

RF 마그네트론 스퍼터링법으로 제조한 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 초전도체 박막의 특성에 대한 기판의 영향

논문
8-1-2

Substrate Effects on the Characteristics of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering

신현용* 박창엽**

(Hyun-Yong Shin Chang-Yub Park)

Abstract

High T_c superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films were prepared on various substrates by off-axis rf magnetron sputtering method to examine the substrate effects on the film structure and its R-T characteristics. The SEM analysis showed that the surface morphology of the grown $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ film has different characteristic structure with different substrate used. The films on (100) $SrTiO_3$ substrate has critical current density of 3×10^5 A/cm² at 77K under zero magnetic field. The X-ray diffraction measurements revealed that the films on (100) $SrTiO_3$ substrate have mixed a-axis and c-axis normal to the substrate surface and the films on (100) MgO and ZrO_2 /sapphire substrates have c-axis normal orientation to the substrate surface. However, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ films on (100) sapphire substrates showed no preferential orientation.

Key Words(중요용어) : Superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Film(초전도 YBCO 박막), R-T Characteristics(저항-온도 특성), Surface Morphology(표면구조), Critical Current Density(임계 전류밀도), Zero Magnetic Field(영자계).

1. 서 론

산화물 고온 초전도체가 발견된¹⁾ 이래 고온 초전도체의 제조와 그 특성에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 와 이와 유사한 성분
의 산화물 고온 초전도체를 조셉슨 접합 소자나 interconnection 등 microelectronics에 이용하기 위하여는, 이들을 박막의 형태로 제조할 필요가 있다. 이를 위하여 electron beam evaporation²⁾, 스퍼터링³⁾, laser ablation⁴⁾, CVD⁵⁾ 등을 이용한 산화물 고온 초전도 박막의 제조 및 제조된 박막의 전자 응용에 관하여 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.^{6,8)}

특성이 우수한 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 초전도 박막을 제조하기 위하여는 적합한 기판의 선택과 적절한 기판의 온도 및 후열처리가 요구되고 있다. 기판의 선택

에는 기판과 제조하려는 초전도 박막사이의 격자 부정합(lattice mismatch)의 크기, 기판과 초전도 박막 사이의 화학적 반응성(reactivity)등을 고려하여야 한다. 비록 적절한 기판이 선택되었다고 후열처리 과정이 적절하지 못하면 제조된 박막의 초전도 특성은 크게 달라진다. 전기료에 의한 후열처리로 얻어지는 특성이 좋은 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 초전도 박막은 일반적으로 대기압의 산소 분위기와 850-950°C의 고온에서 1시간 또는 수시간의 열처리를 통해 얻어지고 있다. 제작된 박막의 초전도 특성을 결정하는 또 다른 중요한 인자는 초기의 상 형성(phase formation), 박막의 화학당량(stoichiometry), 박막의 결정구조 등에 큰 영향을 미치는 박막 증착중의 기판온도로 일반적으로 600-700°C 또는 그 이상의 온도가 사용되고 있다.

고온 초전도체를 이용한 magnetometer 센서에 대한 연구⁹⁾를 통해 sensor의 두께에 대한 직경의 비(d/t)에 따라 센서의 감도가 증가함과 후막형 초전도체 magnetometer 센서의 낮은 임계 전류밀도로 인한 자계의 포화현상을 발견하였다. 따라서 특

* : 남서울산업대학교 전자공학과

** : 연세대학교 전기공학과

접수일자 : 1994년 1월 27일

심사완료 : 1994년 8월 31일

성이 우수한 고온 초전도체 magnetometer 센서의 개발에는 큰 d/t 값과 10^3 A/cm^2 이상의 J_c 를 가진 초전도체 박막이 요구되었다. 본 연구에서는 스퍼터링에 의한 박막 증착과정의 문제점인 산소 음이온에 의한 박막의 표면에서 발생하는 backsputtering을 피하기 위하여 off-axis rf 마그네트론 스퍼터링법으로 SrTiO_3 , MgO , 사파이어 등의 단결정 기판에 비교적 낮은 기판온도 및 짧은 시간의 후열처리를 통해 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 초전도 박막을 제조하고 제조된 박막의 초전도 특성 및 결정구조에 미치는 기판의 영향을 조사하였다.

