

평면배향된 a-축 수직 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 고온초전도 박막의 제작

성건용 · 서정대

한국전자통신연구소

기초기술연구부

(1995년 12월 6일 접수)

Fabrication of the In-plane Aligned a-Axis Oriented $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films

Gun Yong Sung and Jeong Dae Suh

Research Dept., Electronics and Telecommunications Research Institute

(Received December 6, 1995)

요 약

308 nm 파장의 엑시머레이저를 이용하여 $LaSrGaO_4$ (100) 기판위에 $PrBa_2Cu_3O_{7-x}$ (PBCO) 밀틀층을 먼저 증착하고 그 위에 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) 박막을 증착하는 2단계 펄스 레이저 증착법으로 평면배향된 a-축 수직배향 YBCO (a-YBCO) 박막을 제작하였다. 저온 YBCO 밀틀층과 PBCO 밀틀층의 증착온도에 따른 밀틀층 자체의 수직배향 특성과 그 위에 증착된 YBCO 박막의 수직배향 정도, $T_{c,zero}$ (영저항온도), 평면배향, 결정성의 변화를 조사하여, 평면배향된 a-YBCO 박막의 증착조건을 최적화하였다. PBCO 밀틀층의 최적 증착온도는 630°C이었고, 평면배향 a-YBCO 박막의 비저항의 이방성비는 275 K에서 11.5로 단결정에 비해 매우 작았으며, $T_{c,zero}$ 는 88 K이었다.

ABSTRACT

We have fabricated an in-plane aligned a-axis oriented $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (a-YBCO) thin film on a $LaSrGaO_4$ (100) substrate with a $PrBa_2Cu_3O_{7-x}$ (PBCO) template layer by two step pulsed laser deposition using 308 nm XeCl excimer laser. A YBCO layer and PBCO layer grown at low temperatures were used as template layers. We have investigated the effect of the deposition temperature of template layers on the superconducting and structural properties of in-plane aligned a-YBCO thin films. An optimal deposition temperature of the PBCO template layers was 630. In-plane aligned a-YBCO thin films showed an anisotropy ratio in resistivity of 11.5 and a zero resistance temperature of 88 K.

Key words: High temperature superconducting thin films, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $PrBa_2Cu_3O_{7-x}$, Pulsed laser deposition, In-plane alignment

1. 서 론

1986년에 Bednorz와 Muller에 의해 구리계 산화물에서 처음으로 초전도 현상이 발견된 이래로 현재까지 수십종에 이르는 구리를 근간으로 하는 고온초전도체가 개발되었다. 이 중 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) 산화물은 전자 소자 응용에 가장 적합한 물질로 알려져 있다. c-축이 기판에 수직하게 배향된 YBCO(c-YBCO) 박막은 비교적 간단한 증착공정에 의해 제작 가능하고, 10^6 A/cm² 이상의 임계전류밀도와 90 K 이상의 임계 전이온도를 가지므로 마이크로웨이브용 소자나 모서리 접합형 조셉슨

소자등에 널리 사용되고 있다¹⁻³⁾. 한편, 조셉슨 접합에서 비초전도 층의 두께를 결정하는 가간섭 길이(coherence length)는 고온초전도체의 경우 이방성을 나타내는데, YBCO의 CuO_2 면에 수직인 c-축 방향의 가간섭 길이는 0.2~0.7 nm이고 CuO_2 면상에 놓이는 a-축이나 b-축 방향의 가간섭 길이는 1.3~3.4 nm로 알려져 있다. 따라서 a-축이나 b-축이 기판에 수직인 YBCO(a, b-YBCO) 박막이 c-YBCO 박막에 비해 10배 정도 큰 가간섭 길이를 갖게 되므로, a-YBCO 박막의 성장은 평면형 조셉슨접합 제작에서 매우 중요한 문제가 된다. 이러한 a-YBCO 박막은 c-YBCO 박막보다 낮은 증착온도⁴⁻⁶⁾나, 높은 산소

압⁷⁾하에서 성장가능하지만, 영 저항온도($T_{c,zero}$, zero resistance temperature)가 70~80 K로 c-YBCO 박막에 비해 10 K 내지 20 K가 낮은 박막이 얻어진다. 높은 $T_{c,zero}$ 를 가지는 a-YBCO 박막을 얻기 위해서는 a-YBCO 박막과의 격자부정합, 열팽창 계수등이 적당한 $NdGaO_3(110)$ 기판⁶⁾, $CeO_2(110)$ 밀틀층(template layer)이 증착된 Si 기판⁹⁾, $PrBa_2Cu_3O_{7-x}(PBCO)$ 밀틀층이 증착된 $SrTiO_3(STO)(100)$ 기판¹⁰⁻¹²⁾, 그리고 PBCO 밀틀층이 증착된 $LaSrGaO_4(LSGO)(100)$ 기판¹³⁻¹⁶⁾ 등을 사용하여야만 한다.

Inam등¹⁰⁾은 a-축 수직 YBCO 박막의 $T_{c,zero}$ 를 높이기 위해 STO(100) 기판에 PBCO 박막을 밀틀층으로 사용하여, 83 K의 $T_{c,zero}$ 를 갖는 a-YBCO 박막을 제작하였다. 그러나 이 박막은 c-축이 기판 표면에 평행하면서 서로 직교하는 두방향으로 배향된 입자들로 이루어져 있어서 이 입자간에 쌍정 경계(twin boundary)가 존재한다. 이러한 쌍정 경계는 각 입자의 CuO_2 면이 이웃한 입자의 CuO_2 면과 90°를 이루는 90° 입계이며 이 입계가 a-YBCO 박막의 $T_{c,zero}$ 를 c-YBCO 박막보다 낮게 하는 원인이 된다. 쌍정의 형성은 a-YBCO와 STO(100) 기판간의 격자 부정합과 열팽창 계수 차이로 인한 응력에 기인한다고 알려져 있다^{17,18)}.

