자기장하에서 Nb/AlOx/Nb 조셉슨 접합의 거동

김 동 호
영남대학교 물리학과

1. 조셉슨 접합 개요

초전도체를 사용하는 여러 가지 응용분야에서 디지털 소자부분에 가장 기본적인 단위소자가 조셉슨 접합니다. 1962년 Josephson은 두 개의 초전도체 사이에 얇은 절연층이 있을 때 전압강하 없이 흐르는 초전도 전류가 있을 수 있다고 예견하였고, [1] 그 예견은 후일에 실험적으로 증명되었다. 여기서 주로 소개될 $Nb/AlO_x/Nb$ 조셉슨 접합을 도식화하면 그림 1과 같다. 저온 초전도체인 Nb를 양쪽 전극으로 하고 그 사이에 얇은 산화알루미늄 절연체로 이루어져 있다. 이 때 두 초전도체 사이를 흐르는 초전도 전류 I_s는

$$I_s = I_c \sin \Delta\phi \qquad (1)$$

으로 나타나는데 여기서 $\Delta\phi$는 두 초전도체에 있는 파동함수의 위상차이며 I_c는 접합을 흐를 수 있는 최대전류로 임계전류가 된다. 만약 접합 양단에 전압이 걸리게되면 위상차가 식 (2)에 의하여 시간에 따라 변하게되고 그러면 접합을 흐르는 초전도 전류는 진폭이 I_c이고 주파수가 $2eV/\hbar$인 교류가 된다.

$$\frac{d(\Delta\phi)}{dt} = \frac{2eV}{\hbar} \qquad (2).$$

이 초전도 전류는 두 개의 전자로 이루어진 초전도 전자쌍이 얇은 절연층을 터널링함으로서 이루어진다. 초전도전자쌍의 터널링은 양자역학적 현상이며, 그 조건으로 양쪽 초전도체의 파동함수의 겹침이 존재해야 함으로 절연체가 두꺼운 경우에는 터널링 현상이 나타나지 않는다. 실제 접합제작시에는 절연층이 절연을 유지하면서두께가 얇아야하

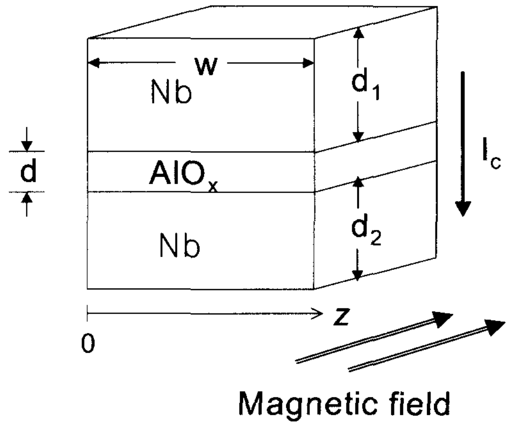

Fig. 1. Schematic diagram of a $Nb/AlO_x/Nb$ Josephson junction, where w is the width of the junction facing the magnetic field, d, d_1, and d_2 are the thicknesses of the insulator, Nb base and counter electrodes, respectively.

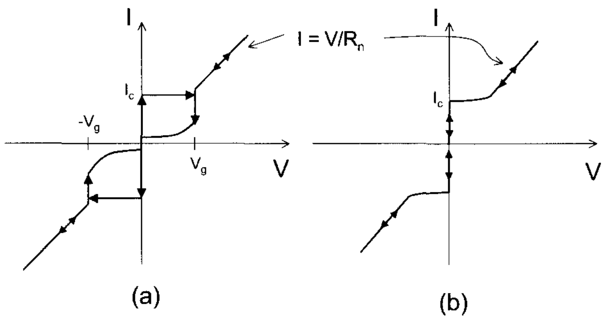

Fig. 2. Current-voltage characteristics of a hysteretic junction (a) and nonhysteretic junction depending on the so-called McCumber parameter. The curves become linear, $I = V/R_n$, if the bias current exceeds the critical current of the junction.

