

논문 99-8-2-15

CeO<sub>2</sub> 완충층의 두께가 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판 위에 성장된 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 박막의

## 초전도 특성에 미치는 영향

임해용<sup>\*\*\*</sup>, 김인선<sup>\*</sup>, 김동호<sup>\*\*</sup>, 박용기<sup>\*</sup>, 박종철<sup>\*</sup>Effect of CeO<sub>2</sub> buffer layer thickness on superconducting properties ofYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> films grown on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substratesHae-Ryong Lim<sup>\*\*\*</sup>, In-Seon Kim<sup>\*</sup>, Dong Ho Kim<sup>\*\*</sup>, Yong Ki Park<sup>\*</sup>,and Jong-Chul Park<sup>\*</sup>

## 요약

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (알루미나 및 R-면 사파이어)기판 위에 c-축 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO) 박막을 펄스레이저 증착법을 이용하여 성장하였다. 완충층으로 사용하기 위해 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판 위에 증착한 CeO<sub>2</sub> 박막의 결정성은 기판온도에 많은 영향을 받았다. CeO<sub>2</sub> 박막은 800 °C의 기판온도에서 a-축방향으로 잘 성장하였으며, CeO<sub>2</sub> 완충층의 두께에 따라 YBCO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막의 초전도 특성은 큰 변화를 나타내었다. 알루미나 기판 위에서 CeO<sub>2</sub> 완충층의 두께는 약 1200 Å 이하, 사파이어 기판의 경우 100~1000 Å 범위에서 YBCO 박막은 양호한 초전도 특성을 나타내었으나, 그 보다 두껍게 성장시킬 경우 초전도 특성이 급격하게 나빠졌다. 알루미나 기판 위에 성장된 YBCO 박막의 임계온도는 83 K였으며, R-면 사파이어 기판 위에 성장된 YBCO 박막의 임계온도는 ≥89.5 K였고, 임계전류밀도는 77 K에서 3×10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

## Abstract

C-axis oriented YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO) thin films were grown on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumina and R-plane sapphire) substrates by a pulsed laser deposition method. The crystallinity of the CeO<sub>2</sub> buffer layer on sapphire substrate exhibit a strong dependence on the deposition temperature, resulting in the growth of a-axis orientation at 800 °C. The superconducting properties of YBCO thin films on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates showed strong dependence on both thickness and crystallinity of the CeO<sub>2</sub> buffer layer. Critical temperature of YBCO film on alumina substrate was ~83 K. In the case of R-plane sapphire substrate,

## 1. 서론

조셉슨 접합을 이용한 소자나 마이크로파 소자 등

고온 초전도 박막을 이용한 전자소자는 임계전류밀도가 높은 양질의 박막을 요구한다. 따라서 여러 연구그룹에서 초전도 특성이 우수한 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO) 박막을 얻기 위하여 SrTiO<sub>3</sub> (STO), LaAlO<sub>3</sub>, MgO, YSZ, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등 단결정 기판을 사용하여 연구하고 있다. 최근에는 박막의 증착효율이 우수한 펄스레이저 증착법

\* 한국표준과학연구원 초전도그룹 (Superconductivity Group, Korea Research Institute of Standards and Science)