최근에, a-YBCO 박막과 열팽창계수가 거의 같은 LSGO(100) 기판을 사용하여 $T_{c,zero}$ 가 90 K 급인 평면배향된(plane aligned) a-YBCO 박막들이 제작되었다¹³⁻¹⁶⁾. 평면배향된 a-YBCO 박막은 a-축은 기판 표면에 수직하고 b, c-축은 각각 기판의 a, c-축에 평행하게 한방향으로만 정렬된 것으로 쌍정이 존재하지 않는 단결정 박막을 의미한다. 이 박막은 앞으로 발전될 고온초전도 디지털 소자에서 매우 중요한 역할을 하게 되므로 평면배향된 a-YBCO 박막 성장기술에 대한 많은 이해가 있어야 하는데, 현재까지의 연구결과는 매우 제한되어 있다. 따라서 본 연구에서는 LSGO(100) 기판상에 308 nm 파장의 엑시머레이저를 이용하여 밀틀층을 저온에서 먼저 증착하고 그 위에 YBCO 박막을 증착하는 2단계 펄스 레이저 증착법으로 a-YBCO 박막을 제작하였다. 저온에서 증착된 YBCO(저온 YBCO) 밀틀층과 PBCO 밀틀층의 증착 온도에 따른 밀틀층 자체의 수직배향 특성과 그 위에 증착된 YBCO 박막의 수직배향 정도, $T_{c,zero}$, 평면배향, 결정성의 변화를 조사하여, 평면배향된 a-YBCO 박막의 증착조건을 최적화하였다.

2. 실험방법

평면배향된 a-YBCO 박막의 성장은 LSGO(100) 기판

상에 밀틀층과 YBCO 박막을 연속적으로 증착하는 2단계 증착법으로 행하였다. 먼저 기판을 기판가열기에 부착시킨 후 10^{-6} Torr의 고진공하에서 850°C까지 승온시켜 30분간 전열처리(pre-annealing)하여 기판 표면을 평탄화하고 불순물을 제거하였다. 전열처리 후, 기판온도를 PBCO 밀틀층 증착온도(600~650°C)까지 낮추어 밀틀층을 증착하였다. 이때 레이저의 에너지 밀도는 $1J/cm^2$, 반복율은 1 Hz이었고, 산소압은 100 mTorr였다. a-YBCO 박막은 밀틀층 증착 후 기판온도를 750°C로 승온하여 밀틀층과 같은 조건으로 증착되었다. 증착시 모든 온도는 기판 가열기 내부에 삽입된 열전대로 측정된 온도로 정하였다. 2단계 증착 직후 산소압을 500 Torr로 승압시키고 500°C까지 급냉한 후 이 온도에서 한시간동안 후열처리하고 상온까지 자연냉각하였다.

증착된 박막의 수직배향성, 평면배향성, 결정성등을 θ -2 θ scan, ϕ -scan, rocking curve등의 X-선 회절(XRD) 분석법과 RBS(Rutherford backscattering spectrometer)로 조사하였고, 표면형상은 주사전자현미경으로 관찰하였다. a-YBCO 박막의 온도-저항곡선은 4점접 직류측정법으로 얻었으며, ϕ -scan으로 확인된 박막의 평면상 방향인 [010]과 [001] 방향으로 각각 측정하여 비저항의 이방성을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 저온 YBCO 자체 밀틀층

먼저 a-YBCO 박막 증착을 위한 밀틀층으로 저온 증착된 YBCO 박막을 사용하기 위하여 저온 YBCO 박막의 증착온도와 증착시 산소압을 변화시켜 밀틀층으로서의 적용가능성을 타진하였다. LSGO(100) 기판상에 620, 640, 670°C에서 각각 증착된 100 nm 두께의 저온 YBCO 밀틀층 위에 750°C에서 재증착된 300 nm 두께의 YBCO 박막은 Fig. 1과 같은 온도-저항 곡선을 보였고, XRD θ -2 θ scan 패턴은 Fig. 2와 같았다. 이 결과는 YBCO 박막은 모두 c-축이 기판에 수직한 c-YBCO 박막으로 성장되었음을 보여준다. 온도-저항 특성도 c-YBCO 박막의 전형적인 특성을 나타내고 있다. 이러한 결과는 Mukaida¹³⁾ 등이 보고한 a-YBCO 박막과는 다른 것인데, 그 원인으로서는 증착시 사용된 엑시머 레이저의 파장이 본 실험보다 짧으며, 산소압이 400 mTorr로 본 실험의 100 mTorr보다 높다는 차이가 있다. a-YBCO의 핵형성 조건은 과포화도, 각 원자들의 운동에너지 등이 중요한 변수이므로, 증착시스템과 증착조건에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 본 연구의 저온 YBCO 박막 증착조건은 Mukaida의 결과와는 달리 c-YBCO 박막 성장조건으로 판명되어,

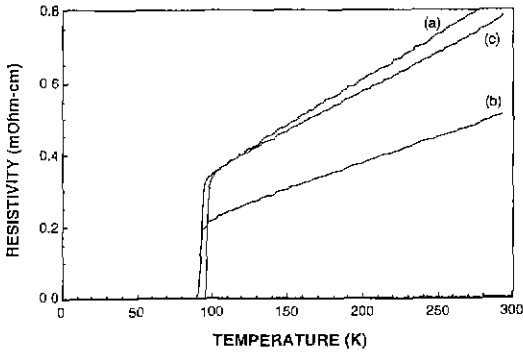


Fig. 1. Resistance-temperature characteristics of YBCO thin films on the low temperature YBCO template layers. The template layers were deposited at (a) 620°C, (b) 640°C, and (c) 670°C.

