

Off-Axis RF 마그네트론 스퍼터링에 의한 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 고온 초전도 박막의 제조

심건용·서정대·강광용·장순호

한국전자통신연구소 기초기술연구부

(1991년 1월 22일 접수)

Fabrication of High- T_c Superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films by Off-Axis RF Magnetron Sputtering

Gun Yong Sung, Jeong Dae Suh, Kwang Yong Kang and Soon Ho Chang

Research Department, Electronics and Telecommunications Research Institute.

(Received January 22, 1991)

요 약

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 고온초전도 박막을 single-target off-axis RF magnetron sputtering 방법으로 제조하였다. Y : Ba : Cu 의 화학조성비가 1 : 2 : 3인 박막을 얻기위한 sputtering target 의 최적조성비는 1 : 1.65 : 3.35이였으며, 이 target 을 사용하여 $LaAlO_3$ 의 버퍼층을 갖는 Si(100)기판 ($LaAlO_3/Si$)과 $MgO(100)$ 단결정 기판위에 sputtering 하고 열처리하여, T_c 를 측정하고 결정상과 화학조성을 조사하였고, 표면 및 단면의 미세조직을 주사전자현미경으로 관찰하였다. MgO 기판위에 제조된 박막의 $T_{c, on-set}$ 은 90 K, $T_{c, zero}$ 는 80K 이였으며 $LaAlO_3/Si$ 기판위에 제조된 박막의 $T_{c, on-set}$ 은 90K, $T_{c, zero}$ 는 70 K로 측정되었다.

ABSTRACT

High- T_c $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconducting thin films have been prepared by single-target off-axis RF magnetron sputtering. Optimal ratio of Y : Ba : Cu of the single-target was determined as 1 : 1.65 : 3.35 in order to obtain the stoichiometric films. T_c , crystalline phase, and microstructures of the surface and cross-section of the *ex-situ* $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films on Si(100) with $LaAlO_3$ buffer layer ($LaAlO_3/Si$) and $MgO(100)$ substrate have been investigated. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films on $MgO(100)$ had a $T_{c, on-set}$ of 90 K and a $T_{c, zero}$ of 80 K, and the films on $LaAlO_3/Si$ had a $T_{c, on-set}$ of 90 K and a $T_{c, zero}$ of 70 K.

1. 서 론

산화물 고온 초전도체가 발견된 이후, 초전도현상의 규명, 새로운 초전도체의 개발, 그리고 실용화를 위한 다양한 형태의 고온 초전도체의 개발 등에 많은 연구가 진행되고 있다. 현재까지 알려진 초전도체의 응용은 선재화 기

술이 필수적으로 요구되는 에너지 분야와 박막화 기술이 선결조건인 microelectronics 분야로 크게 나눌 수 있는데, 실용화 면에서 큰 기대를 모으고 있는 것은 산화물 고온초전도 박막을 이용한 Josephson 접합이다. 이 접합은 SQUID(superconducting quantum interference device, 초전도 양자 간섭 소자), 3단자 초전도 트랜지스터, 그리

고 초고속 컴퓨터용 스위치 소자 등에 응용할 수 있어서 차세대 전자산업의 핵심기술로 인정되고 있다. 따라서 우수한 고온초전도 박막 제조를 위한 연구가 진행되고 있다. 높은 전류밀도(J_c)와 높은 전이온도(T_c), 평활한 표면을 갖는 양질의 고온초전도 박막을 성장시키는데 영향을 주는 주된 변수는 박막제조 방법, 기판의 선택, 박막성장시 기판의 온도 및 박막형성후 열처리의 유무와 열처리 온도 등이며, 현재까지 보고된 박막제조 방법들로는 electron-beam evaporation¹⁻³⁾, thermal evaporation^{4,5)}, sputtering⁶⁻⁹⁾, MOCVD(metal-organic chemical vapor deposition)^{10,11)} MBE(molecular beam epitaxy)^{12,13)}, laser ablation¹⁴⁻¹⁷⁾ 등이 있다.

고온 초전도 박막 제조용 기판은 결정구조와 열팽창 계수등이 고온 초전도 박막의 그것과 거의 같아야 하고, 화학적으로 안정하여 초전도 박막과의 계면 화학반응이나 상호확산이 없어야 한다. 뿐만 아니라 electronic devices 로의 활용을 위해 전기적, 유전적, 광학적, 자기적으로 적당한 특성을 갖는 재료가 기판으로 사용되어야 한다.¹⁸⁾ YBCO($YBa_2Cu_3O_{7-x}$)계 고온 초전도 박막 연구의 초기에는 MgO, ZrO₂, SrTiO₃, Si, sapphire 등의 단결정들이 기판으로 사용되다가, electronic device 로의 활용을 위해 microwave 특성이 뛰어난 rare-earth aluminate 단결정¹⁹⁻²²⁾, 광전기적 특성이 우수한 LiNbO₃ 단결정^{22,23)}, 그리고 자기적 특성이 탁월한 rare-earth orthoferrite 단결정²⁴⁾들이 기판으로 사용되고 있다. 그러나 고온 초전도 박막을 electronic device 에 응용하려면, 지금까지 언급한 기판재료를 보다는 현재 전자부품에 범용으로 쓰이는 Si 기판에서의 박막 제조가 가능하여야 한다. 이를 위하여 YBCO 박막과 lattice matching 과 thermal matching 이 잘 되고 화학적으로 안정한 물질을 Si 기판에 박막화하여 버퍼층(buffer layer)을 형성시킨 후 이 층 위에 YBCO 박막을 성장시키는 이른바 고온초전도 다층박막이 등장하게 되었다. 버퍼층으로는 YSZ^{25,26)}, BaTiO₃ 및 MgAl₂O₃²⁷⁾, Al₂O₃²⁸⁾, BaF₂²⁹⁾ 등이 보고되고 있다.

