

Deposition of Y-Sm Oxide on Metallic Substrates for the YBCO Coated Conductor by MOCVD Method

Jun-Kyu Choi^{*,a}, Min-Woo Kim^{a,b}, Byung-Hyuk Jun^a, Hee-Gyoun Lee^c,
Gye-Won Hong^c, Chan-Joong Kim^a

^a Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

^b Chungnam National University, Daejeon, Korea

^c Korea Polytechnic University, Siheung, Korea

Received 12 August 2005

금속 기판 위에 MOCVD법에 의한 YBCO Coated Conductor용 Y-Sm 산화물 완충층 증착

최준규^{*,a}, 김민우^{a,b}, 전병혁^a, 이희균^c, 홍계원^c, 김찬중^a

Abstract

Complex single buffer composed of yttrium and samarium oxide was deposited on the metallic substrates by MOCVD (metal organic chemical vapor deposition) method using single liquid source. Two different types of the substrates with in-plane textures of about 8~10 degree of Ni and 3at.%W-Ni alloy were used. Y(tmhd: 2,2,6,6-tetramethyl-3,5-heptane dionate)₃:Sm(tmhd)₃ of liquid source was adjusted to 0.4:0.6 to minimize the lattice mismatch between the complex single buffer and the YBCO. The epitaxial growth of (Y_xSm_{1-x})₂O₃ was achieved at the temperature higher than 500°C in O₂ atmosphere. However, it was found that the formation of NiO accelerated with increasing deposition temperature. By supplying H₂O vapor, this oxidation of the substrate could be suppressed throughout the deposition temperatures. We could get the epitaxial growth on pure Ni substrate without the formation of NiO. The competitive (222) and (400) growths were observed at the deposition temperatures of 650~750°C, but the (400) growth became dominant above 800°C. The (Y_xSm_{1-x})₂O₃-buffered metallic substrates can be used as the buffer for YBCO coated conductor.

Keywords : MOCVD, single buffer, YBCO coated conductor

I. Introduction

초전도 전이온도 30K의 La-Ba-Cu-O 산화물 계 초전도체에 관한 연구결과가 발표된 1987년 이후 [1], Y-Ba-Cu-O (YBCO), Ba-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) 등 90K 이상의 높은 초전도 전이온

*Corresponding author. Fax : +82 42 868 8275

e-mail : cjk1020@hanafos.com

도를 갖는 다양한 산화물계 초전도체가 경쟁적으로 개발되어 왔다 [2~4]. 이 후 벌크 형태의 응용에 국한되었던 초전도체의 응용범위가 초전도 모터, 변압기, 케이블, 한류기 개발 등의 전력기반산업으로 확대되면서 고밀도 전력수송과 가공의 용이성이 전제되는 박막(thin film)형 초전도체(coated conductor) 개발에 많은 연구가 집중되었으며 [5,6], 최근 들어 높은 자장 및 운전 온도에서도 초전도특성의 현저한 저하가 없는 YBCO 초전도체에 대한 관심이 한층 높아지고 있다 [7].

Coated conductor 제조공정에는 (a) 이축 정렬된 입방조직(cube-texture)의 기판 제조, (b) 계면 화학반응 및 격자 불일치(lattice mismatch)를 최소화하는 완충층(buffer layer) 제조, (c) 높은 임계 전류밀도의 초전도층(superconducting layer) 제조 등 bulk 초전도체 제조공정과 구별되는 몇 가지 세부공정이 요구된다. 초전도층 제조에 있어서는 metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) 및 pulsed laser deposition (PLD) 공정이 유력하며, 선행연구를 통하여 두 공정 모두 100A 이상의 높은 임계전류를 가지는 미터급 coated conductor 제조에 성공적으로 기여한 바 있다 [8,9]. 또한, 기판 및 완충층 제조에 있어서는 ionized beam-assisted deposition (IBAD) 공정 및 rolling-assisted biaxially textured substrate (RABiTS) 공정이 가장 유망한 공정으로 평가받고 있다 [10,11]. 한편, 전류밀도 및 박막특성 향상을 위해 이상과 같은 새로운 공정개발에 주력하였던 초기 연구방향은 초전도 선재의 상업적 응용 가능성에 대한 논의가 활발해지면서 증착속도 증가를 통한 생산성 향상과 지적 재산권 소유를 통한 시장 선점경쟁 등으로까지 확대되었다. 최근에는 coated conductor 제조에 필수적인 완충층 제조분야에서의 신기술 확보로 안정적인 기판 공급과 로열티 절감에 따른 경제성 확보를 동시에 이루려는 시도가 적극적이며, 일본에서 개발된 $Gd_2Zr_2O_7$ (GZO)가 이러한 노력의 대표적인 산물이다 [12].

