

Laser Ablation에 의하여 $\text{LaAlO}_3(100)$ 기판 위에 증착된 Y-Ba-Cu-O 박막에 대한 연구

조윌렬 · 이규철 · 고도경 · 이현주 · 노태원 · 김정구 · 허필화*

서울대학교 물리학과

*금성중앙연구소

(1991년 8월 29일 접수)

Study of Laser Ablated Y-Ba-Cu-O Thin Films on $\text{LaAlO}_3(100)$ Substrates

William Jo, Gyu-Chul Yi, Do-Kyeong Ko, H.J. Lee, T.W. Noh, Z.G. Khim and P.H. Hur*

Department of Physics, Seoul National University

*Goldstar Central Research Lab.

(Received August 29, 1991)

요 약

Pulsed Nd : YAG 레이저의 second harmonics(파장 : 532 nm)를 이용하여 $\text{LaAlO}_3(100)$ 기판 위에 Y-Ba-Cu-O 박막을 in-situ로 증착하였다. 박막은 200(mtorr)의 산소분위기에서 증착되었으며, 이때 기판의 온도는 670~820°C에서 변화되었다. 증착 후, 박막은 2/3 기압의 산소분위기에서 500°C의 온도로 1시간 동안 in-situ로 열처리되었다. 우리는 증착온도가 고온 초전도체의 결정성장, 임계성질, 표면 미세조직에 영향을 준다는 사실을 밝혔다. 760°C에서 $\text{LaAlO}_3(100)$ 위에 증착된 박막은 85 K에서 저항이 사라지는 초전도 현상을 보여주었다.

ABSTRACT

Y-Ba-Cu-O thin films were in-situ fabricated on $\text{LaAlO}_3(100)$ substrates using the second harmonics of a pulsed Nd:YAG laser. Thin films were deposited under 200 (mtorr) of oxygen atmosphere, when the substrate temperature was changed between 670°C and 820°C. After deposition, the films were in-situ annealed at 500°C under 2/3 bar of oxygen pressure. We showed that the deposition temperature affects the formation of superconducting phase, the resistance, and the surface morphology. The Y-Ba-Cu-O thin films deposited at 760°C show the zero resistance critical temperature of 85 K.

1. 서 론

세라믹 고온 초전도체를 이용하여 적외선 센서, 주파수 미터, 초전도 양자간섭계 등의 소자를 개발하기 위해서는 우수한 결정성, 높은 임계온도와 임계전류밀도, 그리고 균일한 표면을 가진 박막의 증착에 대한 연구가 선행되어야 한다. 따라서 세라믹 고온 초전도체의 발견 초기부터 많은 연구진들이 우수한 박막을 증착하기 위하여 노력해 왔으며, 현재에는 다층 박막의 증착과^{1,2)} 소자물³⁾ 만드는 연구들을 활발히 수행하고 있다.

고온 초전도체 박막을 만들기 위하여 evaporation⁴⁾, sputtering⁵⁻⁷⁾, laser ablation⁸⁻¹⁰⁾ 등의 박막 증착법이

자주 이용되어 왔다. Laser ablation은 1965년 Smith와 Turner가 레이저의 강한 빛이 물질에 입사되면 기화가 일어나는 현상을 발견함으로써 시작되었다¹¹⁾. 그러나, 빛과 고체간의 상호작용에 대한 이해 부족과 1 μm 정도의 크기를 지닌 알갱이가 박막의 표면에 형성되는 어려움 때문에 laser ablation에 대한 연구는 다른 박막 증착법에 비하여 부진하였다¹²⁾. 화학양론(stoichiometry)이 복잡한 고온 초전도체 박막에 대한 연구가 활발히 진행되자, laser ablation은 많은 사람들에게 새로운 박막 증착법으로 널리 인식되기 시작하였다. Evaporation이나 sputtering에서는 원소의 종류에 따라 증발속도 또는 sputtering yield가 다르기 때문에 화학양론이 올바른

초전도 박막의 증착이 쉽지 않다⁴⁻⁷⁾. 하지만, 타게트를 순간적으로 플라즈마 상태로 만드는 laser ablation의 경우, 플라즈마 내의 화학양론이 타게트와 거의 같기 때문에, 다른 박막 증착법보다 용이하게 화학양론을 조절할 수 있다¹²⁾. Laser ablation은 높은 증착온도 및 높은 산소 분압을 요구하는 박막들도 쉽게 증착할 수 있으므로 화학반응이 수반되는 박막 증착법(reactive deposition)에도 이용될 수 있다. 또한, laser ablation은 증착시간이 짧고 sputtering보다 작은 타게트를 사용할 수 있는 장점을 지니고 있으므로 고온 초전도체를 비롯한 여러 화합물들의 박막 증착법으로서¹³⁾ 폭넓은 연구가 진행되고 있다.