Sputtering 에 의한 초전도 박막 제조는 Sr-La-Cu 계에 대해 최초로 보고되었으나, YBCO 계에 대한 연구가 거의 대부분을 차지하고 있다. RF magnetron, dc diode, dc triode, ion beam 등 모든 종류의 sputtering 기법이 연구되었는데, 이중 RF magnetron sputtering 방법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. Single-target sputtering 에서의 가장 큰 문제점은 target 과 화학양론적으로 동일한 조

성의 박막을 얻기 어렵다는 점이다. YBCO 계의 경우 Ba 나 Cu 가 결핍된 박막이 얻어지는데 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Y, BaF₂, Cu target 을 동시에 사용하여 multi-target sputtering 방법을 사용하거나, 0.1~2.5 Torr 의 산소압하에서 sputtering 하거나, target 과 기판의 위치를 바꾸거나, target 의 조성을 조절하는 등 많은 연구가 진행되었다. Eom 등은⁶⁾ single-target off-axis RF magnetron sputtering 방법으로 $T_{c, zero}$ 가 89~91 K 이고 $J_{c, 77K}$ 가 5×10^6 A/cm²인 c 축으로 배향된 YBCO 박막을 제조하였다.

본 연구에서는 일반적인 ceramic processing 으로 준비된 여러조성의 target 을 사용하여 제조한 박막들의 조성을 EDS(energy dispersive spectroscopy)로 분석하여, Y : Ba : Cu 의 조성비가 1 : 2 : 3인 박막을 single-target off-axis RF magnetron sputtering 방법으로 얻기 위한 sputtering target 의 최적조성을 결정하였다. 최적조성의 target 을 사용하여 LaAlO₃의 버퍼층을 갖는 Si(100)기판(LaAlO₃/Si)과 MgO(100) 단결정 기판위에 sputtering 하고 열처리한 후, T_c 를 측정하고 결정상과 화학조성을 조사하였고, 표면 및 단면의 미세조직을 주사전자현미경으로 관찰하였다.

2. 실험방법

2.1. YBa₂Cu₃O_{7-x} 박막 증착용 Spttering Target 의 제조

YBa₂Cu₃O_{7-x} 박막을 RF magnetron sputtering 으로 증착하기 위한 sputtering target 의 제조는 일반적인 ceramic processing 을 거쳤다. 먼저 고순도의 Y₂O₃, BaCO₃, CuO 분말을 Y : Ba : Cu 의 비가 1 : 2 : 3, 2 : 3 : 3, 3 : 2 : 3 등이 되도록 칭량한 후, 원심혼합기(centrifugal ball mill)에서 습식 혼합하였다.

혼합 분말을 건조시킨 후, 공기중 900°C에서 20시간 동안 하소하고 분쇄하여 49MPa 의 압력으로 밀축가압하여 직경이 5cm 인 성형체를 얻었다. 이 성형체를 다시 정수압 성형한 후, 공기중 900°C에서 40시간 동안 소결하였다. 소결후 500°C에서 10시간 동안 공기중 열처리하여 sputtering target 을 얻었다.

2.2. LaAlO₃ 박막의 제조

LaAlO₃ 박막을 Si 기판위에 RF magnetron sputtering 방법으로 증착하기 위하여 먼저 LaAlO₃ sputtering

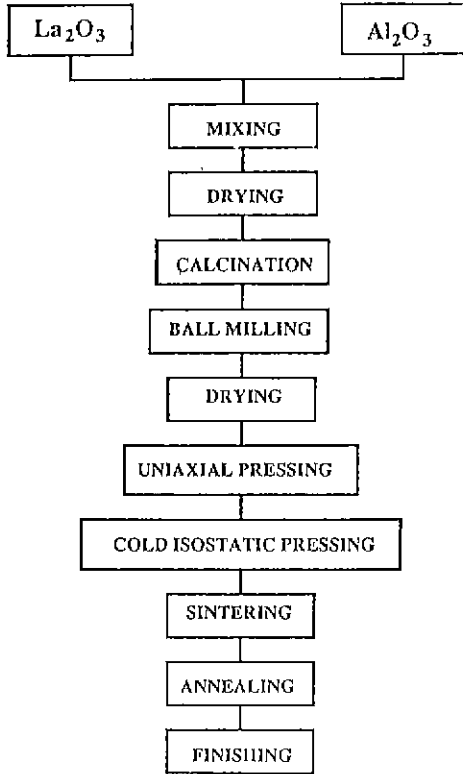


Fig.1. Flow chart for the synthesis and preparation of the lanthanum aluminate targets.

