

SELF-FIELD EFFECT ON CRITICAL CURRENT OF LARGE JOSEPHSON JUNCTIONS

Korea Research Institute of Standards and Science K.-T. KIM*, S.-H. LEE, K.W. LEE

1. 서 론

최근 RSFQ (Rapid Single Flux Quantum) 기술은 초고속, 극저전력의 초전도 디지털 전자회로의 구현 가능성으로 인해 많은 관심을 모으고 있다.[1] 특히 정밀측정 및 표준 분야에 있어서, 기존의 직류 전압표준 소자에 비해 작동이 간편하며, 다양한 측정기술에 활용할 수 있는 차세대 조셉슨 전압표준용 소자에 응용가능성이 주목받고 있다. 그러나 RSFQ의 이러한 강점들이 제대로 발휘되려면 1 kA/cm^2 수준의 고임계전류, $10 \mu\text{m}$ 이하의 미소 조셉슨 접합을 신뢰성있고 재현성있게 제작할 수 있어야한다. 현재까지 이러한 요구에 적합한 접합재료는 Nb/AlOx/Nb 접합으로 알려져 있으나, 임계전류 제어에 필요한 Al 산화과정은 아직 완전히 규명되어 있지 못하고, 제작자에 따라, 제작 장비에 따라 매우 다른 임계전류 값을 보이고 있다. Nb/AlOx/Nb 접합의 임계전류 제어에 필요한 변수를 좀더 잘 이해하기 위해서 모든 산화공정 변수의 정밀측정과 아울러 접합의 임계전류밀도를 정확히 측정하는 것이 필요하다. RSFQ 회로에 쓰이는 $10 \mu\text{m}$ 이하의 미소 접합에 대해 산화조건을 직접 조사하는 것이 한가지 방법이나 접합의 크기가 작을수록 크기를 정밀하게 제어하려면 고도의 lithography 기술이 요구되고, 실제 제작된 접합크기를 포토마스크상의 설계치와 정밀하게 비교 측정하는 것이 요구된다. 반면 접합의 크기가 커지면, 자기장의 self-field 효과로 인해 접합면에 비균일 전류분포가 발생되고 이로 인해 전압-전류($I-V$) 곡선에서 관측되는 임계전류의 크기가 크게 위측되는 현상이 발생한다. 본 연구에서는 제작이 간편한 큰 접합을 이용하면서도, 이러한 위측량을 정량적으로 평가함으로써 구하고자하는 임계전류밀도를 정확히 측정할 수 있음을 보이기 위하여, 관측된 임계전류의 크기를 계산식과 비교측정하여 보았다. 본 논문에서는 실험방법, 실험결과, 결론의 순으로 기술하고자 한다.

2. 접합제작 및 측정

본 연구를 위하여 두가지 유형의 정사각형 접합을 설계하였다. 하나는 cross type으로 $50 \mu\text{m}$ 폭의 접합이고, 다른 하나는 in-line type으로 $3 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ 폭의 접합이다. 제작공정은 다음과 같다. Nb/AlOx/Nb tri-layer는 진공을 깨지 않고 dc magnetron sputtering으로 증착하며, SiO₂ 절연층은 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)로 증착한다. 접합 정의를 위한 Nb 식각은 RIE (Reactive Ion Etching)을 이용하고 있다. 타 방법과 다른 주요 특징은 self-aligned 기법이다.[2] 즉 접합 정의 과정인 Nb 식각에 사용된 PR (Photo Resist) 마스크를 그대로 이용하여 SiO₂ window를 형성한다. 이러한 기법은 포토마스크 및 해당 리소그래피 스텝을 생략할 수 있게 해 줌으로써, 제작이 단순화되고 수율이 향상되는 장점을 갖고 있다. Fig. 1은 cross type 접합의 레이아웃을 보여 준다.

3. 측정결과 및 고찰

크기가 $10 \mu\text{m}$ 이하의 in-line type 접합의 경우 비교적 높은 임계전류밀도인 1.6 kA/cm^2 로 제작된 접합의 $I-V$ 특성으로부터 관측된 임계전류는 모두 BCS 이론에서 예측되는 식 (1)의 값과 잘 일치하는 것이 발견되었으나, 크기가 $50 \mu\text{m}$ 인 cross type 접합의 경우 Fig. 2와 같이

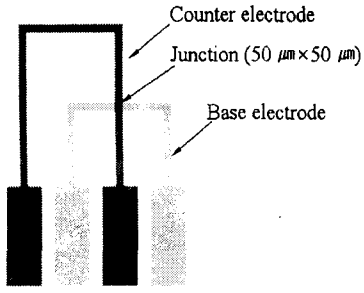


Fig. 1 Layout of the cross type junction.

