

양축 정렬된 Ni기판 위에 MOCVD법에 의한 YBCO 초전도 선재용 CeO₂ 완충층의 증착

Deposition of CeO₂ buffer layer for YBCO coated conductors on biaxially textured Ni substrate by MOCVD technique

김호진*, 주진호**, 전병혁***, 정충환***, 박순동***, 박해웅#, 홍계원##, 김찬중###

Ho-Jin Kim**, Jinho Joo**, Byung-Hyuk Jun*, Choong-Hwan Jung*, Sun-Dong Park#, Hai-Woong Park***, Gye-Won Hong## and Chang-Joong Kim###

Abstract : Textured CeO₂ buffer layers for YBCO coated conductors were deposited on biaxially textured Ni substrate by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD). The degree of texture of deposited CeO₂ films was strongly dependent on the deposition temperature(Td) and oxygen partial pressure(PO₂). (100) textured CeO₂ films were well deposited at T= 500~520°C, PO₂= 0.90~3.33 Torr. The surface morphology showed that the films consisted of columnar CeO₂ films grown from the Ni substrates. The root mean square roughness of CeO₂ films estimated by atomic force microscopy(AFM) increased as the deposition temperature(Td) increased. The growth rate of the CeO₂ films deposited at T= 520°C and PO₂= 2.30 Torr was 150~200 nm/min that was much faster than that of other physical deposition methods.

Key Words : CeO₂ buffer layer, metalorganic chemical vapor deposition(MOCVD), deposition temperature (Td), oxygen partial pressure(PO₂)

1. 서 론

고온 초전도체의 발견 이후 지난 10 여년간 초전도체를 전력기에 응용하기 위한 많은 연구가 진행되었다. 현재까지 개발된 초전도 선재 가공공정 중에서 가장 보편적으로 사용되는 공정은 Powder-in-tube(PIT) 공정이다. 이 공정은 금속 실린더에 초전도 분말을 장입하여 기계적 가공공정으로 선재화하는 방법으로, 손쉽게 초전도 장선재를 제조할 수 있다. 그러나 모든 산화물 초전도체 선재화에 이 공정이 적용되는 것은 아니고 Bi 초전도체와 같이 가공성이 좋고 입자들이 가공방향으로 잘 배열되는 초전도체에 적용이 가능하다. 현재 이 공정을 이용하면 수 km의 Bi-계 초전도 장선재를 제작할 수 있다. Bi-계 초전도체와는 달리,

YBCO 선재는 77 K에서 통전능력이 수십만 A/cm² 급 이상으로 높고, 외부 자장에 대한 저항성도 우수하지만 PIT 공정시 결정 배향성이 떨어지기 때문에 이 공정으로 임계전류특성이 우수한 YBCO 선재를 제작할 수 없다.

Bi-계 초전도를 장선재로 가공이 가능하다 하더라도, 외부 자장에 대한 저항성이 약하기 때문에 고자장이 인가되는 환경에서 활용이 불가능하다. 이런 이유로 Bi-계 초전도체의 응용은 자장특성이 우수한 온도 영역인 20~30 K에 국한되어 있다. 결국 고온 초전도체를 보다 높은 온도에서 응용하려면 Bi-계 보다는 YBCO 초전도체를 이용하여 초전도 선재를 만들어야 한다. 지난 10년간 YBCO 초전도체의 선재화 연구 노력의 결과로 금속 모재 위에 초전도 박막을 증착시킨 박막형 초전도 선재가공공정이 개발되었다. 여러 박막형 초전도 선재 제조공정 중에 잘 알려진 공정은 RABiTS(Rolled Assisted Biaxial Texture Substrate) 공정이다. 이 공정은 집합조직을 갖는 금속 모재 위에 YBCO 초전도체를 박막증착방법을 이용하여 증착시키는 공정으로 증착된 초전도체의 임계전류밀도가 수십만 A/cm²로 통전특성이 대단히 우수하다. 모재는 압연과 후열처리를 통해 제작된 양축정렬된 Ni 테이프를 사용하며, 그 위에 몇개의 완충층을 증착시킨 후 완충층 위에 최종적으로 YBCO 박막을 증착시킨다[1,2].