\*\* 영남대 물리학과 (Dept. of Physics, Yeungnam Univ.)  
<접수일자 : 1999년 2월 2일>

(Pulsed Laser Deposition, PLD)을 이용하여 고온 초전도 박막을 많이 성장시키고 있는데, 특히 유전상수가 낮고 유전손실이 적으며, 넓은 면적의 기판을 쉽게 얻을 수 있고 가격이 저렴한  $Al_2O_3$  기판을 많이 이용하고 있다. 그러나  $Al_2O_3$  기판은 고온 초전도 물질과 화학적인 반응으로 인하여 완충층을 사용해야만 하는데, 완충층의 조건으로는 기판과 증착물질간의 격자상수가 비슷해야하고, 확산장벽 역할을 해야한다. 또한 산화물 계통의 기판 위에 완충층은 2차원 성장이 필수적이며, 증착하려는 YBCO 물질이 에피택셜하게 성장하는데 도움을 주어야한다.  $Al_2O_3$  기판 위에 YBCO 박막을 성장시키기 위해 사용하는 완충층은  $STO^{11}$ ,  $Si^{12}$ ,  $MgO^{3,5)}$ ,  $YSZ^{5,10}$ ,  $CeO_2^{4,11,13)}$  등이 있으며, 이 중에서  $CeO_2$ 는 fluorite구조로 격자상수가  $a_0=5.41 \text{ \AA}$ 으로 YBCO 박막의  $a$ -축과  $b$ -축의 대각선길이에 대한 격자상수 오차가 약 0.5 %이다. 따라서 MgO (9 %), YSZ (6 %), STO (0.5 %) 등과 비교하여 상대적으로 격자상수 오차가 작기 때문에 완충층으로 많이 이용하고 있다.  $Al_2O_3$  기판은 다결정 (알루미나)과 단결정 (사파이어)기판을 사용하고 있는데, 알루미나 기판을 사용한 경우에는 주로 YSZ 완충층을 이용하였는데, Mogro-Campero 등은 YSZ 완충층의 두께가 9000  $\text{\AA}$  정도였고<sup>6)</sup>, Ganapathi 등은 YSZ 완충층을 증착한 후 표면을 열처리하여 YBCO 박막을 성장시켰다<sup>10)</sup>. 사파이어 기판은  $R$ -면과  $M$ -면을 사용하여 고온 초전도 박막을 제작하는데, Cole 등은  $M$ -면 사파이어 기판에는 MgO 박막을 완충층으로 사용하였고,  $R$ -면 사파이어 기판에서는  $CeO_2$  박막을 이용하였다<sup>4)</sup>. 최근에는 여러 연구그룹에서  $R$ -면 사파이어 기판으로 고온 초전도 박막을 성장시키고 있으며, YBCO 박막의 경우에 대한 전반적인 임계온도는 88~89 K였고, 임계전류밀도는  $\leq 1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 이었다. 또한, 다른 고온 초전도 산화물 즉,  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8^{14)}$ ,  $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8^{15,16)}$ ,  $EuBa_2Cu_3O_7^{17)}$  등에 대해서도  $Al_2O_3$  기판을 이용한 박막성장 연구가 많이 이루어지고 있다.

본 연구는  $CeO_2$  완충층을 사용하여 다결정인 알루미나 기판과 단결정인  $R$ -면 사파이어 기판 위에  $c$ -축 YBCO 박막을 펄스레이저 증착법으로 제작하여 그 특성을 비교하였다. 특히,  $CeO_2$  완충층의 두께 변화에 따라 성장된 YBCO 박막의 결정성 및 초전도특성을 평가하여 보았다.

## 2. 실험방법

$CeO_2$  박막과 YBCO 박막은 알루미나 기판과  $R$ -면 사파이어 기판 위에 펄스레이저 증착법을 이용하여 증착하였다. KrF 엑시머 레이저 (Lambda Physik Compex 205 :  $\lambda = 248 \text{ nm}$ )의 레이저 빔을 렌즈로 집광시켜 YBCO와  $CeO_2$  타겟에  $45^\circ$ 로 입사시켰으며, 기판과 타겟사이의 거리는 4 cm로 하였다. YBCO 박막의 증착에는 상용화된 고밀도 YBCO 타겟을 사용하였으며,  $CeO_2$  박막의 증착에는 1550  $^\circ\text{C}$ 에서 10 시간 소결하여 직접 제작한  $CeO_2$  타겟 (직경 2.5 cm, 두께 5 mm)을 사용하였다.  $CeO_2$  박막은 기판온도 300~800  $^\circ\text{C}$ , 산소분압 10~400 mTorr, 레이저 에너지밀도 1~3 J/cm<sup>2</sup>를 다양한 범위로 각각 변화시켜 최적의 증착조건을 얻었으며, YBCO 박막의 증착조건은 810  $^\circ\text{C}$ , 400 mTorr, 1.2 J/cm<sup>2</sup>로 일정하게 유지하였다<sup>18)</sup>. 이러한 조건에서의 YBCO 박막의 증착율은 2.5  $\text{\AA}/\text{pulse}$ 였고,  $CeO_2$  박막의 증착율은 1.4  $\text{\AA}/\text{pulse}$ 였으며, 레이저의 펄스 반복률은 3 Hz로 고정시켰다. 기판은 열전도도가 우수한 은 집착제를 사용하여 기판 홀더에 부착하였으며, 증착챔버의 기본압력을  $1 \times 10^{-5}$  Torr로 유지한 후, 기판온도가 소정의 온도에 도달하면 산소분압을 조절하여  $CeO_2$  완충층과 YBCO 박막을 *in-situ*방법으로 증착하였다. YBCO 박막을 증착한 후 산소 1기압, 500  $^\circ\text{C}$ 에서 1시간 동안 열처리하였다.