는 조건을 만족해야 함으로 주로 금속 산화막이 많이 이용된다. 한편 전극 양단에 전압이 걸리면 단일 전자도 함께 터널링하게 되므로 실험에서 측정되는 전류-전압특성은 단일전자에 의한 직류와 초전도 전자쌍에 의한 교류의 중첩이 된다.

그림 2(a)는 저온초전도체인 Nb를 양쪽 전극으로 하고 그 사이에 산화알루미늄 절연체로 이루어진 조셉슨 접합의 전류-전압 특성 곡선을 나타낸다. 두 전극사이의 정전용량의 크기에 따라 전류-전압 특성곡선에 이력이 나타남을 볼 수 있는데 평면형태의 $Nb/AlO_x/Nb$에서는 정전용량이 상대적으로 크므로 이력이 나타난다. [2] 만약 접합의 형태가 point-contact 형태라면 이력이 관측되지 않는다. 단 전극의 면적이 0.3×0.3 μm^2 이하가 되면 정전용량이 줄어들어 이력현상이 나타나지 않을 것으로 예측되고 있다. 전류가 점차 증가하여 I_c가 될 때까지는 초전도 전류만 흐르게되고 전극 양단의 전압은 0이다. 여기서 외부 전원의 전류를 계속 증가하면 I_c에서 전압 상태로 변환이 되고 이때의 전압 V_g는 Nb 전극의 초전도 에너지 간격에 비례한다. 그 이후로는 단일전자에 의한 직류와 초전도 전자쌍에 의한 교류가 함께 흐르나 교류성분의 주파수가 아주 높아서 일반 계측기로는 직류 성분만 관측되고 이 부분의 기울기는 접합의 저항, 즉 절연체의 저항의 역수, $I = V/R_n$, 가 된다. 이 부근에서 전류를 감소하게 되면 V_g 이하에서 원래의 곡선을 따르지 않고 전류가 곧바로 감소하다가 어느 시점에서 다시 초전도 전류로 변환된다.

여기서 정전용량을 없애기 위해 두 초전도 전극사이를 저항으로 shunt 하는 방법이 있는데 그러면 전류-전압 특성 곡선의 이력이 사라지는 그림 2(b)의 모습을 보인다. 디지털 전자소자에 사용하는 접합은 평면형태의 $Nb/AlO_x/Nb$는 이력현상이 존재하는데 이를 이용하여 rapid single flux quantum 소자를 구현하려면 회로의 설계와 구동회로가 까다로우므로 인위적으로 이력을 없애기 위해 shunt 방법을 주로 사용한다. 고온 초전도체로 제작하는 조셉슨 접합은 주로 ramp-edge나 step-edge 형태로 정전용량이 작아 이력현상을 보이지 않는다.

본 논문에서 주로 다룰 내용은 이력이 있는 $Nb/AlO_x/Nb$ 조셉슨 접합에 외부에서 자기장이 가해지는 경우에 나타나는 여러 가지 흥미로운 현상들을 소개하고자 한다.

2. 접합면에 평행한 자기장이 가해진 경우

직사각형의 단면적을 가지는 평면형 조셉슨 접합에 균일한 전류가 흐를 때, 접합면에 평행하게 자기장이 가해지면 접합을 흐르는 최대 임계전류는 자기장에 따라 변하며 식 (3)으로 주어진다. 여기서 균일한 전류가 흐른다 함은 $Nb/AlO_x/Nb$에서 접합의 크기가 대략 15×15 μm^2 이하일 때 만족되며 이보다 많이 넓은 접합의 경우에는 불균일한 전류가 흐르게 되어 해석에 복잡함이 따른다.

$$I_{max} = I_c\left|\frac{\sin(\pi\Phi/\Phi_0)}{\pi\Phi/\Phi_0}\right| \quad (3).$$