2. 실험

본 실험에서는 스퍼터링 증착 과정에서 타겟 부근에서 형성된 O^- 이온들이 음으로 바이어스된 음극(target)으로부터 가속되어 탈출하는 결과로 기판표면에서 발생하는 backsputtering에 의한 박막의 화학당량의 파괴를 피하고, 작은 스퍼터링 타겟으로부터 비교적 넓은 면적의 기판에 화학적 조성이 균일한 고온 초전도 박막을 증착하기 위하여 그림 1과 같이 타겟과 기판을 배열시킨 off-axis rf 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 고온 초전도 박막을 여러종류의 기판 위에 제조하였다. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 박막의 증착에 사용한 YBCO 타겟은 Johnson Matthey사 제품의 순도 99.99% 이상인 Y_2O_3 , BaCO_3 , CuO 분말을 원료로 사용하여 Y:Ba:Cu의 비가 1:2:3이 되도록 칭량한 후 고상반응법으로 다음과 같이 제작하였다. 잘 혼합 분쇄한 원료분말을 공기중에서 $10^\circ\text{C}/\text{분}$ 으로 승온하여 400°C 에서 30분, 920°C 에서 4시간 동

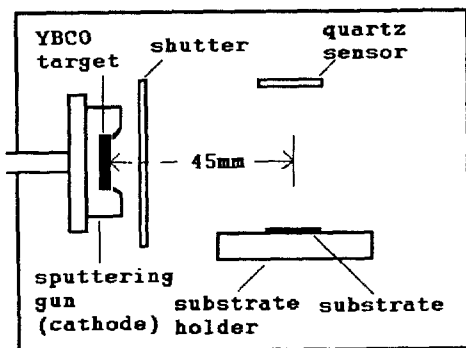


그림 1. Off-axis rf magnetron 스퍼터링의 개략도.

Fig. 1. Schematic diagram of off-axis rf magnetron sputtering.

안 하소한 후, $2^\circ\text{C}/\text{분}$ 의 속도로 승온과 같은 온도 곡선으로 상온까지 잠은시켰다. 이와같이 하소된 원료를 다시 분쇄한 후 molder를 이용하여 60,000 psi의 압력으로 직경 25mm, 두께 3mm의 원판을 만들고 하소와 같은 온도조건으로 산소 분위기에서 소성하였다. 제작된 타겟의 $T_c(\text{zero})$ 는 약 92K , 밀도는 약 $5.5\text{g}/\text{cm}^3$ 이었다.

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 박막의 증착을 위하여 사용한 스퍼터링 조건은 다음과 같았다. RF-전력은 75W, 기판의 온도는 550°C , 기판과 타겟 사이의 거리는 45mm, 증착실의 기본 압력은 1×10^{-5} Torr, 박막 증착중의 스퍼터링 가스의 압력은 2×10^{-3} Torr이었으며 스퍼터링 가스로는 아르곤 80%와 산소 20% 비율의 혼합가스를 사용하였다. 박막을 증착하기 전에 10분 이상의 pre-sputtering을 행하여 타겟 표면의 불순물을 제거하였다. 박막의 증착중에 quartz crystal monitor에 의해 측정된 박막의 증착속도는 약 $2\text{nm}/\text{분}$ 이었으며, 박막의 두께는 $0.4\text{-}0.5\mu\text{m}$ 가 되도록 증착시켰다.

