayers," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.5, No.2, pp. 2739-2742, 1995.