$CeO_2/Al_2O_3$  박막과 YBCO/ $CeO_2/Al_2O_3$  다층막의 결정성은 X선 회절분석 (XRD)으로 조사하였으며, YBCO 박막의 표면 morphology는 주사형 전자현미경 (SEM)으로 관찰하였다. 6 mm×6 mm 크기의 기판에 제작한 박막에 인디움 솔더링으로 리드선을 붙여 4단자법으로 전기적특성을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3. 1. $CeO_2$ 박막의 결정성

$Al_2O_3$  기판 위에 고품질의 YBCO 박막을 성장시키기 위해서는 완충층으로 사용하는  $CeO_2$  박막의 성장에 대한 제어가 매우 중요하다. 따라서 산소분압, 레이저 에너지밀도, 기판온도를 각각 변화시켜 가면서 증착한  $CeO_2$  박막의 결정성을 조사하였다. 그림 1은 알루미나 기판 위에 증착한  $CeO_2$  박막의 X선 회절분석 결과인데, 증착조건중에서 산소분압을 50 mTorr, 레이저에너

지 밀도를 1.5 J/cm<sup>2</sup>로 일정하게 유지하고 증착시의 기판온도를 500 °C ~ 800 °C로 변화시킨 것이다. 그림 1에서 기판온도를 변화시켰을 때, 알루미나 기판 위에 성장된 CeO<sub>2</sub> 박막의 피크는 기판온도에 따라서 많은 변화를 보였다. 이 중에서 기판온도가 500 °C인 경우에는 알루미나 기판 피크를 제외하면 (111) 피크만 나타났으며, (111) 피크의 강도는 기판온도가 증가함에 따라서 감소하는 경향을 보였다. 기판온도가 700 °C 이상인 경우 (111) 피크 외에 다른 피크도 나타났다. 특히 기판온도가 800 °C인 경우 CeO<sub>2</sub> 박막의 X선 피크는 (111), (200), (220), (311) 등이 관찰되어 다결정 방향의 결정성을 나타내었는데, 이는 기판온도가 높을수록 다결정인 알루미나 기판의 영향을 많이 받는 것으로 보여진다.

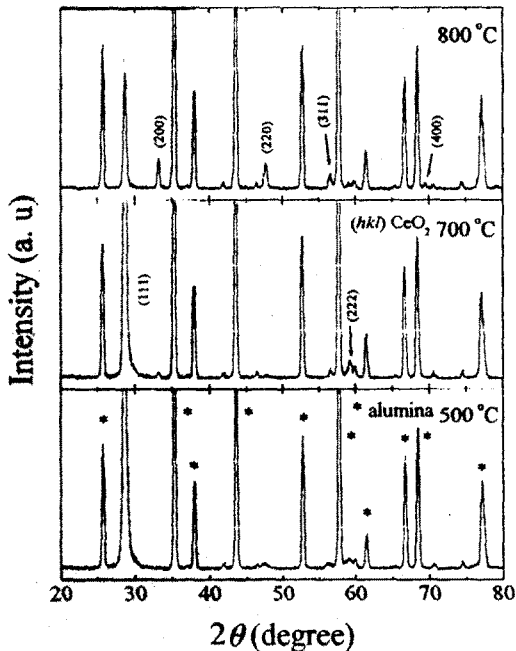


그림 1. 기판온도 500 °C, 700 °C, 800 °C에서 알루미나 기판 위에 두께 1200 Å으로 증착된 CeO<sub>2</sub> 박막의 XRD 패턴.

Fig. 1. XRD patterns of 1200 Å-thick CeO<sub>2</sub> thin films on alumina substrates deposited at 500 °C, 700 °C, and 800 °C.

그림 2는 R-면 사파이어 기판 위에 증착한 CeO<sub>2</sub> 박막의 X선 회절분석에 대한 결과인데, 증착조건은 알루미나 기판을 사용한 경우와 같았다. 단결정인 사파이어 기판 위에 성장한 CeO<sub>2</sub> 박막의 결정방향에 있어서는

(111)과 (200)방향의 피크만 주로 관찰되었다. 기판온도가 낮은 경우에는 (200) 피크보다 (111)피크의 강도가 상대적으로 높게 보였으나, 기판온도가 증가함에 따라서 (111)피크의 강도는 감소하였고, (200) 피크의 강도는 점차 증가하는 경향을 보였다. 특히, 기판온도가 800 °C일 때 (111)방향의 피크는 거의 나타나지 않았고 (200) 피크만 뚜렷하게 관찰되었는데, 이는 CeO<sub>2</sub> 박막이 a-축 방향으로만 잘 성장한 것을 보여주고 결과이다. 그리고, 기판온도의 변화에 따른 사파이어 기판 위에 CeO<sub>2</sub> 박막의 격자상수를 조사하였는데, 기판온도가 증가함에 따라서 격자상수가 낮아지는 경향을 보였다. 또한 기판온도가 650 °C 이상인 경우 CeO<sub>2</sub> 박막의 격자상수가 5.41 Å로 거의 일정하게 나타났는데, 이는 Michikami<sup>17)</sup>이 보고한 결과와 일치하였다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판 위에 완전한 a-축 방향의 CeO<sub>2</sub> 박막을 성장시키기 위한 조건은 산소분압 50 mTorr, 레이저 에너지밀도 1.5 J/cm<sup>2</sup>, 기판온도 800 °C임을 알 수 있었다.

