

Detectable frequency and sensitivity of high temperature superconducting Josephson junctions

고온초전도 조셉슨 접합의 고주파 검지 특성 연구

Wonil Cho, Wooseok Shim, Janghoon Yoo, Dohyon Kim, Gwangseo Park,
and Insang Song*

조원일, 심우석, 유장훈, 김도현, 박광서, 송인상*

High T_c Superconductivity Laboratory, Department of Physics,
Sogang University, C.P.O. Box 1142, Seoul, 100-611, Korea

*Microsystems Laboratory, Samsung Advanced Institute of Technology

서울특별시 중랑구 우체국 사서함 1142, 서강대학교 물리학과, 고온초전도 연구실
*삼성종합기술원, 마이크로시스템 연구실

We prepared high T_c Josephson junctions that have different I_c 's and R_N 's and studied their microwave properties. We measured the current-voltage characteristics of the junctions under the irradiation of 22 GHz electromagnetic wave at various temperatures. From the Shapiro steps, we calculated the maximum detectable frequency and the microwave received power of the junctions. Increasing critical current values increase both maximum detectable frequency and sensitivity. However, increasing temperature increase sensitivity but decrease maximum detectable frequency.

1. 서론 (Introduction)

조셉슨 접합[1]은 고주파 발전기, 검지기, 주파수 혼합기 등의 고주파 소자로의 가능성을 가지고 있다. 특히 고온초전도 물질의 에너지 간격은 수십 meV로 알려져 있으며, 따라서 이를 이용하여 제작한 고온초전도 조셉슨 접합은 밀리미터파나 서브밀리미터파 대역에서 작동하는 소자로서 사용될 수 있다. 그러나 단일접합이 방사, 검지할 수 있는 전자기파의 세기 자체가 작을 뿐 아니라 외부 시스템과의 임피던스 부정합 문제로 실제 응용에 따르는 어려움이 많다. 이런 문제에 대해서는 조셉슨 접합배열이나 조셉슨 집적회로를 제작하여 극복하려는 연구가 활발히 진행중이다 [2][3][4]. 이러한 문제점 외에도 조셉슨 소자를 고주파 검지기로 실제 응용하기 위해 고려해야할

조건들이 있다. 본 실험에서는 접합의 임계전류, 상저항, 그리고 온도의 변화에 따른 조셉슨 검지 특성의 변화에 대하여 연구하였다.

2. 실험 (Experiments)

본 실험에서는 쌍결정 MgO 기판 위에 고온초전도 YBCO를 PLD로 제작한 입계경계간 접합을 사용하였다. 외부 전자기파원으로는 중심주파수가 22 GHz인 Gunn diode oscillator를 사용했다. 접합 제작과정이나 실험방법은 다른 논문에 자세히 나와있다[5][6]. 조셉슨 접합에 전자기파를 조여주면 교류 조셉슨 효과[1]에 의해서 식 (1)과 같은 관계식이 만족될 때, 접합의 전류-전압 특성 곡선에 전류계단(Shapiro step)이 나타나게 된다. 전류계단의 크기는 식 (2)로 주어진다[7].

$$V_n = n \frac{h}{2e} f_a \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (1)$$

V_n 는 접합 양단에 걸리는 직류 전압을 나타내고, h 는 Planck 상수, f_a 는 접합에 조여준 전자기파의 주파수이다.

$$I_n = I_c J_n \left(\frac{nV_s}{V} \right) \sin \phi_0 \quad (2)$$

I_n 은 n 번째 전류계단의 크기이며 J_n 은 제 1종 Bessel함수의 n 차항을 나타낸다. V_s 는 조여준 전자기파의 크기이고 V 는 접합양단에 걸리는 직류 전압이다. 접합에 조여주는 전자기파의 세기에 따라 접합의 임계전류값이 달라지는데, 식 (3)을 이용하여 접합이 받아들이는 전자기파의 세기(수용세기, received power)를 계산할 수 있다[8].

$$P_0 = 2 \Delta I_c I_c \frac{f_a^2}{f_c^2} R_N \quad (3)$$

ΔI_c 는 조여준 전자기파에 의해서 줄어든 임계전류값이고, f_a 는 접합에 조여준 주파수, f_c 는 접합의 특성 주파수를 나타낸다. 특성 주파수 f_c 는 식 (4)으로 정의된다.

$$f_c \equiv \frac{2e}{h} I_c R_N \quad (4)$$

주파수가 22 GHz인 전자기파를 접합에 조여주며 접합의 전류-전압 특성을 측정하여, 이때 전류-전압 특성곡선에 나타나는 전류계단의 특성으로부터 접합이 검지할 수 있는 상한 주파수를 구했다. 또 외부 전자기파의 세기에 따라 감소된 접합의 임계전류값을 구하여 식 (3)으로부터 접합의 수용세기를 계산하였다. 같은 세기의 외부 전자기파에 대한 수용세기를 접합의 검지 민감도로 고려하였다.

