

Nb 조셉슨 접합의 열적 여기현상

김동호, 황준석
영남대학교

Thermal Excitations in Nb Josephson Junctions

Dong Ho Kim, Joon Seok Hwang
Yeungnam University

dhkim@yu.ac.kr

Abstract : We have measured the escape rates of the Nb Josephson junction from its zero-voltage state. The critical current measurements were carried out in repeatedly sweeping the current-voltage characteristics of the junction with a current ramp. From the distribution of the critical current the escape temperature was determined by applying the thermal activation model.

1. 서 론

1962년 Josephson이 두 초전도체 전극 사이를 전압강하 없이 흐를 수 있는 초전도 전류가 존재할 수 있는 있음을 예견한 이래로 조셉슨접합은 응용면에서나 이론적으로도 많은 연구가 진행되었다. 조셉슨접합은 그 양자적인 성질을 거시적인 전류-전압특성으로 관찰할 수 있는 좋은 예이다. 뿐만 아니라, 열적인 효과도 이러한 거시적인 전류-전압 특성을 관찰함으로써 쉽게 이해될 수 있다.

본 실험에서는 Nb 조셉슨접합의 열적 여기현상을 [1] 전류-전압 특성을 통해 관찰하고, 이로부터 준안정적인 상태로부터의 탈출율 (escape rate, Γ)을 구하고, 탈출온도 (escape temperature, T_{esc})를

계산하였다 [2-4]. 준안정적인 상태로부터의 탈출율은 조셉슨접합을 응용한 소자 개발시 그 지속성과 한계를 결정짓는데 유용하게 사용될 수 있다.

조셉슨 접합에서의 전류-전압특성은 흔히 Stewart-McCumber의 RCSJ (resistively and capacitively shunted junction)모형으로 설명되어진다. 이 모형에서는 조셉슨 접합을 저항과 축전기 및 초전도전류부분이 병렬로 연결된 등가회로로 나타낸다. 이때 전류가 일정하게 흐르는 조셉슨접합의 전류-전압 특성은 입자가 $(-x\phi - \cos\phi)$ 형태의 포텐셜내에서 움직이는 것과 동등하다. 여기서 $x=I/I_0$ 이고 ϕ 는 두 접합 전극의 초전도 질서함수의 위상차이다.

입자가 포텐셜 내에 갇혀있을 때는 초전도체 전극사이에 전압이 나타나지 않는 준안정적인 상태에 있게 된다. 전류가 증가하면 포텐셜에 갇혀 있던 입자가 아래로 흐르면서 전극사이에 전압이 나타난다. 그러나, 임계전류가 되기 전이라도 열적여기에 의해서 입자가 탈출할 수 있는데 이로 인하여 실제 임계전류 I_c 는 이론치 I_0 보다 항상 작게 측정되며 어떤 분포를 나타낸다. 이 임계전류 분포곡선으로부터 실험적인 탈출율은 다음과 같이 구해진다 [2-3].

$$\Gamma = \frac{1}{\Delta I} \frac{dI}{dt} \left[\frac{\sum_{i \geq I} P(i)}{\sum_{i \geq I + \Delta I} P(i)} \right] \quad (1)$$

여기서 $P(I)$ 는 임계전류가 I 와 $I + \Delta I$ 사이에 존재하는 빈도이다.

한편, 에너지 장벽 (ΔU)을 넘는 열적전이 과정을 설명한 Kramers에 의하면 이론적인 탈출율 (Γ_t)은 다음과 같이 표현된다 [1].

$$\Gamma_t = (\omega_p/2\pi) \exp(-\Delta U/k_B T_{esc}) \quad (2)$$

여기서 $\omega_p/2\pi$ 는 attempt frequency이다.

본 실험에서는 실험적으로 측정된 임계전류분포로부터 탈출율 (Γ)을 계산하고, 이것을 이론적인 탈출율 (Γ_t)과 비교하여 탈출온도 (T_{esc})를 계산하였다.

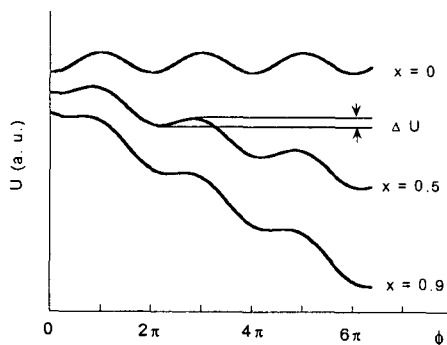


Fig. 1. Potential energy vs ϕ for current biased junctions where $x=I/I_0$. The ΔU is the energy barrier. The tilting increases with bias current.

