

산화물 초전도체를 이용한 자기센서의 제작 및 특성

Fabrication and Characteristics of Magnetic Sensor using Ceramic Superconductor

李 尙 憲*
(Sang-Heon Lee*)

요 약

YBaCuO계 초전도체로 자기 센서를 제작하였다. 초전도 자기 센서는 약 95K에서 초전도 특성이 나타나며 액체질소온도에서 외부 자계를 인가할 때 전기저항이 증가하였다. 자계 인가로 인해 센서에서 발생하는 전압강하는 0에서부터 100 μ V 이상으로 변화하였다. 전기저항의 변화는 자계에 의존하며, 센서의 감도는 2.9 ohm/T가 된다. 이 센서는 약 1.5×10^{-5} T ($= 1.5 \times 10^{-1}$ G)까지의 자기를 감지 할 수 있다. 외부자계에 의한 전기저항의 증가는 초전도재료를 관통하는 자속으로 인한 Josephson 접합의 변화에 기인한다.

Abstract

A magnetic field sensor is fabricated with superconducting ceramics of Y-Ba-Cu-O system. The prepared material shows the superconductivity at about 95K. The sensor at liquid nitrogen temperature shows the increase in electrical resistance by applying magnetic field. Actually, the voltage drop across the sensor is changed from zero to a value more than 100 μ V by the applied magnetic field. The change in electrical resistance depends on magnetic field. The sensitivity of this sensor is 2.9 ohm/T. The sensing limit is about 1.5×10^{-5} T ($= 1.5 \times 10^{-1}$ G). The increase in electrical resistance by the magnetic field is ascribed to a modification of the Josephson junctions due to the penetrating magnetic flux into the superconducting material.

Keyword : magnetic field sensor, YBaCuO ceramics, superconducting material.

I. 서 론

종래의 금속계 초전도체를 이용한 자기 검출소자

로는 초전도 양자간섭 소자(Superconductive Quantum Interference Device, SQUID)가 있다. [1],[2],[3] 이것은 Josephson 접합을 응용한 장치로서, 검출 분해능이 10^{-14} T 이하가 되며, 이는 현재 최고의 검출 분해능이다. 그러나 Josephson 접합을 형성하기 위해서는 약 10nm 두께의 절연 층이 필요하다. 더욱이 금속계 초전도체를 이용한 SQUID는 일반적으로 극저온(4K)에

* 鮮文大學校 電子情報通信工學部
(Dept. of Electronics Information Communication
Eng., Sun Moon Univ.)

接受日: 1999年7月26日, 修正完了日: 1999年11月18日

서 사용되며, 접합부분의 온도변화는 실온에서부터 4K까지 현저하게 변화하므로, 절연 막이 열 또는 기계적 스트레스를 받아 박리현상 이나 균열등으로 인하여 파괴되기 쉽고 극저온하에서 고가의 장치를 필요로 하는 단점이 있다. 그러나 J. G. Bednorz와 K. A. Müller에 의해 산화물에서 고온 초전도성의 가능성이 발견되고^[4], 액체질소 온도 이상의 임계온도를 갖는 이트륨계 산화물(YBaCuO)이 발견된 이래로^[5], 비스무스계, 타륨계, 수은계 산화물 초전도체 등 임계온도가 높은 물질들이 계속 발견되었지만, 아직도 이트륨계 산화물 초전도체는 계속 적지 않은 관심하에 연구가 되고 있다. 이트륨계 산화물 초전도체는 초전도 상태가 비교적 안정되며, 금속계 초전도와 비교하여 간단한 장치를 이용하여 초전도 현상의 관측이 가능한 기술적 이점이 있다. 이러한 이트륨계 산화물 초전도체는 란탄(La), 스트론튬(Sr), 이트륨(Y), 비스무스(Bi), 바륨(Ba), 및 구리(Cu)의 산화물을 균일하게 혼합하여 성형 가공한 것을 950°C 전후에서 소성하는 방법으로 제작된다. 이와 같은 방법으로 제작된 산화물의 표면에는 요철이 생기기 쉽고, 표면에 수 10 nm 두께의 절연 막을 균일하게 제작하는 것이 매우 어려운 작업이다. 따라서 안정된 Josephson접합의 형성이 어려우며 이 때문에 임계 온도가 액체질소 온도(77K)보다 높은 이점은 있으나 SQUID가 실현되지 않는 이유가 된다.