target을 Fig.1과 같은 공정을 거쳐 제조하였으며, $LaAlO_3$ 분말의 합성조건과 소결조건에 대한 연구결과는 이미 보고하였다³⁰⁾. 준비된 $LaAlO_3$ sputtering target을 indium으로 target holder에 부착시키고 기판이 target과 마주보는 on-axis RF magnetron sputtering chamber에서 박막을 증착하였다. 기판은 Si(100) wafer를 $1cm \times 1cm$ 의 크기로 절단한 후, Ishizaka 등이 제안한 방법³¹⁾으로 세척하여 사용하였다. 증착조건과 열처리에 따른 $LaAlO_3$ 박막의 결정상 및 미세조직의 변화로부터 최적 증착조건 및 열처리 조건을 결정하였다³²⁾. Sputtering은 최적 증착조건인 Table 1의 조건에서 행하였으며, 증착막은 산소분위기하에서 $900^\circ C$ 에서 2시간 동안 열처리한 후 $1^\circ C/min$ 의 속도로 냉각하여 결정질의 $LaAlO_3$ 박막을 얻었다.

2.3. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 박막의 제조

준비된 sputtering target을 전도성 예폭시로 target holder에 부착시키고, MgO(100) 단결정 기판과

Table 1. RF Magnetron Sputtering Conditions of $LaAlO_3$ and $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films.

	$LaAlO_3$	$YBa_2Cu_3O_{7-x}$
Substrate temp	$120^\circ C$	$120^\circ C$
Sputtering gas	Ar + O_2 (4 : 1)	Ar
Gas pressure	10 m Torr	10 m Torr
RF input power	150W	150W
Target-to-substrate distance	20mm	off-axis
Post-annealing	$900^\circ C$, 2h, O_2	$900^\circ C$, 2h, O_2

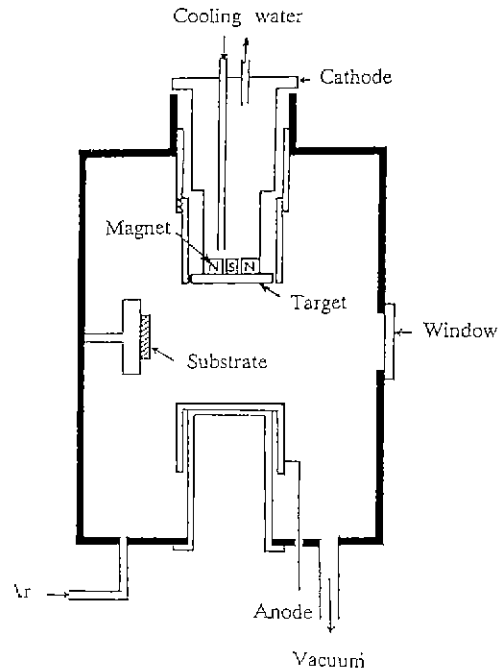


Fig. 2. Schematic diagram of the off-axis RF magnetron sputtering chamber

$LaAlO_3/Si$ 기판을 사용하여 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 고온초전도 박막을 off-axis RF magnetron sputtering 공정으로 제조하였다. Sputtering은 Table 1과 같은 조건하에서 기판과 target이 서로 90° 를 이루도록(Fig.2)하여 off-axis sputtering을 행하였다.

증착된 박막을 산소분위기에서 Fig.3과 같이 열처리하여 최종 시편을 얻었다. 4단자용 전극으로 Au를 thermal evaporator에서 증착하여 시편의 온도-저항 특성을 측정

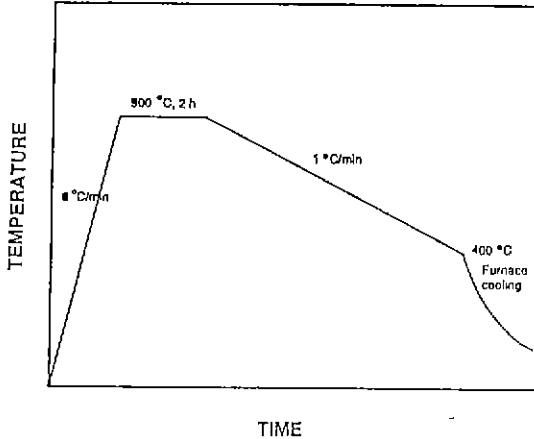


Fig. 3. Oxygen anneal schedule.

하였다. 열처리된 박막의 표면과 단면의 미세조직을 SEM으로 관찰하였으며, X-선 회절 분석으로 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 사방정상(orthorhombic phase)을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 박막 증착용 sputtering target

일반적으로 sputtering 방법으로 고온초전도체의 박막을 증착할 때 가장 기본적인 문제는 sputtering target의 조성과 증착된 박막의 조성이 일치하지 않는다는 점이다. 본 연구에서는 RF magnetron sputtering 공정으로 증착한 박막의 조성을 Y : Ba : Cu = 1 : 2 : 3의 비율로 맞추기 위하여 sputtering target의 조성을 다음과 같은 방법으로 결정하였다.