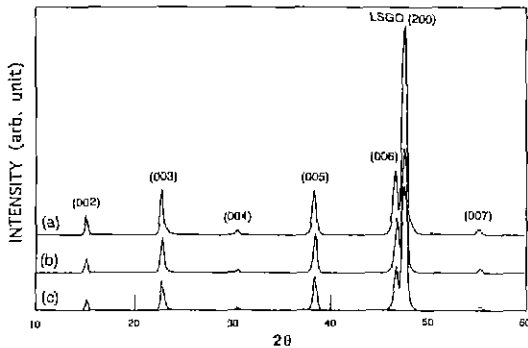


Fig. 2. XRD θ - 2θ scan patterns of YBCO thin films on the low temperature YBCO template layers. The template layers were deposited at (a) 620°C, (b) 640°C, and (c) 670°C.

밀틀층으로 저온 YBCO 박막은 부적합하다는 결론을 내리게 되었다.

640°C에서 증착된 저온 YBCO 밀틀층위에 증착된 c-YBCO 박막의 XRD ϕ -scan 패턴, rocking curve, RBS 분석등의 결과를 Fig. 3~5에 나타내었다. ϕ -scan 패턴으로부터 c-YBCO 박막은 100% 평면배향된 것을 알 수 있으며, rocking curve의 FWHM 값은 0.870으로 결정성이 양호한 편이었다. 그러나 RBS 분석 결과는 χ_{min} 이 90%로 결정성이 매우 나쁘게 나타났는데, 그 이유는 저온 YBCO 밀틀층과 그 위에 증착된 c-YBCO 박막간의 계면이 평탄치 않아서 RBS 분석시 주사된 He 이온이 계면에서 후방산란되어 χ_{min} 값이 크게 나타난 것으로 보여진다. 이상의 분석결과로 부터 c-YBCO 박막은 평면배향은 잘 되어있으나, 박막내에 많은 결함이 존재하고 있는 것으로 생각된다.

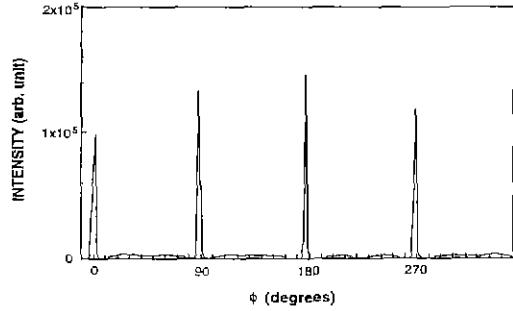


Fig. 3. XRD ϕ -scan pattern for the (103) plane of YBCO thin film on the low temperature YBCO template layer deposited at 640°C.

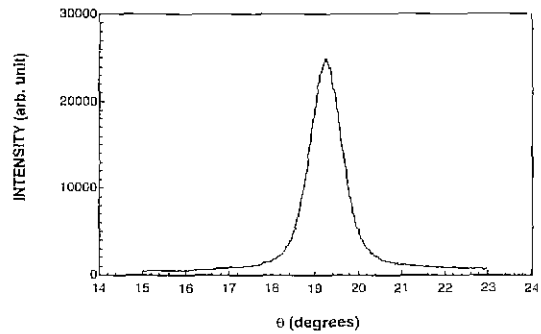


Fig. 4. XRD rocking curve for the (005) plane of YBCO thin film on the low temperature YBCO template layer deposited at 640°C.

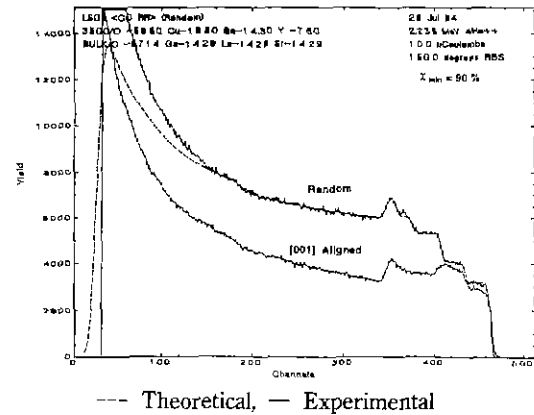


Fig. 5. RBS spectrum of YBCO thin film on the low temperature YBCO template layer deposited at 640°C.

3.2. PBCO 박막의 증착온도 의존성

저온 YBCO 박막 대신 PBCO 박막을 밀틀층으로 사용하기 위하여 증착온도에 따른 PBCO 박막의 배향방

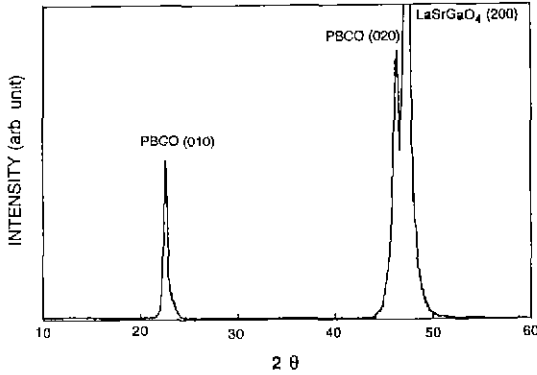


Fig. 6. XRD θ - 2θ scan pattern of PBCO thin films deposited at 640 on LSGO (100) substrate.