본 연구에서는 이제까지 완충층 제조분야에 시도된 바 없는 yttrium과 samarium의 혼합 원

료로부터 액상의 단일 원료용액을 제조한 후 이축 배향된 금속 기판 위에 증착 함으로써 YBCO 초전도층의 직접 증착이 가능한 complex single buffer layer를 제조하고자 하였으며, YBCO와의 격자 불일치 최소화를 위하여 Y과 Sm의 초기 혼합 비를 0.4:0.6으로 조절하였다. 높은 증착속도로 대면적 증착이 가능하며 이동 중의 기판 상에도 안정적인 증착이 가능한 것으로 알려진 MOCVD 공정과 [13], 분말야금 및 압연공정을 통하여 제조된 Ni 및 3at.%W-Ni 합금 선재가 증착방법 및 원료 기판으로 각각 사용되었다.

II. Experimental

Y(tmhd)₃; 2,2,6,6-tetramethyl-3,5-heptane dionate)₃와 Sm(tmhd)₃가 원료 물질로 사용되었다. 이들은 NewChem Materials사(Korea)에서 제조된 증발온도 200~300°C의 킬레이트화 금속 유기 화합물들로, 상온에서 우수한 안정성과 높은 증기압을 나타낸다. Aldrich사(USA)의 시약급 THF (tetrahydrofuran)가 액상의 원료 물질 제조를 위한 용매로 사용되었으며, 선정된 모든 시약은 더 이상의 정제 없이 그대로 사용되었다.

Y(tmhd)₃:Sm(tmhd)₃ = 0.4:0.6으로 혼합된 4g의 고상(solid phase) 원료물질을 50ml의 THF에 용해시켜 액상(liquid phase)의 원료 혼합물을 제조한 후, 30m의 유리 섬유 테이프(glass fiber tape)에 흡수시켰다. 흡수가 완전히 이루어지면 source chamber 내의 reel-to-reel 장치에 섬유 테이프를 장착하고 감압 하에서 건조하였다. 건조공정에서 증발된 THF와 유기물질은 rotary pump에 의하여 외부로 배출되었으므로, 섬유에는 nano급의 Y과 Sm만이 분산된 형태로 잔류하게 된다. 증착 공정 시에는 원료 물질이 분산된 유리 섬유 테이프를 15.6cm/min의 일정한 속도로 이동시켰으며, 원료 물질은 이를 통해 0.02g/min의 공급 속도로 이송되었다. 300°C의 증발부를 지나면서 기상(gas phase)으로 전환된 원료 물질은 운반기체(carrier gas)와 함께 320°C의 공급라인

을 거쳐 반응기로 유입되었고 산소 링(O₂-ring)을 통하여 공급된 산소 또는 수증기와 혼합되었다. 증착 반응은 이러한 반응기체와 예열된 금속 기판들이 접촉하면서 시작되는데, 본 연구에서는 450~800°C의 증착 온도범위에서 10분간 증착반응을 수행하였다.

기판으로 사용된 6×12 mm의 Ni과 3at.%W-Ni 합금 선재는 분말야금 및 압연공정을 거쳐 자체 제조된 것이며, 수십 미터 이상의 길이에서도 in-plain texture가 8~10° 이내의 균일한 값을 나타내는 우수한 특성을 지니고 있다. 본 연구에서는 기판으로 사용된 Ni 및 Ni 합금의 산화 반응 억제를 위하여 산소 및 수증기를 병행 사용하였으며, 이를 위해 1000sccm 이내의 범위에서 미세 유량 조절이 가능한 수증기 공급장치를 별도로 제작하여 설치하였다.