본 연구의 목적은 산화물계 제2종 초전도체의 특징을 효과적으로 이용하여 Josephson접합을 필요로 하지 않는 자기검출 소자를 개발하는데 있다.

II. 실험방법

본 연구에서 사용된 초전도체의 원료는 산화 이트륨(Y_2O_3), 탄산바륨($BaCO_3$), 산화제2동(CuO)이다. 초전도체의 제작과정은 다음과 같다.

- (1) Y_2O_3 0.6g, $BaCO_3$ 1.5g 및 CuO 1.0g의 비율로 정량한다.
- (2) 상기의 재료를 막자사발에서 1시간 혼합 한다.
- (3) 혼합한 재료를 약 960°C에서 20시간 소성 한

다.

- (4) 소성한 재료중에서 녹색부분을 제거하여, 흑색부분만을 분말로 한다.
- (5) (4)에서 형성된 분말을 펠렛상으로 성형 한다.
- (6) 펠렛을 약 960°C의 전기로에서 10시간 소결한다.
- (7) 400°C까지 서서히 냉각한다.
- (8) 400°C에서 24시간 열처리한다.
- (9) 실온까지 냉각한다.

이상의 공정으로 초전도체가 완성된다. 또한 (1)에서 (9)까지의 공정은 대기 중에서 수행하였다. 완성된 시료는 반경 0.5cm, 두께 0.1cm의 흑색 원반형의 형태를 하고 있으나 가공하여 그림 1과 같은 U형의 시료를 제작하였다.

그림 1은 자기검출에 이용한 소자의 구조를 나타낸다. 외측단자 A_1 과 A_2 에 전류 I 를 흘리고 내측단자 B_1 과 B_2 사이의 전압강하 V 를 측정한다. 각각의 단자를 전류단자 ($A_1 - A_2$)와 전압단자 ($B_1 - B_2$)라고 한다. 소자는 U형으로 가공하여 전압단자 부분의 전류밀도를 높게 하였다. 그리하여 자계의 인가에 의해서 용이하게 초전도상태에서 상전도 상태로 천이하기 쉽게 하고 그 부분에 있어서 전기저항이 자계에 의해 크게 변화하는 현상이 기대된다. 전극재료로서는 접촉저항을 줄이기 위하여 인듐(In)을 초음파법으로

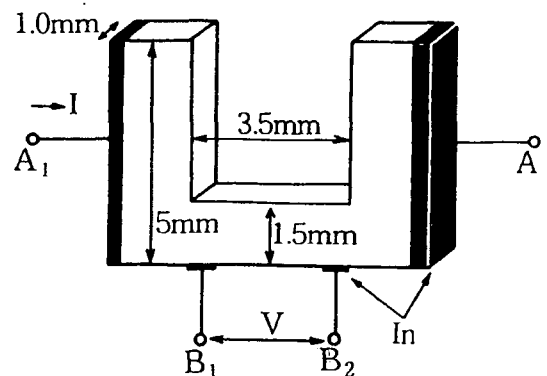


그림 1. 초전도소자의 개략도

Fig. 1. The geometrical structure of the magnetic field sensor. Indium is used as the electrode material.

형성하였으며, 리드선은 약 0.08mmφ의 동선을 이용하였다. 본 연구에서 제작한 초전도체는 상온에서 Ohm 특성을 나타냈다. 초전도체의 임계온도(Tc)를 측정하기 위하여 시편의 온도에 따른 저항변화를 그림 2의 4단자법(four point probe method)으로 측정하였다.

