

Nb/Al₂O₃/Nb 조셉슨 접합의 임계전류밀도 제어

J_c control of Nb/Al₂O₃/Nb Josephson junction

김규태,* 홍현권,** 이규원

Kyu-Tae Kim,* Hyun Kwon Hong, Kyu Won Lee

Abstract: Single Josephson junctions, which are of cross type, of 50 μm x 50 μm were fabricated under several oxidation conditions to investigate controllabilities of critical current density (J_c) with the standard KRISS processes. Considering that the self-field effect suppresses the observed critical current (I_{c0}) at high J_c region, we could reasonably estimate J_c values from I-V observations. The dependence of the obtained 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)^{-0.34}. The maximum J_c value at the controllability margin was found to be 3 kA/cm² with the current equipment set up.

Key Words: Josephson junction, critical current density, superconductor, Josephson penetration depth, Nb-AlO_x-Nb, barrier, oxidation

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

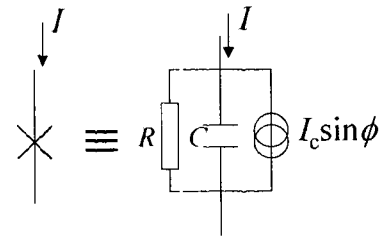


그림 1. 일반 터널접합의 등가회로.

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

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

따라서 접합은 2eI_cR/h가 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 평형에도달하는데 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 작아시켜야 한다. 본 논문에서는 높은 임계전류밀도를 안정적으로 제어하는 기술을 확립하고자, Al 집합장벽의 산화조건과 임계전류밀도의 관계를 실험을 통해 조사한 결과를 소개하고, 실험과정에서 나타난 집합의 크기효과에 의한 임계전류 억압현상에 관하여 논의하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 접합 제작

KRISS(한국표준과학연구원)의 Nb 접합 제작장비에서 산화 조건과 임계전류밀도의 관계를 조사하기 위해 50 μm x 50 μm 크기의 cross type 단일접합을 여러 가지 산화조건으로 제작하였다. 그림 2는 단일접합의 레이아웃을 보여준다. 제작은 KRISS의 표준 제작 방식으로 제작되었다 [4]. 그림 3은 전형적인 접합 제작 과정을 보여주고 있다. 여기서 Nb는 dc sputtering으로, SiO₂는 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor

* 정 회 원 : 한국표준과학연구원 전기자기그룹

** 학생회원 : 충북대 대학원 전자공학과 석사과정

원고접수 : 2002년 02월 19일

심사완료 : 2002년 05월 24일

Deposition)을 이용하여 증착하였으며, Nb 식각에는 RIE(Reactive Ion Etching)을 사용하였다.

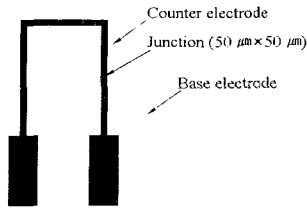


그림 2. 단일접합 시료의 레이아웃
Fig. 2. Layout of the single Josephson junction.

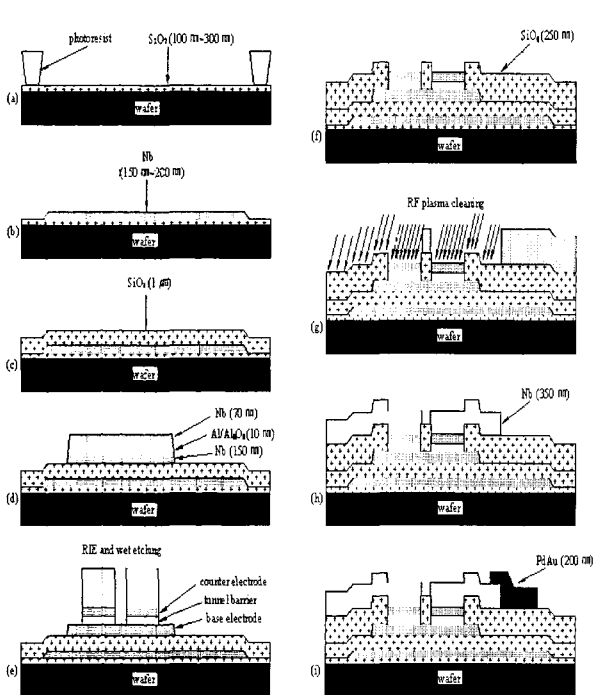


그림 3. 조셉슨접합 제작과정:(a) Ground plane lift-off를 위한 PR 증착, (b) Ground plane (Nb) 형성, (c) 유전층 (SiO₂) 증착, (d) SIS sandwich 제작(lift-off), (e) Nb 전극 및 Al/Al₂O₃ 장벽식각, (f) SiO₂ 절연막 증착, (g) Nb wiring용 PR 패터닝 및 표면세정, (h) Nb wiring 증착, (i) 저항 종말단 증착 (PdAu).