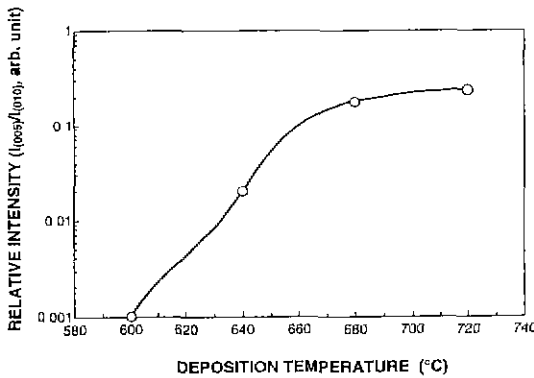


Fig. 7. Variation of the relative intensity of $I_{(005)}/I_{(010)}$ for PBCO thin films on LSGO (100) substrate as a function of deposition temperature.

위와 격자상수를 조사하였다. PBCO 밀틀층의 증착온도를 600°C에서 720°C까지 변화시켜 증착온도에 따른 두께 100 nm인 PBCO 밀틀층의 배향성 변화를 XRD θ - 2θ scan으로 조사하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 PBCO 박막은 (010)면이 기판에 평행하게 배향되어 b-축이 기판에 수직인 b-PBCO 박막이었다. PBCO 박막이 b-축으로 수직하게 배향되는 이유는 LSGO(100) 기판의 a-축 격자상수($a=0.3843$ nm, $c=1.2681$ nm)와 PBCO의 a-축 격자상수($a=0.387$ nm, $b=0.3934$ nm, $c=1.173$ nm)가 거의 일치하여 PBCO의 a-축은 기판의 a-축과 평행을 이루며 늘어져서 결과적으로 b-축이 기판에 수직하게 배향된다고 생각된다. 뿐만 아니라, b-PBCO 박막이 a-PBCO 박막보다 a-YBCO 박막 증착을 위한 밀틀층으로 더 적합하다. 왜냐하면, b-PBCO 박막 표면에 평행한 PBCO의 a-축과 c-축의 격자상수가 YBCO의 b-축과 c-축 격자상수($a=0.382$ nm, $b=0.388$ nm, $c=1.172$ nm)와 거

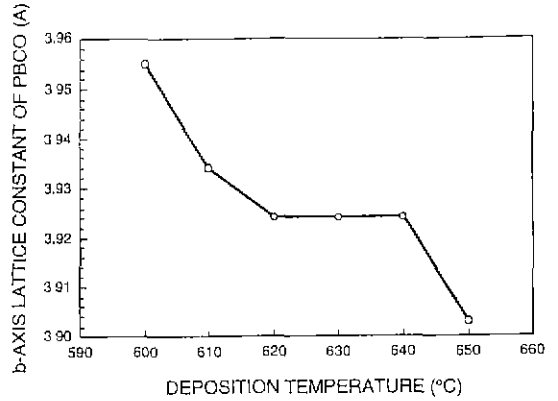


Fig. 8. Variation of the b-axis lattice constant of PBCO thin films on LSGO (100) substrate as a function of deposition temperature.

의 일치하기 때문이다. 따라서 LSGO(100) 상에 a-YBCO 박막을 증착시키기 위해서는 b-PBCO 박막을 밀틀층으로 사용하는 것이 매우 중요하다.

한편 c-축 수직성분을 나타내는 (005)면의 회절 peak 들을 정량적으로 비교하기 위하여 (010)면에 대한 (005)면의 회절 peak 상대강도($I_{(005)}/I_{(010)}$)를 계산하여 Fig. 7에 나타내었다. 이 상대강도는 600°C에서는 0.001로 가장 낮았고, 640°C일 때 0.020, 680°C일 때 0.179, 720°C일 때 0.238로 가장 높았다. 이러한 결과로 부터 b-PBCO 밀틀층의 증착온도는 600°C에서 640°C 사이가 적당함을 알 수 있었다.

이상의 실험결과로 부터 얻어진 PBCO 박막의 증착 온도 의존성을 보다 면밀히 조사하기 위하여, 600°C에서 650°C까지 10°C 간격으로 증착온도를 변화시켜 PBCO 박막의 특성을 조사하였다. 증착된 PBCO 박막의 XRD θ - 2θ scan 결과로 부터 b-축 격자상수를 구하여, 증착온도에 따른 격자상수의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 증착온도 증가에 따라 b-축 격자상수는 감소되다가 620°C에서 640°C까지의 온도구간에서는 0.3922~0.3924 nm 정도의 일정한 값을 갖으며, 650°C에서 다시 0.3903 nm로 감소되었다. 이는 증착후 냉각중에 발생하는 박막과 기판간의 열팽창계수 차이에 기인한 응력이 작용하여 각 증착온도별로 격자상수가 다르게 관찰되는 것으로 생각된다. PBCO에 대한 격자상수의 온도의존 특성에 관한 보고는 찾을 수 없으나 YBCO와 거의 유사할 것으로 가정하면, 온도 감소에 따라 사방정(tetragonal) PBCO의 a-축 격자상수가 단사정(orthorhombic) PBCO의 a-축과 b-축으로 전이될 때 a-축 격자상수는 급격한 감소를 거쳐 직선적으로 감소하고, b-축은 급격히 증가를 거쳐 직선