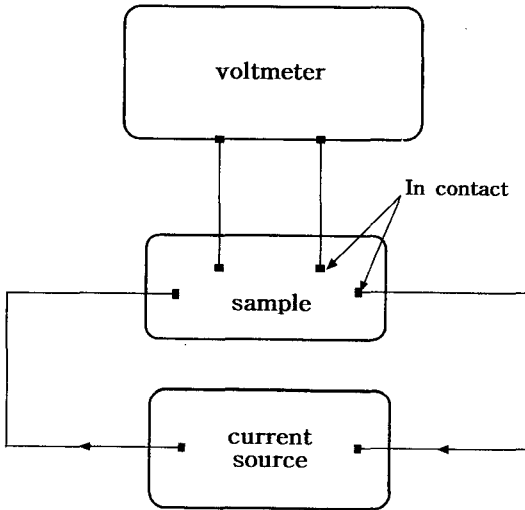


그림 2. 4단자법에 의한 측정회로
Fig. 2. Schematic diagram of four point probe method.

온도측정은 Silicon diode sensor가 달린 온도계를 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 1에서 설명한 바와 같이 A₁-A₂단자 사이에 전류I를 흘리면서 B₁-B₂단자간에서 발생하는 전압 V를 측정한다. 전류에 대한 전압의 비, 즉 V/I는 단자 B₁과 단자 B₂ 사이의 전류경로에서 발생하는 전기저항 R이 된다. 그림 3은 온도를 저하시키면서 시료의 전기저항 R의 변화를 측정한 결과이다. 소자의 주위온도가 95K정도가 되면 전기저항이 급격히 감소하여 0이 되는 현상을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제작된 산화물 재료는 초전도 상태를 만족하는 재료로 판단되었다.

그림 1의 소자에 외부 자계를 인가하면서 소자의 전류-전압특성을 측정하였다.

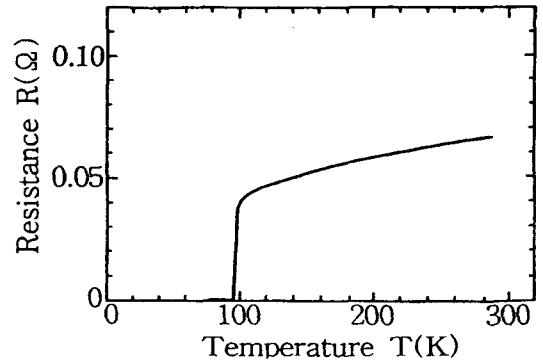


그림 3. YBaCuO 초전도체의 저항의 온도의존성
Fig. 3. The temperature dependence of electrical resistance of the magnetic field sensor.

그림 4는 A₁-A₂단자간에 흐르는 전류 I와 B₁-B₂ 단자간에 발생하는 전압강하V의 관계를 측정한 결과로서 300K에서의 전류-전압특성은 ohm성을 보이며 전기저항은 약 0.067 Ω이 되었다. 소자의 온도가 액체질소 온도 77K가 되면 300K에서의 특성으로부터 현저하게 변화한다. 77K에서 측정된 곡선에 있어서, 전류치가 0.425A까지는 B₁-B₂단자간에 전압이 발생하지 않는다. 즉 0.425A보다 전류치가 높아지면 전압강하는 적은 수치이나 관측되기 시작한다.