Fig. 3. Fabrication process of Josephson junction:(a) PR deposition for lift-off of ground plane, (b) Ground plane (Nb) formation, (c) Dielectric layer (SiO₂) deposition, (d) SIS sandwich formation by lift-off, (e) Dry etching of Nb counter electrode and wet etching of Al/Al₂O₃, (f) Self-aligned deposition of SiO₂ 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.

2.2. 임계전류밀도의 분석

제작한 접합은 KRISS의 표준 측정장치[4]를 이용하여 임계전류를 측정하였다. 그림 4는 그 중 대표적인 특성 사진을 보여준다. 그림 4에서 (a)의 경우 산소분압 P와 산화시간 t의 곱으로 정의할 수 있는 산화

노출량 Pt는 약 2.3x10⁷ Pa·s, (b)의 경우 Pt = 1.6x10⁴ Pa·s, (c)의 경우 Pt = 1.1x10³ Pa·s 이었다. 산화노출량이 감소함에 따라 J_c가 증가함을 알 수 있다. 그런데 J_c가 큰 접합일 수록 관측된 I_{c0} 값이 BCS 이론에서 예상되는 I_c 값(5),

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

(Δ는 Nb의 에너지갭 각주파수, V_g는 접합의 갭전압)

보다 더 적게 나타나는 현상이 발견된다 (그림 4). 이것은 J_c가 커짐에 따라

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

(μ₀는 진공의 투자율, λ_{Nb}는 Nb의 London 투과깊이, d는 접합장벽의 두께)

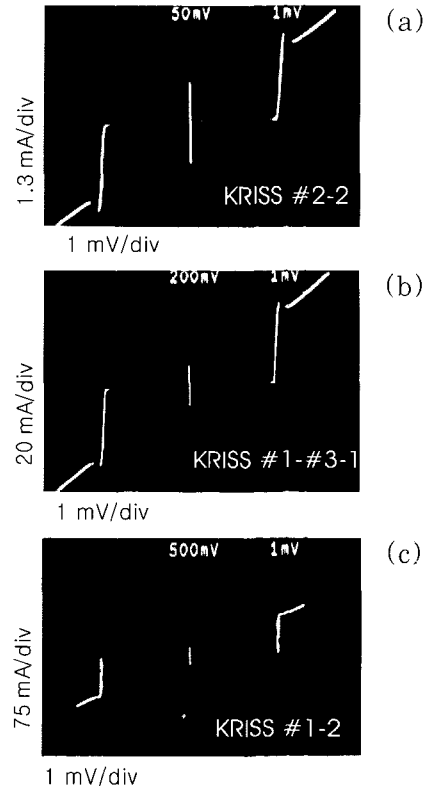


그림 4. 제작된 단일 조셉슨접합의 I-V 특성:(a) J_c(J_{c0}) = 0.1(0.067) kA/cm², (b) 1.5(0.52) kA/cm², (c) 3(0.79) kA/cm². 여기서 J_{c0}는 관측된 임계전류로부터, J_c는 관측된 V_g 값을 이용하여 (2)로부터 구하였다.

Fig. 4. Typical I-V characteristics of single junctions: (a) J_c(J_{c0}) = 0.1(0.067) kA/cm², (b) 1.5(0.52) kA/cm², (c) 3(0.79) kA/cm². Here, J_c was obtained from observed V_g using (2). J_{c0} was obtained from observed critical current.