초기 RABiTS 연구에서는 금속모재인 Ni 위에 직접 YBCO 박막을 증착시켰으나[3], 이 경우 Ni 원자들이 YBCO 박막층 내부로 확산, 침투하여 초전도 특성을 저하시키기 때문에 Ni 위에 직접 YBCO를 증착시키는 어렵다. 모재와 초전도체간의 반응을 억제하고 Ni 기판과 박막 사이의 격자 불일치를 보완하기 위한 중간 완충층을 증착한 다음에 그위에 초전도체를 증착하게 되었다. 지금까지 개발된 완충층 중에 가장 널리 사용되고 있는 물질은 CeO₂와 Ythrium-stabilized Zirconia(YSZ)이다. 이 중에 CeO₂는 YSZ에 비해 YBCO와의 격자 불일치가 적고, 열팽창계수가 비슷하기 때문에 보다 널리 사용되고 있다[4]. 그러나 CeO₂ 완충층은 두께가 커지면 열용력에 의한 미세균열이 발생하며 Ni에 대한 확산 억제효과가 또한 작다는 단점을 갖고있다. CeO₂ 박막은 PLD(pulsed laser deposition)[5,6], sputtering[7-9], e-beam evaporation[10,11] 등으로 제조되었으나, 두께가 1000Å 이상이 되면 미세균열이 발생하여 이를 통해 YBCO 층으로의 Ni 원자들이 확산하여 초전도 특성을 저하시키는 것으로 알려졌다[12 -14].

본 연구에서는 기존에 사용된 물리적 증착방법이 아닌 화학적 방법으로 CeO₂ 완충층을 증착해 보았다. 이

* 학생회원:성균관대 대학원 신소재공학과 박사과정
** 정 회 원:성균관대 금속재료공학부 부교수
*** 비 회 원:한국원자력연구소 원자력재료기술개발부
비 회 원:한국기술교육대학교 신소재공학과 부교수
정 회 원:한국산업기술대학교 전자공학부 부교수
정 회 원:한국원자력연구소 원자력재료기술개발부
원고접수: 2002년 05월 02일
심사완료: 2003년 01월 23일

용한 화학적 방법은 MOCVD(Metal organic chemical vapour deposition) 공정으로 증착 속도가 빠르고 대면적 증착에 유리하다. 이 공정은 반도체 제조에 일반적으로 적용되는 공정으로 초전도 coated conductor 제조에 적용할 경우 경제성 있는 장선재 제작이 가능할 것으로 생각되나, 아직 이 분야에 대한 연구가 폭넓게 진행되고 있지 않다. 본 연구에서는 RABiTS 공정과 같이 집합조직을 갖는 Ni 테이프 위에 MOCVD 공정으로 CeO₂ 박막을 증착하여 증착온도(Td)와 산소분압(PO₂)등의 증착변수에 따른 박막의 증착거동을 알아보았다. 또한 미세조직분석을 통하여 미세균열의 존재여부와 표면의 거칠기를 관찰하였다.

2. 실험방법

MOCVD 공정의 원료는 일반 CVD 공정과는 달리 고체상의 금속 유기물이다. 이 유기물은 약 200~300oC 온도에서 기화된다. 보통은 금속이나 세라믹 용기에 금속유기물을 정량하여 넣은 후 적당 온도로 가열하면 유기물이 분해되어 금속기가 기체상으로 변하게 된다. 그러나 이 경우 고체유기물이 기화되는 양상이 초기와 중기에 서로 다르기 때문에 균일한 증착조건을 찾기가 어렵다. 이런 문제를 해결하고자 본 연구에서는 고체유기물을 액체에 녹여서 액상을 만든 다음, 이 액상에 포함된 원료를 연속이동이 가능한 유리섬유에 균일하게 분산시킨 후 이 유리섬유를 가열함으로써 원료가 균일하게 기화되도록 하였다.

