

산화물 초전도체의 자기적 특성

이상현.

선문대학교 전자정보통신공학부

Magnetic Properties of Oxide Superconducting Material

Sang-Heon Lee

Department of Electronic Information and Communication Engineering , Sun Moon Univ.

Abstract

The sensor at liquid nitrogen temperature showed the increase of electrical resistance by applying magnetic field. Actually, the voltage drop across the sensor was changed from zero to a value more than $100 \mu V$ by the applied magnetic field. The change of electrical resistance depended on magnetic field. The sensitivity of this sensor was $2.9 \Omega/T$. The sensing limit was about $1.5 \times 10^{-5} T$. The increase of electrical resistance by the magnetic field was ascribed to a modification of the Josephson junctions due to the penetrating magnetic flux into the superconducting material. Considering the observed properties of the superconductor with trapped magnetic flux, a magnetic sensor was fabricated to detect simultaneously both the intensity and the direction of the magnetic field.

Key Words : BiPbSrCaCuO superconductor, Magnetic field, Magnetic field sensor

1. 서 론

1986년 고온초전도체의 발견은 산업전반에 무한한 응용성 때문에, 학문적인 측면뿐만 아니라, 초전도 소자들의 실현을 위해 electronics, computer technology 및 반도체와 초전도 현상을 응용한 hybrid 소자 등 다양한 분야에서 전세계적으로 연구되고 있다[1-3]. 이와 같이 고온초전도체의 응용은 현대 산업의 많은 분야에서 시도되고 있으며 그중 가장 실용화에 근접되어 있는 것으로 초전도 센서 분야가 주목을 받고 있다. 이는, 초전도 상태에서 상전도 상태로 혹은 상전도 상태에서 초전도 상태로의 상전이때 발생하는 저항의 변화를 디바이스의 동작으로 응용할 수 있기 때문이다. 고온초전도체의 전자소자로서의 응용은 초전도 산업화를 위해서도 대단히 중요한 의미를 갖는다.

BiPbSrCaCuO계 초전도체에는 외부로부터 자계를 인가하면 전압이 발생하게 되는데 외부 자계를 소거한 후에도 출력전압이 유지되는 물리적 현상이 있다. 이 현상은 다결정 입계로 구성되어 있는 산화물 초전도체가 갖는 특징이며 자계를 인가합

과 동시에 초전도체에 발생하는 출력전압이 변화하는 현상을 주목하면 간단한 초전도 자기 검출소자로서 응용할 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 초전도상태에 있는 시료가 자속에 의한 메모리의 기입이 가능하며 이러한 자기적 현상을 효과적으로 이용하여, 고가의 장비를 필요로 하지 않는 간이형 자기검출소자를 도출하는데 있다.

2. 실험 방법

시료는 99.9% 순도의 Bi_2O_3 , PbO , $SrCO_3$, $CaCO_3$ 와 CuO 분말을 혼합과 하소의 공정을 포함하는 고상 반응법으로 제조하였다. 저울에서 정량한 분말을 알루미늄이나 딱자 사발에서 균일하게 혼합하였다. 재료의 조성은 고온 초전도상을 생성하기 용이한 것으로 알려진 $Bi : Pb : Sr : Ca : Cu = 1.84 : 0.34 : 1.92 : 2.03 : 3.06$ 을 선택하였다. 혼합된 분말은 $840^\circ C$ 에서 24시간 하소하였다. 하소된 분말은 알루미늄이나 딱자사발에서 분쇄한 후 원판형