Y : Ba : Cu의 조성비가 2 : 3 : 3, 1 : 2 : 3, 3 : 2 : 3인

Table 2. Atomic Ratio of Sputtered Films and Targets.

Sputtered film		Y : Ba : Cu ratio of sputtering target		
		2 : 3 : 3	1 : 2 : 3	3 : 2 : 3
Atomic % of sputtered films	Y	24.8	16.2	41.1
	Ba	42.5	40.6	30.3
	Cu	32.7	43.2	28.6
Y : Ba : Cu ratio		1:1.7:1.3	1.2:5:2.7	1:0.7:0.7

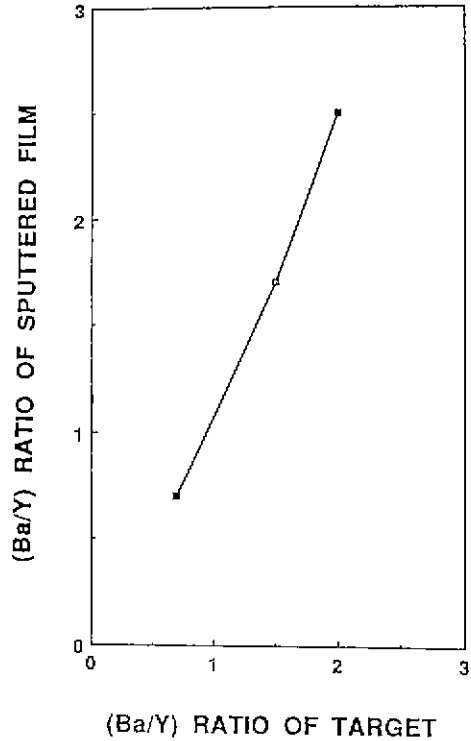


Fig. 4. (Ba/Y) ratio of target vs. (Ba/Y) ratio of sputtered film.

sputtering target을 사용하여 증착한 박막의 화학조성을 EDS로 정량분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. 이때 사용된 software는 LINK ZAF 4/FLS program 이었으며, 오차는 총 무게분율의 $\pm 2\%$ 이내 이었다. 이러한 EDS 분석결과로부터 Y에 대한 Ba와 Cu의 atomic ratio 즉 (Ba/Y)값과 (Cu/Y)값을 구하여 sputtering target과 증착된 박막의 화학조성간의 관계를 알아보았다. Sputtering target의 (Ba/Y), (Cu/Y)값을 x축으로, 증착된 박막의 (Ba/Y), (Cu/Y)값을 y축으로 plot하여 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 보면, sputtering target과 증착된 박막의 (Ba/Y), (Cu/Y)값은 거의 직선적인 관계를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 이용하여 Y : Ba : Cu의 조성비가 1 : 2 : 3인 고온초전도 박막을 증착시키기 위하여 Fig. 4와 Fig. 5에서 증착된 박막의 (Ba/Y)값과 (Cu/Y)값이 각각 2와 3인 점을 택하여 각각에 대응되는 sputtering target의 (Ba/Y)값과 (Cu/Y)값을 결정하였다. 이에 따라 조성비

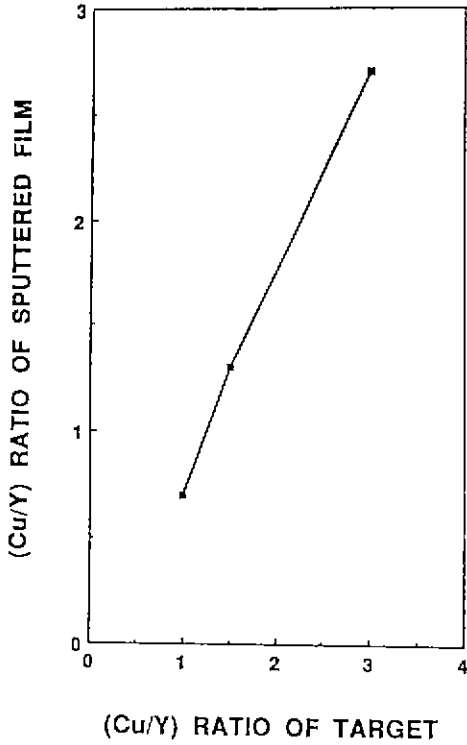


Fig. 5. (Cu/Y) ratio of target vs. (Cu/Y) ratio of sputtered film.

Table 3. Atomic Ratio of Sputtered Films and Targets.

Y : Ba : Cu ratio of sputtering target		1 : 1.65 : 3.2	1 : 1.65 : 3.35
Sputtered film			
Atomic % of sputtered films	Y	18.6	17.1
	Ba	31.2	31.6
	Cu	50.3	51.3
Y : Ba : Cu ratio		1 : 1.7 : 2.7	1 : 1.9 : 3.0

가 1 : 1.65 : 3.2와 1 : 1.65 : 3.35인 sputtering target 을 제조하여 고온초전도 박막을 증착한 후 EDS 분석을 행한 결과를 Table 3에 나타내었다. 여기서 sputtering target 의 조성비가 1 : 1.65 : 3.35일 때 1 : 1.9 : 3인 조성비를 갖는 박막을 얻을 수 있었다.