증착된 모든 박막에 대하여 X-ray diffraction (XRD) 분석을 통한 결정학적 고찰이 이루어졌으며, 이를 토대로 (Y_xSm_{1-x})₂O₃ 및 NiO의 생성 여부가 확인되었다. 제조된 박막의 표면 및 단면은 scanning electron microscope (SEM)과 energy dispersion spectroscopy (EDS)로 관찰되었다.

III. Result and discussion

입방(cubic) 구조에 관한 JCPDS 자료에 의하면 Y₂O₃ 및 Sm₂O₃의 격자상수(lattice parameter)는 각각 10.604 Å 및 10.927 Å으로 알려져 있다. 입방 구조의 YBCO에서는 그 값이 3.812 Å이므로, Y₂O₃의 결정면 위에 YBCO 결정이 성장되려면 YBCO의 ab면이 Y₂O₃의 ab면에 45° 비틀어진 형태가 가장 안정적일 것임을 고려하여야 한다. 이러한 유사 입방(pseudocubic) 구조를 전제하여 생각할 때 Y₂O₃과 Sm₂O₃의 격자상수는 각각 3.749 Å와 3.863 Å으로 계산되며, YBCO와의 격자 불일치(%)는 다음의 Eq. (1)에 의하여 1.68 및 -1.33%에 대응된다. 여기서, LM은 기준층 상부 결정면에 대한 증착 층 하부 결정면의 격자 불일치 정도를 뜻하며, a는 각 결정면의 격자상수를 의미한다.

$$LM(\%) = (a_{YBCO} - a_{Buffer}) / a_{Buffer} \times 100 \quad (1)$$

Y과 Sm 원자간의 전율(isomorphous) 고용을 전제할 때, (Y_xSm_{1-x})₂O₃와 YBCO 간의 격자 불일치 정도는 아래의 Eq. (2)에 의하여 표현된다.

$$LM_{complex}(\%) = x 1.68 + (1 - x)(-1.33) \quad (2)$$

이로부터, Y 원자의 혼합 몰 비에 따른 격자 불일치 변화를 Table 1과 같이 정리할 수 있다.

Table 1. Theoretical % lattice mismatch between YBCO and (Y_xSm_{1-x})₂O₃ with the mixing ratio of the yttrium.

Mixing ratio, x	0.3	0.4	0.5
LM _{complex} (%)	-0.427	-0.126	0.175

이러한 결과들은 Y과 Sm의 혼합 비를 적절히 조절함으로써 (Y_xSm_{1-x})₂O₃와 YBCO 결정간의 격자 불일치 정도를 자유롭게 조절할 수 있음을 의미하는 것으로, MOCVD과 같이 다양한 조성의 원료 제조가 용이한 공정들에 특히 유용하다. 본 연구에서는 Y(tmhd)₃:Sm(tmhd)₃ 혼합 비를 0.4:0.6으로 조절하여 YBCO와의 격자 불일치 최소화를 모색하였으며, 격자 불일치가 상대적으로 큰 Ni 및 3at.%W-Ni의 금속 기판 위에 (Y_xSm_{1-x})₂O₃ 형태의 산화물 완충층을 직접 증착시킴으로써 MOCVD 공정을 위한 YBCO용 단일 완충층(single buffer layer)으로서 나타내는 이들 박막의 응용 가능성을 평가하였다.

Fig. 1에 Ni 기판 위에 증착된 (Y_{0.4}Sm_{0.6})₂O₃ 박막('YSmO'로 표기)의 XRD 분석결과를 도시하였다. 증착 반응 시의 산소 유량 및 증착 압력은 각각 500sccm과 10Torr이었다. 500°C 이상에서부터 YSmO의 epitaxial growth가 관찰되며, 증착온도 증가에 따라 (222) 및 (400) YSmO의 회절강도도 비례적으로 증가하였다. 그러나 증착온도가 증가함에 따라 Ni 기판의 산화반응도 함께 가속화되었으며, 증착온도 750°C 이상에서는 YSmO의 결정 성장보다 (111) NiO 성장이 오히려 우세하였다. Ni 기판 산화에 의한 (111) 방향의 NiO 결정성장은 (200) NiO층과는 달리