여기서 Φ는 접합을 투과하는 총 자속이며, Φ_0는 단자속으로 2.07×10^{-7} G cm^2이다. 만약 초전도 전극의 두께가 충분히 두꺼우면 총자속은

$$\Phi = Hw(\lambda_1+\lambda_2+d) \quad (4)$$

로 표현되며, 여기서 λ_1과 λ_2는 각 초전도 전극의 침투깊이이며, w는 자기장에 수직인 변의 길이, d는 절연층의 두께이다 (그림 1 참조). 이 식을 Φ의 함수로 나타낸 것이 그림 3으로 광학에서 단일 slit에 의한 Fraunhofer 회절무늬와 같다. 만약 접합의 모양이 원형이면 Airy 회절무늬가 된다. [2] 그림 3은 실제 $Nb/AlO_x/Nb$ 조셉슨 접합에서 측정한 그림 2(a) 형태의 전류-전압 특성 곡선으로부터 구한 임계전류의 자기장 의존성을 식 (3)과 비교한 것이다. 여기서 자속이 단자속의 정수 배에 해당할 때 ($\Phi = N\Phi_0$) 임계전류가 0이 되는데 이 결과를 이용하면 식 (4)로부터 $\lambda_1+\lambda_2$의 값을 구할 수 있다. 현재 사용하는 시료처럼 두 전극이 같은 물질인 경우에는 $\lambda_1=\lambda_2=\lambda$가 된다. 그림 3에서 시료의 크기가 16×16

μm^2 이므로, w =16 μm이고 $\Phi = \Phi_0$가 되는 자기장의 크기가 7.5 gauss이므로 이를 식 (4)에 대입하면 λ(4.2 K) = 88 nm가 된다. 절연층의 두께는 λ에 비해 아주 작으므로 무시될 수 있다.

그림3 같이 가해진 자기장에 따라 임계전류가 변화하는 이유는 임계전류를 결정하는 두 전극사이의 위상차 $\Delta\phi$가 접합내의 위치 (그림 1에서 z 축)와 외부 자기장의 크기에 따라 변화하기 때문이다. 접합내 한 지점 z의 위상차 $\Delta\phi$는 접합 시작점 (z = 0)에서의 위상차에 비해 그 두 지점 사이에 존재하는 자속에 비례하여 증가하는데, 어떤 주어진 자기장 하에서 주어진 지점의 위치가 시작점에서 멀어질수록 그 사이를 투과하는 자속이 증가하므로 외부 자기장의 크기에 따라 어느 지점에서부터 $\Delta\phi$가 π보다 커질수도 있다. $\Delta\phi \geq \pi$인 영역에서는 전류의 흐르는 방향이 $\Delta\phi \leq \pi$ 인 영역과 비교하여 반대가 된다. 만약 주어진 자기장에 의한 자속이 Φ_0의 정수배가 되면 시료의 반에서는 순방향으로, 나머지 반에서는 역방향으로 전류가 흐르기 때문에 알짜전류는 0이 된다.

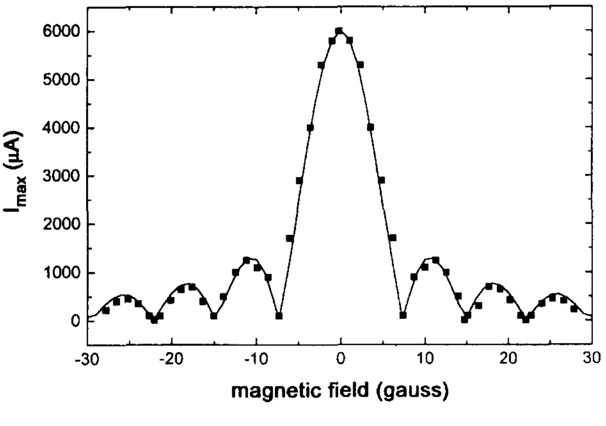

Fig. 3. Variation of the critical current of a Nb/AlOx/Nb Josephson junction of w = 16 μm with magnetic field parallel to the junction plane measured at 4.2 K. Solid line is a fit to Eq. (3).