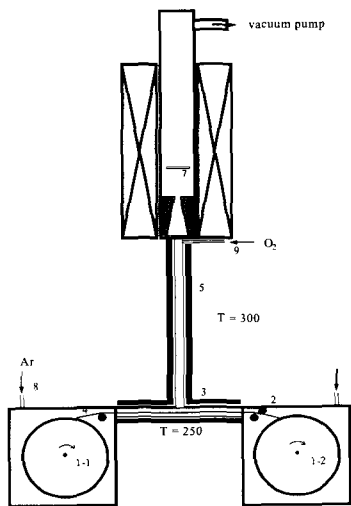


그림 1. Belt-type MOCVD 장비의 개요도: 1-1,1-2 : 토오크 모터, 2: DC 모터, 3: 증발부 4: 유리섬유밴드 5: 밴드히터 6: 노즐부 7: 기판부 8: Ar가스 주입부 9: O₂ 가스 주입부
Fig. 1. Schematic diagram of belt-driven precursor feeding system and MOCVD reactor: 1-1: feeding spool with tension, 1-2: winding spool 2: DC motor 3: evaporation zone 4: glass fiber band 5: band heater 6: nozzle 7: substrate. 8. Ar gas 9. O₂ gas

원료물질로는 열적으로 안정하고 비교적 낮은 온도에서 큰 증기압을 갖는 Ce(thd)₄(thd=2,2,6,6-tetramethyl-3,5-heptanedionato)킬레이트 화합물을 사용하였다.

원료물질을 정량하여 THF(tetrahydrofuran, Aldrich사)) 용매에 녹인 다음, 유리섬유 테이프를 원료 용액에 넣어 원료 용액이 유리섬유에 스며들도록 하였다. 유리섬유가 용액에 충분히 적셔지면 꺼내어 건조시킨 후, 그림 1에 나타난 CVD장치의 원료 공급부에 장착하였다. 이 원료 증착부는 reel-to-reel로 유리섬유 테이프가 한쪽 reel에서 다른 쪽 reel로 이동될 때 장치의 중간부에서 가열하여 원료가 기화되도록 고안된 것이다. CeO₂박막의 증착조건은 표 1에 나타내었다.

표 1. CeO₂ 박막의 증착조건
Table 1. Deposition parameters of CeO₂ films by chemical vapor deposition.

Precursor	Ce(thd) ₄
Deposition temperature, T(°C)	460 ~ 540
Total Pressure(Torr)	10
Oxygen partial pressure(Torr)	0.90 ~ 3.33
Deposition time(min)	10
Substrate angle (degree)	30 ~ 60
Substrate	Ni(200)

집합조직을 갖는 Ni 테이프는 미국 oxford사의 것으로 (200) 방위의 cube texture의 양측 정렬도가 8°이었다. 이 Ni 테이프를 1x1 cm²의 크기로 잘라서 시편 홀더에 부착시킨 다음, 반응로 내부에 위치시켰다. 원료를 기화시키기 전에 먼저 Ar+H₂(Ar:96%, H₂:4%)를 1000 sccm으로 흘려주면서, Ni 기판을 650oC 온도에서 10 분간 가열하여 Ni 표면에 부착되어 있을지도 모르는 산화막과 기타 유기불순물들이 제거되도록 하였다. 반응부의 전체압력과 증착시간 등을 일정하게 유지하고, 증착온도와 산소분압을 변화시키면서 변수에 따른 박막 증착거동을 관찰하였다.

Ni 위에 직접 증착시킨 CeO₂박막의 결정구조를 알고자 Rigaku사의 X-ray diffraction을 사용하였다. X-선의 회절분석은 35 kV, 15 mA에서 Cu-Kα(λ=1.5418 Å) target을 사용하였고, X-선 회절 구간은(2θ)은 25~55°이었다. AFM(atomic force microscopy)을 이용하여 박막 표면의 거칠기를 측정하였으며, 증착한 박막의 표면 미세조직과 증착두께는 주사전자현미경을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2(a)-(c)는 산소분압을 고정시키고 증착온도를 변화하였을 때 형성된 박막의 XRD 분석결과이다.그림 2(a)는 산소분압이 PO₂ = 0.90 Torr인 경우로서, 증착온도가 460℃일 때에는 CeO₂ (111) peak와 (200) peak 모두 관찰되었으며, 두 회절선 모두 회절강도가 매우 낮았다. 증착온도가 500℃일 때는 (200) peak는 거의 관찰되지 않고, (111) peak만 관찰되었다. 증착온도를 520℃로 높일 경우에는 (111) peak의 회절강도는 감소하였고, (200) peak의 회절강도는 증가하였다. 이 결과를 종합해 보면 PO₂ = 0.90 Torr의 산소압에서는 실험 온도 범위 내에서는 (111)면과 (200) 면이 모두 증착되고 있다고 할 수 있다.