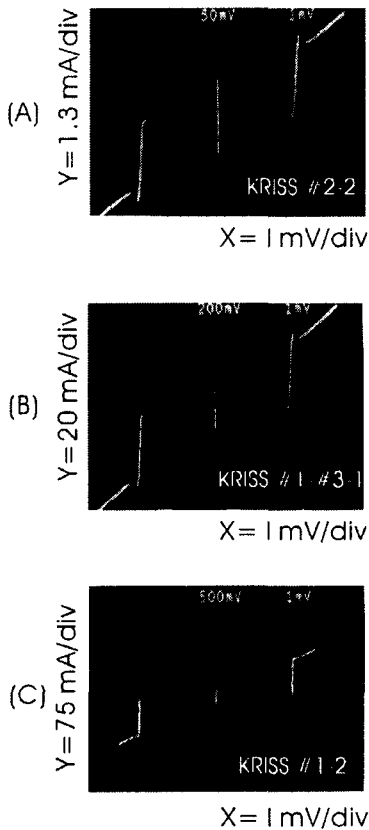


Fig. 2 I - V curves of the cross type square junctions with size of $50 \mu\text{m}$.

5. 참고문헌

- [1] Likharev K.K. The New Superconducting Electronics. NATO ASI Series: Kluwer Academic Publishers, (1993).
- [2] Hong H.K, Kim K.-T, Park S.I, K.-Y. Lee. Progress in Superconductivity ;3(1):49-55(2001).
- [3] Vaglio R. Approximate Analysis for Stationary Current Flow in Two-Dimensional Josephson Tunnel Junctions. J. Low Temp. Phys. ;25(3/4):299-315(1976).

Acknowledgement

This research was supported by a grant from Center for Applied Superconductivity Technology of the 21st Century Frontier R&D Program funded by the Ministry of Science and Technology, Republic of Korea.

관측된 임계전류가 커질수록 식 (1)의 값에서 크게 벗어나 위축되는 것을 볼 수 있었다.

$$I_{c(BCS)} = (\pi/2)\hbar\Delta/(eR) = 0.78V_g/R \quad (1)$$

(여기서 V_g 는 갭전압, R 은 접합의 normal state 저항)

이러한 현상은 접합의 크기가 조셉슨 투과 깊이 $\lambda_J = [\hbar/(2e\mu_0 J_c(2\lambda_{Nb} + d))]^2$ (여기서 J_c 는 접합의 최대임계전류밀도, λ_{Nb} 는 Nb의 London 투과깊이, d 는 접합장벽의 두께)에 비해 클 경우 흔히 발견되는 현상으로 self-field 자기장이 전류분포의 굴절을 일으키고, 접합의 기하학적 모양에 의존하는 전류분포가 생기기 때문이다. 본 실험과 같이 폭이 w 인 정사각형 접합에 비대칭 전류 바이어스를 사용한 경우 Vaglio [3]의 계산 결과에 따르면 $w > 4\lambda_J$ 일 경우, 접합 임계전류는 $w^2 J_c$ 대신 $2w\lambda_J J_c$ 가 될 것으로 예상된다. 여기서 J_c 값으로 식 (1)에서 주어진 $I_{c(BCS)}$ 를 접합 면적 w^2 로 나눈 것으로 가정하면, 즉

$$J_c = I_{c(BCS)}/w^2 \quad (2)$$

Vaglio 이론에서 예측되는 접합 임계전류를 계산할 수 있다. Table I에서 보듯이 이 계산 결과와 실험에서 관측된 임계전류 값이 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 식 (2)에서 계산한 값이 접합의 크기에 관계없이 임계전류밀도를 정확히 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Comparison of the critical current with theory for fabricated square junctions of size $50 \mu\text{m}$

J_c	λ_J	$4\lambda_J$	$2w\lambda_J J_c$	I_c measured
70 A/cm ²	45 μm	180 μm	-	1.7 mA
1.5 kA/cm ²	10 μm	40 μm	15 mA	13 mA
3 kA/cm ²	7 μm	28 μm	21 mA	20 mA

4. 결론

RSFQ용 조셉슨 접합의 임계전류밀도를 정확히 평가하기 위해서는 접합의 크기와 임계전류를 미소접합극한에서 정확히 측정해야한다. Self-field effect를 정량적으로 평가함으로써, 비교적 큰 접합에 대해서도 조셉슨접합의 임계전류밀도를 정확히 구할 수 있음을 Vaglio의 이론과 실험으로 증명하였다.