초전도체의 침투깊이는 초전도체의 특성을 나타내는 중요한 변수이다. 일반적으로 침투깊이의 제곱은 전자밀도에 반비례하고, 전자의 평균자유행로가 짧아짐에 따라 그 크기가 증가한다. 따라서 침투깊이의 크기로부터 시료에 불순물이나 결함이 미치는 영향을 짐작할 수 있다. 또한 침투깊이의 온도 의존성도 평균자유행로와 가간섭거리 간의 크기의 비에 따라 변하므로 그 물질에 대한 추가 정보를 주게된다. Nb 단결정의 경우 침투깊이의 크기는 0 K에서 약 40 nm이나 박막으로 제작하면 그 크기가 약 60 nm로 증가하는데 그 이유는 박막성장시 자연스레 나타나는 결함 등에 의한 효과로 볼 수 있다. 이러한 침투깊이 측정은 위에서 언급한 바처럼 조셉슨 접합의 임계전류의 자기장에 대한 변화로부터 쉽게 얻을 수 있다.

$Nb/AlO_x/Nb$ 접합에서 전극의 두께는 대략 200-500 nm 이므로 Nb 두께 ≫ 침투깊이가 되어 저온에서는 Fraunhofer 무늬로부터 침투깊이를 구할 수 있다. 그러나 온도가 임계온도 근방으로 상승하게 되면 침투깊이 또한 가파르게 증가함으로 더 이상 Nb 두께 ≫ 침투깊이의 조건을 만족할 수 없게 된다. 이 경우에는 접합을 투과하는 자속이 더 이상 식 (4)로 표현되지 않고

$$\Phi = Hw\left[d + \lambda\tanh\left(\frac{b_1}{2\lambda}\right) + \lambda\tanh\left(\frac{b_2}{2\lambda}\right)\right] \quad (5)$$

로 변하게 된다. 여기서 b_1과 b_2는 두 전극 각각의 두께를 의미한다.

침투깊이의 크기와 온도의존성을 구하는 또 다른 방법은 접합에 평행한 일정한 자기장 하에서 온도-저항 특성 곡선을 측정하는 것이다. 만약 온도를 변화하게되면 침투깊이의 온도 의존성에 의하여 접합을 투과하는 자속 Φ가 변하게 된다 (식 (4)와 (5)에서). 따라서 온도가 변함에 따라 $\Phi = N\Phi_0$를 만족하는 온도가 존재하게 되고, 이 온도에서는 접합을 흐르는 알짜전류가 초전도 전류가 아닌 단일 전자로 이루어지므로 접합에 저항이 나타나게 된다. 임계온도에 가까울수록 침투깊이가 증가함으로 Φ가 Φ_0의 정수배가 되는 온도가 다수 존재하게되고 이 온도를 온도-저항 특성곡선에서 확인할 수 있다. [4]

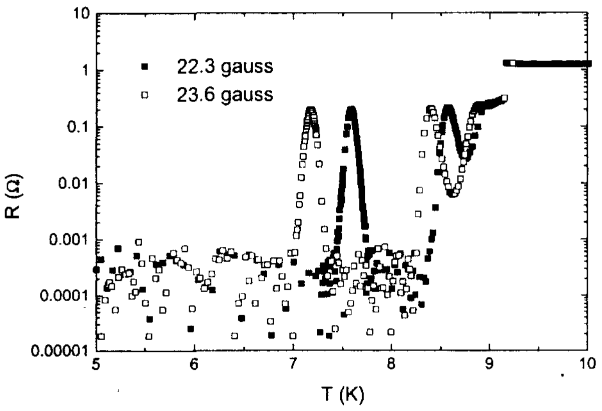

Fig. 4. Resistive transition of the same junction in Fig. 3 for fields of 22.3 and 23.6 gauss applied parallel to the junction plane. The peak appears when the total flux threading the junction is an integral multiple of the flux quantum.