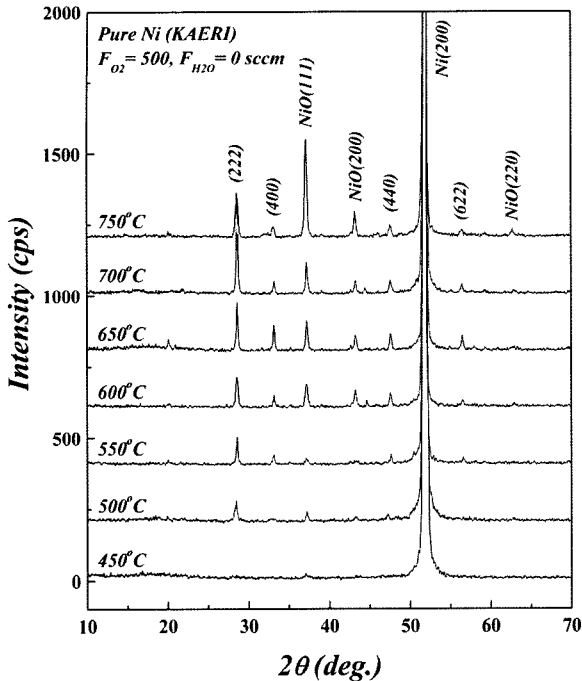


Fig. 1. XRD patterns of $(Y_{0.4}Sm_{0.6})_2O_3$ films deposited on Ni substrates by O_2 supply with deposition temperatures.

초전도 박막 제조에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 [14]. 따라서, YBCO 증착용 완충층으로 $(Y_xSm_{1-x})_2O_3$ 박막을 이용하고자 하는 경우 (111) NiO의 생성을 최대한 억제하여야 하며, $(Y_xSm_{1-x})_2O_3$ 의 결정 배향 또한 가능한 (h00)방향으로 이루어지도록 증착조건을 적절히 조절하여야 한다. 그러나, 산소 공급 조건에서 시행된 증착반응에서는 유량 및 압력 등의 어떠한 변수 변화에도 기판의 산화가 억제되지 않았으며, 산화 정도가 비교적 작은 $500^\circ C$ 이하의 증착조건에서는 NiO뿐만 아니라 YSmO 박막의 안정적인 생성도 함께 제한되었다.

Fig. 2에 $750^\circ C$ 의 산소 공급 분위기에서 증착된 YSmO 박막의 단면 EDS 분석결과를 나타내었다. 기 예측된 바와 같이 산화반응에 의한 Ni 원자확산이 증착된 YSmO 박막의 표면으로까지 이어지고 있음을 확인할 수 있다.

기판 표면에서의 산화반응 억제를 위해 산소 대신 수증기를 공급하면서 동일한 증착공정을 수행하여 보았다. 그 결과 어떤 온도조건에서

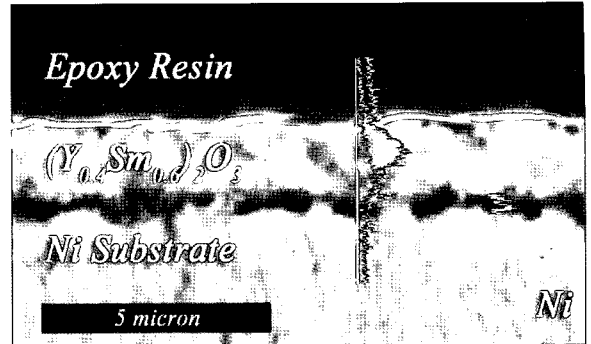


Fig. 2. Result of EDS line-scan for the $(Y_{0.4}Sm_{0.6})_2O_3$ film deposited on Ni substrate by O_2 supply at $750^\circ C$.

도 NiO의 생성이 관찰되지 않았으며, 이는 산소 공급 환경에서 $500^\circ C$ 이상의 모든 증착온도에 걸쳐 Ni의 산화가 진행되었던 것과 비교하여 크게 주목되는 결과이다. Fig. 3에 도시된 박막들은 Fig. 1의 박막들과 같은 조건에서 제조된 것이므로 이러한 변화는 산소를 수증기로 대체함에 따라 발생한 것임이 분명하다. 이는 원료로 사용된 Y 및 Sm 원자들이 물 분자들로부터 산소 원자들을 우선적으로 취하여 NiO보다 열역학(thermodynamics)적으로 안정한 [15] Y_2O_3 와 Sm_2O_3 를 상대적으로 빠른 속도로 형성시키기 때문으로 생각되며, 이 과정에서 Ni 원자들은 (a) 산소 원자들을 충분히 공급받지 못하는 동시에 (b) 물 분자들로부터 해리(disassociation)된 환원성의 수소 원자들에 의해 산화반응이 억제되어 NiO로의 전환이 크게 제한된다.