3. 실험 결과 및 분석 (Results)

실험에 사용된 모든 조셉슨 접합에서 식 (1)을 만족하는 22 GHz에 해당하는 약 45.5 μ V의 배

수되는 전압에서 샤프로 계단을 볼 수 있었다. 그림 1은 11 K에서 전자기파가 조여주었을 때와 조여주지 않았을 때의 전류-전압 특성곡선이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 접합에 조여준 전자기파의 세기가 클수록 전류계단은 또렷하며 또 많은 수의 계단이 나타나게 된다.

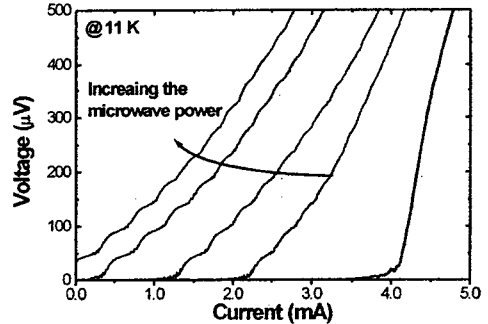


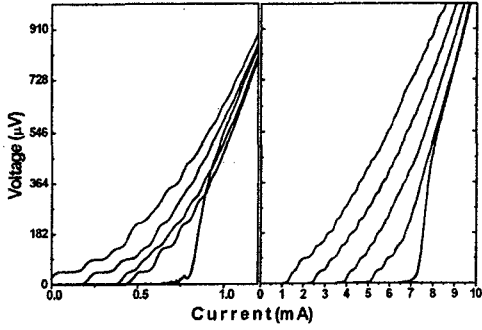
그림 1 외부 전자기파가 있을 때와 없을 때의 접합의 전류-전압 특성 곡선

3-1. 임계전류(I_c)와 상저항(R_N)에 따른 조셉슨 접합의 고주파 검지 특성

접합의 임계전류(I_c)와 상저항(R_N)이 각각 다른 값을 갖는 접합을 여럿 제작하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 접합의 임계전류값에 따라서 샤프로 계단의 특성이 달라짐을 알 수 있다. 그림 2(a)는 임계전류값이 작고 상저항은 큰 접합의 전류-전압 특성곡선이고, 그림 2(b)는 반대로 임계전류는 크고 상저항은 작은 접합의 결과이다. 대체적으로 접합의 임계전류가 큰 접합이 많은 수의 샤프로 계단을 보였으며 수용세기 역시 임계전류가 큰 접합이 더 컸다. 그림 3은 실험한 접합의 임계전류의 크기에 따른 검지가 가능한 최대 주파수와 같은 세기의 전자기파를 조였을 때의 수용세기를 나타낸 그림이다. 임계전류가 크다는 것은 보다 높은 온도에서나 높은 전류를 가했을 때에 비교적 초전자들이 남아있을 확률이 높아서, 보다 많은 초전자들이 전자기파와 상호작용을 할 수 있기 때문으로 생각할 수 있으며 식 (2)에서도 실험결과를 유추할 수 있다.