시료를 만들었다. 이 시료들은 830-850°C 공기중에서 100시간 소결하였다. 완성된 시료는 직경 15 mm, 두께 1 mm의 흑색 원판형을 하고 있다. 소자는 凹형으로 전압단자가 위치하는 부분을 오목하게 가공하여 전압단자 부분의 전류밀도를 높게 하였다. 그리하여 시료에 전류를 흘리거나, 외부로부터 자계를 인가함으로써 초전도 상태에서 상전도 상태로 천이하기 쉽게 하고 그 부분에 있어서 전기저항이 자계에 의하여 크게 변화하는 현상이 기대된다. 전류 및 전압 단자는 접촉저항을 줄이기 위하여 In을 전극 재료로 사용하였고, 리드선은 약 0.08mm ϕ 의 구리선을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제작한 BiPbSrCaCuO계 초전도시료의 전류-전압특성의 결과를 그림1에 나타낸다. 특성(A)는 외부로부터 자계를 인가하지 않는 경우의 특성이며, 저항값은 0.067 Ω 이 된다. 액체질소 온도에서는 전류가 425mA 까지 전압강하가 관측되지 않으나, 임계전류 ($I_c=425mA$) 보다 큰 전류를 인가하면 초전도 시료의 양단에서는 전압이 발생한다. 이것은 초전도체를 흐르는 전류와 더불어 발생한 자계로 인하여 초전도영역의 일부가 상전도영역으로 천이된 결과로 생각된다. 시료의 주위온도를 77K로 하고 그림1의 삽입도 예시와 같이 BiPbSrCaCuO계 초전도시료에 외부로부터 0.1 T의 자계를 인가하면 특성 (A)는 일정해선으로 표시된 특성 (B)로 변화된다. 즉, 자계 인가로 인하여 초전도 시료의 저항이 증가되고 동시에 전압도 증가하게 된다.

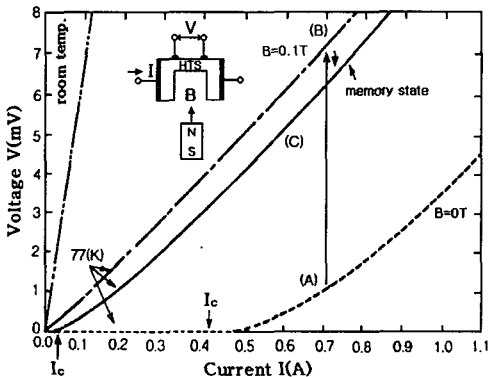


그림 1. BiPbSrCaCuO 초전도체의 전류-전압특성.
Fig. 1. Current-voltage characteristics of

BiPbSrCaCuO superconductor.

다음으로 외부 자계를 소거하면 시료에서 발생하는 전압은 감소하나 원래의 특성 (A)의 상태로는 돌아가지 않고 (C)의 특성에 머무르게되며 임계전류는 감소하게 된다. 이 상태에서 전압을 0으로 하고 다시 전압을 인가하여도 동작점은 (C)의 특성을 나타낸다. 이러한 자기현상은 초전도 시료가 77K를 유지하는 한 지속되나, 시료를 일단 상온으로 되돌려 상전도 상태로 하면 소거된다. 그러나 초전도 시료를 77K로 냉각하여 외부 자계를 인가한 후에는 다시 특성(C)가 얻어져 자기 특성이 재현된다. 이러한 자기 현상은 자석의 N극과 S극에 대하여도 같은 정도로 발생하게 된다.

자계인가에 의해서 초전도체에는 전압이 출력되나, 그 메카니즘에 대하여는 다음과 같이 생각할 수 있다. 고온초전도체는 다결정 입계로 구성되며, 이들 많은 입계는 초전도의 약결합으로 가정할 수 있다. 인가되는 자계가 작을 경우는 초전도 전류는 Josephson 효과에 의해 약결합을 저항이 발생하지 않는 상태로 통과할 수 있다. 그러나, 어느 일정한 값 이상의 자계가 인가되면, 초전도 전류는 이들 약결합을 저항 0의 상태로 통과할 수 없게 되어 저항이 발생하게 된다. 이 원인으로 다음과 같은 요소가 생각된다.

- (i) 자계에 의한 약결합 부분의 초전도 상태 변화
- (ii) 자계에 의한 초전도 상태의 coherence 길이 감소.
- (iii) 자계에 의하여 유기된 차폐 전류에 의한 약결합 파괴.
- (iv) 전류에 의하여 유기된 내부전계가 (i), (ii)에 미치는 영향.

이러한 요소에 대한 상세한 검토는 앞으로 연구를 계속 진행하여 규명해 갈 필요가 있다.