그림 2(b)는 PO₂= 2.30 Torr의 경우로 460℃에서는 여전히 (111) peak와 (200) peak 모두 관찰되고 회절강

도가 미약하였으나, 온도를 480°C ~ 540°C로 증가하면 (111) peak는 낮아지고 상대적으로 (200) peak는 높아져서 (200) peak만을 나타내는 회절패턴을 얻을 수 있었다. 그림 2(c)에 나타난 PO₂ = 3.33 Torr에서의 XRD 패턴은 PO₂ = 2.30 Torr에서의 결과와 유사하게 온도 증가에 따른 단일 (200) 회절패턴이 얻어진다. 그러나 이 경우는 PO₂ = 2.30 Torr에 비해 상대적인 회절강도는 낮았다. CeO₂ 박막이 YBCO buffer로써 사용된다면

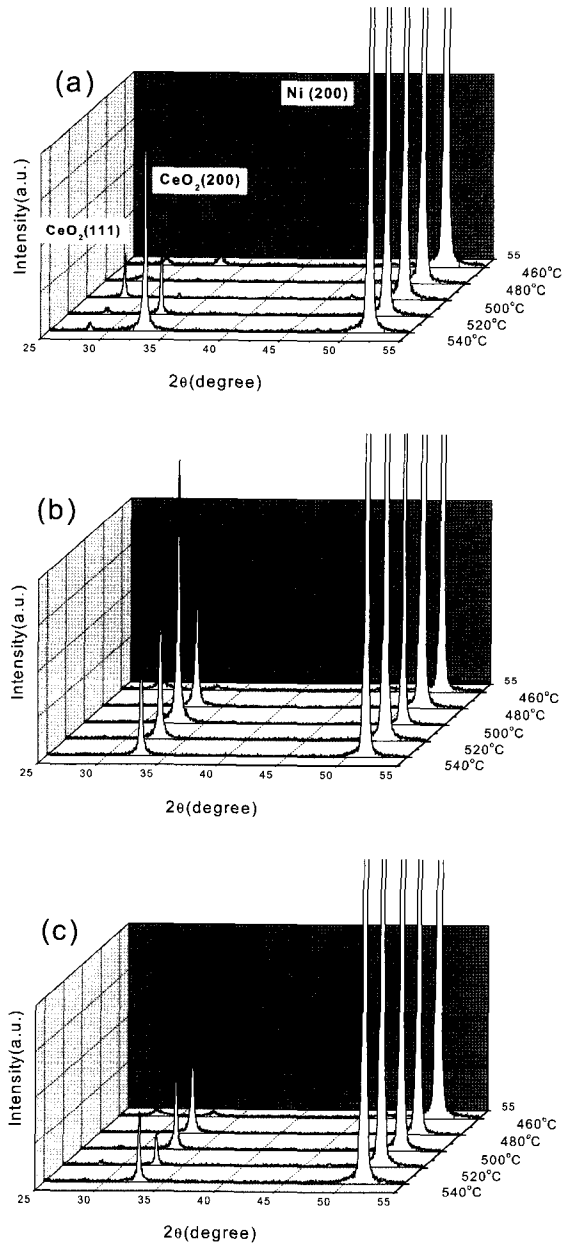


그림 2. 다양한 증착온도와 산소분압에 따른 CeO₂ 박막의 XRD 패턴: (a) 0.90 torr, (b) 2.30 torr, (c) 3.33 torr
Fig. 2. XRD patterns for the CeO₂ films deposited at various oxygen partial pressures and deposition temperatures (a) 0.90 Torr, (b) 2.30 Torr, and (c) 3.33 Torr.

(200) 면으로 박막이 성장해야 하며, 본 실험의 연구에서는 산소분압이 2.30 Torr, 증착온도가 480°C ~ 540°C 인 구간에서 박막증착이 가장 원활하였다.