이러한 전압강하의 발생은, 소자에 흐르는 전류와 이로 인해 발생하는 자계의 상호작용으로 인하여 초전도 상태의 파괴, 즉 일부의 영역이 초전도 상태에서 상전도 상태로 천이되는 현상에 기인한 것으로 생각된다. 전압강하가 발생되지 않는 경우의 최대전류를 임계 전류(본 논문에서는 I_C로 표기한다)라고 한다. 그림 5는 YBaCuO계 초전도소자에 외부자계를 인가하면서 전류-전압특성을 측정하는 회로를 나타낸다. 소자에 흐르는 전류치로서 I_C를 유지하면서 전류경로에 대하여 수직으로 외부 자계를 인가하면 B₁-B₂ 단자간에서 전압강하(본 논문에서는 V_M라고 표기한다)

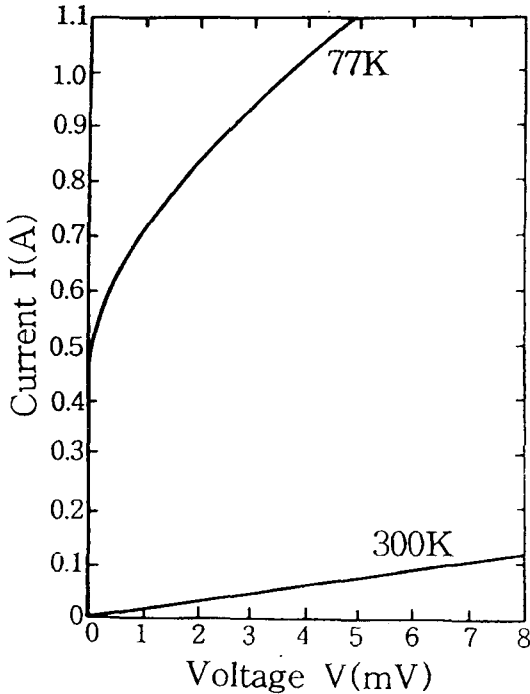


그림 4. YBaCuO 초전도체의 전류-전압 특성
 Fig. 4. Current-Voltage characteristics of the magnetic field sensor at 300K and 77K.

다)가 발생하게 된다. 그림 6은 외부 자계 인가에 따른 자속밀도 B에 대한 V_M 의 변화를 나타낸 결과이다. 그림 6중의 삽입도는 I_C 와 V_M 의 의미를 정의하고 있다.

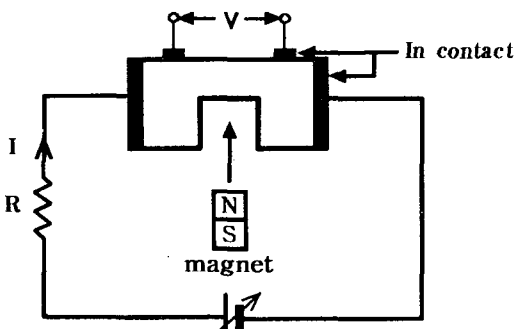


그림 5. 전류-전압특성의 측정회로도
 Fig. 5. Circuit used for measurement of Current-Voltage characteristics of Superconducting materials.

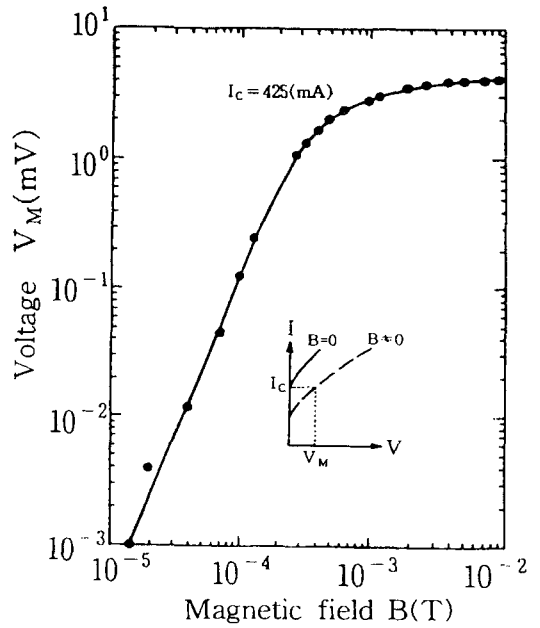


그림 6. 초전도체에서 발생하는 전압의 외부자계 의존성
 Fig. 6. The dependence of V_M on the density of magnetic flux B. Symbols I_C and V_M are explained in the figure as inserted.