증착된 박막을 결정화 시키기 위하여 다음과 같이 전기로에서 후열처리하였다. 후열처리 전기로의 석영관 내의 불순물들을 제거하기 위하여 대기압의 헬륨가스를 공급하면서 $50^\circ\text{C}/\text{분}$ 의 속도로 승온시켰다. 온도가 895°C 로 안정되면 분위기 가스를 헬륨가스에서 산소가스로 전환시키고 제조된 박막 시료를 $20^\circ\text{C}/\text{초}$ 의 승온속도를 유지하면서 열처리 전기로 속으로 집어 넣었다. 895°C 에서 30분 동안 유지시킨 후 $2^\circ\text{C}/\text{분}$ 의 속도로 냉각시키고 다시 600°C 에서 1시간을 유지시킨 후 같은 속도로 200°C 까지 냉각시키고 전기로의 전원을 차단하여 상온까지 자연 냉각시켰다.

제조된 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 초전도 박막은 XRD와 SEM을 이용하여 박막의 결정구조와 표면구조를 조사하였다. 박막의 전기적 특성을 조사하기 위하여 초음파 soldering gun을 이용하여 indium을 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 초전도 박막에 접착시켜 전극으로 사용하였으며, 이 indium 전극에 silver paste를 사용하여 직경 $50\mu\text{m}$ 의 구리선을 부착시켜 4단자법으로 박막의 비저항-온도 특성을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

후열처리를 끝낸 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 초전도 박막은 특성 측정을 시작하기 전에 광학 현미경을 사용하여 박막 표면의 균일성을 조사하였다. $30^\circ\text{C}/\text{초}$ 미만의 승온속도로 열처리 전기로에 투입시킨 박막의 표면은 비교적 균일하였고 균열을 발견할 수 없었으