3.2. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 박막 증착

조성비가 1 : 1.65 : 3.35인 sputtering target 을 사용하

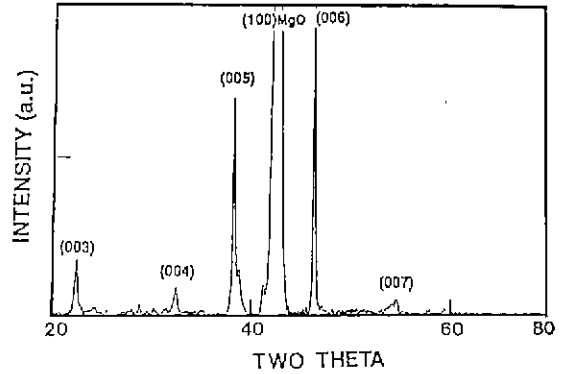


Fig. 6. X-ray diffraction pattern of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films on $\text{MgO}(100)$.

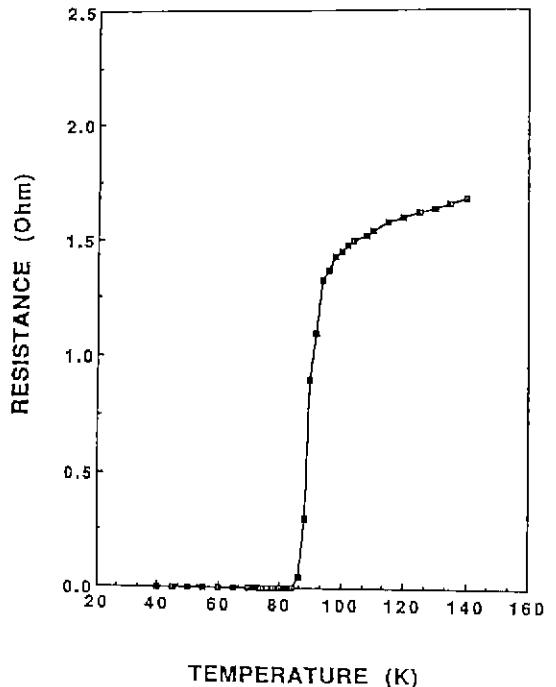


Fig. 7. Resistance vs. temperature curve for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films on $\text{MgO}(100)$.

여 $\text{MgO}(100)$ 단결정 기판위에 증착된 박막을 열처리한 시편의 X-선 회절패턴을 Fig. 6에 나타내었는데, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 의 사방정상의 (00L)면 peak 들만 관측되어진 것으로 보아 박막이 c 축 방향으로 배향되어 있음을 예측할 수 있다. 이 박막의 온도-저항 특성은 Fig. 7과 같았다.

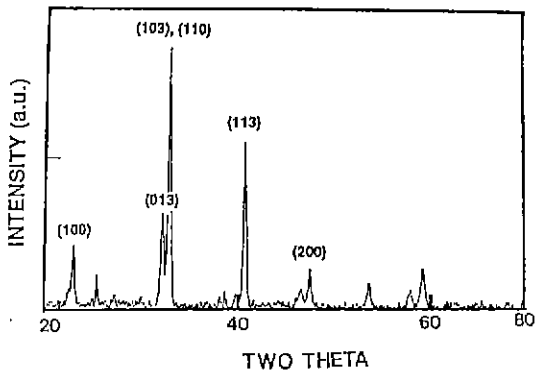


Fig. 8. X-ray diffraction pattern of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films on $\text{Si}(100)$ with LaAlO_3 buffer layer.

$T_{c, \text{on-set}}$ 은 90 K이었으며 $T_{c, \text{zero}}$ 는 이 온도보다 10 K 정도 낮았다. 이와같이 $T_{c, \text{zero}}$ 가 낮은 이유는 초전도 박막의 조성비가 1 : 2 : 3에서 약간 벗어난 1 : 1.9 : 3이었기 때문으로 사료된다.

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{LaAlO}_3/\text{Si}(100)$ 고온초전도 다층박막에 대한 X-선 회절패턴은 Fig. 8과 같은데, LaAlO_3 의 회절패턴과 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 의 사방정상 회절패턴이 겹치지 않는 $32^\circ \sim 34^\circ$ 사이의 회절 peak 들로부터 사방정상이 생성되었음을 확인하였다. 그러나 Fig. 6의 $\text{MgO}(100)$ 단결정 기판상에 증착된 초전도 박막에 비하여 (00L)회절 peak 이 나타나지 않는 것으로 미루어 특정방향으로 배향되지 않