고온 초전도체 박막의 증착에는 펄스폭이 10 ns 정도인 레이저가 주로 사용되어 왔다. 특히, 레이저의 파장이 짧을수록 박막의 임계 성질 및 표면 미세조직이 좋다는 사실이 알려져¹⁴⁾, 자외선 영역의 레이저(excimer 레이저, Nd : YAG 레이저의 third harmonics)가 주로 이용되어 왔다. 따라서, 가시광선 영역인 Nd : YAG 레이저의 second harmonics(파장 : 532 nm)를 이용한 박막증착에 관한 연구논문들은 많지 않다^{15,16)}. 본 연구진이 사용한 Nd : YAG 레이저는 third harmonics(파장 : 355 nm)의 출력이 작아 laser ablation에 사용할 수 없었기 때문에, 우리는 second harmonics를 이용하여 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 박막을 증착하였다. 이러한 second harmonics를 이용한 연구에서는 자외선 영역의 빛을 이용한 연구보다 광학기기의 alignment가 쉽고, 비교적 낮은 출력의 레이저로도 laser ablation을 할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 이 연구는 second harmonics를 이용하여 증착된 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 박막도 우수한 임계성질을 지니고 있음을 잘 보여주고 있다.

본 논문은, laser ablation을 이용하여 $LaAlO_3(100)$ 기판 위에 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 박막을 증착할 때, 기판의 온도가 세라믹 초전도체의 결정성장, 임계성질, 표면 미세조직 등에 미치는 영향을 기술하고 있다. 본 연구에서 사용된 박막들은 670~820°C의 기판온도와 200(mtorr)의 산소분위기 아래서 증착되었다. 증착된 박막은 0.7기압 정도의 산소분위기에서 500°C로 in-situ로 열처리(in-situ thermal annealing)되었으며, 이러한 열처리 방법은 사후 열처리(post annealing)에서 오는 박막과 기판 사이의 확산(diffusion) 등의 문제점을 줄일 수 있었다. 특히, 이런 연구에서는 X-ray diffractometry(XRD), four-probe resistance method, energy dispersive X-ray analysis(EDX), scanning electron microscopy(SEM) 등의 측정방법을 사용하여 박막의 특성을 조사하였다.

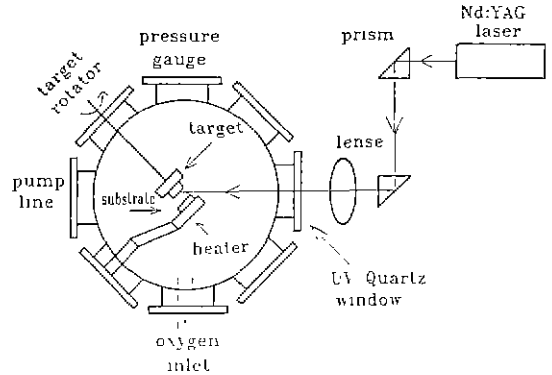


Fig. 1. The schematic diagram of the laser ablation system.

2. 실험방법

Laser ablation에 의하여 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 박막을 증착하기 위하여, 비교적 단순한 형태의 진공 chamber를 제작하였다¹⁷⁾[그림 1 참조]. 진공 chamber의 압력은 회전펌프를 사용하여 낮추었다. Chamber내의 산소분압을 좋게 하기 위해서 산소를 100(torr) 정도까지 넣었다가 다시 압력을 낮추는 flushing 과정을 3~4차례 반복하였다. 증착시의 산소분압은 초전도 박막의 형성에 중요한 영향을 미치는 사실이 알려져 있으며¹⁸⁾, 많은 연구들은 100~300(mtorr)에서 우수한 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 박막을 증착하는 것이 가능하다고 발표하여 왔다^{9,10,18)}. 우리는 chamber내로 들어가는 산소의 양을 조정하여 chamber내의 산소분압이 200(mtorr)가 되도록 유지시켰다.

Laser ablation에 사용된 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 타게트는 고온 초전도체의 소결에 주로 사용되는 고상반응법(solid state reaction)에 의하여 만들어졌다. 박막을 증착하는 과정에는 타게트를 6 rpm으로 회전시켜 레이저 빛으로부터 오는 타게트의 손상을 최소화하도록 노력하였다. $LaAlO_3(100)$ 기판을 900°C까지 가열하기 위하여 저항선을 이용한 가열대가 제작되었다. 기판을 부착할 때, 가열대와외의 열전도를 좋게 하기 위하여 기판과 가열대 사이에 은 페인트를 칠하였다. 증착온도의 측정에는 가열대에 부착된 두 개의 열전쌍이 이용되었으며, 증착온도를 원하는 영역에서 안정화시키기 위하여 온도조절장치가 이용되었다.