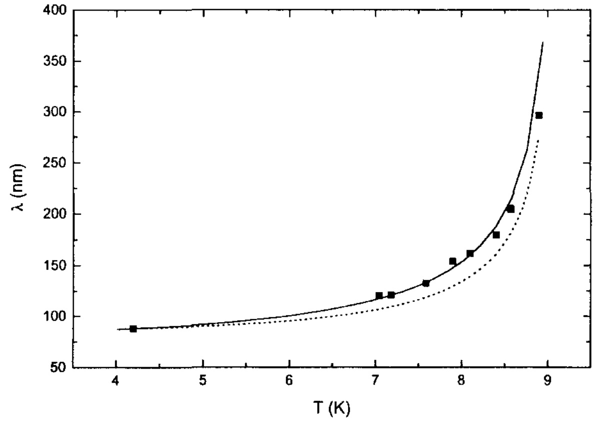

Fig. 5. Penetration depths determined from the resistive peaks in Fig. 4 as a function of temperature. Solid line is a to the dirty-local limit and dotted line is a fit to the two-fluid model.

그림 4는 평행한 자기장 하에서 측정한 $Nb/AlO_x/Nb$ 접합의 저항 변화를 나타낸 것이다. 온도가 상전도 상태에서 감소함에 따라 먼저 Nb 전극이 초전도 상태가 되고 이어 접합을 투과하는 초전도 전류가 흐르게 된다. 그러나 자기장 하에서는 온도의 변화에 따라 접합에 저항이 나타남을 알 수 있다. 이렇게 저항이 다시 나타나는 온도에서 식 (5)가 Φ_0의 정수배가 되는 조건을 적용하면 온도에 따른 침투깊이를 손쉽게 구할 수 있다. 그림 5는 이와 같은 방법으로 구한 침투깊이를 잘 알려진 침투깊이의 온도의존성과 비교해 본 것이다. 여기서 실선은 dirty-local 조건을 만족하는 침투깊이의 온도의존성이고 점선은 two-fluid 모형을 따르는 침투깊이의 온도의존성이다.[5] 이로부터 그림 4와 5에서 사용된 조셉슨 접합의 Nb 전극에는 단결정과 달리 불순물이나 구조적 결함이 포함되어 있어 전기 및 자기적 특성에 영향을 미침을 알 수 있다.

3. 접합면에 수직한 자기장이 가해진 경우

그림 6은 수직한 자기장 하에서 측정한 $Nb/AlO_x/Nb$ 접합의 온도-저항 특성 곡선을 나타낸 것이다. 자기장이 없는 상태에서는 접합이 곧 초전도 상태가 되지만 자기장이 존재하게 되면 전이폭이 넓어져서 자기장이 커질수록 접합이 초전도가 되는 온도가 내려감을 볼 수 있다. 여기서는 접합을 투과하는 자기장은 전극에서 볼텍스 상태로 존재한다. 자기장이 수직인 경우에는 demagnetization factor가 50 이상 이므로 아주 작은 자기장 하에서도 자속이 Nb 전극을 침투하게 된다. 이상적으로는 Nb 전극이 초전도 상태가 되면 곧바로 초전도 전류가 접합을 터널링하여 흘러야 하나, 임계온도 근처에서는 초전도 파동함수가 작으므로 I_c가 작아 I_c에 비례하는 두 전극간의 조셉슨 결합에너지가 열에너지보다 충분히 크지 못함으로 열적요동에 의하여 접합에 저항이 나타나게 된다.[6] 여기서 온도를 더 내리면 조셉슨 결합에너지가 충분히 커짐으로 초전도 전류가 흐르게 된다. 그러면 왜 저항전이가 자기장 하에서 넓어지는가? 우선 전극에 존재하는 볼텍스의 운동에 기인한다고 생각할 수도 있으나 이 경우에는 전류와 볼텍스의 방향이 서로 평행함으로 Lorentz force가 없다. 따라서 볼텍스 운동은 저항에 기여하지 않는다고 볼 수 있다. 다른 관점은 Nb 전극에 침투한 볼텍