그림 3은 전체압력을 10 Torr, 증착시간을 10분으로 유지시키고 산소분압 0.90~3.33 Torr, 증착온도 460~540°C 조건에서 증착시킨 CeO₂ 완충층에 대한 I(200)/{I(200)+I(111)}의 회절강도비를 나타낸 것이다. 그림 3(a)에서 알 수 있듯이, 증착온도가 480°C, 500°C인 경우, 산소분압이 2.30 Torr 이상에서 회절강도비가 100%인데, 이는 (111)면이 존재하지 않고 단지 (200)면 성장만이 이루어졌음을 의미한다. 520°C, 540°C인 경우에는 산소분압이 0.90 Torr에서는 회절강도비가 95% 정도이며, 2.30 Torr에서는 100%이었다. 그림 3(b)에서 볼 때, 산소분압이 0.90 Torr의 경우 증착온도가 증가함에 따라 I(200)/{I(200)+I(111)}의 회절강도비가 증가하였으며, 증착온도가 520°C에서 (200)면 성장이 활발하게 이루어졌다. 산소분압이 2.30 Torr와 3.33 Torr의 경우, 증착온도가 480°C부터 대부분 (200)면 성장이 이루어졌다.

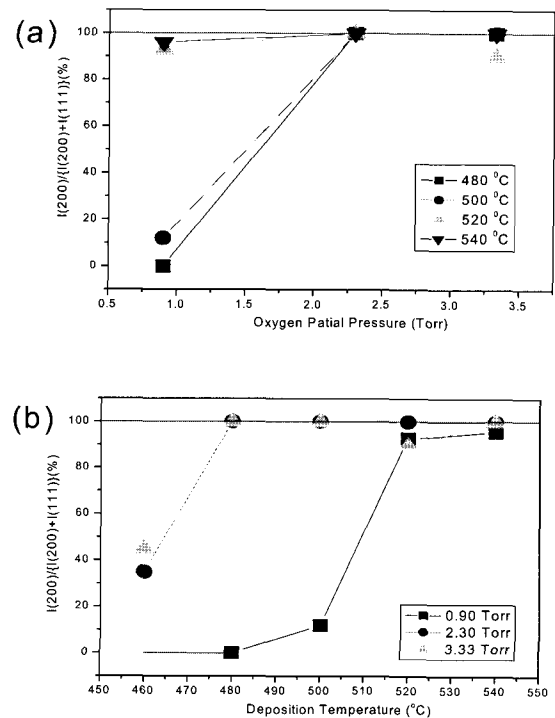


그림 3. CeO₂ 박막의 I(200)/{I(200)+I(111)}회절강도비; (a) 산소분압 (b) 증착온도
Fig. 3. Intensity ratio of I(200)/{I(200)+I(111)} of CeO₂ buffer layer on Ni substrates; (a) various oxygen partial pressures, (b)deposition temperatures.

그림 4(a)-(e)는 산소분압을 2.30 Torr로 일정하게 유지시키고 증착온도를 변화시켰을 때의 표면 미세조직을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 증착온도가 높을수록 결정입자가 커지는 것을 알 수 있다. 460°C에서는 Sanghyun Oh 등[12-14]에서 보고한 것처럼 미세균열이 나타났으며, 1 μm 정도의 크기로 갈라져 시편 전체에 넓게 퍼져 있었다. 480°C에서는 박막이 균질하고 입자 크기가 작았으나, 시편 전체에 미세균열이 관찰되었다. 500°C에서는 박막이 균질하고 입자 크기가 130~160 nm였으며 미세균열도 관찰되지 않았다. 520°C에서도 박막표면이 전반적으로 균질하면서 입자 크기가 150~230 nm였으며 미세균열도 관찰되지 않았다. 그러나 540°C에서 증착시킨 박막은 220~620 nm 정도의 큰 입자들로 이루어져 있으며, 입자면이

facet한 모양을 나타내었다. 이는 증착온도가 고온일 때 입자성장에 의해서 일어나는 일반적인 미세구조이다. Qing He 등[13]은 CeO₂ 박막의 미세균열이 Ni 기판과 CeO₂사이의 열팽창 계수 차이에 의한 것으로 보고하였으며, Sanghyun Oh 등[12]은 Ni의 열팽창 계수가 CeO₂보다 크므로 증착 후 냉각과정에서 compressive stress(압축응력)을 받게 되므로 열팽창 계수의 차이가 tensile stress(인장응력)을 유발하여 미세균열을 형성시켰다고 보기 어려우며, 기판과 박막간의 lattice mismatch가 심한 경우 미세균열이 생길 가능성이 높다고 보고하였다. 본 실험에서도 낮은 증착 온도에서 미세균열이 발생하였으며, 온도가 증가하였을 때 미세균열이 발생하지 않은 것으로 볼 때 열 응력만으로 미세균열을 설명하기는 미흡할 것으로 사료된다.