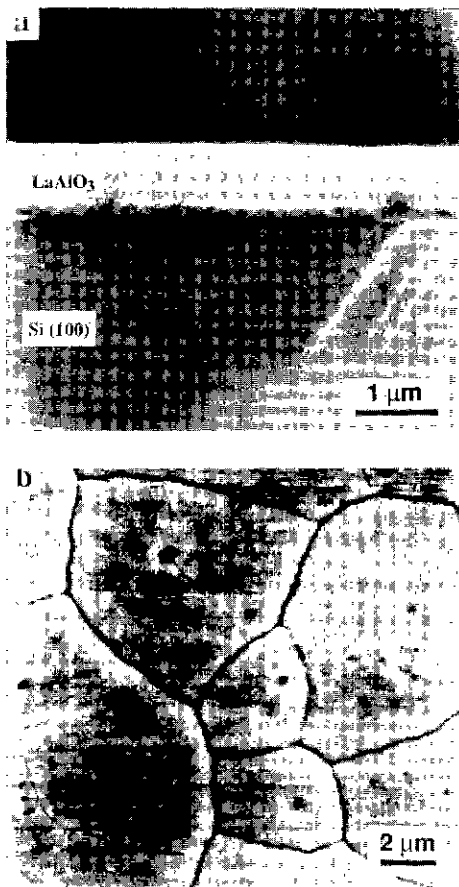


Fig. 9. Scanning electron micrographs for the LaAlO_3 thin films on $\text{Si}(100)$ substrate.
(a) Cross-section of the film on substrate and
(b) surface morphology of the film showing grain boundaries.

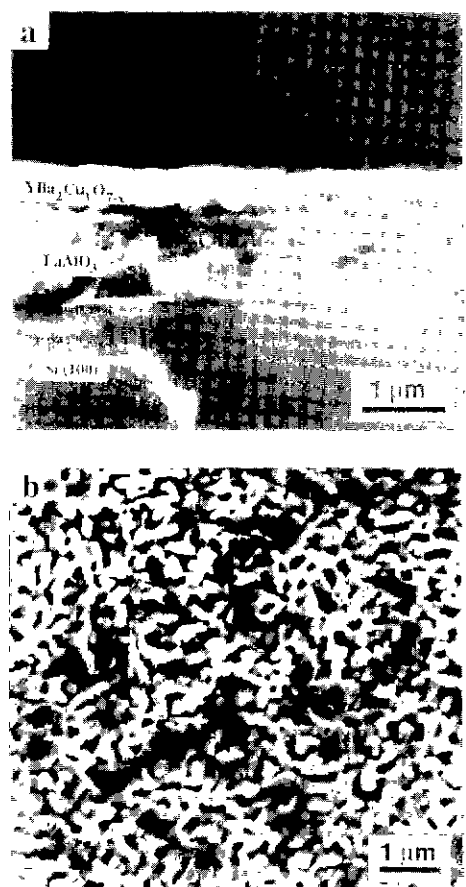


Fig. 10 Scanning electron micrographs showing a multi-layered structure of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin film/ LaAlO_3 buffer layer/ $\text{Si}(100)$ substrate.
(a) Cross-section and (b) surface morphology of the top layer.

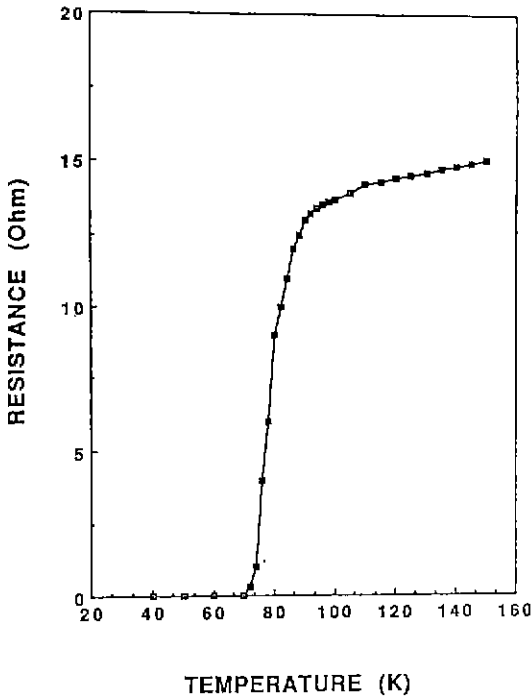


Fig. 11 Resistance vs. temperature curve for $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films on Si(100) with $LaAlO_3$ buffer layer.

있음을 알 수 있다. 이는 $LaAlO_3$ 버퍼층의 표면 미세조각에서(Fig.9(b)) 알 수 있듯이 버퍼층이 다결정질이기 때문인 것으로 여겨진다. 이 다층박막의 단면과 표면의 미세조각을 주사전자현미경으로 관찰하여 Fig.10에 나타내었다. Fig.10(a)에서 보면 Si(100) 기판위에 $1\mu m$ 의 두께의 $LaAlO_3$ 버퍼층이 균일하게 증착되어 있고, 그 위에 다시 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 고온 초전도 박막이 $0.6\mu m$ 의 두께로 증착되어 있는 다층구조를 얻었음을 알 수 있다. 표면층인 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 고온초전도 박막의 온도-저항 특성은 Fig.11와 같은데 $T_{c,on-set}$ 은 90 K, $T_{c,zero}$ 는 70 K임을 알 수 있다. 이와같이 $T_{c,zero}$ 가 $YBa_2Cu_3O_{7-x}/MgO(100)$ 박막의 $T_{c,zero}$ 보다 10 K 정도 낮은 이유는 열처리시 $LaAlO_3$ 버퍼층의 미세균열을 통한 Si의 확산에 기인한 것으로 여겨진다.