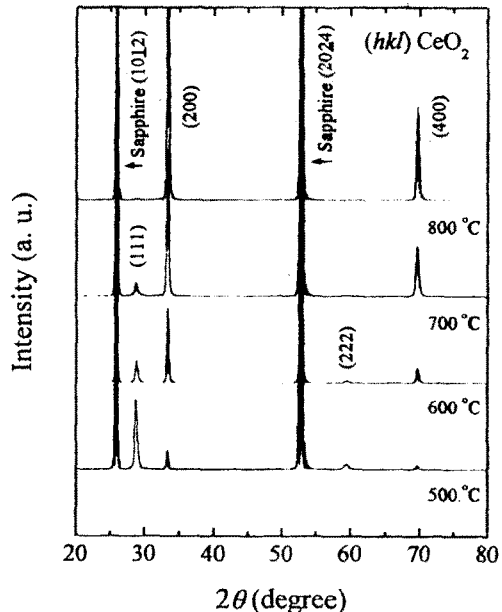


그림 2. 기판온도 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C에서 R-면 사파이어 기판 위에 두께 1200 Å으로 증착된 CeO<sub>2</sub> 박막의 XRD 패턴.

Fig. 2. XRD patterns of 1200 Å-thick CeO<sub>2</sub> thin films on R-plane sapphire substrates deposited at 500 °C, 600 °C, 700 °C, and 800 °C.

### 3. 2. YBCO 박막의 결정성 및 형성

그림 3은  $\text{CeO}_2$  박막을 최적의 성장조건 즉  $800^\circ\text{C}$ ,  $1.5 \text{ J/cm}^2$ ,  $50 \text{ mTorr}$ 으로 증착하고,  $\text{CeO}_2$  완충층이 있는 알루미늄 기판과 사파이어 기판 위에 증착한 YBCO 박막의 X선 회절패턴이다. 이 때 알루미늄 기판 위에 증착한  $\text{CeO}_2$  완충층의 두께는  $1000 \text{ \AA}$ 였으며, 사파이어 기판의 경우  $\text{CeO}_2$  완충층의 두께는  $500 \text{ \AA}$ 이었다. 그리고 완충층이 있는 두 종류의 기판 위에 증착한 YBCO 박막의 두께는  $2000 \text{ \AA}$ 으로 하였다.  $\text{CeO}_2$  완충층이 있는 알루미늄 기판과 사파이어 기판 위에 YBCO 박막의 X선 회절패턴에서 YBCO 박막의 (00l) 피크만 관찰되었는데, 이는 YBCO 박막이 c-축방향으로 잘 성장된 것을 보여주는 결과이다.

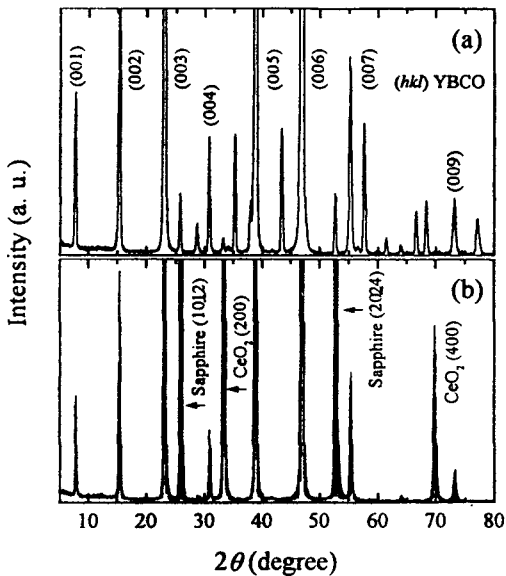


그림 3. YBCO/ $\text{CeO}_2$ / $\text{Al}_2\text{O}_3$  다층박막의 XRD 패턴, (위) 두께  $1200 \text{ \AA}$ 으로 증착된  $\text{CeO}_2$  완충층이 있는 알루미늄 기판 위에 성장된 YBCO 박막, (아래) 두께  $500 \text{ \AA}$ 으로 증착된  $\text{CeO}_2$  완충층이 있는 R-면 사파이어 기판 위에 성장된 YBCO 박막.