자속 밀도가 2×10^{-3} T까지는 전압강하의 증가분 V_M 은 자계를 제거함과 동시에 자계를 인가하기 이전의 상태로 되돌아온다. 그러나 2×10^{-3} T 이상의 자속밀도 영역에서는 외부 자계를 제거하여도 전압강하는 0이 되지 않는다. 그림 6의 곡선으로부터, 자속밀도가 3×10^{-4} T 이하에 있어서 V_M 의 증가는 자속밀도 B에 대하여 3×10^{-4} T보다 크게 되면 V_M 은 포화되는 경향을 알 수 있다. V_M 의 포화치는 4 mV가 된다. 선형영역에서 10^{-4} T(=1G)의 자속밀도의 자계를 인가하면, V_M 은 약 125 μ V가 된다. 한편 1 μ V의 출력으로는 약 1.5×10^{-5} T의 자기가 검출된다. 이 값은 지구자기와 비교해서 거의 같은 정도의 세기를 나타낸다.

I_C 를 0.425 A로 일정하게 했을 때 V_M 이 125 μ V

이므로, 전기저항은 자계인가에 의하여 0으로부터 $2.9 \times 10^{-4} \Omega$ 로 증가된 결과가 되며, 자속밀도의 변화에 의한 전기저항의 변화는 $2.9 \Omega/T$ 이다. 현재까지 Sharp(日)사가 발표한 자기센서에 있어서 외부 자계인가에 의한 전기 저항의 변화는 $8 \times 10^{-2} \Omega/T$ 에 불과하다.^[6] 그러므로 본 연구에 얻는 결과는 같은 종류의 YBaCuO계 물질의 소결체로 제작된 자기센서중 가장 좋은 특성을 보인다.

본 연구에서 제작한 YBaCuO계 초전도 시료에 자계를 인가하여 측정된 전류-전압 특성의 결과를 그림 7에 나타낸다. 특성(A)는 외부자계를 인가하지 않은 경우의 특성이며 저항값은 0.067Ω 이 된다. 액체질소 온도에서는 전류가 425 mA까지 전압강하가 관측되지 않으나 임계전류치 ($I_c = 425 \text{ mA}$) 보다 큰 전류를 인가하면 초전도 시료의 양단에서는 전압이 발생한다. 시료의 주위온도를 77 K로 하고 그림 7의 삽입도에서와 같이 YBaCuO계 초전도 시료에 외부로부터 0.1 T의 자계를 인가하면 특성 (A)는 일점쇄선으로 표시된

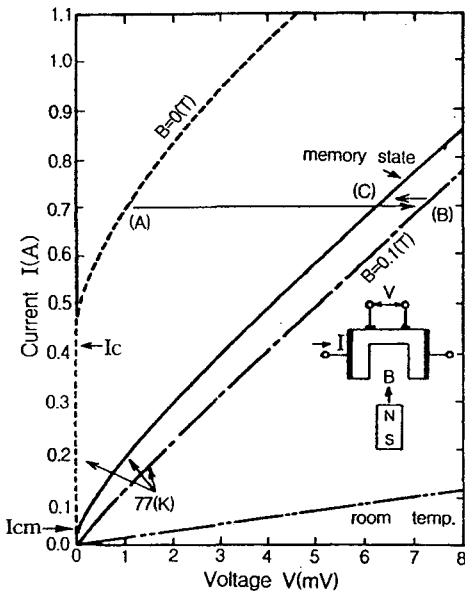


그림 7. YBaCuO계 초전도체의 전류-전압 특성
 Fig. 7. Current-Voltage characteristics of the YBaCuO ceramics.

특성 (B)로 변화된다. 즉, 자계인가로 인하여 초전도 시료의 전압이 증가되고 동시에 저항도 증가하게 된다. 다음으로 외부자계를 소거하면 시료에서 발생하는 전압은 감소하나 원래의 특성 A의 상태로는 돌아가지 않고 (C)의 특성에 머무르게 되며 임계전류는 23 mA로 감소하게 된다. 본 논문에서는 이러한 현상을 자기적 효과라고 한다.