앞에서 설명한 바와 같이 산화물 초전도체에는 결정입계가 다수 존재하며, 결정입계에 의해서 Josephson접합이 형성되어 있다고 생각된다. 이를 회로 모델로 대응하여 보면 접합은 직렬, 병렬로 입체적이며 복잡하게 접속된 회로라고 할 수 있다. 또한 결정 입계의 결합정도에 의해 Josephson접합의 자기적 특성이 다르다고 하면 초전도 시료에 인가되는 자계의 강도가 커짐에 따라 Josephson접합에서 저항이 발생되므로 저항이 발생하는 접합수가 증가하게 된다. 따라서 초전도 시료에서 자계의 증가에 의하여 발생하는 전압은 증가하게 된다.

외부 자계의 인가에 의한 초전도 시료의 전압

V_{MAG} 의 변화와 인가되었던 외부 자계를 소거한 후 발생하는 전압 V_{MEM} 의 관계를 그림2에 나타낸다. $I_c = 425\text{mA}$ 의 조건에서 측정하였다.

이 결과로부터 약 2×10^{-3} T이하의 자계에서는 자기적 특성이 발생하지 않는다. 즉 2×10^{-3} T이하의 자계에서는 초전도 시료에 자계를 인가하였을 경우 단자간에 전압이 발생하나 자계를 배제하면 전압은 0이 된다. 이것은 자계를 배제한 후의 특성이 다시 초전도 상태로 천이 되어 메모리 되지 않는 것을 의미한다. 그러나 2×10^{-3} T이상의 자계를 소거한 후 시료에서 발생하는 전압 V_{MEM} 은 급격히 증가하고 약 10^{-2} T에서 포화된다.

이 결과로부터 외부 자계로 인하여 시료의 초전도 영역의 일부가 상전도 영역으로 천이 되어 시료를 흐르는 전류가 저항을 감지하는 것으로 생각되며 외부 자계가 2×10^{-3} T 이하에서는 자계를 소거하면 자계에 의하여 형성되었던 상전도 영역이 원래의 초전도영역으로 되돌아가 전압 V_{MEM} 은 0이 된다. 한편 2×10^{-3} T 이상에서는 자계에 의하여 형성되었던 상전도 영역의 일부만이 초전도 영역으로 되돌아가고 다른 부분은 자계를 배제하여도 상전도 상태를 계속적으로 유지하므로 전압 V_{MEM} 이 발생하게 된다. 초전도 시료가 외부자계의 영향으로 전압이 발생하는 현상에 대하여는 앞서 설명하였다. 그러나, 본 시료와 같이 초전도 소결체의 경우, 일반적인 Nb_3Sn 와 같은 초전도체와는 다른 특이점을 들 수 있다.

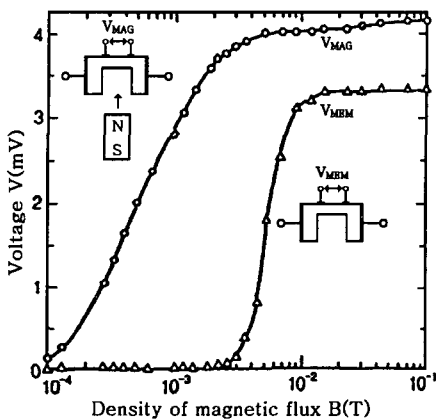


그림 2. 온도 77K에서 인가된 외부자계로 인하여 발생하는 전압 의존성.

Fig. 2. Dependences of the voltage V on externally applied magnetic field.

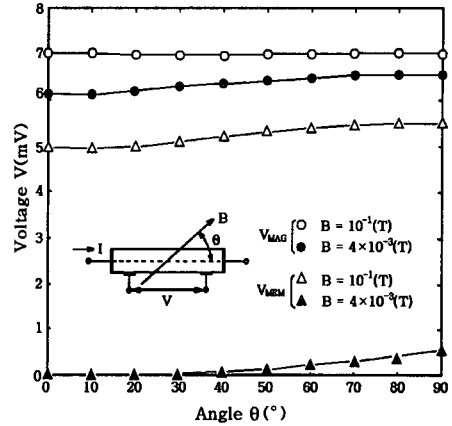


그림 3. 시료에 인가된 외부 자계와 시료를 흐르는 전류와의 각도에 의한 전압 의존성.

