

YBCO 박막을 이용한 고감도 SQUID 센서

소대화* · 최성재** · K.N.Yugay* · A.B.Muravjev* · K.K.Yugay* · G.M.Serojan* · A.S.Sjichev*
*명지대학교 · **경원전문대학 · Dept. of Physics · Omsk State University, Omsk 644077,
Russia

High sensitive SQUID sensor on YBCO thin film

Soh Dea-wha* · Choi Sung-jae** · K.N.Yugay#, A.B.Muravjev#, K.K.Yugay#,
G.M.Serojan#, A.S.Sjichev#
*Myongji University · **Kyongwon College
#Dept. of Physics, Omsk State University, Omsk 644077, Russia
E-mail : dwhsoh@mju.ac.kr

요 약

본 연구의 목적은 최대 감도를 갖는 막을 이용하는 SQUID를 생산하기 위해서 고온 초전도 YBCO막의 새로운 응력상태를 기술하고 고찰하는 데 있다. Laser ablation method에 의해서 성장되는 응력을 받은 막의 실험적인 고찰, 응력을 받은 막의 특성에 대한 고찰, 응력을 받은 YBCO막을 기초로 하는 최대 감도를 갖는 dc-SQUID를 제작하는 문제가 수행된다. 응력을 받은 막의 임계전류 밀도는 $J_c=3 \cdot 10^5$ A/cm²로 다른 것보다 안정적이다.

ABSTRACT

The goal of the research is to study and describe a new stressed state of High Temperature Superconducting (High-T_c) YBCO Films, to create of SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Device) on the bases of these Films with maximal sensitivity. With the experimental investigation of the stressed films grown by laser ablation method and its properties, the fabrication of the dc-SQUIDs with maximal sensitivity on the bases of the stressed YBCO films were carried out. The stressed film having the value of the critical current density $J_c=3 \cdot 10^5$ A/cm² was the more stable than others.

Key Words

고온 초전도체, YBCO 박막, laser ablation, stress domain, SQUID

I. 서 론

최근에 발표되는 초전도체의 특성연구에 대한 보고서들을 살펴보면 본 연구에서 실행한 실험 결과가 기술적인 응용분야에 사용될 수 있을 것이라는 확신을 갖게 한다. 본 연구에서는 레이저 어블레이션(laser ablation method) 기법에 의해서 제작되는 응력을 받은 YBCO막의 성장에서 보다 새롭고 상세한 데이터를 구하고자 하는데 있다. 내부범위 경계에서의 Coulomb blockade에서 임계전류의 억제 메커니즘이 결정된다. 응력을 받은 막이 갖는 특성과 임계전류에 의존하는 온도의 특성, 막의 두께에 의존하는 자기 투자율의 특성,

변형에 대한 새로운 실험적 데이터들이 구해진다. 응력 영역에서의 새로운 실험적 데이터는 터널링 spectroscopy법에 의해서 구해진다.

II. 연구배경과 필요성

1986년말 고온 T_c 세라믹이 발견된 이후 많은 연구원들이 초전도 양자 간섭 소자인 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) 를 제작하는데 관심을 가지게 되었다. 벌크 형태

의 세라믹 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ RF-SQUID는 1987에 생산되었다. 이런 SQUID들은 최상의 조건에서 $50 \times 50 \mu m^2$ 의 단면적을 갖는 약 연접(weak link) diem 브리지의 기초 위에서 제작되는데 이들을 준비하는 데는 아주 큰 어려움을 갖는다. 이런 diem 브리지들은 5~7 열-사이클(thermo-cycle)에서 붕괴되어진다. 따라서 이런 방향으로 진행되는 작업들은 고온 초전도박막을 기본으로 하는 SQUID 제작에 초점이 맞추어져 있다. 그렇지만 SQUID의 제작 문제는 대단히 복잡하다는 것이 이미 증명된바 있다. 중요한 점은 SQUID를 제작하는데 가장 널리 사용되는 정밀한 고온 초전도 YBCO 막은 레이저 어블레이션 기법에 의해서 성장된다는 점이고 이들은 초전도의 넓은 측정범위와 기타의 물리적인 파라미터를 갖게 된다는 점이다. 에피택셜 단결정 막은 대략 $10^6 A/cm^2$ 의 임계전류밀도를 갖는다. $3 \mu m$ 의 브리지와 $100 nm$ 의 두께를 갖는 막에서 접합의 임계전류밀도는 $3 mA$ 이다. 이런 경우의 직류 SQUID의 파라미터는 $\beta = 2L_c L / \Phi_0$ (Φ_0 는 자속의 양자화, L 은 양자화 루프의 인덕턴스)이고, $L = 10^{-10} H$ 인 경우 300 이다. β 의 파라미터 값은 고감도를 갖는 SQUID들 중 하나이다. L 값은 SQUID의 입체구조를 결정하게 되는데 양자화 루프 직경은 보통 $20 \sim 30 \mu m$ 다. 이런 직경을 갖는 경우 대략 $10^{-10} H$ 의 L 값을 제공하게 된다. 따라서 접합의 임계전류는 β 의 감소에 비례해서 당연히 감소하게 된다. 그러나 막의 구조는 granular 되고 임계전류밀도가 $10^4 A/cm^2$ 로 감소하는 열-사이클 동안 불안정해진다. SQUID 막의 제작은 크게 두 가지 방향으로 진행되는데 그중 하나는 step edge 접합을 사용하는 것이고 나머지 하나는 bicrystal 접합을 사용하는 것이다[1]. 이런 SQUID들은 제작과정이 대단히 복잡하기 때문에 많은 시간과 복잡한 장비를 필요로 한다. 반면 고온 초전도막은 bicrystal 경계영역과 step edge 접합에서 성장은 낮은 안정도와 퇴보를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 높은 감도를 갖는 SQUID 막의 제작문제를 해결하기 위해서 응력을 받은 YBCO막을 사용하는 새로운 방법을 제안하게 되었다. 응력을 받은 상태의 고온 초전도 막은 이미 1998년 레이저 어블레이션 기법에 의해서 성장시킨바 있다[4].