기판의 온도와 산소분압이 원하는 영역에서 안정되면, 강한 레이저 빛을 타게트에 입사시켜 박막을 증착하기 시작하였다. 사용된 레이저 빛은 Q-switched Nd : YAG 레이저(Quanta-ray, DCR-2A)에서 나오는 second har-

monics(파장 : 532 nm)로서 1초에 20개의 펄스로 이루어졌다. FWHM(full width at half maximum)에 해당되는 빛의 펄스폭은 약 6.5 ns이었고, 타겟에 도달한 펄스 하나의 크기는 70 mJ 가량이었다. 레이저는 타겟에 약 45°의 각도로 입사되었으며, 그 세기(flucose)는 수정 window 앞에 설치된 렌즈의 위치를 바꾸어 조정하였다. 레이저의 세기가 약 1.5~2.0 J/cm²·pulse로 유지되었을 때, 타겟 위에서 빛은 지름이 1.5~2 mm 가량인 타원의 형태를 지녔다. 박막의 증착속도는 레이저 펄스 하나 당 0.6Å/pulse로서, 2,000Å의 박막증착에 약 3분 정도의 시간이 소요되었다. 증착이 끝나면, chamber내의 산소분압을 3분 이내에 0.7기압으로 증가시킨 후, 기판의 온도를 500°C로 유지하며 한시간 동안 in-situ로 열처리하였다. 열처리가 끝나면 chamber내의 산소분압을 1기압으로 증가시킨 후 기판의 온도를 천천히 상온으로 내렸다.

Laser ablation을 이용하여 박막을 증착하고자 할 때, 우리는 레이저의 상태(즉, 빛의 파장, 세기, 펄스폭), 타겟의 밀도, 산소의 분압, 기판의 종류, 증착온도, 열처리 방법(즉, 온도, 시간, 분위기) 등의 많은 실험조건들을 변화시켜가며 양질의 박막을 얻는 노력을 하여야 한다. 현재까지, 레이저의 상태¹⁴⁾, 산소의 분압¹⁶⁾, 기판의 종류^{8,9)} 등을 조직적으로 변화시켜가며, 이들이 고온 초전도체 박막의 형성에 미치는 영향들이 많이 연구되어 왔다. 우리는 기판의 온도에 따라 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 박막의 결정성장, 입계성질, 표면 미세조직 등이 어떻게 변화하는가에 대하여 조직적인 연구를 시도하였다. 즉, 우리는 기판의 온도를 각각 670, 700, 720, 760, 780, 820°C로 유지시켜 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 박막을 in-situ로 증착하였고, XRD, 저항측정, EDX, SEM 등의 실험방법을 이용하여, 기판의 온도와 박막 특성 사이의 상관관계를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 구리의 $K\alpha$ 선(파장 : 1.5406Å)을 이용하여 얻은 XRD 실험의 결과를 보여주고 있다. 그림 2(a)에 표시된 670°C에서 증착된 박막의 XRD 결과는 비정질 상에 의한 background, 기판에 의한 피크, 그리고 이차상(secondary phase)에 의한 피크만을 보여주었다. 이러한 사실로부터 우리는 670°C에서는 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 상이 형성되지 않음을 알 수 있다. 그림 2(b)는 700°C에서 증착된 박막들에 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 상이 형성되기 시작하는 현상을 보여주고 있으나, 21°와 42° 근처의 피크에 해당되는 이차상이 많이 형성되어 있는 것도 보여주고 있다. 21°

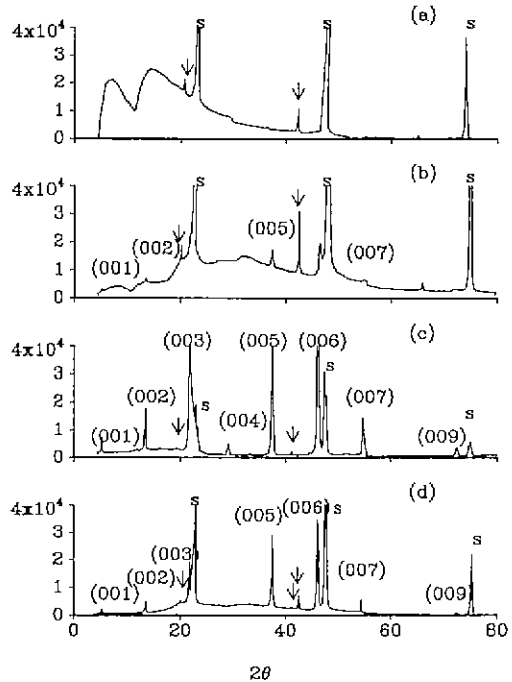


Fig. 2. XRD patterns of Y-Ba-Cu-O thin films deposited at various substrate temperatures. (a) 670°C, (b) 700°C, (c) 760°C, and (d) 820°C.

