

28 A/cm²~940 A/cm²의 임계전류밀도 범위로 제작된 Nb/Al-AlO_x/Nb 터널접합의 전기적 특성

Electrical Characteristics of Nb/Al-AlO_x/Nb Tunnel Junction fabricated with I_c Values in the Range of 28 A/cm²~940 A/cm²

홍현권*, a)김규태**, 박세일**, 김구현***, 남두우#

Hyun Kwon Hong*, a)Kyu-Tea Kim**, Se Il Park**, Gu Hyun Kim***, and Doo-Woo Nam#

Abstract: Samples of Nb/Al-AlO_x/Nb tunnel junction with the size of 50 μm×50 μm were fabricated by using self-aligning and reactive ion etching technique. In the high quality samples, the V_m value (the product of the critical current and subgap resistance measured at 2 mV) was 34 mV at the critical current density of $J_c=500$ A/cm² and the V_g value (the gap voltage) was 2.8 mV. For the higher J_c sample, voltage fluctuation at the gap voltage was observed. The V_m and J_c values for this sample were 8 mV and 900 A/cm², respectively. Also, the relationship between critical current density J_c and specific normal conductance G_s of the junctions with J_c in the range of 28 A/cm²~940 A/cm² was investigated.

Key Words: Josephson tunnel junction, critical current density, voltage fluctuation

1. 서 론

Nb/Al-Al₂O₃/Nb 터널접합은 고품질 I - V 특성 [1][2]과 임계전류밀도의 높은 균일도를 나타내고 있다 [3]. 이와 같은 특성을 얻기 위해서는 다음과 같은 특성을 만족해야 한다. 터널장벽으로 사용되고 있는 얇은 Al 박막은 Nb 박막의 표면을 완전히 덮여야 하고, 열산화 (thermal oxidation)시켜 형성한 Al₂O₃는 좋은 열처리 안전성과 전기적인 절연 특성을 가져야 한다.

이러한 고이력성을 이용한 여러 가지 조셉슨 집적 회로 [4]-[8]에서 산화된 Al 박막의 두께를 줄이는 것은 임계전류밀도와 컨덕턴스 ($1/R_n$)를 지수함수로 증가시키고, 접합 커패시턴스 (C)를 선형으로 증가시키기 때문에 조셉슨 집적회로의 스위칭 시간과 연관되

어 있는 시정수 (R_nC)를 감소시키게 된다. 여기서, R_n 은 상전도 저항이다. 따라서, 조셉슨 응용 소자에서는 스위칭 시간을 짧게 하기 위해 높은 임계전류밀도를 갖는 고품질 Nb/Al-Al₂O₃/Nb 터널접합의 개발이 필수적이다 [9]. 그리고, 접합의 누설저항 (R_{sh})은 2 mV에서 측정된 전압과 전류의 비로 표현되며, R_n 으로 규격화시켜 접합특성을 나타내고 있다.

본 논문에서는 높은 임계전류밀도를 얻기 위해서 제작한 50 μm×50 μm의 접합크기를 갖는 Nb/Al-Al₂O₃/Nb 터널접합의 상전도 컨덕턴스에 대한 임계전류밀도의 관계를 조사하였고, 그 특성들을 나타내었다.

2. 본 론

2.1. 제작 방법

1 V 및 10 V 조셉슨 접합 어레이를 제작하는데 사용한 self-aligning 기술과 반응성 이온 식각 기술 [10]를 이용하여 Nb/Al-Al₂O₃/Nb 터널접합을 제작하였다. Fig. 1은 이 기술을 이용한 제작방법을 나타낸 것이다.

먼저, 1×10^{-5} Pa의 초기 압력에서 0.5 Pa의 Ar 분압과 분당 60 nm의 증착률로 150 nm 두께의 하부 Nb 전극을 증착하고, 그 위에 Al 박막을 0.5 Pa의 Ar 분압에서 분당 23 nm의 증착률로 10 nm 두께의 Al 박막을 증착한다. 그리고, 고순도 산소 (99.9999 %)를 주입시켜 Al 박막을 열산화시키고, 80 nm 두께의 상부 Nb 전극을 증착시켜 삼층구조를 형성한다 (Fig. 1(a)).