이런 상태의 막은 최소 특성을 갖는 임계전류에 의존하는 $55 \sim 57 K$ 구간의 온도에서 특이하다. 이런 응력 상태에서의 막의 임계전류밀도는 $77 K$ 에서 10^5 에서부터 10^6 까지의 넓은 범위에서 가변된다. 자화율과 임계온도가 증가할수록 단결정 막에서의와 동일한 값을 갖게 된다[1].

반면 응력을 받은 막은 높은 안정도와 퇴보를 갖는다. SQUID에서의 파라미터 $\beta = 2L_c L / \Phi_0$ 는 이들 중의 하나와 등가인 응력을 받은 막을 기준으로 제작되고, 그들의 감도는 $2 \times 10^5 \sim 6 \times 10^6 \Phi_0/Hz^{1/2}$ 의 자속에 의해서 제작된다[2].

$1mm^2$ 의 면적에서 자속 집중기를 사용하는 자기장에 의한 감도는 약 $5 \times 10^{14} T/Hz^{1/2}$ 이다[3].

이런 값들은 step edge 접합과 bicrystal 접합을 사용하는 dc-SQUID의 감도와 일치된다.

III. 응력을 받은 YBCO막 제작실험

레이저 어블레이션 기법에 의해서 양질의 YBCO 박막이 성장된다는 사실은 이미 알려져 있다. 첫 번째 공정은 레이저 펄스의 흡수에서 기판 표면을 성장시키는 것이다.

본 연구에서 행한 실험에서 경계에서의 레이저 방사의 전력 밀도는 $W_{pc} = 2.5 \times 10^8 W/cm^2$ 이다. YBCO기판의 입자 파괴 클러스터 메커니즘은 $W_p > W_{pc}$ 에서 실현된다. $W_p < W_{pc}$ 에서 드롭 메커니즘으로 변경되고 우리들은 드롭 메커니즘 이론과 클러스터 이론을 발견했다. 응력을 받은 YBCO막은 레이저 어블레이션 기법에 의해서 성장된다. 기판은 $LaAlO_3 (100)$ 의 단결정 극판이 사용된다.

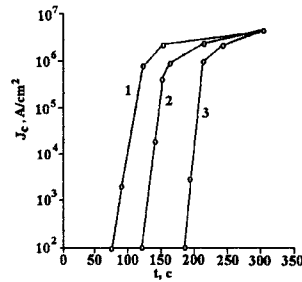


그림 1. 냉각비의 차 [(1) 2.5 deg./s, (2) 2.2 deg./s, (3) 1.6 deg./s] 에서의 로의 유지시간 대 임계전류 밀도 J_c 의 특성곡선

실험에는 파장이 $\lambda = 1.06 \mu m$, 펄스길이가 $\tau = 20 ns$, 반복레이스가 $\nu = 12 Hz$ 펄스를 발생시키는 인 ND YAG 레이저를 사용한다. 기판의 온도는 $810 \sim 840^\circ C$ 에서 조정된다. 진공 챔버에서의 산소 분압은 도포주기 동안 대략 $0.1 \sim 0.6 mbar$ 이다. 타겟 표면의 레이저 방사의 전력밀도는 $3 \times 10^8 W/cm^2$ 에서 $8 \times 10^8 W/cm^2$ 로 가변 된다. 측정될 막은 자외선 레이저빔의 집속에 의해서 대략 $10 \sim 40 \mu m$ 의 폭을 갖는 긴 스트립의 형태로 만들어진다. 임계전류는 4탐침법에 의해서 측정된다. 임계전류를 위해서 $1 \mu V$ 가 표준전압으로 사용된다. 응력을 받은 상태의 고온 YBCO 막의 성장은 급격한 냉각비에 의해서 발생된다[5].