근처에 보이는 피크는 BaCuO_2 의 (330) 피크이며, 42° 근처의 피크는 BaCuO_2 의 (660) 피크로 추정된다. 이 박막의 다른 XRD 피크의 세기와 비교하면, 우리는 상당한 양의 BaCuO_2 의 상이 형성되어 있음을 알 수 있다. 그림 2(c)는 760°C에서 증착된 박막의 XRD pattern을 보여주고 있다. 이 온도에서 증착된 박막은 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 상들이 주로 형성되어 있으며, BaCuO_2 의 이차상은 거의 형성되지 않고 있음을 알 수 있다. 820°C에서 증착된 박막의 XRD 결과는 그림 2(d)에 나타나 있으며, 이는 박막내에 초전도상이 주로 형성되어 있으나 약간의 BaCuO_2 의 상도 상존하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 XRD 실험결과로부터 우리는 박막의 결정 성장에 가장 적절한 온도는 760°C 부근임을 알 수 있다. In-situ 증착온도인 760°C는 사후 열처리에 의하여 박막을 증착하는 경우 상의 형성을 위해 필요한 850°C보다 낮기 때문에¹⁹⁾, in-situ 열처리를 하는 본 실험의 경우 기판과 박막간의 diffusion 문제를 줄일 수 있다.

LaAlO_3 의 격자상수가 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 의 ab-면의 격자상수와 2% 이내로 일치하기 때문에, LaAlO_3 기판 위에서 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 가 c-축이 배열된 epitaxial 성장의 경향을

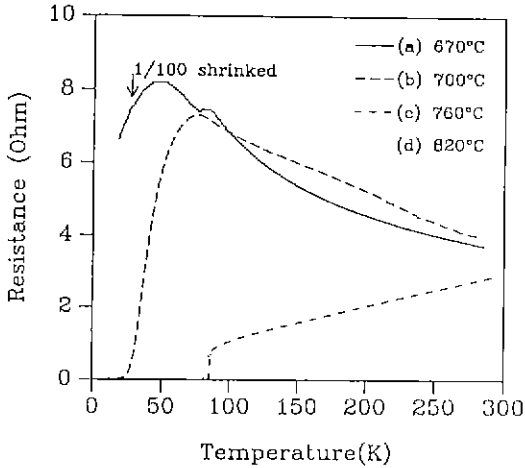


Fig. 3. The temperature dependent resistance of Y-Ba-Cu-O thin films deposited at various substrate temperatures.

지낼 수 있음이 추정된다. 그림 2의 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 상에 해당되는 XRD 피크들은 모두 (00l) 피크들이며, 초전도 grain들의 대부분이 c-축을 기판에 수직이 되도록 배열하고 있다는 것을 보여주고 있다. 양질의 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 단결정을 기르는 것이 매우 어렵다는 사실을 고려하면, c-축이 한 방향으로 배열된 이러한 박막들은 이 물질의 비등방성적인 물성 연구에 크게 도움을 줄 수 있을 것이다²⁰.

그림 3은 박막의 저항이 온도에 따라 어떻게 변화하는가를 보여주고 있다. 670°C에서 증착된 박막은 온도가 낮아지면 저항이 증가하는 반도체의 특성을 보여주다가 낮은 온도에서는 저항이 감소하였다. 그러나, 이 박막은 저항이 사라지는 초전도성을 보여주지 못하였으며, 이러한 사실은 670°C에서 초전도체상이 형성되지 않는다는 그림 2(a)의 XRD 결과와 잘 일치하고 있다. 700°C에서 증착한 박막들은 670°C의 박막보다 약 1/100 정도로 작은 상온 저항을 가지고 있었으며 20 K 근처에서 초전도성을 보여주고 있다. 가장 좋은 임계성질을 보이는 박막은 760°C에서 증착시킨 박막으로서 온도가 감소함에 따라 저항이 줄어드는 금속의 저항특성을 보여주었다. 저항이 급격히 감소하기 시작하는 온도($T_{c,onset}$)는 87 K이며 저항이 사라지는 임계온도($T_{c,zero}$)는 85 K이었다. 720°C와 820°C에서 증착된 박막들은 $T_{c,zero}$ 가 모두 80 K 이상으로, laser ablation을 이용하면 비교적 넓은 증착온도 영역에서 좋은 임계성질을 갖는 박막을 만들 수 있다는 사실을 보여주고 있다. 또한, 이러한 결과는 XRD의 결과와 잘 일치하고 있다.