그리고, PR (photoresist)를 사용하여 접합 형태를 만들고, SF₆를 이용한 RIE (reactive ion etching)를 사용하여 Nb 박막을 식각한다. 이때, Al/Al₂O₃ 박막은 식각 정지층으로 사용하며 습식식각으로 제거한다 (Fig. 1(b)). 그리고, wiring layer와 단락을 방지하기 위해 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition)를 사용하여 산화막 (SiO₂)을 250 nm 두께로 증착시키고, PR를 제거하면 wiring layer가 증착될 수 있는 영역이 생기게 된다 (Fig. 1(c)).

마지막으로 PR를 사용하여 wiring 형태를 만들고, Fig.1(a)에서 사용한 Nb 박막의 증착조건으로 wiring Nb 박막을 320 nm 두께로 증착시킨다 (Fig. 1(d)).

* 학생회원 : 충북대 대학원 전자공학과

** 정 회 원 : 한국표준과학연구원

*** 학생회원 : 충북대 대학원 물리학과

학생회원 : 인천대 대학원 물리학과

a) 통신저자 : ktkim@kriss.re.kr

원고접수 : 2002년 02월 19일

심사완료 : 2002년 05월 07일

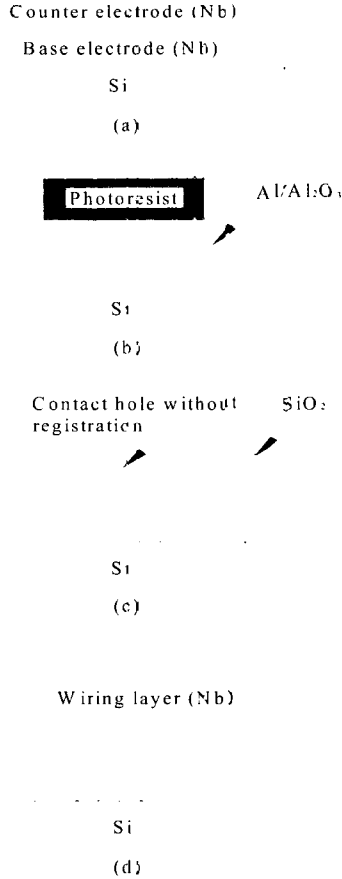


그림 1. Self-aligning 기술과 반응성 이온 식각 기술의 제작과정. (a) Nb/Al-Al₂O₃/Nb 삼층구조 증착. (b) RIE를 이용한 건식식각 및 습식식각. (c) 산화막 (SiO₂) 증착 및 lift-off 과정. (d) wiring Nb 박막 증착.

Fig. 1. Fabrication process of self-aligning and reactive ion etching technique. (a) The fabrication of the Nb/Al-Al₂O₃/Nb structure. (b) The patterning of the junction area by RIE and wet etching of Al/Al₂O₃. (c) The fabrication of the contact hole without registration after the deposition of insulation. (d) The deposition of wiring layer (Nb).

2.2. 전기적 특성

Fig. 2는 Fig. 1의 방법으로 제작된 터널접합들에 대해 상전도 컨덕턴스 (G_s)에 대한 임계전류밀도를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 원으로 표시된 것은 I - V 곡선에서 측정된 임계전류밀도를 나타낸 것이고, 삼각형으로 표시된 것은 "knee" 구조가 나타난 지점의 전류값 (J_{knee})에 0.78배 정도의 전류밀도를 나타낸 것이다. 참고문헌 [12]에서 $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ 터널접합의 임계전류는 대략 $0.78J_{knee}$ 에서 나타났다.

본 논문에서 사용한 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 터널접합에서 얻어진 측정값으로부터 $4\lambda_J$ 보다 큰 접합에 관한 J_c 와 G_s 의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있었다.