Fig. 3. XRD patterns of YBCO ( $2000 \text{ \AA}$ )/ $\text{CeO}_2$ / $\text{Al}_2\text{O}_3$  bilayer at (a)  $1200 \text{ \AA}$ -thick  $\text{CeO}_2$  film on alumina substrate and (b)  $500 \text{ \AA}$ -thick  $\text{CeO}_2$  film on R-plane sapphire substrate.

그림 4는 YBCO/ $\text{CeO}_2$ / $\text{Al}_2\text{O}_3$  박막의 표면 morphology를 관찰한 SEM 사진인데, (a)는 알루미늄 기판에  $\text{CeO}_2$  완충층을  $1200 \text{ \AA}$  정도 증착시킨 후

YBCO 박막을  $2000 \text{ \AA}$ 의 두께로 제어한 것이고, (b)는 사파이어 기판 위에  $\text{CeO}_2$  완충층을  $500 \text{ \AA}$ 의 두께로 증착한 후  $1500 \text{ \AA}$ 의 두께로 증착한 경우이다. 알루미늄 기판 위에 증착한 YBCO 박막인 경우 grain의 크기는 약  $\leq 1 \mu\text{m}$  정도이며, 표면에 나타난 입자들의 크기는 균일하지 않았다. 이는 Lee 등<sup>7)</sup>이 알루미늄 기판 위에 증착한 YBCO 박막에 대한 미세구조분석에서 grain의 크기는  $1\sim 2 \mu\text{m}$ 이고,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ ,  $\text{Ba}_2\text{CuO}_3$  등 다른 결정상이 존재한다는 보고와 grain의 크기 면에서 비슷한 결과를 나타내었다. 알루미늄 기판에서는  $\text{CeO}_2$  박막의 결정성이 그림 1에서 알 수 있듯이 거의 다결정 형태로 보이기 때문에 YBCO 박막은 3차원 형태의 성장을 하였으며, 그 결과 표면의 입자 (outgrowth 및 pinholes)들이 많이 생성된 것으로 생각된다. 한편 사파이어 기판 위에 증착한 YBCO 박막에 대한 grain 크기는 약  $0.2 \mu\text{m}$  정도로 관찰되었는데,  $\text{CeO}_2$  박막이 a-축 방향으로 잘 성장되었기 때문에 YBCO 박막이 layer-by-layer 성장을 하는데 도움을 준 것으로 보인다. 사파이어 기판 위에 성장된 YBCO 박막의 표면 morphology와 grain의 크기는 STO 기판 위에 성장된 경우와 비슷한 결과를 얻었다<sup>18)</sup>. 사파이어 기판 위에 성장된 YBCO 박막 표면에 나타난 입자는 알루미늄 기판의 경우와 비교하면 상대적으로 밀도가 적은 것을 알 수 있으며, YBCO 박막에 대한 grain의 크기는 약 10 배 정도의 차이를 보였다. 또한, 기판과 증착물질간의 열팽창계수 차이에 의해서 나타나는 미세균열은 YBCO 박막의 성장조건이 맞지 않은 경우에 많이 나타났으나, 성장조건이 최적인 경우에는 미세균열이 관찰되지 않았다.

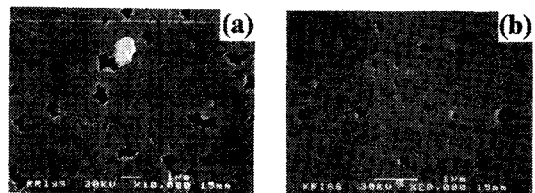


그림 4.  $2000 \text{ \AA}$ 의 두께로 성장된 YBCO 박막의 SEM 사진, (a)  $1200 \text{ \AA}$ 의 두께로 증착된  $\text{CeO}_2$  완충층이 있는 알루미늄 기판, (b)  $500 \text{ \AA}$ 의 두께로 증착된  $\text{CeO}_2$  완충층이 있는 R-면 사파이어 기판.

Fig. 4. SEM image of  $2000 \text{ \AA}$ -thick YBCO thin films on (a)  $1200 \text{ \AA}$ -thick  $\text{CeO}_2$  on alumina substrate and (b)  $500 \text{ \AA}$ -thick  $\text{CeO}_2$  buffered R-plane sapphire substrate.