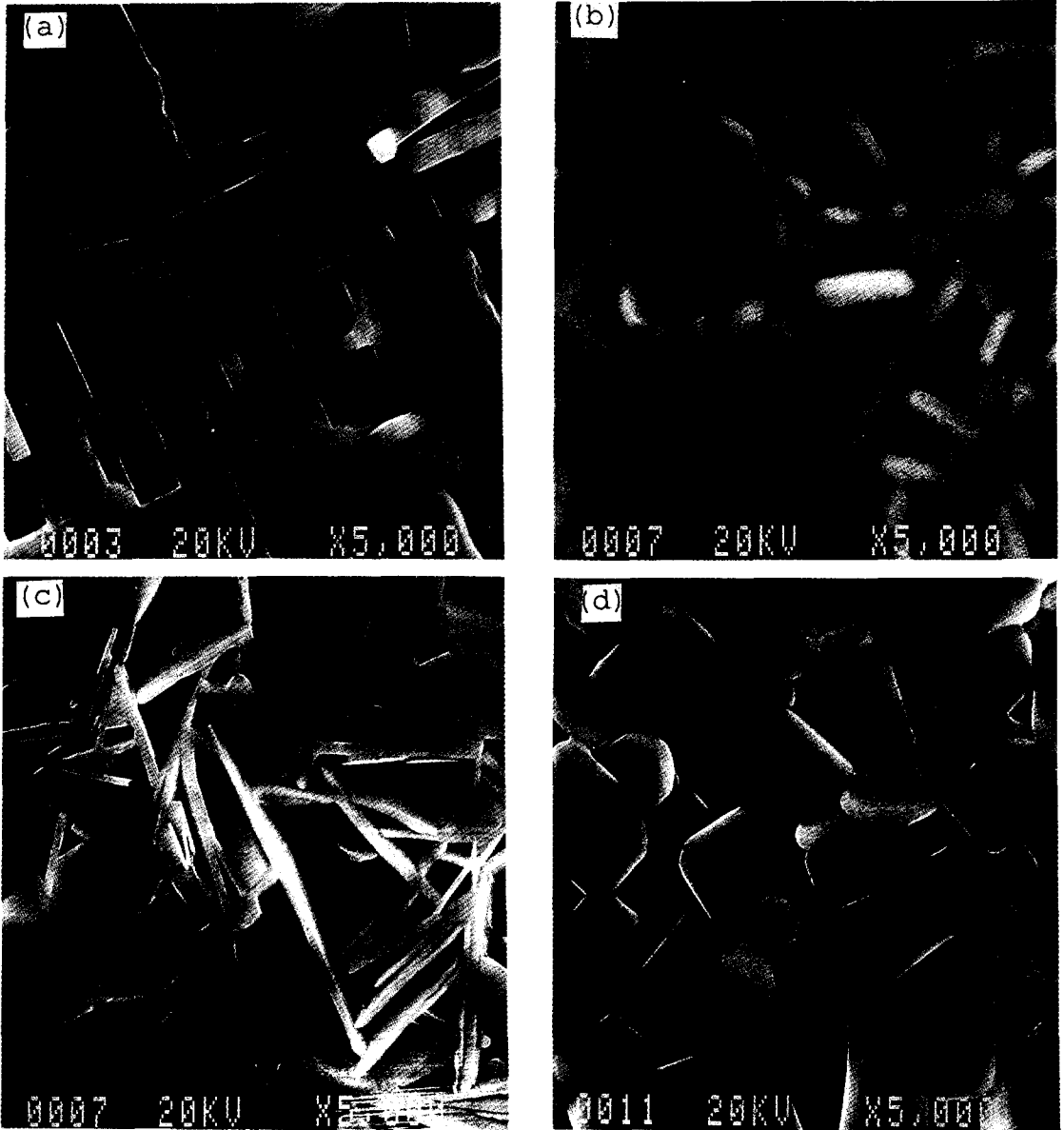


사진 1. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 초전도체 박막의 표면 SEM 사진: (a) SrTiO_3 , (b) MgO , (c) 사파이어 (d) ZrO_2 /사파이어 기판.

Photo. 1. Typical SEM photographs of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconducting thin film surfaces prepared on (a) SrTiO_3 , (b) MgO , (c) sapphire, and (d) ZrO_2 /sapphire substrates.

나, $30^\circ\text{C}/\text{초}$ 이상으로 승온시키며 투입시킨 경우에는 균열이 발견되었다. 사진 1은 각기 다른 기판에 제작한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 박막의 표면을 보여주는 SEM사진이다. 사진 1의 (a)는 단결정의 (100) SrTiO_3 기판위에 제작한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 박막의 표면을 보여주는 것으로 비교적 잘 정렬된 장방형의 구조를 가졌음을 나타내고 있다. 그러나 단결정의

(100) MgO 기판에 제작한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 박막은 사진 1의 (b)에서 보는바와 같이 크기와 모양이 고르지 못한 판상 구조를 가지고 있다. 사진 1의 (c)는 단결정의 (100) 사파이어 기판에 제작한 박막의 표면으로써 무질서하게 배열된 바늘모양의 구조와 무정형의 판상구조가 혼재되어 있음을 볼 수 있다. 사진 1의 (d)는 사파이어 기판과 초전도 박막사이

에서 발생하는 상호확산을 감소시키기 위하여 500 Å의 ZrO₂ buffer 층을 입힌 ZrO₂/사파이어 기판에 제작한 박막의 표면을 나타내는 사진이다. ZrO₂/사파이어 기판에 제작한 박막의 표면구조는 MgO 기판에 제작한 박막과 매우 유사하나 그 형태가 다소 부정형임을 알 수 있다. 사진 1에서 보는바와 같이 본 연구에서 제작한 YBa₂Cu₃O_{7-x} 박막의 표면구조는 기판에 따라 각기 달랐으나, EDAX 분석 결과는 이들의 화학적 조성이 모두 YBa₂Cu₃O₇ 초전도체의 화학당량에 근사함을 보여주었으며 그 결과를 표 1에 나타내었다.