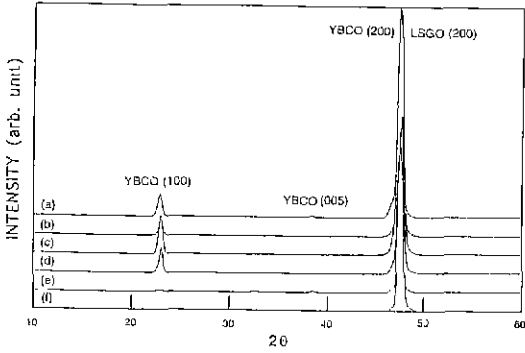


Fig. 9. XRD θ - 2θ scan patterns of 300 nm YBCO thin films on LSGO (100) substrate with 100 nm PBCO template layers. The template layers were deposited at (a) 650°C, (b) 640°C, (c) 630°C, (d) 620°C, (e) 610°C, and (f) 600°C.

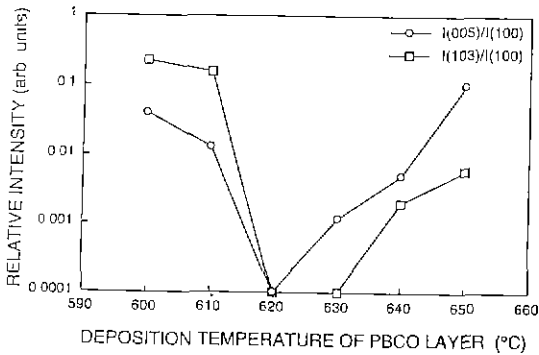


Fig. 10. Variation of the relative intensities of $I_{(005)}/I_{(100)}$ and $I_{(103)}/I_{(100)}$ for 300 nm YBCO thin films on LSGO (100) substrate with 100 nm PBCO template layers as a function of template deposition temperature.

적으로 감소될 것이다¹⁹⁾. 본 실험에서 조사한 PBCO 박막 증착온도 구간은 시방정-단사정 전이구간으로 격자상수가 온도에 따라 크게 변하는 영역이므로 열팽창계수 차이에 의한 응력변형의 효과가 크게 나타나서 PBCO 박막의 격자상수를 변화시킨 것으로 보여진다.

3.3. a-YBCO 박막의 PBCO 밀틀층 증착온도 의존성

평면배향 a-YBCO 박막을 얻기 위하여 PBCO 밀틀층의 증착온도를 600~650°C까지 10°C 간격으로 변화시키면서 a-YBCO 박막의 특성을 조사하였다. PBCO 밀틀층의 증착온도에 따른 a-YBCO 박막의 XRD θ - 2θ scan 패턴을 Fig. 9에 나타내었다. YBCO 박막의 a-축 배향성을

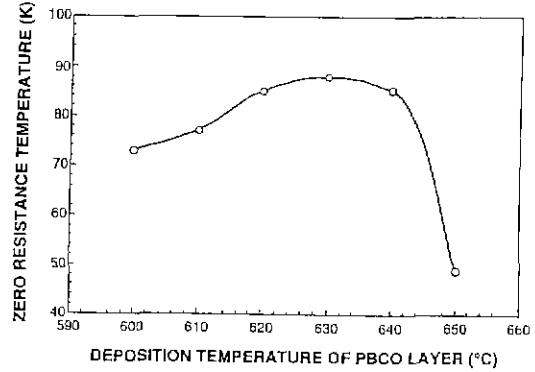


Fig. 11. Variation of $T_{c,zero}$ for 300 nm YBCO thin films on LSGO (100) substrate with 100 nm PBCO template layers as a function of template deposition temperature.

평가하기 위하여 YBCO의 (100)면에 대한 (005)면과 (103)면의 상대강도를 계산하여 Fig. 10에 나타내었다. (005)면과 (103)면의 상대강도는 620~630°C에서 최소값을 가지며 포물선적으로 변화하였다. 이상의 결과로부터, a-YBCO 박막은 PBCO 밀틀층 증착온도에 크게 의존하며, 이는 PBCO 밀틀층의 격자상수, 표면상태, 두께 등이 그 위에 증착되는 YBCO 박막의 결정배향성에 영향을 주는 중요한 변수임을 알았다.

한편, 위 시료들의 온도-저항 특성을 측정하여 PBCO 밀틀층 증착온도에 따른 a-YBCO 박막의 $T_{c,zero}$ 를 Fig. 11에 나타내었다. PBCO 밀틀층 증착온도 증가에 따라 $T_{c,zero}$ 는 630°C에서 최대값인 88 K를 가지며 포물선적으로 변화하였다. PBCO 밀틀층 증착온도에 따른 a-YBCO 박막의 XRD 결과와 $T_{c,zero}$ 결과는 서로 잘 일치되는 것으로, PBCO 밀틀층의 최적 증착온도 구간은 620~640°C임을 보여주었다.

3.4. a-YBCO 박막의 평면배향성

PBCO 밀틀층의 최적 증착온도 구간인 620~640°C에서 증착된 PBCO 밀틀층을 사용한 a-YBCO 박막의 표면형상, 평면배향성, 결정성, 비저항의 이방성등을 조사하여 평면배향된 a-YBCO 박막의 최적증착조건을 결정하였다.