4. 결론

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 고온초전도 박막을 single-target off

-axis RF magnetron sputtering 방법으로 제조하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Y : Ba : Cu의 화학조성비가 1 : 2 : 3인 박막을 얻기 위한 sputtering target의 최적조성비는 1 : 1.65 : 3.35이었다.
- 2) $MgO(100)$ 단결정 기판위에 제조된 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 고온초전도 박막은 c축 방향으로 배향되어 있었으며, $T_{c,on-set}$ 은 90 K이고 $T_{c,zero}$ 는 80 K로 측정되었다.
- 3) $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 박막의 기판제대로 적합하다고 알려진 $LaAlO_3$ 박막을 Si 기판상에 증착시키고 다시 이 위에 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 박막을 증착시켜, $YBa_2Cu_3O_{7-x}/LaAlO_3/Si(100)$ 의 다층구조를 가지는 고온초전도 다층박막을 제조하였다.
- 4) $LaAlO_3$ 의 버퍼층을 갖는 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 고온초전도 다층박막의 $T_{c,on-set}$ 은 90 K이고 $T_{c,zero}$ 는 70 K로 측정되었다.

[감사의 글]

본 연구는 1989년도 과학기술처 특정연구개발사업비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. D.D. Berkley, B.R. Johnson, N. Anand, K.M. Beauchamp, L.E. Conroy, A.M. Goldman, J. Maps, K. Mauersberger, M.L. Mecartney, J. Morton, M. Tuominen, and Y-J. Zha, "In Situ Formation of Superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films using Pure Ozone Vapor Oxidation," *Appl. Phys. Lett.*, **53** (20) 1973-75 (1988).
2. A. Mogro-Campero, L.G. Turner, E.L. Hall, M.F. Garbaskas, and N. Lewis, "Epitaxial Growth and Critical Current Density of Thin Films of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ on $LaAlO_3$ Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (26) 2719-21 (1989).
3. X.K. Wang, D.X. Li, D.Q. Li, Y.P. Lu, S.N. Song, Y.H. Shen, J.Q. Zheng, R.P.H. Chang, J.B. Ketterson, J.M. Chabala, D. Hansley, and R. Levi-Setti, "Superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films with Three Different Orientations," *J. Appl. Phys.*, **67** (9) 4217-20 (1990).

4. P. Berberich, J. Tate, W. Dietsche, and H. Kinder, "Low-Temperature Preparation of Superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Films on Si, MgO, and SrTiO_3 by Thermal Coevaporation," *Appl. Phys. Lett.*, **53** (10) 925-26 (1988).
5. R. Feenstra, L.A. Boatner, J.D. Budai, D.K. Christen, M.D. Galloway, and D.B. Poker, "Epitaxial Superconducting Thin Films of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ on KTaO_3 Single Crystals," *Appl. Phys. Lett.*, (11) 1063-65 (1989).
6. C.B. Eom, J.Z. Sun, K. Yamamoto, A.F. Marshall, K.E. Luter, and Y.H. Geballe, "In situ Grown $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Thin Films from Single-Target Magnetron Sputtering," *Appl. Phys. Lett.*, **55** (6) 595-97 (1989).
7. Y. Kageyama and Y. Taga, "Effect of a Declination Angle of Substrate Position on Magnetron Sputter Deposition from a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Target," *Appl. Phys. Lett.*, **55** (10) 1035-37 (1989).
8. F.E. Luborsky, R.F. Kwasnick, K. Borst, M. F. Garbaskas, E.L. Hall, and M.J. Curran, "Reproducible Sputtering and Properties of Y-Ba-Cu-O Films of Various Thicknesses," *J. Appl. Phys.*, **64** (11) 6388-91 (1988).
9. M. Muroi, Y. Okamura, T. Suzuki, K. Tsuda, M. Nagano, and K. Mukae, "Sputter Deposition of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Thin Films with Low Gas Pressure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1) 69-73 (1990).
10. A. Irie, M. Era, T. Yamashita, H. Kurosawa, H. Yamane, and T. Hirai, "YBCO DC SQUID of MOCVD Thin Film Bridge," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (10) L1816-19 (1989).
11. J. Zhao, D.W. Noh, C. Chern, Y.Q. Li, P. Norris, B. Gallois, and B. Kear, "Low-Temperature in-situ Formation of Y-Ba-Cu-O High Tc Superconducting Thin Films by Plasma-Enhanced Metalorganic Chemical Vapor Deposition," *Appl. Phys. Lett.*, **56** (23) 2342-44 (1990).
12. J. Kwok, M. Hong, D.J. Trevor, R.M. Fleming, A.E. White, R.C. Farrow, A.R. Kortan, and K.T. Short, "In situ Epitaxial Growth of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Films by Molecular Beam Epitaxy with an Activated Oxygen Source," *Appl. Phys. Lett.*, **53** (26) 2683-85 (1988).
13. A. Schuhl, R. Cabanel, S. Lequien, B. Ghyselen, S. Tyc, G. Creuzet, and J. Siejka, "Atomic Layer by Atomic Layer Growth of DyBaCuO Superconducting Thin Films by Molecular Beam Epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, **57** (8) 819-21 (1990).
14. D. Dijkkamp, T. Venkatesan, X.D. Wu, S.A. Shaheen, N. Jisrawi, Y.H. Min-Lee, W.L. McLean, and M. Croft, "Preparation of Y-Ba-Cu Oxide Superconductor Thin Films using Pulsed Laser Evaporation from High T_c Bulk Material," *Appl. Phys. Lett.*, **52** (8) 619-21 (1987).
15. S. Witanachchi, H.S. Kwok, X.W. Wang, and D.T. Shaw, "Deposition of Superconducting Y-Ba-Cu-O Films at 400°C without Post-Annealing," *Appl. Phys. Lett.*, **53** (3) 234-36 (1988).
16. T. Venkatesan, X.D. Wu, A. Inam, C.C. Chang, M.S. Hedge, and B. Dutta, "Laser Processing of High- T_c Superconducting Thin Films," *IEEE J. Quantum Electronics*, **25** (11) 2388-93 (1989).
17. T. Venkatesan, A. Inam, B. Dutta, R. Ramesh, M.S. Hegde, X.D. Wu, L. Nazar, C.C. Chang, J.B. Barner, D.M. Hwang, and C.T. Rogers, "Epitaxial $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{Y}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ Heterostructures," *Appl. Phys. Lett.*, **56** (4) 391-93 (1990).
18. 성건용, 강광용, 유형준, 박신중, "고온초전도 박막 제조를 위한 재료과학적 고찰," 요업 재료의 과학과 기술, **4** (3,4) 143-56 (1989).
19. R.W. Simon, C.E. Platt, S.E. Lee, G.S. Lee, K.P. Daly, M.S. Wire, J.A. Luine, and M. Urbanik, "Low-Loss Substrate for Epitaxial Growth of High-Temperature Superconductor Thin Films," *Appl. Phys. Lett.*, **53** (26) 2677-79 (1988).