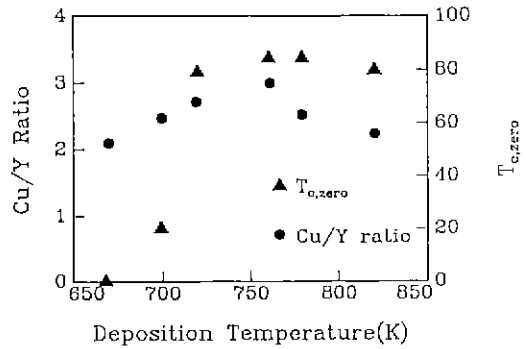


Fig. 4. Dependence of Cu/Y ratio and $T_{c,zero}$ on the deposition temperatures.

증착온도에 따른 박막 조성비의 변화를 EDX를 사용하여 조사하였다. 본 연구처럼 $LaAlO_3(100)$ 기판 위에 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 박막을 증착한 경우, Ba의 EDX 피크가 기판의 주성분 중의 하나인 La의 피크와 서로 비슷한 에너지 영역에 놓여 있기 때문에 Ba에 대한 조성비를 얻는 것이 매우 어렵다. 따라서, 우리는 EDX를 이용하여 박막의 Cu와 Y의 조성비만을 분석하였으며, 그 결과는 그림 4에 보여지고 있다. 760°C에서 증착한 박막의 경우, Cu/Y의 비가 약 3.0으로서 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 상의 Cu/Y의 비와 잘 일치하고 있다. 이러한 결과는 760°C가 가장 이상적인 증착온도라는 XRD 및 저항측정 실험과도 잘 일치하고 있다.

그림 4는 증착된 박막의 Cu와 Y의 조성비가 증착온도에 강하게 의존하는 사실을 보여주고 있다. EDX에 의한 조성비의 분석은 비교적 측정오차가 큰 편이지만, 그림 4는 laser ablation으로 증착된 박막들의 Cu양이 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 타겟에서의 Cu양보다 적다는 사실을 알 수 있다. 본 실험은 증착온도를 제외하면 동일한 실험 조건에서 이루어졌으므로, Cu의 응착계수(sticking coefficient)가 Y의 응착계수보다 낮으며, Cu의 응착계수가 온도에 따라 크게 변화함을 알 수 있다.

그림 4에서 증착온도가 700°C인 경우와 820°C인 경우를 비교해 보면 Cu/Y의 비는 거의 비슷함에도 불구하고 $T_{c,zero}$ 가 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 700°C에서 증착된 박막들은 $BaCuO_2$ 와 같은 이차상이 상당히 존재하는데 비하여 820°C에서 증착한 박막들이 Cu의 부족에도 불구하고 이차상들 대신 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 상을 주로 형성한다는 XRD의 결과로부터 설명할 수 있다[그림 2(b)와 2(d) 참조]. 즉, 전기저항은 박막내에 conducting path의 유무에 따른 percolation 현상에 크게 좌우되기 때문에, 박막의 조성비보다는 초전도체상의 형

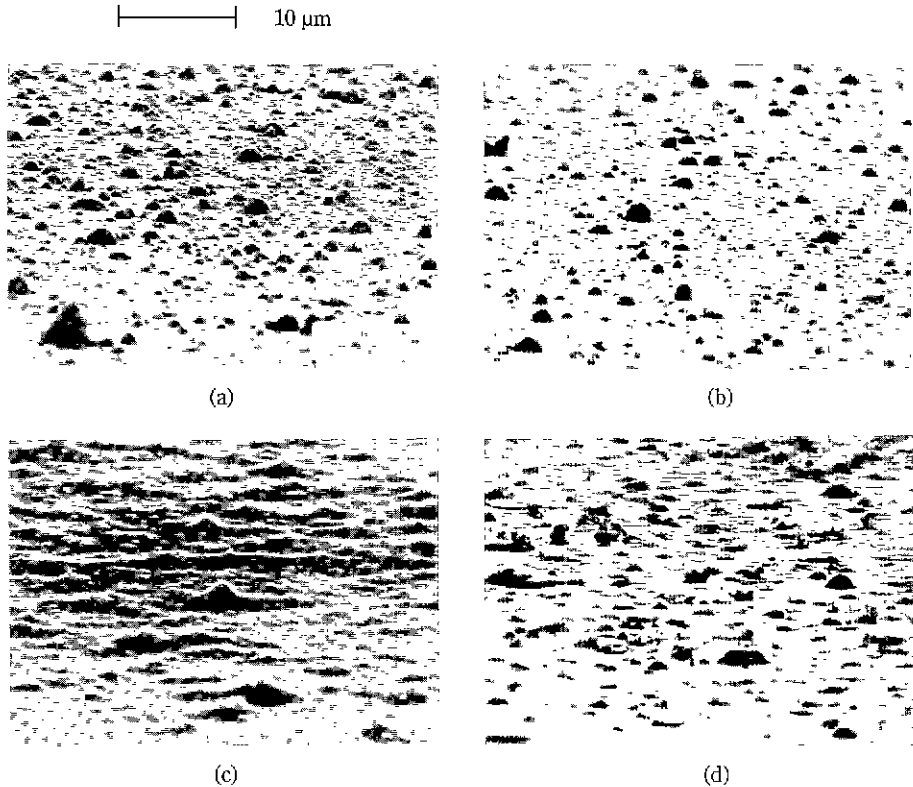


Fig. 5. SEM pictures for Y-Ba-Cu-O thin films deposited at various substrate temperatures. (a) 670°C, (b) 700°C, (c) 760°C, and (d) 820°C.