$$J_c \approx 3.025 + 0.00134 G_s, \quad 28 < J_c < 327 \quad (1)$$

$$J_c \approx 253 + 0.00036 G_s, \quad 327 < J_c < 940 \quad (2)$$

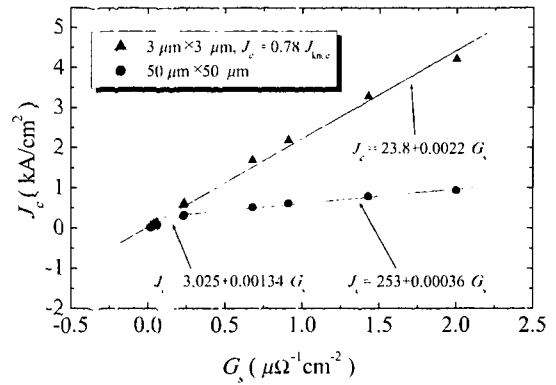
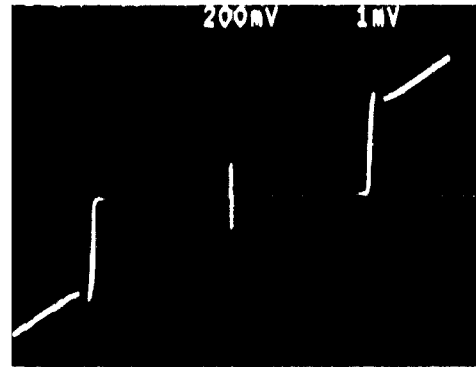
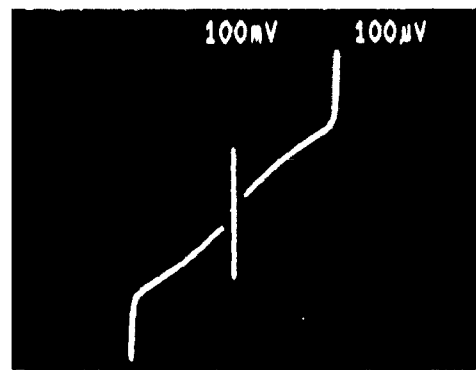


그림 2. 상전도 컨덕턴스 ($G_s=1/R_nA$)에 대한 임계전류밀도 (J_c). A 는 접합면적이다.
Fig. 2. Critical current density (J_c) vs specific normal conductance ($G_s=1/R_nA$). A is the area of junction.

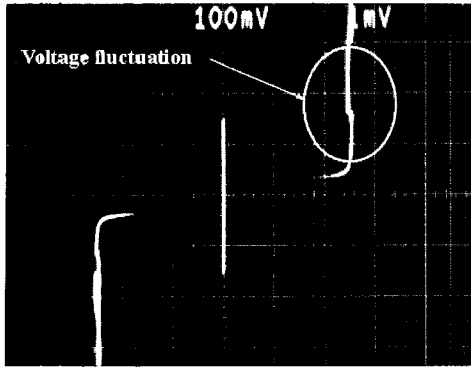


(a)

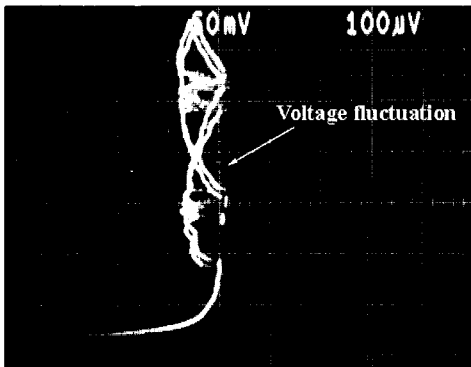


(b)

그림 3. (a) J_c 가 500 A/cm^2 이고, V_m 이 34 mV 의 특성을 갖는 접합의 I - V 특성. (b) $210 \mu\text{V}$ 의 첫 번째 Fiske step. (a) 수평: 1 mV/div , 수직: 20 nA/div . (b) 수평: $100 \mu\text{V/div}$, 수직: $100 \mu\text{A/div}$.
Fig. 3. (a) I - V characteristic of a junction having $J_c=500 \text{ A/cm}^2$ and $V_m=34 \text{ mV}$. (b) First Fiske step is observed at $210 \mu\text{V}$. (a) Horizontal scale: 1 mV/div , vertical scale: 20 nA/div . (b) Horizontal scale: $100 \mu\text{V/div}$, vertical scale: $100 \mu\text{A/div}$.



(a)



(b)

그림 4. (a) J_c 가 900 A/cm^2 이고, V_m 이 8 mV 의 특성을 갖는 터널접합의 I - V 특성. (b) 갭전압에서 관측된 전압요동 현상. (a) 수평: 1 mV/div , 수직: 15 mA/div . (b) 수평: $100 \text{ } \mu\text{V/div}$, 수직: 7.5 mA/div .