2. 본 론

2.1 시료제작 및 실험방법

Nb 조셉슨 접합은 미국 Hypres사에서 제작하였고 접합의 넓이는 $4.5 \times 4.5 \mu\text{m}^2$ 이고, 임계전류 밀도는 4.2 K에서 $1,700 \text{ A/cm}^2$ 이다. 시료를 brass로 만든 exchange gas chamber 내부에 장착된 뒤 액체 헬륨에 담구어 측정하였다. 시료에 흐르는 전류는 건전지를 이용하여 공급하였고 접합의 전류-전압 특성은 National Instrument사의 data acquisition board를 사용하여 측정하였다. 최대값이 임계전류 값보다 큰 삼각파 전류를 시료에 흘려 접합의 전압이 영에서 벗어나는 전류를 임계전류로 결정하였고 임계전류의 분포는 10,000회를 측정하여 구하였다. 그리고 brass chamber 바깥에 초전도 코일을 감아 접합에 자기장을 가할 수 있도록 하였으며 자기장을 $\pm 76 \text{ G}$ 범위에서 변화하며 임계전류분포의 자기장의존성을 구하였다.

2.2 전류-전압특성

그림 2는 4.2 K, 0 G에서 측정한 전류-전압특성 곡선으로 0.363 mA 근처에서 준안정적 상태에

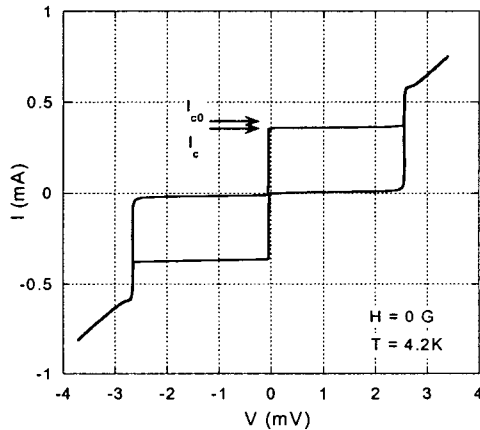


Fig. 2. Current-voltage characteristics measured at 4.2 K and 0 G. Experimentally observed I_c is usually smaller than theoretical value I_{c0} .

서 전압상태로 전이함이 보인다. 이 값은 이론적인 값인 0.4 mA보다 약간 작게 나타나며 이는 열적여기 현상에 기인한다.

2.3 임계전류분포와 탈출율

실험에서 측정한 4.2 K, 0 G의 임계전류 분포 $P(I)$ 를 그림 3에 나타내었다. 여기서 $P(I)$ 를 구할 때 사용한 $\Delta I = 0.3 \mu\text{A}$ 이다. 식 (1)을 사용하면 탈출율을 구할 수 있고 이를 그림 3에 함께 나타내었다. 임계전류가 0.3583 mA에서 0.3653 mA 사이에 분포함을 알 수 있고 탈출율은 10^{-10} ~ $10^5/\text{sec}$ 로 나타났다.

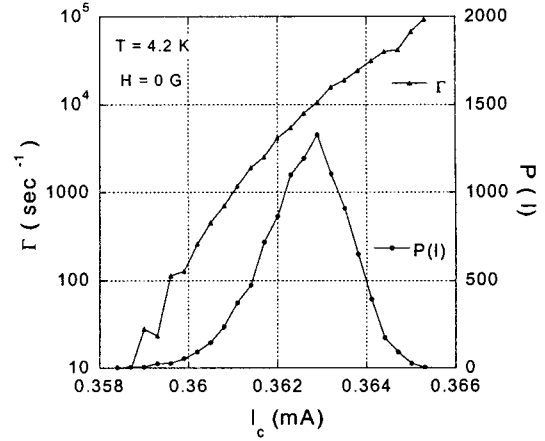


Fig. 3. $P(I)$ and Γ for Nb Josephson junction at 4.2 K and 0 G.

그림 4는 실험에서 구한 탈출율을 식 (2)와 비교한 결과이다. Fitting parameter로 사용된 T_{esc} 는 4.76 K로 실제 온도인 4.2 K와 근사하게 나타났다.