20. G. Koren, A. Gupta, E.A. Giess, A. Segmuller, and R.B. Laibowitz, "Epitaxial Films of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ on $NdGaO_3$, and $SrTiO_3$ Substrates Deposited by Laser Ablation," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (11) 1054-56 (1989).
21. A. Mogro-Campero, L.G. Turner, E.L. Hall, M.F. Garbaskas, and N. Lewis, "Epitaxial Growth and Critical Current Density of Thin Films of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ on $LaAlO_3$ Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (26) 2719-21 (1989).
22. A. Hohier, D. Guggi, H. Neeb, and C. Heiden, "Fully Textured Growth of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Films by Sputtering on $LiNbO_3$ Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (11) 1066-67 (1989).
23. S.G. Lee, G. Koren, A. Gupta, A. Segmuller, and C.C. Chi, "Epitaxial Growth of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films on $LiNbO_3$ Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **55** (12) 1261-63 (1989).
24. R. Ramesh, A. Inam, W.A. Bonner, P. England, B.J. Wilkens, B.J. Meagher, L. Nazar, X.D. Wu, M.S. Hegde, C.C. Chang, and T. Venkatesan, "Ferrimagnetic Rare-Earth Orthoferrites: A New Magnetic Substrate for the Growth of Epitaxial Y-Ba-Cu-O Thin Films," *Appl. Phys. Lett.*, **55** (11) 1138-40 (1989).
25. K. Mizuno, M. Miyauchi, K. Setsune, and K. Wasa, "Low-Temperature Deposition of Y-Ba-Cu-O Films on $CaF_2/GaAs$ Substrate," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (4) 383-85 (1989).
26. M. Migliuolo, A.K. Stamper, D.W. Greve, and T.E. Schlesinger, "Single Target Sputtering of Superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films on Si (100)," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (9) 859-61 (1989).
27. X.D. Wu, A. Inam, M.S. Hegde, B. Wilkens, C.C. Chang, D.M. Hwang, L. Nazar, T. Venkatesan, S. Miura, S. Matsubara, Y. Miyasaka, and N. Shohata, "High Critical Currents in Epitaxial $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films on Silicon with Buffer Layers," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (8) 754-56 (1989).
28. T. Asano, K. Tran, A.S. Byrne, M.M. Rahman, C.Y. Yang, and J.D. Reardon, "Interface Analysis of Y-Ba-Cu-O Films on Al-Coated Si Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (13) 1275-77 (1989).
29. F. Radpour, R. Singh, S. Sinha, A.M. Tulpule, P. Chou, R.P.S. Thakur, M. Rahmati, N.J. Hsu, and A. Kumar, "Preparation of Y-Ba-Cu-O Superconducting Thin Films Using BaF_2 as a Buffer Layer," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (24) 2479-80 (1989).
30. G.Y. Sung, K.Y. Kang, and S.C. Park, "Synthesis and Preparation of Lanthanum Aluminate Target for Radio-Frequency Magnetron Sputtering," *J. Am. Ceram. Soc.*, **74** (2) 437-39 (1991).
31. A. Ishizaka and Y. Shiraki, "Low Temperature Surface Cleaning of Silicon and Its Application to Silicon MBE," *J. Electrochem. Soc.*, **133**, 666-71 (1986).
32. G.Y. Sung and J.D. Suh, "Preparation of $LaAlO_3$ Thin Films by RF Magnetron Sputtering," (in preparation).