### 3. 3. YBCO 박막의 전기적 특성

그림 5는 알루미늄 기판 위에 최적조건에서 증착한 CeO<sub>2</sub> 완충층의 두께변화에 대한 YBCO 박막의 온도 대 저항의 변화를 조사한 것이다. 이 때 YBCO 박막의 두께는 2000 Å였으며, 완충층의 두께는 0, 600, 900, 1200, 2000 Å등으로 제어하였고, 완충층의 두께에 따라 YBCO 박막의 저항 값은 290 K에서 측정된 저항 값으로 나누어 규격화하였다. YBCO 박막의 초전도 전이특성은 완충층의 두께에 영향을 많이 받았으며, 특히 상온에서 85 K부근까지 저항의 기울기는 다양하게 변화하였다. 완충층의 두께가 얇은 경우에는 반도체와 같은 거동을 보이다가, 완충층의 두께가 점점 두꺼워질수록 금속과 같은 거동을 나타내었다. YBCO 박막의 임계온도는 완충층의 두께가 증가할수록 증가하는 경향을 보였는데, 1200 Å인 두께에서 임계온도는 73 K였다. 또한 두께 2000 Å의 CeO<sub>2</sub> 완충층을 사용하였을 때 YBCO 박막의 임계온도는 62 K로써 완충층의 두께가 1200 Å인 경우보다 오히려 임계온도가 감소하였다. 이는 CeO<sub>2</sub> 완충층의 두께가 아주 얇은 경우에는 확산장벽의 역할을 하지 못하며, 두께가 너무 두꺼운 경우에는 완충층의 표면 거칠기로 인하여 YBCO 박막의 임계온도가 저하된 것으로 보인다. 따라서 알루미늄 기판 위에 증착한 완충층의 임계두께는 약 1200 Å으로 나타났다. 그림 5의 삽입그림은 완충층의 두께가 1200 Å 일 때, YBCO 박막의 두께를 변화시킨 것이다. YBCO 박막의 두께를 5000 Å으로 증가하였더니 YBCO 박막의 임계온도는 83 K로써 2000 Å의 두께보다 약 10 K 정도 임계온도가 증가하였다. 이러한 현상에 대해서 Ganapathi등<sup>10)</sup>은 YBCO박막의 두께가 증가될수록 초전도성의 연결고리가 증가되어 임계온도의 상승이 일어난다고 설명하고 있다.

그림 6은 사파이어 기판 위에 CeO<sub>2</sub> 완충층의 두께변화에 따른 YBCO 박막의 온도 대 저항 곡선을 나타낸 것이다. 완충층이 없는 경우 임계온도는 약 86 K였고, 200 Å과 1000 Å인 경우는 각각 약 89 K와 89.5 K로서 높은 임계온도를 나타내었으며, 2000 Å인 경우는 약 85 K로서 임계온도는 완충층이 없는 경우보다 낮다는 것을 확인하였다. 또한 완충층의 두께가 200~1000 Å인 경우, 전이폭  $\Delta T \sim 0.5$  K이었고,  $R_{300}/R_{100} \sim 3$  으로 전기적 특성이 우수한 YBCO 박막의 조건<sup>19)</sup>과 비슷한 결과를 보였다. 사파이어 기판 위에 완충층의 두께 변화에 따른 YBCO 박막의 초전도 특성의 변화는 알

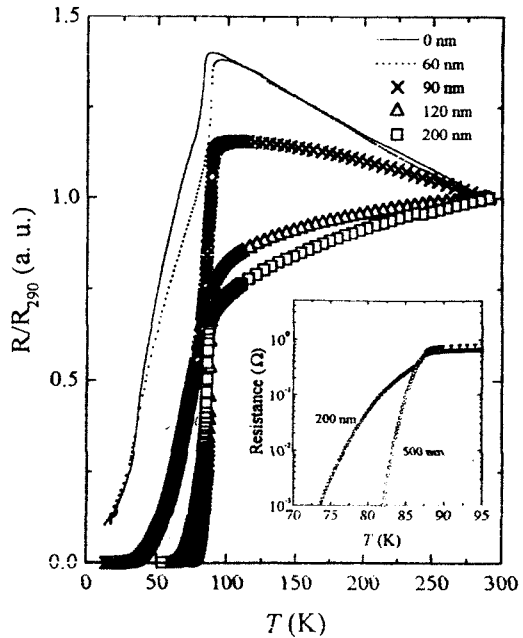


그림 5. 알루미늄 기판에서 CeO<sub>2</sub> 완충층의 두께 변화에 대한 YBCO 박막의 온도-저항 곡선의 변화. (삽입 그림) CeO<sub>2</sub> 완충층의 두께가 1200 Å인 경우 YBCO 박막의 두께에 대한 온도-저항 곡선.