Fig. 12는 a-YBCO 박막의 표면형상을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 여기서 알 수 있듯이 630°C에서 증착된 PBCO 밀틀층위에 증착된 a-YBCO 박막의 표면이 가장 평탄하고 균질하였다. 반면에 620°C 시료의 경우(Fig. 12(a))에는 미세한 크기의 outgrowth가 관찰되며, 640°C 시료의 경우(Fig. 12(c), (d)) 다른 texturing을 보

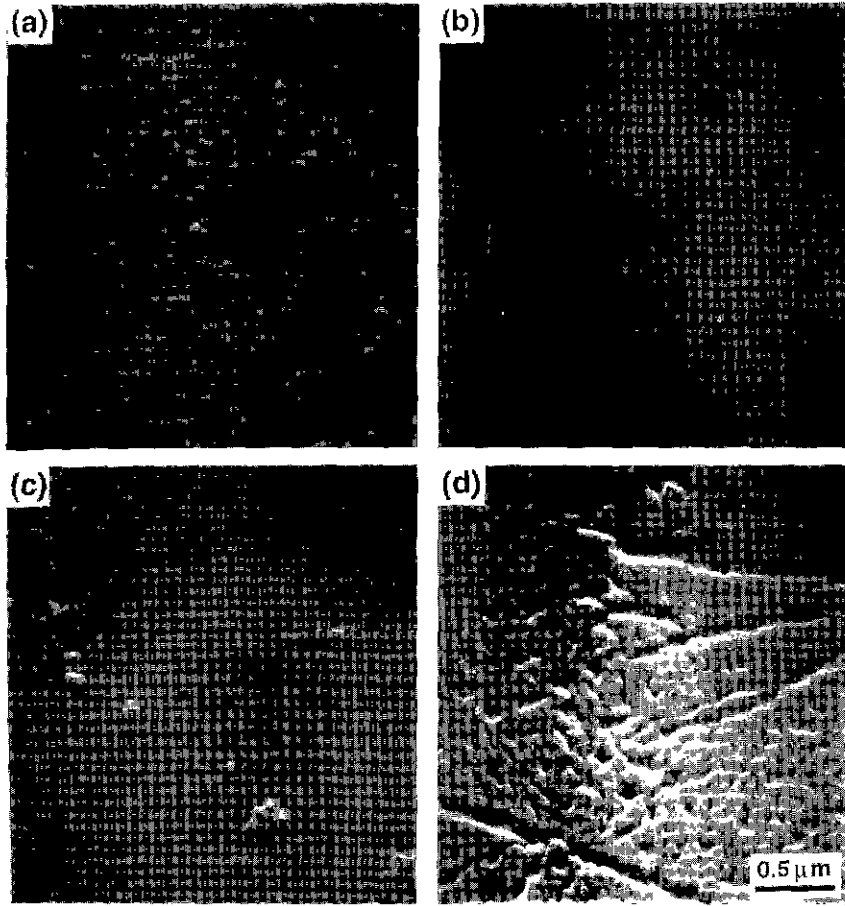


Fig. 12. Scanning electron micrographs for the surface of 300 nm YBCO thin films on LSGO (100) substrate with 100 nm PBCO template layers. The template layers were deposited at (a) 620°C, (b) 630°C, and (c), (d) 640°C.

이는 입자들이 분포된 분극질한 표면형상이 관찰되었다.

a-YBCO 박막의 평면배향 정도를 알아보기 위하여, a-YBCO의 [100] 방향을 회전축으로 (102)면에 대한 XRD ϕ -scan을 하였다. YBCO 구조에서 (102)면은 2-회 회전 대칭이므로 YBCO 단결정에서 (102)면을 ϕ -scan할 경우 180°마다 회절 peak이 나타나게 된다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 PBCO 밀들층 증착온도가 630°C일 때 a-YBCO 박막의 평면배향성이 가장 높았다. 90°와 270°에서 관찰되는 약한 peak들은 a-YBCO 박막내부에 90° 입체들이 미량 존재함을 의미한다. 평면배향의 정도를 정량적으로 평가하기 위하여 ϕ -scan 패턴에서 180° peak에 대한 90° peak의 강도비를 계산해 본 결과, PBCO 밀들층 증착 온도가 630°C일 때 0.045로 최소값을 가졌다.

한편 평면배향된 a-YBCO 박막의 결정성을 알아보기

위하여 YBCO (100)면에 대한 XRD rocking curve를 측정하여 Fig. 14에 나타내었다. 여기에서도 PBCO 밀들층 증착온도가 630°C일 때 FWHM이 0.65로 최소값을 가졌다. RBS random channeling과 [100] aligned channeling간의 차이로부터 얻어지는 crystallinity(χ_{nm}) 값도 PBCO 밀들층 증착온도가 620, 630, 640°C일 때 39, 11.8, 70.6%로 변하여 630°C일 때 최소값을 가졌다.

이상의 XRD θ -2 θ scan, ω -scan, rocking curve, 주사 전자현미경, RBS, $T_{\text{c,zero}}$ 등의 분석결과, 평면배향된 a-YBCO 박막 성장을 위한 PBCO 밀들층의 최적 증착온도는 630°C로 결정되었다.

Fig. 15는 평면배향된 a-YBCO 박막의 온도-저항 곡선으로 [010] 방향으로 전류를 흘리면서 측정한 결과와 [001] 방향으로 측정한 결과를 함께 도시한 것이다. 두 방향에서 모두 $T_{\text{c,zero}}$ 는 88 K이었고, 정상상태의 온도-저

항 특성은 금속적인 거동을 보이고 있다. 비저항의 이방성비(anisotropy ratio in resistivity, ρ_c/ρ_b at $T=275$ K)는 11.5로 기존에 보고된 2~11¹³⁻¹⁵보다 큰 값을 가졌다. 참고로 쌍정이나 전혀 존재하지 않는 YBCO 단결정에서 측정된 비저항의 이방성비는 275 K에서 71로 박막의 경우보다 매우 큰 값을 가진다²⁰. 이러한 차이는 평면

배향된 박막내에도 많은 입체들이 존재함을 의미한다. 88 K의 $T_{c,0}$ 를 갖는 YBCO bulk 시료의 a-축 격자상수는 0.382 nm로 a-YBCO 박막보다 약간 작은 값을 갖는데, 이는 기판과 박막간의 격자부정합에 의한 응력변형에 기인한 것으로 여겨진다.