제조된 박막의 결정구조의 특징을 알아보기 위하여 X-선 회절 실험을 행하였으며 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 (a)는 SrTiO₃ 기판에 제조한 YBa₂Cu₃O_{7-x} 박막의 X-선 회절 모양으로 2θ 각이 23.16°와 47.38°에서 비교적 강한 피크를 보여주고 있다. 이것은 SrTiO₃ 단결정 기판에 제조한 박막의 a-축이 기판에 수직으로 성장되었음을 보여주는 것이다. 그러나 (005)와 (009) 피크가 존재함을 미루어 볼 때, 그림 2의 (b)와 (d)에서 보는 것과 같이 c-축이 기판에 수직으로 성장된 YBa₂Cu₃O_{7-x} 초전도 박막에서 주 피크로 나타나는 (003)과 (006) 피크는 SrTiO₃ 기판의 피크와 중첩된 것으로 생각된다. 따라서 SrTiO₃ 단결정 기판에 제조한 박막은 a-축이 기판에 수직인 구조와 c-축이 기판에 수직인 구조가 혼재되어 있는 것으로 볼 수 있다. 이와같은 결과는 YBCO 초전도체의 격자상수와 SrTiO₃ 단결정의 격자상수의 관계 및 YBCO 초전도체의 결정구조적 특성을 고려함으로 이해될 수 있다. SrTiO₃ 단결정은 격자상수가 a=b=c=3.90Å의 입방 구조이나 YBCO 초전도체는 격자상수가 a=3.81Å, b=3.90Å, c=11.68Å의¹⁰⁾ orthorhombic 구조를 가진 것으로 알려져 있다. SrTiO₃ 단결정의 b-축과 YBCO 초전도체의 b-축 사이에는 격자 부정합이 존재하지 않고, SrTiO₃ 단결정의 b-축과 YBCO 초전도체의 c-축 사이의 격자 부정합도 0.2% 이하로 매우 작다. 따라서 SrTiO₃ 단결정 기판에 제조된 박막은 주로 a-축이 기판에 수직으로 성장되어 질 것으로 예상된다. 그러나 YBCO 초전도체는 CuO₂면이 크고 강한 금속이온(Ba)을 포함하고 있는 금속-산소층(AO)에 의해 3차원으로 구속되어 AO-CuO₂-AO의 층상(layered) 페로프스카이트 구조를 형성하며¹¹⁾ a-b면 (CuO₂)과 다른 면 사이의 표면 에너지의 차로 인한 구조적인 비등방성 때문에 상층된 기판의 온도에서 c-축이 기판에 수직으로 성장하려는 특성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.¹²⁾

표 1. 기판에 따른 박막의 EDAX 분석 결과
Table 1. EDAX analysis results of the films grown on the different substrates.

	Atomic Composition			Chemical Formula
	Y	Ba	Cu	
SrTiO ₃	16.98	33.04	49.98	YBa _{1.95} Cu _{2.94} O _x
MgO	16.73	31.86	51.41	YBa _{1.90} Cu _{3.07} O _x
Sapphire	18.65	32.81	48.54	YBa _{1.76} Cu _{2.60} O _x
ZrO ₂ /Sapphire	17.64	33.07	49.29	YBa _{1.88} Cu _{2.79} O _x