Fig. 5. Temperature dependence of electrical resistance for 2000 Å-thick YBCO films deposited on CeO<sub>2</sub> buffer layers with different thicknesses on alumina substrates, (inset) thickness dependence of YBCO films on 1200 Å-thick CeO<sub>2</sub> buffered alumina substrates.

루미늄 기판 위에 증착한 경우보다 크지 않았으나, 전체적인 전이온도는 약 2~4 K정도 차이가 있었다. 사파이어 기판에서는 100~1000 Å으로 임계두께의 범위가 넓게 나타났으며, 이는 Michikamiref 등<sup>17)</sup>이 보고한 EBCO 박막보다는 YBCO 박막의 경우가 완충층의 두께의존성이 적은 것으로 나타났다. YBCO 박막의 두께 변화에 대해서 임계온도를 측정하여 보았는데, 알루미늄 기판과 다르게 사파이어 기판 위에서는 두께에 대한 임계온도의 변화는 없었다. 또한 사파이어 기판 위에 증착한 YBCO 박막을 Ar 이온 식각법으로 선폭 10 μm, 길이 5000 μm로 패터하여 임계전류밀도를 조사하였다. 이때 사파이어 기판 위에 증착된 CeO<sub>2</sub> 완충층의

두께는 500 Å였으며 YBCO 박막의 두께는 2000 Å 이었다. YBCO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1012)박막을 1 cm 당 1 μV를 기준으로 77 K에서 측정된 임계전류밀도는 3 × 10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>으로 측정되었으며, 이는 STO, MgO, LaAlO<sub>3</sub> 등 다른 산화물 단결정 기판 위에 증착한 YBCO 박막의 결과와 비슷한 우수한 특성을 보였다.

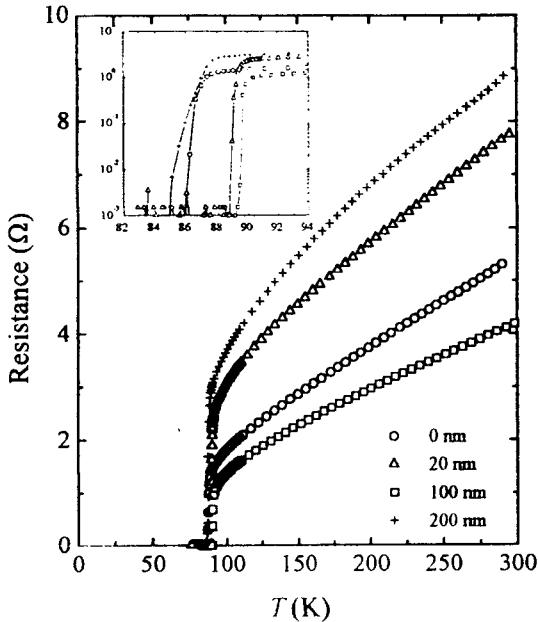


그림 6. R-면 사파이어 기판에서 CeO<sub>2</sub> 완충층의 두께 변화에 대한 YBCO 박막의 온도-저항 곡선의 변화.

Fig. 6. Temperature dependence of electrical resistance for YBCO films deposited on CeO<sub>2</sub> buffer layers with different thicknesses on R-plane sapphire substrates.

#### 4. 결론

다결정과 단결정 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판 위에 성장된 CeO<sub>2</sub> 박막의 결정성에 있어서는 증착온도가 낮은 경우 (111) 피크의 강도는 크게 나타났고, 온도가 증가될수록 (200) 피크의 강도는 증가하였다. 완충층인 CeO<sub>2</sub> 박막을 a-축방향으로 성장시킨 조건에서 YBCO 박막은 c-축방향으로 성장함을 알 수 있었다. 알루미늄 기판 위에 증착된 YBCO 박막에서 성장된 입자들의 크기는 약 ≤1 μm였으며, 단결정 기판 위에 증착된 YBCO 박막의 경우에는 약 0.2 μm정도였다. 알루미늄 기판 위에 성장한