Fig. 4. I - V characteristics of a junction having $J_c=900 \text{ A/cm}^2$ and $V_m=8 \text{ mV}$. (b) Voltage fluctuation is observed at the gap voltage. (a) Horizontal scale: 1 mV/div , vertical scale: 15 mA/div . (b) Horizontal scale: $100 \text{ } \mu\text{V/div}$, vertical scale: 7.5 mA/div .

여기서 J_c 와 G_s 는 각각 A/cm^2 와 $\Omega^{-1}\text{cm}^{-2}$ 이고, λ_j 는 조셉슨 투과깊이이다. 그리고, $4\lambda_j$ 보다 작은 접합크기를 갖는 $3 \text{ } \mu\text{m} \times 3 \text{ } \mu\text{m}$ 의 특성 곡선으로부터 얻어진 $0.78J_{knee}$ 에서는 G_s 가 증가함에 따라 다음과 같이 선형으로 J_c 가 증가하였다.

$$J_c \approx 23.8 + 0.0022 G_s, \quad 34 < J_c < 4212 \quad (3)$$

참고문헌 [11]과 [12]에 의하면 접합크기가 $4\lambda_j$ 보다 크면 접합 둘레에 대한 조셉슨 전류의 편차 때문에 J_c 가 낮게 나타난다고 보고하고 있다. 여기서, $\lambda_j \propto J_c^{-0.5}$ 이므로 J_c 가 증가할수록 이런 현상이 두드러지게 나타나게 된다. 따라서, 본 논문에서 제작한 접합 크기는 $4\lambda_j$ 보다 크기 때문에 $4\lambda_j$ 보다 작은 접합크기를 갖는 터널접합의 J_c 와 차이가 나타나고, J_c 가 증가할수록 이런 현상이 두드러지게 나타난 것이다.

Fig. 3(a)는 Pt (산소압력 \times 산화시간) = $8146 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 에서 산화시킨 터널접합의 특성을 나타낸 것으

로 임계전류밀도는 대략 500 A/cm^2 이다. 이 접합의 단위 면적당 커패시턴스 (C_s)를 Maezawa 등이 [13] $0.1 \text{ kA/cm}^2 \sim 18 \text{ kA/cm}^2$ 범위에서 조사한 다음과 같은 실험식으로부터 구하면 대략 $4.7 \text{ } \mu\text{F/cm}^2$ 이다.

$$\frac{1}{C_s} = 0.2 - 0.043 \log J_c \quad (4)$$

여기서, C_s 는 $\mu\text{F/cm}^2$ 이고, J_c 는 kA/cm^2 이다. 그리고, 특성전압 ($V_m = I_c R_{sg}$)과 갭전압 (V_g)은 각각 34 mV 와 2.8 mV 이고, 시정수와 R_{sg}/R_n 은 각각 9.6 ps 와 31 이다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)의 지자장에 의한 기하학적인 공진모드인 첫 번째 Fiske step으로 대략 $210 \text{ } \mu\text{V}$ 에서 나타났다. 이 Fiske step으로부터 Fiske 공진주파수를 구하면 대략 102 GHz 이고, London 투과깊이 (λ_L)는 대략 77 nm 이다.

Fig. 4는 $Pt=1130 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 에서 산화시킨 것으로 임계전류밀도는 대략 900 A/cm^2 이고, (4) 식으로부터 단위 면적당 커패시턴스는 대략 $4.95 \text{ } \mu\text{F/cm}^2$ 이다. 그리고, V_m 과 V_g 는 각각 8 mV 와 2.6 mV 이고, 시정수와 R_{sg}/R_n 은 각각 2.5 ps 와 19 이다. 그리고, Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)의 갭전압 근처를 확대한 것이다. Fig. 4(b)에서처럼 갭전압 근방에서 갭전압을 축소시키려는 방향으로 전압 요동 현상이 일어나고 있다. 전압 요동 현상으로 축소된 최대 갭전압은 대략 $80 \text{ } \mu\text{V}$ 이다. 현재로서는 확실한 원인을 규명할 수는 없지만 $4\lambda_j$ 보다 큰 접합크기를 갖는 터널접합에서 임계전류밀도의 증가로 열효과 또는 평형상태에서 벗어나려는 현상 때문에 전압 요동 현상이 발생된 것으로 보인다. 참고문헌 [12]에서 $4\lambda_j$ 보다 작은 크기를 갖는 터널접합으로부터 임계전류밀도가 증가하면 이와 같은 원인으로 갭전압에서 음의 미분저항이 나타나는 것으로 보고하고 있다.