Fig. 1과 3을 비교하여 볼 때 (222) 및 (400) YSmO의 초기 생성온도가 각각 $500^\circ C$ 와 $650^\circ C$ 로 구별되는 것을 알 수 있다. 이는 산소 대신 수증기를 공급하는 경우 산소 생성을 위한 물 분자 해리과정에 추가적인 에너지가 요구되기 때문으로 해석된다. 그러나, 수증기 공급에 의한 반응기구(mechanism) 변화에 관해서는 앞으로 계속적인 연구가 필요하며, 아직까지 명확한 반응경로에 대한 논의는 충분히 이루어지지 않았다. 수증기를 산소 공급원으로 하여 증착된 박막의 경우 $750^\circ C$ 의 증착온도까지 (222)과 (400) YSmO결정 성장이 경쟁적으로 이루어졌으나, 증착온도가 $800^\circ C$ 이상으로 증가함에

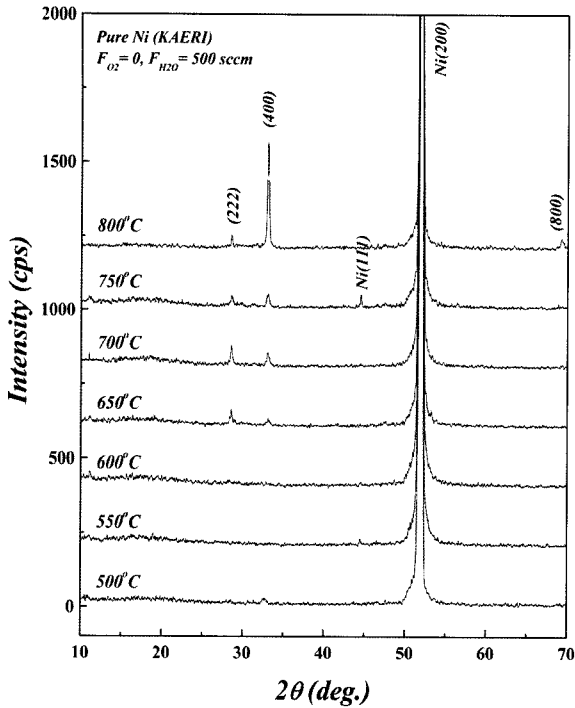


Fig. 3. XRD patterns of $(Y_{0.4}Sm_{0.6})_2O_3$ films deposited on pure Ni substrates by H_2O vapor supply with deposition temperatures.

따라 (400) epitaxial growth가 현저히 우세하여 짐이 확인되었다.

Fig. 4에 수증기 공급을 통하여 각기 다른 온도에서 증착된 YSmO 박막의 SEM 표면사진을 나타내었다. 500°C에서 증착된 Fig. 4 (a) 박막의 경우 증착이 거의 이루어지지 않았으나, 증착 온도가 (b) 600°C, (c) 700°C로 증가함에 따라 결정립의 크기가 서서히 증가하는 경향을 보였다. 그러나, Fig. 4 (b)의 결과를 Fig. 3의 XRD 분석 결과와 조합하여 볼 때 각 입자들은 박막으로 성장된 YSmO의 결정립이 아닌 Y_2O_3 와 Sm_2O_3 의 독립된 결정립들로 생각된다. 한편, Fig. 4 (c)와 (d)의 굵은 입자들은 (222) YSmO 결정립들로 추측되며, 산재된 입자들 사이로 보이는 짙은 색상의 고른 형상은 미세 결정립들이 높은 밀도로 배향하여 형성한 (400) YSmO박막 표면으로 판단된다.