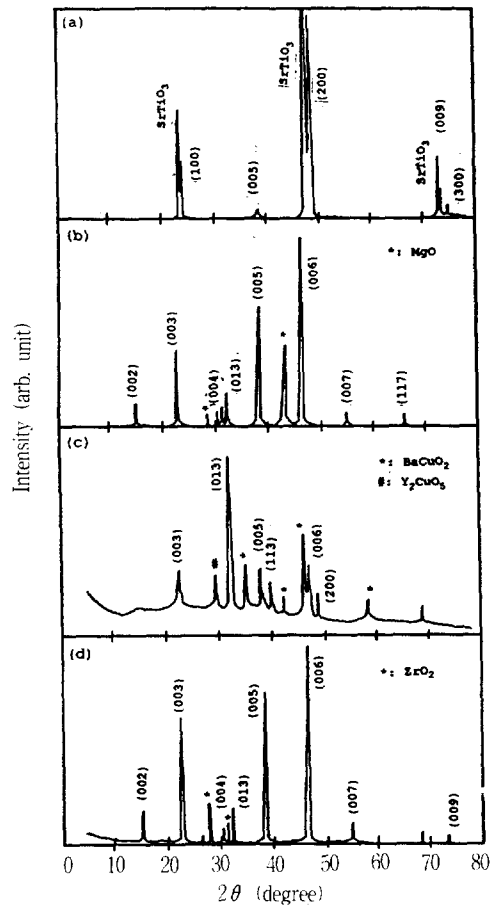


그림 2. YBa₂Cu₃O_{7-x} 초전도체 박막의 X-선 회절 모양 : (a) SrTiO₃, (b) MgO, (c) 사파이어 (d) ZrO₂/사파이어 기판.

Fig. 2. XRD patterns obtained from YBa₂Cu₃O_{7-x} superconducting thin films prepared on (a) SrTiO₃, (b) MgO, (c) sapphire, and (d) ZrO₂/sapphire substrates.

이와 같은 YBCO 초전도체의 구조적인 특성으로 인하여 SrTiO₃ 단결정 기판에 c-축이 기판에 수직인 박막이 성장된 것으로 보여진다. H. Fuke 등¹³⁾도 ionized cluster beam 증착법으로 (100) SrTiO₃ 단결정 기판에 제작한 박막이 a-축 방향의 그레인과 c-축 방향의 그레인이 서로 직각으로 성장되었고 이 a-축 그레인이 flux pinning 센터의 역할을 한다고 보고하였다. 그림 2의 (b)와 (d)는 각각 MgO 단결정 기판과 ZrO₂/사파이어 기판에 제조한 YBa₂Cu₃O_{7-x} 박막의 X-선 회절 스펙트럼이다. MgO 단결정 기판은 격자상수가 a=4.2117Å인 입방 구조이고 ZrO₂는 격자상수가 a=5.145Å, b=5.2075Å, c=5.3107Å인 단사 구조로써 Y-Ba-Cu-O 초전도 박막과는 격자상수의 부정합이 10% 내외로 방향성은 기대할 수 없다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 (00L)번에 해당하는 회절 피크들이 많이 존재하는 것으로 볼 때 주로 박막의 c-축이 기판에 수직으로 성장하였음을 알 수 있다. 이것은 YBCO 초전도체의 결정구조적인 특성 때문인 것으로 생각된다. 격자상수가 a=4.7591Å, c=12.9894Å인 rhombohedral 구조의¹⁴⁾ 사파이어 단결정 기판의 Y-Ba-Cu-O 초전도 박막에 대한 격자상수의 부정합은 약 11%로 MgO 단결정 기판의 경우와 비슷하나 사파이어 단결정 기판에 제조한 박막의 X-선 회절 스펙트럼은 그림 2의 (c)에서 보는 것처럼 (00L) 피크가 존재하지는 하지만 특별한 방향성은 보이지 않았고, 무질서하게 배열된 다결정의 YBa₂Cu₃O_{7-x}에서 강하게 나타나는 (103) 피크가 가장 크며 상전도상인 BaCuO₂, Y₂CuO₅ 등이 혼재하고 있음을 알 수 있다. 이는 격자상수의 부정합보다는 YBa₂Cu₃O_{7-x} 초전도 박막과 사파이어 기판의 계면에서 Y, Ba, Al 등의 상호확산 때문인 것으로 생각된다.

그림 3은 본 연구에서 제조한 YBa₂Cu₃O_{7-x} 초전도 박막을 4단자법으로 측정된 비저항 온도 특성곡선이다. 측정을 위한 전류원으로는 10μA의 직류를 사용하였다. 사파이어, ZrO₂/사파이어, SrTiO₃ 및 MgO 기판에 제작한 YBa₂Cu₃O_{7-x} 박막의 비저항은 상온에서 각각 19.88mΩ-cm, 7.24mΩ-cm, 3.02mΩ-cm, 5.99mΩ-cm이었다. 그림 3의 (a)는 SrTiO₃ 기판에 제조한 박막의 비저항-온도 특성곡선으로 T_c(zero)=91K, T_c(onset)=94K로 전이온도 폭, ΔT_c가 3K 미만의 매우 빠른 전이를 보여주고 있다. 그림 3의 (b)는 MgO 단결정 기판에 제조한 박막의 비저항-온도 곡선으로 T_c(zero)=85K, T_c(onset)≅89K를 나타내고 있다. 그림 3의 (d)는 ZrO₂/사파이어 기판에 제조한 박막의