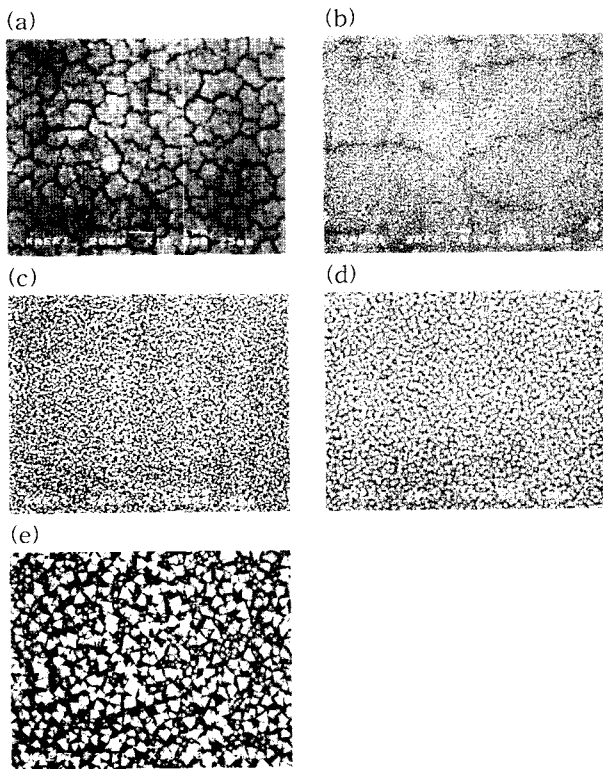


그림 4. 증착온도에 따른 CeO₂ 박막의 표면 미세조직 (SEM)사진 (PO₂= 2.30 Torr, td= 10 min); (a) 460°C, (b) 480°C, (c) 500°C, (d) 520°C, (e) 540°C
Fig. 4. SEM micrograph of the surface of deposited CeO₂ films at PO₂= 2.30 Torr and Td=(a) 460°C, (b) 480°C, (c) 500°C, (d) 520°C and (e) 540°C.

그림 5는 산소분압을 2.30 Torr로 일정하게 유지시키고 증착온도를 변화시켰을 때의 박막 표면의 거칠기를 관찰한 AFM 사진이다. 증착온도가 460°C에서 표면의 거칠기가 5 nm 정도로 매우 균질하였으나 증착 온도가 520°C에서는 51 nm로 증착온도가 증가할수록 표면의 거칠기가 증가하였다. 그림 4와 그림 5의 결과로부터 증착온도가 높아질수록 결정성장에 의해 결정의 크기가 커지면서 표면의 거칠기가 증가하였음을 알 수 있다.

그림 6은 PO₂= 2.30 Torr and Td= 520°C 인 조건에서 10분간 증착시킨 CeO₂ 박막의 단면을 관찰한 SEM 사진이다. CeO₂ 박막이 c축 방향으로 columnar 구조로 잘 증착되었음을 보여주며, 박막의 두께는 1.5~

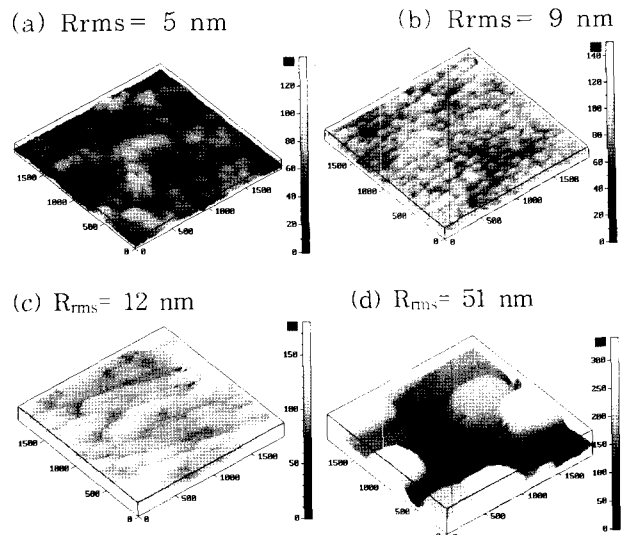


그림 5. 증착온도에 따른 CeO₂ 박막의 표면(AFM)사진 (PO₂= 2.30 Torr, td= 10 min); (a) 460°C, (b) 480°C, (c) 500°C, (d) 520°C
Fig. 5. AFM images of the surface of deposited CeO₂ films at PO₂= 2.30 Torr and Td= (a) 460°C, (b) 480°C, (c) 500°C and (d) 520°C.