성유무에 크게 영향을 받는다. 이와 같이 조성비에서 크게 벗어남에도 불구하고 우수한 임계성질을 지닌 초전도 박막을 증착하는 것이 가능하다는 사실은 다른 연구결과에서 보고된 바 있다²¹.

세라믹 고온 초전도체를 소자로 개발하기 위해서는 표면 미세조직이 아주 균일한 박막이 바람직하다. Laser ablation은 박막 증착법으로서 많은 장점이 있음에도 불구하고 particulate라고 불리는 1 μm 정도 크기의 알갱이들이 박막 표면에 형성되는 단점을 지니고 있다 따라서 많은 연구진들은 이러한 알갱이들의 생성원인을 규명하고 이를 제거하려는 연구를 수행했다^{18,21-24}. 그림 5는 본 실험에서 증착된 박막들을 약 70° 정도 기울여 촬영한 SEM 사진이다. 그림 5(a)와 (b)으로부터 우리는 670°C 및 700°C에서 증착된 박막의 표면에 구형의 알갱이 (boulder)가 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이러한 boulder들은 레이저에 의하여 플라즈마가 생성될 때 타겟의 물질들이 cluster 형태로 타겟에서 튀어나와 기판 위에 응착하며, 타겟내의 기공밀도(pore density)와 깊은 관계를 갖는 것으로 알려져 있다^{14,21}. 그림 5(c)에서

보여주는 것처럼, 증착온도가 760°C인 박막에서는 1 μm 정도 크기의 boulder 및 길이가 5 μm 정도의 lenticular 형태의 구조물이 관측되었다 이러한 lenticular 형태의 구조물은 비교적 높은 증착온도에서 형성되는 것으로 알려져 있다²⁴. 한편, 그림 5(d)의 SEM 사진은 820°C에서 증착된 박막이 전혀 새로운 표면 미세조직을 갖는 것을 보여주고 있다. 이 박막에서는 lenticular 형태의 구조물은 보이지 않았으며, 1 μm 정도 크기의 boulder 및 박막에 수직으로 형성된 작은 바늘 모양의 구조물이 관측되었다. 이러한 바늘 모양의 구조물에 대한 보고는 아직 알려져 있지 않으므로, 이에 대한 이해를 위해서는 좀더 조직적인 SEM 및 TEM을 이용한 연구가 요구된다.

고온 초전도체 박막의 증착에는 많은 형태의 기판이 사용되고 있다. 실용화에 가장 큰 가능성을 지닌 Si 기판이나 sapphire 기판은 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 와 서로 반응하며, 열팽창계수가 많이 다르기 때문에 buffer 층을 이용하여야 한다는 약점을 지니고 있다²⁵. 한편, SrTiO_3 기판은 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 와 2% 이내에서 격자상수가 같고 열팽창계수도 비슷하기 때문에, 이 기판 위에서는 높은 임계전

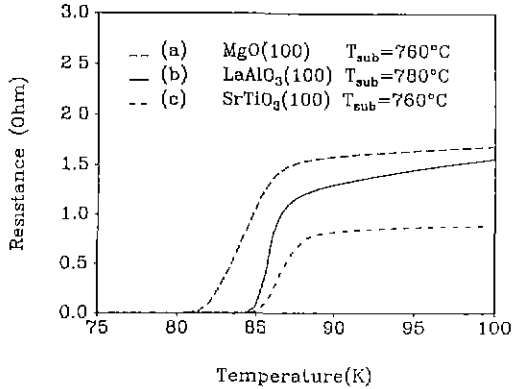


Fig. 6. The temperature dependent resistance of Y-Ba-Cu-O thin films on various substrates.

류밀도를 갖는 박막의 증착이 가능하다는 보고가 있다⁹⁾. 그러나, SrTiO₃ 기판은 마이크로파 영역에서 심한 흡수 현상을 보이기 때문에 고주파 응용을 이용하는 소자를 만드는 연구에는 이용하기 어려운 점이 있다. 한편, MgO 기판은 마이크로파 영역의 흡수가 거의 없고 가격이 저렴하므로 중요한 기판으로 인식되고 있지만, lattice mismatch가 크고 SrTiO₃ 기판에서보다 임계성질이 조금 떨어지는 YBa₂Cu₃O_{7-x} 박막이 증착되는 단점이 있다²¹⁾.