3-2. 온도변화에 따른 조셉슨 접합의 고주파 검지 특성

하나의 접합에 대해서 온도를 변화시켜가며 검



(a) (b)

그림 2. 접합의 임계전류가 작고 상저항이 큰 경우의 쇼피로 계단(a)과 반대인 경우의 쇼피로 계단(b) (11 K)

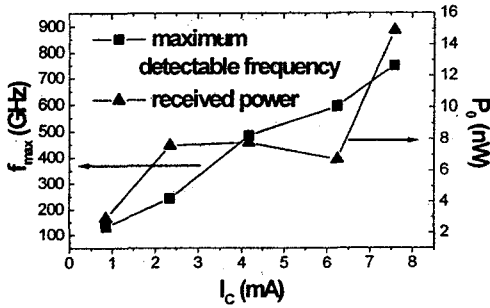
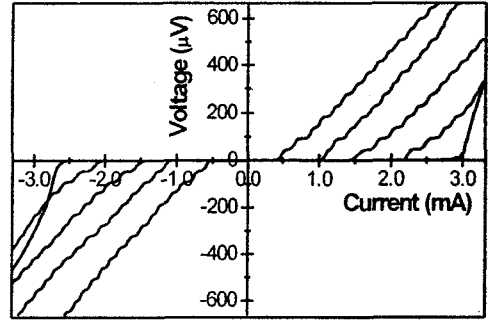
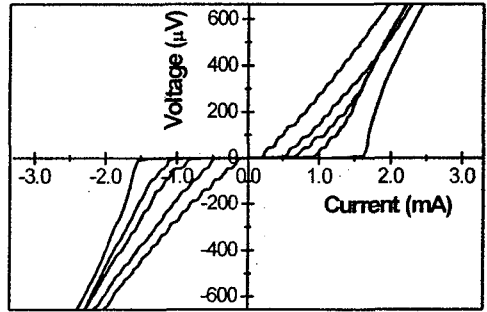


그림 3. 각 접합의 임계전류에 따른 최대 검지 주파수와 전자기파 수용세기의 변화

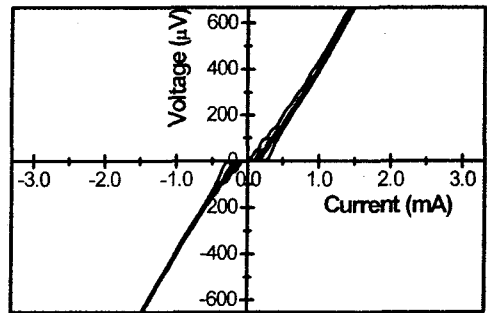
지 특성을 살펴보았다. 그림 4의 (a), (b), (c)는 각각 10 K, 40 K, 및 70 K에서의 전류-전압 특성 곡선이다. 온도가 증가함에 따라 쇼피로 계단의 수(검지 가능한 최대 주파수)는 감소하였다. 그러나 접합이 받아들인 전자기파 수용세기는 온도 증가와 함께 증가하는 경향을 보였다(그림 5). 이는 앞에서 임계전류값이 클수록 수용세기도 컸던 것과 비교하면 서로 상반되는 결과로 보인다. 이런 결과의 원인은 식 (3)이 식 (5)의 꼴로 간략화 되어질 수 있는데, 온도 증가에 따른 $\Delta I_C / I_C$ 의 증가량보다 R_N 의 증가량이 작기 때문으로 생각된다(그림 6). 즉, 온도 증가에 따른 $\Delta I_C / I_C$ 의 증가는 외부 전자기파에 의해 감소하는 임계전류의 정도가 온도에 대한 영향이 크지 않음을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. 온도에 따른 쇼피로 계단의 비교. 각각 (a) 10 K, (b) 20 K, (c) 70 K에서의 쇼피로 계단.

$$P_0 \propto \frac{\Delta I_C}{I_C R_N} \quad (5)$$

또한 접합의 특성주파수(f_c)와 실제 쇼피로 계

단이 나타나는 최대 주파수(f_{max})를 비교해 보았다. 그림 7은 사피로 계단으로부터 구한 최대 주파수와 접합의 특성 주파수의 비를 온도에 따라서 그린 그림이다. 접합의 특성 전압 이상의 전압값에서도 사피로 계단을 관측할 수 있었다. 최대 전압 대 특성 전압의 비율도 온도가 높아질수록 커지는 경향을 볼 수 있었는데, 이 현상은 접합의 전류-전압 특성 곡선이 임계전류값을 넘어선 지점부터 완만한 기울기로 상저항을 나타내는 직선으로 다가가는 모양을 하고있으며, 온도가 올라갈수록 그 완만한 정도가 더 커지기 때문에 상저항을 나타내는 직선과 실제 전류-전압 특성 곡선이 만나는 점은 임계전류와 상저항의 곱으로 정의되는 특성전압보다 높게 위치할 수 있기 때문으로 고려된다.