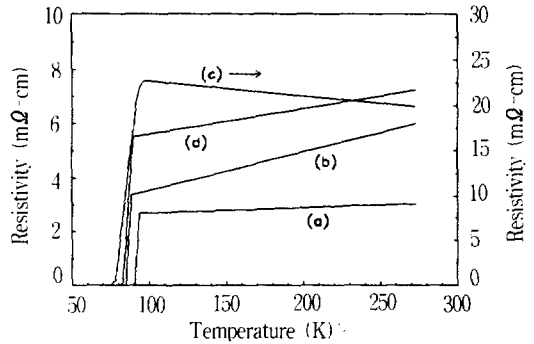


그림 3. YBa₂Cu₃O_{7-x} 초전도체 박막의 비저항-온도 곡선 : (a) SrTiO₃, (b) MgO, (c) 사파이어 (d) ZrO₂/사파이어 기판.

Fig. 3. Resistivity-temperature curves of YBa₂Cu₃O_{7-x} superconducting thin films prepared on (a) SrTiO₃, (b) MgO, (c) Sapphire, and (d) ZrO₂/Sapphire substrates.

비저항-온도 특성을 보여주는 것으로 T_c(zero)와 T_c(onset)는 각각 80K와 90K이었다. 그림 3의 (c)는 사파이어 기판에 제조한 박막의 비저항-온도 특성 곡선으로 T_c(onset)는 약 95K, T_c(zero)는 74K이었으나 다른 기판에 제조한 박막과는 달리 T_c(zero) 부근에서 매우 완만한 비저항의 변화를 보여주고 있다. SrTiO₃, MgO 및 ZrO₂/사파이어 기판에 제조된 YBa₂Cu₃O_{7-x} 초전도 박막들의 비저항은 T_c(onset)와 상온사이의 온도에서 금속과 같은 특성을 보이고 있으나 사파이어에 제작한 박막의 비저항은 반도체와 유사한 특성을 나타내고 있다. 사파이어 단결정 기판에 제작한 YBa₂Cu₃O_{7-x} 초전도 박막의 반도체와 유사한 비저항-온도 특성, T_c(zero) 부근에서 매우 완만한 비저항의 변화, 넓은 전이온도 폭등은 XRD 분석 결과에서 고찰한 것과 같이 박막의 증착과 후열처리 과정에서 형성된 상전도상 때문인 것으로 생각된다. 제작한 YBa₂Cu₃O_{7-x} 초전도 박막을 사진식각법으로 폭 50μm, 길이 250μm의 다리(bridge) 형태로 제작하고 1×10⁻⁵ Torr의 진공 중에서 약 1000Å의 은전극 (0.5mm×2mm)을 증착시켰으며, 이 은전극에 직경 50μm의 구리선을 silver paste로 접착시켜 박막의 임계 전류밀도, J_c를 측정하였다. 77K, 영자계의 조건에서 측정된 임계 전류밀도는 SrTiO₃ 기판에 제작된 박막의 경우 약 3×10⁷A/cm²이었다.