스의 의하여 접합이 볼텍스 수 만큼 나누어 진다고 보는 것이다. 한쪽 전극에 있는 볼텍스 들과 다른 쪽 전극에 있는 볼텍스들이 정렬되어 있다면 이 볼텍스 들에 의하여 양 전극간 위상이 결맞는 영역이 나누어 진다는 것이다.[7] 이렇게 되면 실제 접합은 여러 개의 (볼텍스 수 만큼) 독립적인 작은 접합이 병렬로 연결되어 있다고 볼 수 있으며 각각 나누어진 접합의 조셉슨 결합에너지는 원 접합의 결합에너지를 볼텍스 수로 나눈 크기로 줄어들게 된다. 이는 앞서 언급한대로 조셉슨 결합에너지가 I_c에 비례하고 I_c는 접합 면적에 비례하기 때문이다. 개별적으로 거동하는 접합의 면적이 작아질수록 조셉슨 결합에너지가 더 작아짐으로 열에너지와 비교할 때 열적요동 현상이 무시될 수 있는 온도가 원 접합에 비해 더 낮아지게 된다. 즉 자기장이 증가할수록, 열적요동에 의하여 저항이 나타나는 온도영역이 넓어지게 된다.

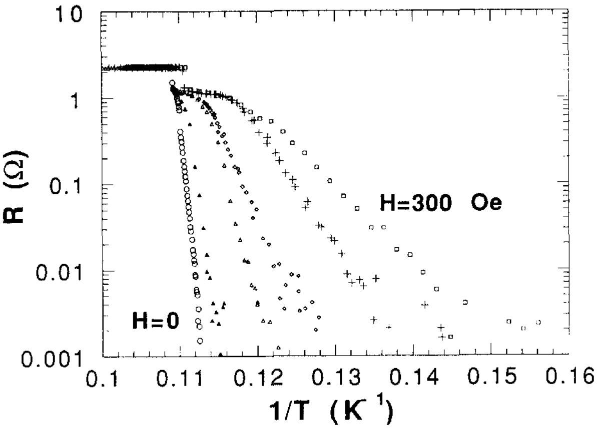

Fig. 6. Field dependence of the resistive broadening in magnetic fields perpendicular junction plane. Magetic fields: 300 Oe (squares), 200 Oe (pluses), 100 Oe (diamond), 50 Oe (open triangles), 20 Oe (solid triangles), zero field (circles). The curves look very similar to the resistive transition of high-temperature superconductors.

그림 6에서 저항의 온도의 역수에 대한 기울기 (열적활성화 에너지 U_0)가 자기장 증가에 따라 감소함을 볼 수 있다. U_0는

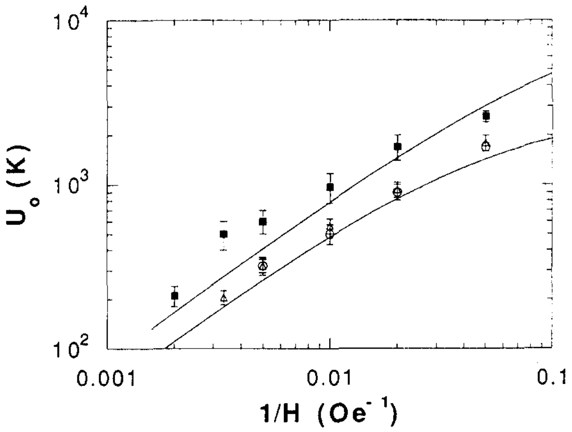

Fig. 7. Thermal activation energy obtained from the slope of the Arrhenius plot in Fig. 6. The lines denotes 1/H dependence including a low-field limit junction area.