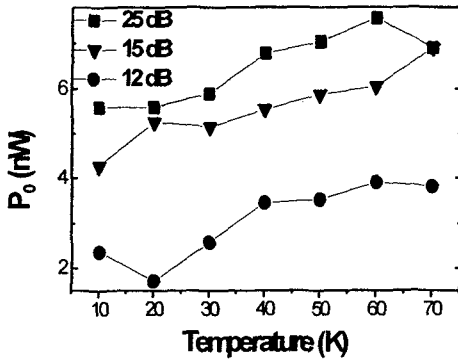


그림 5. 온도의 변화에 따른 접합의 전자기파 수용세기의 변화

4. 결론 (Conclusion)

고온초전도체 YBCO 조셉슨 접합을 여러개 제작하여, 접합의 임계전류, 상저항, 그리고 온도의 변화에 따른 접합의 고주파 검지 특성을 살펴보았다. 초전도체가 많이 존재할 수 있는 조건이 형성되는 큰 임계전류를 갖는 접합에서, 또 같은 접합에 대해서는 낮은 온도에서 더 높은 주파수까지 검지할 수 있었다. 접합의 수용세기로부터 고려한 고주파 전자기파 검지 민감도는 임계전류가 큰 접합에서 특성이 좋았고, 온도가 높을수록

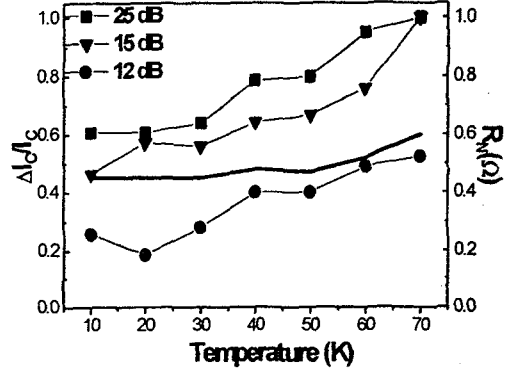


그림 6. 온도 변화에 따른 $\Delta I_c/I_c$ 의 변화와 R_N 의 변화량 비교. 가운데 굵은 선은 상저항의 변화를 나타낸다.

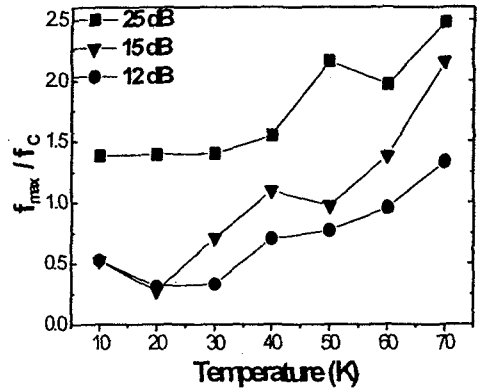


그림 7. 온도에 따른 접합의 특성 주파수와 실제 사피로 계단이 나타난 최대 주파수 비의 변화.

특성이 좋았다. 그러나 온도가 높아지면 접합의 임계전류가 감소하는 점을 생각하면 이는 서로 상반되는 결과처럼 보인다. 이런 결과는 외부 전자기파에 의한 임계전류의 감소치가 온도의 증가에 따른 변화가 크지 않기 때문으로 생각된다. 본 실험결과는 고온 초전도 조셉슨 접합을 고주파 검지기로 사용할 때, 전자기파의 주파수와 세기 등에 따라 접합이 필요한 특성을 알 수 있음을 보여준다.

5. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 연구비 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] B. D. Josephson, Phys. Lett. 1, 251 (1962)
- [2] I Song, K Kang, and G Park, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 38, 44-47 (1999)
- [3] M Darula, T Doderer, and S Beuven, Supercond. Sci. Technol. 12, R1-R25 (1999)
- [4] I Song et al, Proceedings of the 8th KCMAS, 64-66 (1998)
- [5] 송인상, 강광용, 신현범, 박광서, 응용물리 Vol. 11(4), 448-453 (1998)
- [6] I Song, K Kang, and G Park, Supercond. Sci. Technol. 11, 189-192 (1998)
- [7] A Barone and G Paterno, "Physics and Applications of the Josephson Effect" John Wiley & Sons (1992)
- [8] K. K. Likharev, "Dynamics of Josephson Junctions and Circuits" Gordon and Breach, New York (1986)