로 표현되는 조셉슨 투과깊이가 접합의 크기에 비해 작아지고, 접합면을 따라 J_c의 불균일한 분포가 생기기 때문이다. 정사각형 접합의 이러한 효과에 대한 정량적 분석은 Vaglio[6]에 의해 이루어진 바 있다. 이에 의하면 접합의 길이 W (50 μm)가 4λ_J보다 훨씬 큰 경

우 외부 자장 없이 얻을 수 있는 최대 임계전류, I_{c1} 은 $2W\lambda_j J_c$ 로 주어진다. 여기서 J_c 는 small junction 즉 $W(\lambda_j)$ 를 만족하는 경우 (2)로부터 얻어지는 BCS 이론의 임계전류밀도이다. KRISS 제작장비에서 얻어지는 Nb 박막의 경우 λ_{Nb} 는 80 nm [4], λ_j 는 약 10 nm 이므로 $J_c = 1.5$ kA/cm로 추정되는 그림 4 (b)의 경우 λ_j 는 10 μ m가 되고 $J_c = 3$ kA/cm로 추정되는 그림 4 (c)의 경우 λ_j 는 7 μ m가 된다. 두 경우 $W > \lambda_j$ 를 만족하므로 Vaglio의 계산식을 적용하여 I_{c1} 을 계산해 보면 각기 15 mA 및 21 mA를 얻는다. 이 값은 그림 4 (b) 및 그림 4 (c)에서 볼 수 있는 임계전류 I_{c0} 의 값들과 잘 일치한다.

2.3. 산화조건과 임계전류밀도

그림 5는 임계전류밀도와 산화노출량의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 검은 사각형은 관측된 임계전류밀도 J_{c0} 를 나타내고 검은 삼각형은 관측된 V_R 로부터 (2)식을 적용하여 구한 J_c 값으로 집합의 크기 효과가 없을 경우의 값이며, 흰 사각형은 Sugiyama [7] 등의 결과를 표시한 것이다. 크기효과를 제외하고 순수한 터널특성만을 비교할 때, Sugiyama 등이 얻은 것에 비해 동일한 노출량에 대해 더 낮은 J_c 가 얻어졌으며 이것은 KRISS 챔버에서 유효 산화가 더 잘 일어나는 것으로 생각되는 데 산소²⁺의 수소나 탄소와 같은 다른 원소의 영향 때문으로 추측된다.

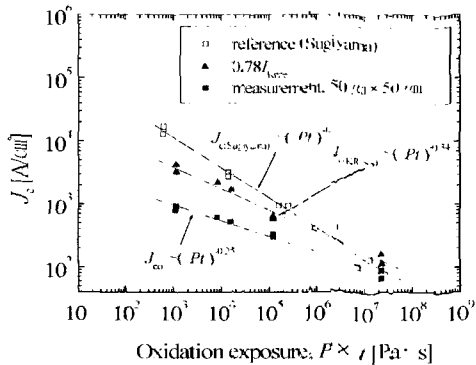


그림 5. 임계전류 밀도 대 산화 노출량의 관계. 검은 사각형은 실험결과이며, 검은 삼각형은 식 (2)로 계산한 것이고 흰 사각형은 참고문헌 [7]의 자료이다. Fig. 5. J_c vs. oxidation exposure relations. solid squares are experimental observations, solid triangles are estimated one from (2), empty squares are from reference [7].

3. 결 론

Nb 접합의 산화노출량(Pt)에 대한 임계전류밀도를 조사하였다. 접합의 크기 효과를 고려할 때 관측된 접합의 임계전류는 Vaglio의 이론에서 예상되는 값과 잘 일치하였다. 터널특성만을 고려하여 임계전류를 $0.78V_R/R$ 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 $J_c = 3$ kA/cm²의 임계전류밀도를 얻었으며, 임계전류 제어의 재현 안정성 등은 앞으로 더 조사될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

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. Aogai, H. Nakaga, and I. Kurosawa, "Specific capacitance of Nb/AlOx/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. Vaglio, "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/AlOx/Nb trilayers," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.5, No.2, pp. 2739-2742, 1995.

저 자 소 개



김규태 (金奎泰)
1960년 4월 5일생, 1989년 한국과학기술원 박사, 현재 한국표준과학연구원 진기자기그룹장.



홍현권 (洪玄權)
1973년 2월 22일생, 1999년 청주대 공대 반도체공학과 졸업, 2002년 충북대 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).



이규원 (李奎元)
충남대학교 물리학과 석사, 현 한국표준과학연구원 초전도그룹 책임연구원.