막에서의 기계적인 응력이 발생하는 중요한 원인은 YBCO구조와 기판 물질의 파라미터 차에 기인된다. YBCO와 $LaAlO_3$ 결정의 격자 파라미터 차는 대략 1 %이다. 대략 $1.5 \sim 2.5 deg./s$ 의 급냉비에서 막의 기계적인 응력은 완화가 불가능하기 때문에 그들은 초전도 물질에서 결빙된다. 그림 1에 표시된 것처럼 냉각비의 차와 로에서의 유지

시간에 따라서 임계전류 밀도가 결정된다.

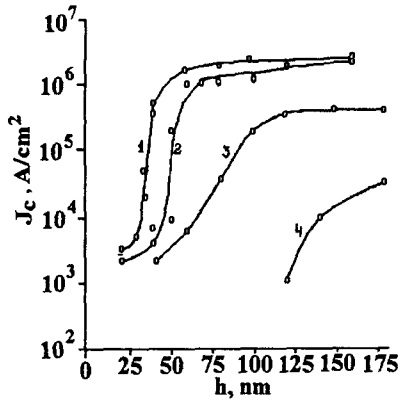


그림 2. 임계전류밀도와 경화시간차의 두께의존성
1) 300 s, 2) 180 s, 3) 90 s, 4) 80 s

막의 응력강도는 그림 2에 표시된 것처럼 막의 두께에 의존하게 된다. 응력을 받은 고온 초전도체 막은 응력 도메인의 막 구조를 표시하는 터널링 현미경에 의해서 관찰할 수 있으며, 막과 스캐닝 현미경 니들(needle) 사이의 터널 전류-전압 특성을 측정하였다[6].

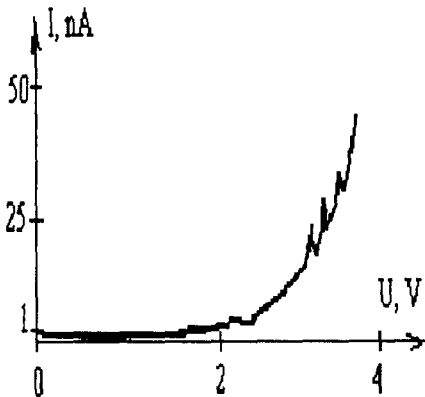


그림 3. 대표적인 전류-전압 특성 곡선

도메인 사이의 경계는 전위장벽을 변형시키고 전자들은 국부적으로 제한될 수 있다. 따라서 터널 전류-전압 특성은 peak를 갖게 된다. 일반적인 전류-전압 특성 곡선은 그림 3에 표시되어 있다.

그림 4에서 주사 점(scan dot)들은 그림 3에 표시된 전류-전압 특성 곡선의 피크를 표시한다.

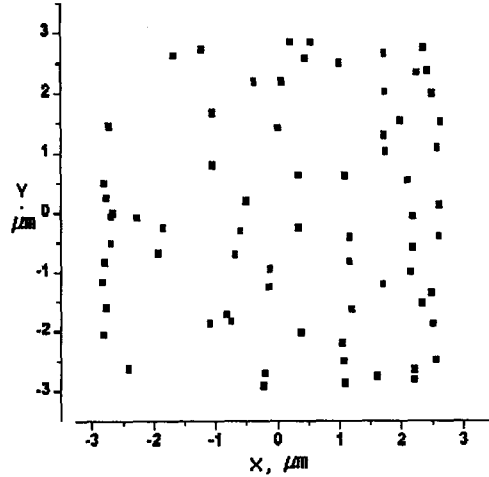


그림 4. 주사 점들은 그림 3에 표시된 도메인 경계의 터널 전류-전압 특성 곡선의 피크를 표시한다.

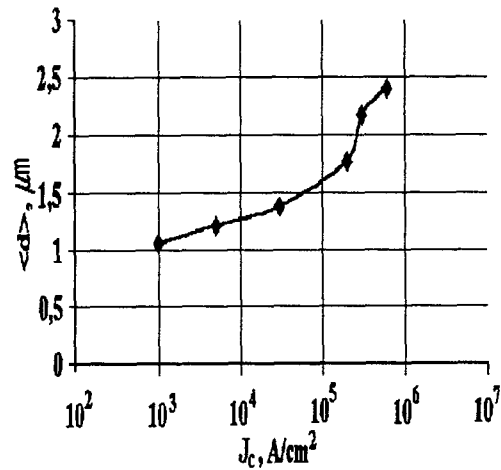


그림 5. 도메인 평균크기와 임계전류밀도

그림 5에 표시된 것처럼 도메인의 평균 크기는 임계전류밀도에 의존하게 된다. 그림 5를 통해서 임계전류가 증가하면 도메인의 평균 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 응력을 받은 고온 초전도 YBCO 막은 항상 온도에 의존하는 임계전류 밀도를 갖는 것은 아니며, 55~57 K 온도 구간에서 최소 값을 갖는다[7].