2.0 μm이었다. 이 두께로부터 증착속도를 계산한 결과 150~200 nm/min이었다. Electron beam evaporation법으로 CeO₂ 박막을 증착시킨 M. Paranthaman 등[14]의 결과에서의 CeO₂ 박막의 증착속도는 6 nm/min였다. 또한 RF sputtering법으로 증착시킨 M. Španková 등[15]의 결과에서의 증착속도는 혼합가스 (Ar:O₂ = 1:1) 분위기에서는 0.5 nm/min, 산소분위기에서는 0.35 nm/min였다. 이는 PVD법보다 MOCVD법으로 CeO₂ 박막을 증착시킬 경우 상대적으로 빠른 시간에 박막을 증착시킬 수 있다는 것을 의미한다.

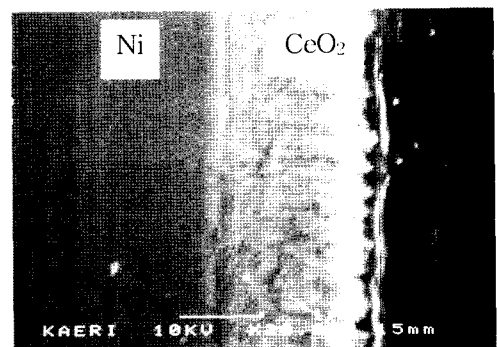


그림 6. CeO₂ 박막의 단면(AFM)사진 (Td=520°C, PO₂= 2.30 Torr, td= 10 min)
Fig. 6. SEM image of the cross section in CeO₂ film (Td=520°C, PO₂= 2.30 Torr, td= 10 min)

4. 결 론

양축 정렬된 Ni 기판 위에 MOCVD법을 사용하여 CeO₂ 박막을 증착시켰다. 증착조건은 증착온도와 산소분압이었으며, 그에 따른 XRD 패턴과 표면 미세조직 및 두께를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산소분압이 2.30 Torr, 증착온도가 500°C~520°C인

구간에서 (200)면의 방향성 성장이 원활하게 이루어졌다.
 2. 480°C 이하의 낮은 증착온도에서는 미세균열이 관찰되었지만, 500°C 이상의 온도에서는 관찰되지 않았다. 반면, 증착온도가 증가할수록 입자 성장에 의해 입자의 크기가 증가하였다.
 3. 증착온도가 증가할수록 박막 표면의 roughness가 증가하였다.
 4. 산소분압이 2.30 Torr, 증착온도가 520°C인 조건에서 10분간 증착시켰을 때의 증착속도는 150~200 nm/min으로 다른 PVD 공정과 비교해 증착속도가 높았다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] A. Goyal, "High critical current density superconducting tapes by epitaxial deposition of YBa₂Cu₃O_x thick films on biaxially textured metals", Appl. Phys. Lett., vol. 69, pp.1795-1797, September 1996.
 [2] D.P. Norton et al. "Epitaxial YBa₂Cu₃O₇ films on rolled-textured metals for high-temperature superconducting applications", Materials Science and Engineering B, vol. 56, pp.86-94, 1998.
 [3] B. Champagne, et. al "Solid-state interaction between nickel and YBa₂Cu₃O_x", Supercon. Sci. and Tech., vol. 2, pp.25-28, 1989.
 [4] Anchuan Wang et al. "Buffers for high temperature superconductor coating. Low temperature growth of CeO₂ films by metal-organic chemical vapor deposition and their implementation as buffers", Physica C, vol. 320, pp.154-160, 1999.
 [5] M.W. Denhoff, J.P. McCaffrey, "Epitaxial YBa₂Cu₃O₇ thin films on CeO₂ buffer layers on sapphire substrates", J. Appl. Phys, vol. 70, pp. 3986-3988, 1991
 [6] X.D. Wu et al. "Epitaxial CeO₂ films as buffer layers for high-temperature superconducting thin films", Appl. Phys. Lett., 58, pp.2165-1267, 1991
 [7] S. Yaegashi, T. Kurihara, "Epitaxial Growth of CeO₂ Films on Si(111) by Sputtering". Jpn. J. Appl. Phys, vol. 33, pp. 270-274, 1994
 [8] S. Guo et al. "A spectroscopic ellipsometry study of cerium dioxide thin films grown on sapphire by rf magnetron sputtering", J. Appl. Phys, vol. 77, pp. 5369-5376, 1995
 [9] F. Wang, R. Wordenweber, "Large-area epitaxial CeO₂ buffer layers on sapphire substrates for the growth of high quality YBa₂Cu₃O₇ films", Thin Solid Films, 227, pp. 200-204, 1993
 [10] T. Inoue et al. "Growth of (110)-oriented