자기적 현상은 초전도 시료가 77 K를 유지하는 한 지속되나 시료를 일단 상온으로 되돌려 상전도 상태로 하면 소거된다. 그러나 초전도 시료를 77 K로 냉각하여 외부자계를 인가한 후에는 다시 특성 C가 얻어져 자기적 특성이 재현된다. 외부자계의 인가에 의한 초전도 시료의 전압 V_{MAG} 의 변화와 인가되었던 외부자계를 소거한 후 발생하는 전압 V_{MEM} 의 관계를 그림 8에 나타낸다. $I_c=425\text{mA}$ 의 조건에서 측정하였다.

이 결과로부터 약 $2 \times 10^{-3} \text{ T}$ 이하의 자계에서는 자기적 특성이 발생하지 않는다. 즉, $2 \times 10^{-3} \text{ T}$ 이하에서는 초전도 시료에 자계를 인가하였을 경우 단자간에 전압이 발생하나 자계를 배제하면 전압은 0이 된

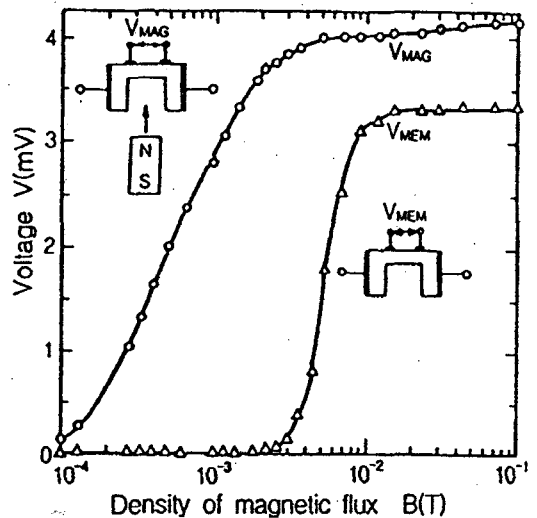


그림 8. 초전도체에서 발생하는 전압의 외부자계의 의존성

Fig. 8. Dependences of the voltage V on externally applied magnetic flux B at 77K. Symbols V_{MAG} and V_{MEM} are defined in the inserted figures.

다. 이것은 자계를 배제한 후의 특성이 다시 초전도 상태로 천이되어 메모리 되지 않는 것을 의미한다. 즉 2×10^3 T 이상의 영역에서 자기적 효과가 발생함을 알 수 있다. 이 실험 결과로부터 다음과 같은 추론을 생각할 수 있다.

외부자계로 인해 시료의 초전도 영역의 일부가 상전도 영역으로 천이되어 시료를 흐르는 전류가 저항을 감지하는 것으로 생각되며 외부자계가 2×10^3 T 이하에서는 자계를 배제하면 자계에 의하여 형성되었던 상전도 영역이 원래의 초전도 영역으로 되돌아가 전압 V_{MEM} 은 0이 된다. 한편 2×10^3 T 이상에서는 자계로 인하여 형성되었던 상전도 영역의 일부만이 초전도 영역으로 되돌아가고 다른 부분은 자계를 배제하여도 상전도 상태를 계속적으로 유지하므로 전압 V_{MEM} 이 발생하게 된다. 따라서 같은 자속밀도에서 발생하게 되는 V_{MEG} 와 V_{MEM} 는 저항의 감소로 인한 전압의 감소분에 해당하는 것으로 사료된다.

자계인가에 의해서 초전도체에는 전압이 출력되나, 그 메카니즘에 대하여는 다음과 같이 생각할 수 있다.