그림 6은 응력 받은 고온 초전도 YBCO 막이 열-사이클에 따른 임계전류의 온도의존성을 나타낸 것으로 일반적인 온도에서의 온도의존성을 보인다.

임계전류밀도에 의존하는 온도의 비정상적인 극성은 도메인 경계에서의 전자들이 국부적으로 제한되는 쿨롬의 blockade로 설명되는데, 이와 같은 도메인 경계는 미지의 조셉슨 접합과 유사하다.

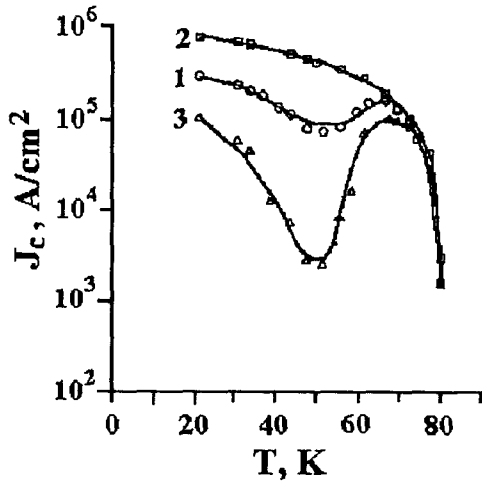


그림 6. 응력을 받은 고온초전도 YBCO막은 n이 [(1) n=0, (2) n=70, (3) n=140]인 서로 다른 열-싸이클에서 임계전류밀도의 온도의존성

IV. 결 론

스트레스를 받은 막은 granular 구조를 갖는 막 보다 열-싸이클에서 보다 안정적이라는 점을 확인하였다.

스트레스 응력을 받은 고온초전도 YBCO 막은 임계전류밀도의 특이한 온도 의존성을 갖는다. 응력을 받은 YBCO 막을 기초로 하여 레이저 어블레이션으로 제작한 SQUID 센서로부터 효과적인 고감도 특성을 성공적으로 얻을 수 있었다.

응력을 받은 막의 임계 전류 밀도는 $J_c = 3 \times 10^5$ A/cm²로 얻어졌으며, 더욱 안정한 상태를 보였다.

실험에 사용된 레이저 어블레이션으로 얻어진 YBCO 박막으로 제작된 SQUID 센서에서 500회 이상의 열-싸이클에 견딜 수 있는 안정성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 KISTEP에서 시행한 국제공동연구사업(과제번호: M6-0011-00-0043)의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

[1] K.N.Yugay, G.M.Seropjan, A.A.Skutin, K.K.Yugay. "Superconducting properties of YBCO thin films at thermocycling", Low

Temp. Phys., Vol. 23, p. 281, 1997

[2] E.A.Kanev, A.B.Muravjev, K.K.Yugay, K.N.Yugay, G.M.Seropjan, S.A.Sjichev. "HTS film dc-SQUID: measurement of its asymmetry and sensitivity", Vestnik Omsk Univer., No. 1, p. 30, 2000

[3] Patent No. 2104939 (Russia). Yugay K.N., Skutin A.A., Muravjev A.B., Sjichev S.A., Yugay K.K. "Superconducting Quantum Interference Device and method of its making", 1999.

[4] A.V.Demin, O.L.Kurnjavko, A.B.Muravjev, WA. A.Skutin, K.K.Yugay, K.N.Yugay, G.M.Seropjan, S.A.Sjichev., "Temperature dependence of the critical current of the HTS films growing by laser ablation method", Vestnik Omsk Univer., No. 3, p. 37. 1998

[5] A.B.Muravjev, G.M.Seropjan, K.K.Yugay, K.N.Yugay. "HTS stressed YBCO films growing by laser ablation method", Vestnik Omsk Univer., No. 4, p. 25. 2000

[6] K.N.Yugay, K.V.Konovalenko, A.B.Muravjev, G.M.Seropjan, Sjichev S.A. "Studying of stressed states of YBCO films by tunnel spectroscopy method", Vestnik Omsk Univer., No. 3, p. 21. 2002

[7] A.B.Muravjev, G.M.Seropjan, K.K.Yugay, K.N.Yugay. "Growing of HTS YBCO films and their properties. Proc. of Sensor Microelectronics Institute of SB RAS Microsensors", p. 242, 2000