4. 결 론

Off-axis rf 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여

직경 25mm의 작은 스퍼터링 타겟으로 부터 비교적 넓은 면적($>1\text{cm}^2$)의 기판에 균일한 화학적 조성의 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 초전도체 박막을 $T_{\text{sub}}=550^\circ\text{C}$ 의 낮은 온도에서 증착하고, 짧은 시간 후열처리하여 제조하였다. 박막의 표면구조는 기판에 따라 특이한 미세구조를 나타내었으며, 특히 (100) SrTiO_3 단결정 기판에 제조한 박막의 미세구조는 잘 배열된 장방향으로 다른 기판에 제작한 박막과는 전혀 다른 형태이었다. XRD분석 결과, 사파이어에 제조한 박막은 특정한 방향성을 보이지 않았으나 SrTiO_3 기판에 제조한 박막은 주로 a-축과 c-축이, ZrO_2 /사파이어 기판과 MgO 기판에 제조한 박막은 주로 c-축이 각각 기판의 표면에 수직이었다. SrTiO_3 단결정 기판에 제조한 초전도 박막은 $T_c(\text{zero})=91\text{K}$, $T_c(\text{onset})=94\text{K}$, 전이온도 폭, $\Delta T_c < 3\text{K}$ 및 77K 에서 $J_c=3 \times 10^3 \text{A}/\text{cm}^2$ 으로 특성이 우수하였다. MgO , ZrO_2 /사파이어, 사파이어 기판에 제조한 박막의 초전도 특성을 비교 분석한 결과 YBCO초전도 박막의 제조에 있어 박막과 기판 사이의 격자 부정합의 정도보다 박막과 기판의 계면에서의 상호확산의 정도가 박막의 초전도 특성과 결정구조에 더 큰 영향을 주는것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. G. Bendorz and K. A. Muller, "Possible high T_c superconductivity in Ba-La-Cu-O system", Z. Phys. B. Vol. 64, no. 2, pp. 189-193, 1986.
- [2] M. Maul et al., "Thin $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ films by electron-beam coevaporation-Growth and in situ characterization", J. Appl. Phys., vol. 73, no. 4, pp. 2032-2034, 1993.
- [3] Q. X. Jia and W. A. Anderson, "High temperature superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7-x$ films on metallic substrates grown in situ by off-axis sputtering", Appl. Phys. Lett., vol. 60, no. 21, pp. 2689-2691, 1992.
- [4] S. Pramanick and J. Narayan, "Effect of processing geometry on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7-x$ plasma emission during superconducting thin film growth by pulsed laser evaporation technique", J. Appl. Phys., vol. 73, no. 1, pp. 316-319, 1993.
- [5] W. J. DeSisto et al., "Metalorganic chemical vapor deposition of low microwave surface resistance $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ on (100) SrTiO_3 ", Appl. Phys. Lett., vol. 60, no. 23, pp. 2926-2928, 1992.
- [6] X. X. Xi et al., "Voltage-current characteristics of a high T_c superconducting field effect device", Appl. Phys. Lett., vol. 61, no. 19, pp. 2353-2355, 1992.
- [7] S. S. Tinchev, "High- T_c SQUIDS with local oxygen-ion irradiated weak links", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 3, no. 1, pp. 28-32, 1993.
- [8] G. C. Liang et al., "High-temperature superconducting delay lines and filters on Sapphire and thinned LaAlO_3 substrates", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 3, no. 3, pp. 3037-3042, 1993.
- [9] H. Y. Shin, "Current injected YBCO high temperature superconductor sensors for low dc field magnetometry", Trans. KIEE, vol. 42, no. 4, pp. 47-52 (1993).
- [10] Yipaing Li and G. C. Hadjipanayis, "Superconducting R-Ba-Cu-O balls made by rapid solidification", Appl. Phys. Lett. vol. 53, no. 5, pp. 412-413, 1988.
- [11] B. Dabrowski, "Synthesis of new copper oxide superconductors at high oxygen pressure", J. Electron. Mater. vol. 22, no. 10, pp. 1183-1187, 1993.
- [12] R. Ramesh, T. Sands, and V. G. Krramidas, "Template approaches to growth of oriented oxide heterostructures on SiO_2/Si ", J. Electron. Mater. vol. 23, no. 1, pp. 19-23, 1994.
- [13] H. Fule et al., "Flux pinning by a-axis grains in c-axis oriented Y-Ba-Cu-O films", Appl. Phys. Lett., vol. 60, no. 21, pp. 2686-2688, 1992.