4. 결 론

Self-aligning 기술과 반응성 이온 식각기술을 이용하여 J_c 가 500 A/cm^2 에서 $V_m=34 \text{ mV}$ 를 갖는 Nb/Al-Al₂O₃/Nb 터널접합을 제작하였고, G_s 에 대한 J_c 의 변화를 조사하였다. 즉, 임계전류밀도와 접합크기가 증가할수록 접합둘레의 조셉슨 전류편차와 열효과 때문에 J_c 가 낮게 나타나는 것으로 조사되었다.

그리고, J_c 가 900 A/cm^2 에서 $V_m=8 \text{ mV}$ 를 갖는 터널접합의 갭전압에서 전압 요동 현상이 나타났다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Gurvitch, M. A. Washington, and H. A. Huggins, "High quality refractory Josephson tunnel junctions utilizing thin aluminum layers",

Appl. Phys. Lett., 42, 472, 1983.

[2] S. Morohashi, F. Shinoki, A. Shoji, M. Aoyagi, and H. Hayakawa, "High quality Nb/Al-AlO_x/Nb Josephson junction", Appl. Phys. Lett., 46, 1179, 1985.

[3] S. Morohashi, A. Yoshida, and S. Hasuo, "Stability of high-quality Nb/AlO_x/Nb Josephson junctions", J. Appl. Phys., 70, 1806, 1991.

[4] M. B. Ketchen, "Design considerations for DC SQUIDS fabricated in deep sub-micron technology", IEEE Trans. Mag., MAG-27, 2919, 1991.

[5] H. H. Zappe and K. R. Grabe, "Dynamic behavior of Josephson tunnel junctions in the subnanosecond range", J. Appl. Phys., 44, 865, 1973.

[6] E. P. Harris, "Turn-on delays of Josephson interferometer logic devices", IEEE Trans. Mag., MAG-15, 562, 1979.

[7] N. Fujimaki, S. Kotani, T. Imamura and S. Hasuo, "Josephson modified variable threshold logic gates for use in ultra-high-speed LSI", IEEE Trans. Electron Devices, ED-36, 433, 1989.

[8] A. Bhat, X. Meng, S. Whiteley, M. Jeffery, and T. V. Duzer, "A 10 GHz digital amplifier in an ultra-small-spread high- J_c Nb/Al-Al₂O₃/Nb integrated circuit process", IEEE Trans. Appl. Supercond., 9, 3232, 1999.

[9] K. K. Likharev, "Dynamics of Josephson junctions and circuits", New York: Gordon and Breach, 129, 1986.

[10] H. K. Hong, K.-T. Kim, S. I. Park, and K.-Y. Lee, "Fabrication of all-Nb Josephson junction array using the self-aligning and reactive ion etching technique", Prog. in Supercond., 3, 49, 2001.

[11] C. S. Owen and D. J. Scalapino, "Vortex structure and critical currents in Josephson junctions", Phys. Rev., 164, 538, 1967.

[12] H. Sugiyama, A. Fujimaki, and Hayakawa, "Characteristics of high critical current density Josephson junctions with Nb/AlO_x/Nb trilayers", IEEE Trans. Appl. Supercond., 5, 2739, 1995.

[13] 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", Appl. Phys. Lett., 66, 2134, 1995.

저 자 소 개



홍현권(洪玄權)

1973년 2월 22일생, 1999년 칭주대 광대 반도체공학과 졸업, 2002년 충북대 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).



김규태(金奎泰)

1960년 4월 5일생, 1989년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학박사). 현재 한국표준과학연구원, 전·자기그룹.



박세일(朴世一)

1961년 9월 30일생, 1990년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학박사). 현재 한국표준과학연구원, 전자소자그룹.



김구현(金丘顯)

1966년 2월 26일생, 1988년 충북대 물리학과 졸업, 현재 동 대학원 물리학과 박사과정.



남두우(南斗祐)

1975년 12월 7일생, 2001년 인천대 물리학과 졸업, 현재 동 대학원 물리학과 석사과정.