4. 결 론

평면배향 a-YBCO 박막을 PBCO 밀틀층이 증착된 LSGO (100) 기판위에 308 nm XeCl 엑시머 레이저를 이용하여 증착하였다. 저온 YBCO 박막은 a-YBCO 박막의 밀틀층으로 부적합하였다. PBCO 밀틀층은 b-축이 기판에 수직하게 배향되었으며 증착온도에 따라 b-축 격자상수와 배향분율이 변화하였다. 평면배향 a-YBCO

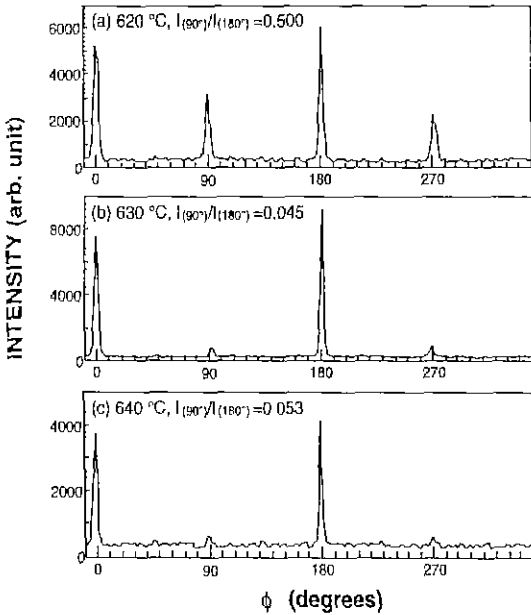


Fig. 13. XRD f-scan pattern for the (102) plane of 300 nm YBCO thin films on LSGO (100) substrate with 100 nm PBCO template layers. The template layers were deposited at (a) 620°C, (b) 630°C, and (c) 640°C.

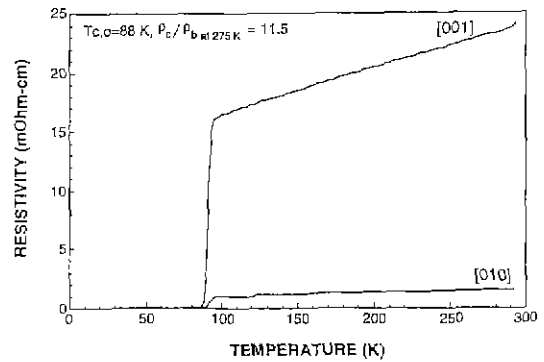


Fig. 15. Resistivity vs. temperature curves in the [010] and [001] directions of the in-plane aligned a-axis oriented YBCO thin films on the LSGO (100) substrate with 100 nm PBCO template layer deposited at 630°C.

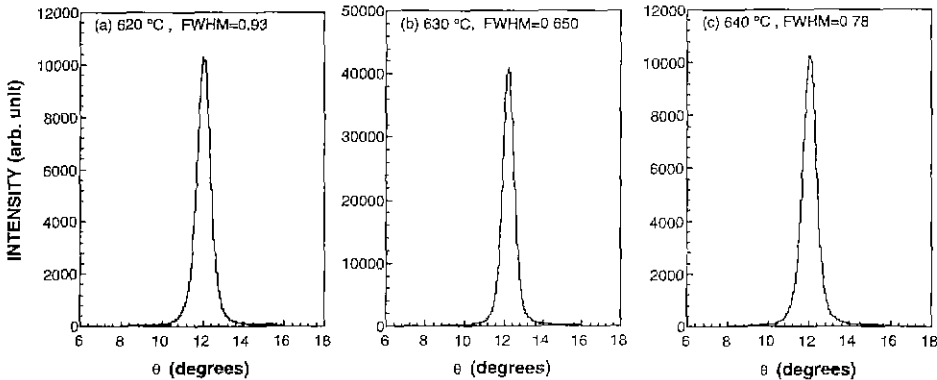


Fig. 14. XRD rocking curve for the (100) plane of 300 nm YBCO thin films on LSGO (100) substrate with 100 nm PBCO template layers. The template layers were deposited at (a) 620°C, (b) 630°C, and (c) 640°C.

박막 증착을 위한 PBCO 밀틀층의 증착온도는 630°C가 최적이었다. YBCO의 [100] 방향을 회전축으로 (102)면에 대한 ϕ -scan으로 평면배향을 확인하였다. 평면배향 a-YBCO 박막의 비저항의 이방성비는 275 K에서 11.5로 단결정에 비해 매우 작았으며, $T_{c,zero}$ 는 88 K이었다.

감사의 글

본 연구에 많은 도움을 준 이일항 박사께 감사드리며, 본 연구는 정보통신부의 연구비 지원에 의해 수행되었으므로 이에 감사의 뜻을 표합니다.