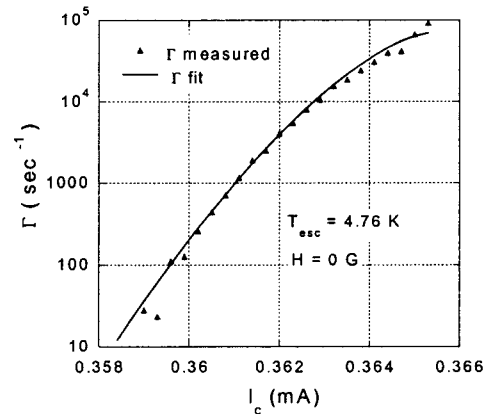


Fig. 4. Experimental escape rates are fit to Eq. (2) of the thermal activation model. The fitting parameter $T_{\text{esc}} = 4.76 \text{ K}$.

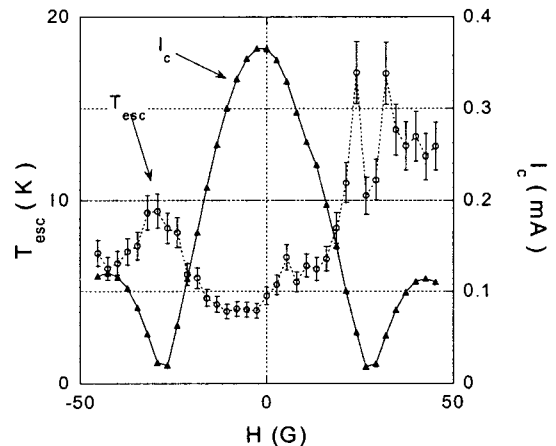


Fig. 5. Magnetic field dependence of I_c and T_{esc} determined from the critical current distribution. T_{esc} increases with magnetic field implying possible field induced excitations.

2.4 임계전류와 탈출온도의 자기장 의존성

접합평면에 평행하게 자기장을 가하면서 임계전류의 변화와 이에 따른 탈출온도의 변화를 살펴 보았다. 2.3절에 적용된 분석 방법을 각 자기장에서 측정된 임계전류 분포에 적용하여 탈출온도를 구하여 그림 5에 나타내었다. 자기장이 영인 부근에서는 T_{esc} 가 실제 시료온도인 4.2 K와 거의 비슷하게 나타났으나 자기장이 증가하면서 I_c 가 극소점인 부분 근처에서 T_{esc} 가 약 15 K 까지 증가함을 보였다. 그러나 I_c 가 다시 증가하면 T_{esc} 는 약간 감소하는데 이는 임계전류의 자기장 의존성을 뒤집어 놓은 것과 유사하다. 식 (2)에서 ΔU 는 다음과 같은 전류의존성을 가진다.

$$\Delta U = \frac{\Phi_0 I_c}{3\pi} (2 - 2x)^{3/2} \quad (3)$$

여기서 Φ_0 는 양자단자속이다. 식 (3)은 에너지 장벽이 I_c 에 의존한다는 사실을 보여준다. 따라서 I_c 의 자기장 의존성은 fitting과정에서 고려되었다. 그럼에도 불구하고 T_{esc} 가 자기장에 따라 변한다는 사실은 자기장의 변화에 따른 I_c 감소로 인한 ΔU 의 감소 외에 다른 영향도 존재함을 의미한다. 이처럼 T_{esc} 가 자기장 의존성을 나타내는 경우도 보고된 상태이나 [4] 아직 이에 대한 해석은 제시되지 않고 있다.

3. 결 론

Nb 조셉슨 접합에서의 임계전류분포로부터 전압 영인 상태로부터의 영적 여기에 의한 탈출을 구하였고 이를 열적활성화이론과 비교하여 탈출 유효 온도를 구하였다. 자기장이 영 근방에서는 실제온도와 탈출온도가 잘 일치함이 관측되었으나 자기장이 증가할수록 임계전류의 변화와 상반된 방향으로 탈출온도가 변함이 관측되었다.

[감사의 글]

이 논문은 21C 프론티어사업 차세대 초전도 응용기술개발 사업의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. A. Kramers, Physica, p284, 1940.
- [2] T. A. Fulton and L. N. Dunkleberger, "Lifetime of the zero-voltage state in Josephson tunnel junctions", Phys. Rev. B, vol. 9, pp4760-4768, 1974.
- [3] John M. Martinis, Michel H. Devoret, and John, Clarke, "Experimental tests for the quantum behavior of a macroscopic degree of freedom : The phase difference across a Josephson junction", Phys. Rev. B, vol. 35, pp4682-4698, 1987.
- [4] M. G. Castellano, G. Torrioli, C. Cosmelli, F. Chiarello, M. Cirillo, P. Carelli, and G. Rotoli, "Magnetic field dependence of thermal excitations in Josephson junctions", IEEE Trans. on Appl. Supercond. 7, pp2430-2433, 1997.