접합의 조셉슨 결합에너지에 비례하게 되는데 이 기울기를 자기장의 함수로 나타낸 것이 그림 7이다. 여기서 열적활성화 에너지가 자기장의 역수에 비례함을 볼 수 있는데, 볼텍스의 개수, 즉 각 나누어진 접합의 면적에 비례함으로 실제접합이 볼텍스에 의하여 작은 접합들로 나누어진 것처럼 행동한다는 가정이 잘 맞음을 보여준다. 이러한 가정은 고온초전도체에의 온도-저항 특성 곡선을 설명하는 데에도 이용될 수 있다. 예를 들어 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$에 자기장을 결정의 c 축 방향과 평행하게 가하고 측정한 c 축 방향의 온도-저항 특성에서 자기장의 크기에 따라 저항전이 폭이 점차 넓어짐이 관측되어 왔는데 [8] 이 모습은 Nb/AlO_x/Nb 접합에서 관측된 그림 6과 매우 흡사하다. $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$은 초전도특성의 이방성이 매우 큰 물질로 초전도 현상을 나타내는 CuO_2 층이 절연층을 사이에 두고 층층으로 쌓여있는 층상구조를 하고 있고 각 CuO_2 층은 조셉슨 결합으로 이루어져 있다고 알려져 있다. 따라서 자기장이 결정의 c 축 방향으로 가해지고 전류도 c 축 방향으로 흐르는 경우는 바로 조셉슨 접합면에 수직한 자기장이 가해진 경우와 동일하게 된다. 이렇게 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$에서 구한 c 축 방향의 열적활성화 에너지도 자기장의 역수에 비례함을 보여준다.

4. 요 약

디지털 소자 구현에 가장 기본적인 조셉슨 접합의 특성 중 잘 알려진 특성이 아닌 자기장 하에서 접합의 거동을 살펴보았다. 자기장이 접합면에 평행하게 걸린 경우에는 임계온도 이하에서도 어느 특정 온도에서 저항이 나타나는데 이는 그 때 접합을 투과하는 자속이 단자속의 정수배가 되는 경우에 해당함을 보였다. 이로부터 초전도 전극의 침투깊이의 크기와 온도의존성을 구할 수 있었다. 자기장이 접합면에 수직하게 걸린 경우에는 자기장이 볼텍스의 형태로 전극에 침투하여 전체접합을 볼텍스의 수로 나누는 역할을 함을 보였다. 이로써 자기장이 증가할수록 저항전이 폭이 증가함을 설명할 수 있었고 이는 고온초전도체의 거동을 이해하는 데에도 사용될 수 있음을 보였다.

감사의 글

이 논문은 차세대초전도응용기술사업단의 연구비지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1]. B. D. Josephson, Phys. Lett. **1**, 251 (1962).
[2]. A. Barone and G. Paterno, *Physics and Applications of the Josephson Effect*, John Wiley & Sons, New York (1982).
[3] M. Weihnacht, Phys. Status Solidi **32**, K196 (1969).
[4] D. H. Kim, K. E. Gray, J. D. Hettinger, J. H. Kang, and S. S. Choi, J. Appl. Phys. **75**, 8163 (1994).
[5] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, McGraw-Hill, Singapore (1996).
[6] V. Ambegaokar and B. I. Halperin, Phys. Rev. Lett. **22**, 1364 (1969).
[7] D. H. Kim, K. E. Gray, and J. H. Kang, Phys. Rev. B **45**, 7563 (1992).
[8] G. Briceno, M. F. Crommie, and A. Zettl, Phys. Rev. Lett. **66**, 2164 (1991).

저자이력

김동호
1957년 1월 6일생, 1989년 미네소타 대학 물리학 박사, 1989년~1992년 Argonne National Lab. 연구원, 1992년~1994년 한국과학기술연구원 선임연구원, 1994년~현재 영남대학교 자연과학부 부교수