그림 6은 760°C 근처의 증착온도와 200(mtorr)의 산소분위기에서 SrTiO₃(100), MgO 및 LaAlO₃(100) 기판 위에 증착된 박막들의 전기저항에 대한 실험결과이다. LaAlO₃ 기판 위에 증착된 박막의 임계성질은 SrTiO₃ 위의 박막과 비슷하였으며 MgO 위의 박막보다는 상당히 우수하였다. 따라서, LaAlO₃ 기판은 임계성질과 적층 성장은 SrTiO₃에 버금가면서도 마이크로파 영역에서의 손실 탄젠트(tanδ=σ/εω)가 작아서 고주파 응용을 위한 단결정 기판으로 사용될 수 있다²⁶⁾.

4. 결 론

우리는 Nd : YAG 레이저의 second harmonics를 이용하여 LaAlO₃(100) 기판 위에 YBa₂Cu₃O_{7-x} 박막을 증착하였으며, 산소분압은 200(mtorr)를 유지하면서 온도를 670°C에서 820°C까지 변화시켜가며 증착하였으며, 증착 후 2/3기압의 산소분위기에서 500°C의 온도로 1시간 동안 in-situ로 열처리되었다. 670°C 근처의 낮은 온도에서는 초전도체 상이 잘 형성되지 않으며 BaCuO₂의 이차상이 많이 존재하였다. 760°C 이상의 높은 온도에서는 초전도체의 상이 잘 형성되며 좋은 임계성질을 갖는 것이 밝혀졌다. 특히, 760°C에서 증착된 박막은 가장 우수한

임계성질(T_{c,zero}: 85 K)과 c-축이 기판에 수직인 성장형태를 보여주었으며, Cu/Y의 조성비도 3.0에 가까운 것으로 나타났다. 또한, 증착온도에 따라 박막의 미세조직에 상당한 영향을 주는 것으로 관측되었으며, 이러한 현상에 대한 구체적인 이해를 얻기 위하여는 좀더 조직적인 SEM 및 TEM의 연구가 바람직하다.

감사의 글

이 연구를 위하여 호의와 조언을 주신 서울대학교의 이재형 교수님과 금성중앙연구소의 김성태 박사님께 감사드립니다. 본 연구는 과학기술처 특정연구사업과 한국과학재단 우수연구센터 지원연구비의 지원에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

1. T. Venkatesan, X.D. Wu, A. Inam, C.C. Chang, M.S. Hedge, and B. Dutta, "Epitaxial YBa₂Cu₃O_{7-y}/Y_{1-x}Pr_xBa₂Cu₃O_{7-y} Heterostructures," *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 391 (1990).
2. J.J. Kingston, F.C. Wellstood, P. Lerch, A.H. Milklich, and J. Clarke, "Multilayer YBa₂Cu₃O_{7-x}/SrTiO₃-YBa₂Cu₃O_{7-x} Films for Insulating Crossovers," *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 189 (1990).
3. Y. Tarutani, T. Fukazawa, U. Kabasawa, A. Tsukamoto, M. Hiratani, and K. Takagi, "Superconducting Characteristics of a Planar-type HoBa₂Cu₃O_{7-x}-La_{1.5}Ba_{1.5}Cu₃O_{4-y}-HoBa₂Cu₃O_{7-x} Junction," *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 2707 (1991).
4. A. Mongro-Campero, L.G. Turner, E.L. Hall, M.F. Garbaskas, and N. Lewis, "Epitaxial Growth and Critical Current Density of Thin Films of YBa₂Cu₃O_{7-x} on LaAlO₃ Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 2719 (1989).
5. J.L. Makous, L. Maritato, C.M. Falco, J.P. Cronin, G.P. Rajendran, E.V. Uhlmann, and D.R. Uhlmann, "Superconducting and Structural Properties of Sputtered Thin Films of YBa₂Cu₃O_{7-x}," *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 2104 (1987).
6. 한택상, 김영환, 염상섭, 최상삼, 박순자, "RF Magnetron Sputtering 방법에 의한 고온 초전도 박막 제조를 위한 조성 조절 및 열처리 효과," *요업학회지*, **27**, 249 (1990).
7. 성진용, 서정대, 강광용, 장순호, "Off-Axis RF 마그네트론 스퍼터링에 의한 YBa₂Cu₃O_{7-x} 고온 초전도 박막의 제조," *요업학회지*, **28**, 243 (1991).
8. T. Venkatesan, C.C. Chang, D. Dijkkamp, S.B. Ogaie, E.W. Chase, L.A. Farrow, D.M. Hwang, P.F. Miceli, S.A. Schwartz, J.M. Tarascon, X.D. Wu, and A. Inam,