Fig. 3. Dependence of the voltage on the angle θ between externally applied magnetic field and current flow.

그림 3은 초전도 시료에 인가되는 자계의 방향과 전압과의 관계를 나타낸 결과이다. 그림에서 초전도체에서 발생하는 전압은 인가되는 자계의 방향성에는 크게 의존하지 않는 것으로 생각할 수 있다. 초전도 시료에 흐르는 전류에 대하여, 외부자계를 수직 또는 수평한 방향으로 인가하여도 전압 (V_{MAG})은 발생하며, 외부자계를 제거한 후, 자속이 메모리 된 상태에서도 전압(V_{MEM})은 발생하였다.

자기적 상태에 있는 초전도 시료에 2×10^{-3} T 이하의 외부 자계를 인가하면서 초전도 시료의 전류-전압특성을 조사한 결과를 그림4에 나타낸다. 이 결과에서는 0.1 T의 강한 N극을 초전도 시료에 접근시켜 시료의 특성변화를 나타낸다. 초전도 시료에 인가한 자극과 같은 방향으로 약 2×10^{-3} T의 약한 N극을 초전도 시료에 인가하면 전압은 감소되고 초전도체에 인가된 자극과 반대 방향의 약한 S극을 인가하면 시료의 전압은 증가하였다. 강한 S극으로 메모리 시킨 경우의 약한 자계의 역할은 정반대가 된다. 이 약한 N극과 S극은 이미 초전도시료에 트랩 되어 있는 자속을 많이 하거나 또는 적게 하는 기능을 하며 서로 반대의 작용을 하고 있다.

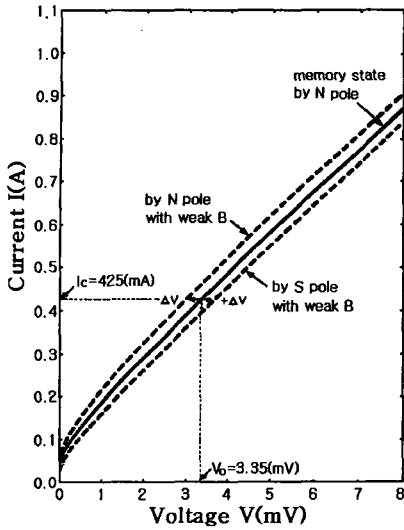


그림 4. 자석 N극 에 의하여 메모리된 시료의 전류-전압특성. 기호 $\pm\Delta$ 와 $-\Delta$ 는 각각 전압의 증가분과 감소분.

Fig. 4. Current-voltage characteristics of the sample memorized by placing N pole near to it. Symbols $\pm\Delta$ and $-\Delta$ mean the increase and the decrease in the voltage, respectively.

4. 결론

0.1 T의 비교적 강한 자계에서 자기 메모리 된 BiPbSrCaCuO계 초전도체의 전기적 특성을 조사하였다. 전압의 자기특성을 검토한 결과 자기검출 기능을 갖는 간단한 소자로 사용할 수 있으며, 10^{-5} T이하의 자계 범위에서는 용이하게 자기를 측정할 수 있는 결과를 얻었다. 자기 메모리의 원인으로 사료되는 자속 트랩을 고정하여 두고 외부 자계의 극성에 변화를 주면 임계전류치 이상의 전류가 흐르고 있는 고전류 영역에서는 자계의 극성에 따라 초전도체의 전기저항이 증가하고 감소하는 현상을 고찰하였다.

참고 문헌

[1] J. G. Bednorz and K. A. Muller, "Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system", Z. Phys. B64, p. 189, 1986.

[2] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Hukutomi, "Bi-based High Tc Superconductors" Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 27, No. 2, p.209, 1988.
 [3] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Trong, P. H. Hor, R. L. Gao, I. J. Huang, Y. Q. Wang, and C.W. Chu, "Superconductivity at 91K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O system", Phys. Rev. Lett., Vol. 58, No. 9, p. 908, 1989.