제2종 초전도체에서 나타나는 외부 자계에 의한 초전도체 내부의 자속 전계로 하고 있다. 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 자계의 강도가 커짐에 따라 Josephson접합에서 전압이 발생되므로 전압이 발생하는 접합수가 증가하게 된다. 따라서 단자간에서 전압이 발생하므로 초전도 시료에는 저항이 나타나며 자계의 증가에 의하여 저항이 증가하게 된다. 자기감도를 더욱 향상시키는 것은 앞으로의 연구 과제이나, 초전도 자기 센서에 임계전류를 인가하는 조건에 있어서 자계에 의하여 발생하는 전압 V_M 은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.^[6]

$$V_M = \rho \cdot \frac{L}{S} \cdot I_C = \rho \cdot L \cdot J_C \quad (1)$$

ρ 는 자계를 인가하였을 때 나타나는 시료의 비저항에 대응하는 물리량이며 L 은 시료의 길이, S 는 시료의 단면적, I_C 는 임계전류, J_C 는 임계전류 밀도가 된다. (1)식에서 자기감도를 향상시키기 위해서는 우선 L 을 길게 할 필요가 있다. 이점은 소자를 박막으로 제작하여 집적회로 기술에 적용하면 실효 적도의 길이를 길게 할 수 있으므로 시료의 길이는 극복할 수 있다. 다음으로 ρ 와 J_C 를 크게 할 필요가 있는데, ρ 와 J_C 는 산화물 초전도체의 결정입자 크기, 결정입계의 결합강도, 결정입자의 초전도특성에 크게 의존하는 것으로 생각된다. 이점은 산화물 초전도체의 제작조건과도 밀접하게 관계되는 사항으로서 재료분말의 입자 크기, 분말의 혼합정도등 여러 제작 조건을 상세히 검토하여 초전도체를 제작함으로써 초전도체의 최적조건을 찾아낼 필요성이 있다.

IV. 결 론

본 연구에서 제작한 YBaCuO계 산화물 초전도체는 약 95K이하에서 전기저항이 0이 되는 완전 전도성을 보인다. 4단자 구조를 갖는 소자에 임계전류를 흘리면서 자계를 인가하면, 전압단자간에서 전압이 출력된다. 이러한 전압의 자기특성을 검토한 결과 비교적 고도의 자기센서로서 사용할 수 있으며 10^{-5} T 이하의 자계범위에서는 용이하게 자기를 측정할 수 있는 결과를 얻었다.

이점은 같은 물질로 제작된 자기센서보다 약 30배의 감도가 좋은 결과를 나타내었다. 자계인가에 의해 전압이 발생하는 메카니즘으로서 YBaCuO계 산화물 초전도체의 결정입계를 Josephson접합과 대응시켜 결정입계가 접합의 직렬, 병렬접속회로 모델로 검토될 수 있는 가능성을 설명하였다. 또한 자기감도를 더욱 향상시킬 수 있는 방법에 대하여 기술하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. Lambe, A. H. Silver, J. E. Mercereau, and R. C. Jakleric : Phys. Lett, 11, 16. 1968.

[2] P. W. Anderson and A. H. Dayen : Phys. Rev. Lett. 13, 195. 1964.

[3] B. D. Josephson : Adv. Phys. 14, 251. 1962

[4] J. G. Bednorz and K. A. Muller : Z. Phys. B64, 189. 1986.

[5] C. W. Chu, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huan, and Y. Q. Wang : Phys. Rev. Lett, 58, 405. 1987.

[6] S. Tsuchimoto, S. Kataoka, and H. Shintake : IEDM Tech. Digest, 867. 1992.

저 자 소 개



李尙憲 (會員申請中)

1989년 일본 TOKAI Univ. 전자공학과 학사, 1991년 일본 TOKAI Univ. 전자공학과 석사, 1994년 일본 TOKAI Univ. 전자공학과 박사, 1994년 4월~1997년 2월 일본 通産省 초전도공학연구소 주임연구원, 1997년 3월~현재 선문대학교 전자정보통신공학부 조교수.

주관심 분야 : 전자 소자, 초전도 소자, 전자기 응용.