- "Substrate Effects on the Properties of Y-Ba-Cu-O Superconducting Films Prepared by Laser Deposition," *J. Appl. Phys.*, **63**, 4591 (1988).
9. G. Koren, A. Gupta, E.A. Giess, A. Segmuller, and R.B. Laibowitz, "Epitaxial Films of YBa₂Cu₃O_{7- δ} on NdGaO₃ and SrTiO₃ Substrates Deposited by Laser Ablation," *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1054 (1989).
 10. S. Wittanachchi, 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**, 234 (1988).
 11. H.M. Smith, and A.F. Turner, "Vacuum Deposition Thin Films Using a Ruby Laser," *Appl. Opt.*, **4**, 147 (1965).
 12. J.T. Cheng and H. Sankur, "Growth of thin Films by Laser-Induced Evaporation," *CRC Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, **15**, 63 (1988).
 13. R. Ramesh, K. Luthur, B. Wilkens, D.L. Hart, E. Wang, J.M. Tarascon, A. Inam, X.D. Wu, and T. Venkatesan, "Epitaxial Growth of Ferroelectric Bismuth Titanate Thin Films by Pulsed Laser Deposition," *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1505 (1990).
 14. G. Koren, A. Gupta, R.J. Baseman, M.I. Lutwyche, and R.B. Laibowitz, "Laser Wavelength Dependent Properties of YBa₂Cu₃O_{7- δ} Thin Film Deposited by Laser Ablation," *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 2450 (1989).
 15. D.S. Misra and S.B. Palmer, "Growth of As-Deposited Superconducting Thin Films of YBa₂Cu₃O_{7- δ} Using Nd : YAG Laser," *J. Appl. Phys.*, **68**, 1403 (1990)
 16. S. Komuro, Y. Aoyagi, T. Morikawa, and S. Namba, "Preparation of High-T_c Superconducting Films by Q-switched YAG Laser Sputtering," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27**, L34 (1988)
 17. 이현주, 조윤희, 이규철, 코도경, 노태원, 김정구, "Laser Ablation을 이용한 YBa₂Cu₃O_{7- δ} 초전도 박막의 합성," *응용물리*, **4**, 200 (1991).
 18. T. Hase, H. Izumi, K. Ohata, K. Suzuki, T. Morishita, and S. Tanaka, "Partial Oxygen Pressure Effects on the Morphology of Y-Ba-Cu-O Thin Films in Laser Deposition," *J. Appl. Phys.*, **68**, 374 (1990).
 19. B. Oh, Ph. D. Thesis, (Stanford University, 1988).
 20. W. Bauhofer, W. Biberacher, B. Gegenheimer, W. Joss, R.K. Kremer, H. Mattausch, A. Müller, and A. Simon, "Anisotropic Superconducting Properties of YBa₂Cu₃O_{7- δ} (x=0.1 and 0.4) Untwinned Single Crystals," *Phys. Rev. Lett.*, **63**, 2520 (1989).
 21. N.G. Chew, S.W. Goodyear, J.A. Edwards, J.S. Satchell, S.E. Blenkinsop, and R.G. Humphreys, "Effects of Small Changes in Composition on the Electrical and Structural Properties of YBa₂Cu₃O_{7- δ} Thin Films," *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 2016 (1990).
 22. T. Nagaishi, H. Itozaki, S. Tanaka, T. Matsuura, N. Ota, N. Fujimori, and S. Yazu, "YBa₂Cu₃O_{7- δ} Thin Film Prepared by Laser Ablation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**, L718 (1991).
 23. X.D. Wu, R.E. Muenchausen, S. Foltyn, R.C. Dye, C. Flamme, N.S. Nogar, A.R. Garcia, J. Martin, and J. Tesmer, "Effect of Deposition Rate on YBa₂Cu₃O_{7- δ} Superconducting Films," *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 1481 (1990).
 24. R. Ramesh, A. Inam, D.M. Hwang, T.D. Sands, C.C. Chang, and D.L. Hart, "Surface Outgrowth Problem in c-axis Oriented Y-Ba-Cu-O Superconducting Thin Films," *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 1557 (1991).
 25. R. de Reus, F.W. Saris, G.J. van der Kolk, C. Witmer, B. Dam, D.H. Blank, D.J. Adelerhof, and J. Flokstra, "Buffer Layers for Superconducting Y-Ba-Cu-O Thin Films on Silicon and SiO₂," *Material Science and Engineering*, **B7**, 135 (1990)
 26. D. Grischkowsky and S. Keiding, "THz Time-Domain Spectroscopy of High T_c Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1055 (1990).