YBCO 박막은 완충층의 두께에 따라서 초전도 전이특성이 큰 변화를 보였으며, 사파이어 기판 위에 증착한 YBCO 박막의 임계온도는 완충층의 두께변화에 대해서 2~4 K 정도의 미소한 차이를 보였다. 알루미늄 기판을 사용한 경우 YBCO 박막의 임계온도는 83 K였다. 사파이어 기판을 이용한 경우 완충층의 두께가 1000 Å에서 YBCO 박막의 임계온도는 89.5 K였으며, 77 K에서 측정된 임계전류밀도는 3 × 10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정과제연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] K. Char, N. Newman, S. M. Garrison, R. W. Barton, R. C. Taber, S. S. Laderman, and R. D. Jacowitz, Appl. Phys. Lett., vol. 57, pp. 409~411, 1990.
- [2] D. K. Fork, F. A. Ponce, J. C. Tramontana, N. Newman, Julia M. Phillips and T. H. Geballe, Appl. Phys. Lett., vol. 58, pp. 2432~2434, 1991.
- [3] A. B. Berezin, C. W. Yuan and A. L. de Lozanne, Appl. Phys. Lett. 57, 90 (1990).
- [4] B. F. Cole, G.-C. Liang, N. Newman, K. Char, G. Zaharchuk and J. S. Martens, Appl. Phys. Lett., vol. 61, pp. 1727~1729, 1992.
- [5] A. Fartash, Ivan K. Schuller, and J. Pearson, J. Appl. Phys. vol. 67, pp. 2524~2527, 1990.
- [6] A. Mogro-Campero, L. G. Turner and G. Kendall, Appl. Phys. Lett., vol. 53, pp. 2566~2568, 1988.
- [7] J.-W. Lee, M. Migliuolo, A. K. Stamper, D. W. Greve, and D. E. Laughlin, J. Appl. Phys., vol. 66, pp. 4886~4890, 1989.
- [8] X. D. Wu, R. E. Muenchausen, N. S. Norgar, A. Pique, R. Edwards, B. Wilkens, T. S. Ravi, D. M. Hwang and C. Y. Chen, Appl. Phys. Lett., vol. 58, pp. 1429~1431, 1991.
- [9] M. Schieber, M. Schwartz, G. Koren, and E. Aharoni, Appl. Phys. Lett., vol. 58, pp. 301~

- 303, 1991.
- [10] L. Ganapathi, S. Giles, Rama Rao, J. P. Zheng and H. S. Kwok, Appl. Phys. Lett., vol. 63, pp. 2552~2554, 1993.
- [11] M. W. Denhoff and J. P. McCaffrey, J. Appl. Phys., vol. 70, pp. 3986~3988, 1991.
- [12] X. D. Wu, R. E. Muenchausen, N. S. Norgar, A. Pique, R. Edwards, B. Wilkens, T. S. Ravi, D. M. Hwang and C. Y. Chen, Appl. Phys. Lett., vol. 58, pp. 1429~1431, 1991.
- [13] P. Merchant, R. D. Jacowitz, K. Tibbs, R. C. Taber, and S. S. Laderman, Appl. Phys. Lett., vol. 60, pp. 763~765, 1992.
- [14] L. S. Hung, J. A. Agostinelli, G. R. Paz-Pujalt, and J. M. Mir, Appl. Phys. Lett., vol. 53, pp. 2450~2452, 1988.
- [15] W. L. Holstein, L. A. Parisi, D. W. Face, X. D. Wu, S. R. Foltyn, and R. E. Muenchausen, Appl. Phys. Lett., vol. 61, pp. 982~984, 1992.
- [16] Q. Xiong, S. Afonso, K. Y. Chen, G. Salamo, and F. T. Chen, Physica C., vol. 280, pp. 17~20, 1997.
- [17] Osamu Michikami, Atsushi Yokosawa, Hironori Wakana and Yasube Kashiwaba, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 36, pp. 2646~2651, 1997.
- [18] 임 해용, 김 인선, 김 동호, 이 규원, 박 용기, 박 종철, 새물리 vol. 38, pp. 109~114, 1998.
- [19] M. Kawasaki, J. Gong, M. Nantoh, T. Hasegawa, K. Kitazawa, M. Kumagai, K. Hirai, K. Horiguchi, M. Yoshimoto, and H. Koinuma, Jpn. J. Appl. Phys, vol. 32, pp.1612~1616, 1993.

著 者 紹 介

임해용

『센서학회지 제7권 제1호』 논문98-7-1-09, p.61 참조  
현재 한국표준과학연구원 초전도그룹.

박용기

『센서학회지 제6권 제4호』 논문97-6-4-02, p.264 참조  
현재 한국표준과학연구원 양자연구부 부장. 책임연구원

김인선

『센서학회지 제6권 제4호』 논문97-6-4-02, p.264 참조  
현재 한국표준과학연구원 초전도그룹. 책임연구원

박종철

『센서학회지 제6권 제4호』 논문97-6-4-02, p.264 참조  
현재 한국표준과학연구원 초전도그룹. 책임연구원

김동호

『센서학회지 제7권 제1호』 논문98-7-1-09, p.61 참조  
현재 영남대학교 물리학과 조교수.