REFERENCES

- C.M. Chorney, K. Kong, K.B. Bhasin, J.D. Warner, and T. Itoh, "YBCO Superconducting Ring Resonator at Millimeter-Wave Frequencies," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, **39**, 1480-1487 (1991).
- W.G. Lyons, R.R. Bonetti, A.E. Williams, P.M. Mankiewicz, M.L. O'Malley, J.M. Hamm, A.C. Anderson, R.S. Withers, A. Meulenberg, and R.E. Howard, "High-Tc Superconductive Microwave Filters," *IEEE Trans. on Magnetics*, **27**, 2537-2539 (1991).
- K.Y. Kang, J.D. Suh, C.Y. Lee, G.Y. Sung, and D. Ahn, "Fabrication and Characterization of High-Tc Superconducting Bandpass Filter made on MgO and LaAlO₃," *Applied Superconductivity*, **1**(10-12), 1691-1698 (1993).
- C.B. Eom, A.F. Marshall, S.S. Laderman, R.D. Jacowitz, and T.H. Geballe, "Epitaxial and Smooth Films of a-Axis YBa₂Cu₃O_{7-x}," *Science*, **249**, 1549-1552 (1990).
- R. Ramesh, C.C. Chang, T.S. Ravi, D.M. Hwang, A. Inam, X.X. Xi, Q. Li, X.D. Wu, and T. Venkatesan, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1064 (1990).
- G.Y. Sung, J.D. Suh, K.Y. Kang, and J.Y. Lee, "Surface Morphology and Interface Structure of ex situ YBa₂Cu₃O_{7-x} Thin Films," *J. Mater. Sci. Lett.*, **14**, 124-128 (1995).
- T. Hase, H. Takahashi, H. Izumi, K. Ohata, K. Suzuki, T. Morishita, and S. Tanaka, "Epitaxial Growth of a-Axis Oriented Laser Deposited YBa₂Cu₃O_{7-x} Thin Films," *J. Cry. Growth*, **115**, 788-792 (1991).
- N. Homma, S. Okayama, H. Takahashi, I. Yoshida, T. Morishita, S. Tanaka, T. Haga, and K. Yamaya, "Crystallinity of a-Axis Oriented YBa₂Cu₃O_{7-x} Thin Film Epitaxially Grown on NdGaO₃ (110) by 95 MHz Magnetron Sputtering," *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 1383-1385 (1991).
- L. Luo, X.D. Wu, R.C. Dye, R.E. Muenchausen, S.R. Foltyn, Y. Coulter, C.J. Maggiore, and T. Inoue, "A-Axis Oriented YBa₂Cu₃O_{7-x} Thin Films on Si with CeO₂ Buffer Layers," *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2043-2045 (1991).
- A. Inam, C.T. Rogers, R. Ramesh, K. Remsching, L. Farrow, D. Hart, T. Venkatesan, and B. Wilkens, "A-Axis Oriented Epitaxial YBa₂Cu₃O_{7-x}-PrBa₂Cu₃O_{7-y} Heterostructures," *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 2484-2486 (1990).
- S. Hontsu, N. Mukai, J. Ishii, T. Kawai, and S. Kawai, "A-Axis Oriented Epitaxial YBa₂Cu₃O_{7-y}/-PrBa₂Cu_{3-x}Nb_xO_{7-z} Multistuctures," *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 1576-1578 (1993).
- G.Y. Sung and J.D. Suh, "Effect of Template Layers on the a-Axis Oriented YBa₂Cu₃O_{7-x} Thin Films using two step Pulsed Laser Deposition," *Physica*, **C235-240**, 601-602 (1994).
- S. Hontsu, N. Mukai, J. Ishii, T. Kawai, and S. Kawai, "A-Axis Oriented Growth of YBa₂Cu₃O_{7-x} Thin Films on LaSrGaO₄ (100) Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 1134-1136 (1992).
- M. Mukaida and S. Miyazawa, "In-plane alignment of a-Axis Oriented Growth of YBa₂Cu₃O_{7-x} Thin Films," *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 999-1001 (1993).
- Y. Suzuki, D. Lew, A.F. Marshall, M.R. Beasley, and T.H. Geballe, "Anisotropic Transport Properties of In-plane aligned a-Axis YBa₂Cu₃O_{7-x} Films," *Phys. Rev.*, **B48**, 10642-10645 (1993).
- G.Y. Sung and J.D. Suh, "Superconducting and Structural Properties of In-plane Aligned a-Axis Oriented YBa₂Cu₃O_{7-x} Thin Films," *Appl Phys Lett.*, **67**, 1145-1147 (1995).
- R. Ramesh, A. Inam, D.L. Hart, and C.T. Rogers, "Microstructure Studies of a-Axis Oriented YBa₂Cu₃O_{7-x}-PrBa₂Cu₃O_{7-y} Heterostructures," *Physica C*, **170**, 325-332 (1990).
- J.D. Suh and G.Y. Sung, "Thickness Dependence of Resistance-Temperature Characteristics of c-Axis and a-Axis Oriented YBa₂Cu₃O_{7-x} Ultrathin Films," *Physica C*, **252**, 54-60 (1995).
- D. Shi, K. Lahiri, J.R. Hull, D. LeBlanc, M.A.R. LeBlanc, A. Dabkowski, Y. Chang, Y. Jiang, Z. Zhang, and H. Fan, "Growth of Large-domain YBa₂Cu₃O_x with New Seeding Crystals of CaNdAlO₄ and SrLaGaO₄," *Physica C*, **246**, 253-261 (1995).
- T.A. Friedmann, M.W. Rabin, J. Giapintzakis, J.P. Rice, and D.M. Ginsberg, *Phys. Rev. B*, **42**, 6217 (1990).