CeO₂ layers on (100) silicon substrates", Appl. Phys. Lett., vol. 59, pp. 3604-3606, 1991
 [11] I. M. Kotelyanskii et al. "Deposition of CeO₂ films including areas with the different orientation and sharp border between them" Thin Solid Films, vol. 280, pp.163-166, 1996
 [12] Sanghyun Oh et al. "Comparative study on the crack formations in the CeO₂ buffer layers for YBCO films on textured Ni tapes and Pt tapes", Physica C, vol. 308, pp.91-98, 1998.
 [13] Qing He et al. "Deposition of biaxially-oriented metal and oxide buffer-layer films on textured Ni tapes: new substrates for high-current, high temperature superconductors", Physica C, vol. 275, pp.155-161, 1997.
 [14] M. Paranthaman et al. "Growth of biaxially textured buffer layers on rolled-Ni substrates by electron beam evaporation", Physica C, vol. 275, pp.266-272, 1997.
 [15] M. Pankov et al. "Growth and recrystallization of CeO₂ thin films deposited on R-plane sapphire by off-axis RF sputtering", J. Crystal. Growth, vol. 218, pp. 287-293, 2000.

저자 소개



김호진(金昊振)

1971년 11월 25일생. 1999년 수원대학교 전자재료공학과 졸업. 2001년 성균관대학교 신소재공학과 졸업(공학석사). 현재 동대학원 박사과정



주진호(朱鎭皓)

1961년 12월 6일생. 1984년 성균관대학 졸업(공학박사). 교 금속공학과 졸업. 1988년 웨스민주립대 금속공학과 졸업(공학석사). 1993년 미국 일리노이 공대 금속공학과 현재 성균관대학교 금속재료공학부 교수



전병혁(全炳赫)

1970년 10월 17일생. 1993년 고려대학교 재료공학과 졸업. 1995년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학석사), 1998년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 한국원자력연구소 선임연구원



정충환(鄭忠桓)

1964년 5월 9일생. 1988년 연세대학교 공대 요업공학과 졸업. 1990년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학석사). 현재 한국원자력연구소 선임연구원



박순동(朴淳東)
1955년 5월 25일생. 1987년 대전 한밭
대학교 화학공학과 졸업. 1996년 전북
대학교 화학공학과 졸업(공학석사).
현재 한국원자력연구소 선임연구원



박해웅(朴海雄)
1958년 3월 15일생. 1984년 인하대학교
금속공학과 졸업. 1989년 U. Illinois 금
속공학과 졸업(공학석사). 1994년 U.
Illinois 금속공학과 졸업(공학박사). 현
재 한국기술교육대학교 신소재공학과
부교수



홍계원(洪啓源)
1956년 4월 3일생. 1978년 서울대학교
재료공학과 졸업. 1980년 한국과학원
재료공학과 졸업(공학석사). 1983년 한
국과학기술원 재료공학과 졸업(공학박
사). 1983- 2001년 한국원자력연구소,
책임연구원. 현재 한국산업기술대학교
전자공학부 부교수



김찬중(金瓚中)
1958년 10월 26일생. 1983년 성균관대
학교 금속공학과 졸업(학사) 1986년 한
국과학기술원 재료공학과 졸업(공학석
사) 1986년 한국과학기술원 재료공학
과 졸업(공학박사) 현재 한국원자력연
구소 초전도 과제책임자