Fig. 4에 도시된 분석 결과로부터, 제조된 박

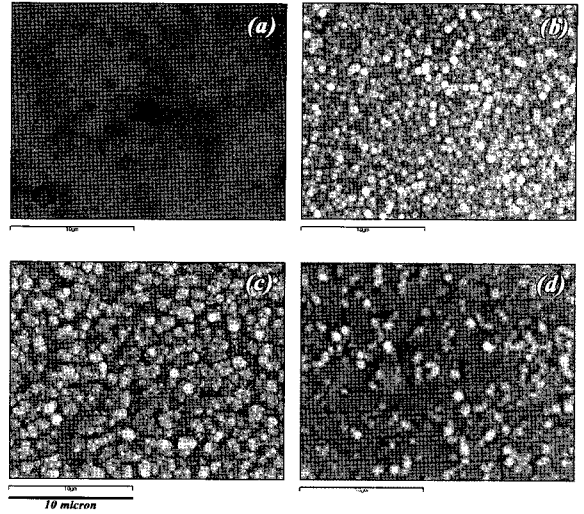


Fig. 4. SEM planar morphologies of $(Y_{0.4}Sm_{0.6})_2O_3$ films deposited on pure Ni substrates by H_2O vapor supply at; (a) 500°C, (b) 600°C, (c) 700°C and (d) 800°C.

막의 표면 거칠기(luminous intensity roughness)나 결정립의 크기 분포가 기존의 범용 완충층들보다 다소 불균일함을 알 수 있었다. 그러나 이러한 특성들은 원료 공급량 또는 원료 공급속도 감소 등을 통한 증착속도 조절과 적절한 연마(polishing)공정 등을 통한 표면 처리를 통하여 충분히 개선 가능하며, 증착온도를 상승시키거나 적절한 후-열처리(post-annealing)과정을 거침으로써 완전 배향(fully-orientated)된 YSmO 박막을 얻는 것도 가능할 것으로 기대된다.

Fig. 5는 수증기를 사용하여 3at.%W-Ni 합금 기판에 증착시킨 YSmO박막의 XRD 회절 패턴 분석결과이다. 순수 Ni 기판 위에 증착된 다른 박막들과 마찬가지로 모든 증착온도 범위에 걸쳐 NiO의 생성은 발생되지 않았다.

증착온도 증가에 따른 회절패턴 변화에 있어서도 Fig. 3의 결과와 매우 유사한 경향을 나타내었으나, (222) YSmO의 생성 개시온도가 Ni 기판에 비하여 전체적으로 높았다. 또한, 높은 증착온도에서 (400) YSmO 성장이 현저히 우세하였던 Fig. 3의 경우와 달리 Fig. 5에서는 700°C 이상의 모든 온도범위에서 (222) YSmO성장이 우세하였다. 일반적으로 Ni에 W과 같이 원자

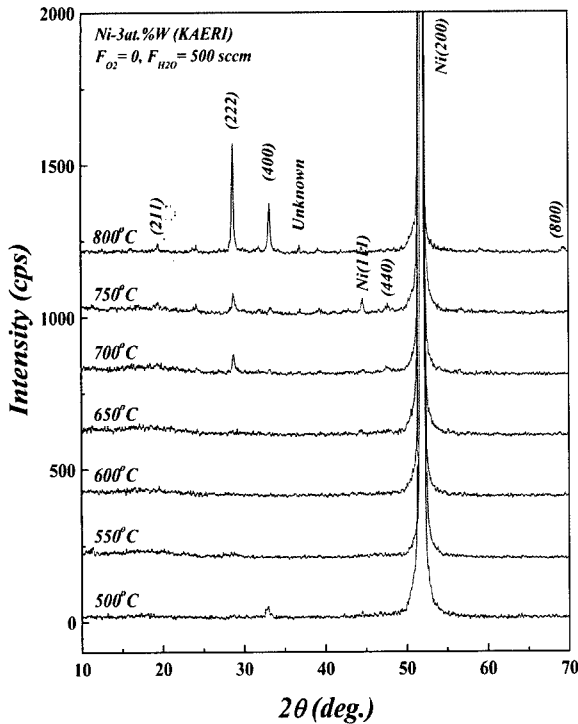


Fig. 5. XRD patterns of $(Y_{0.4}Sm_{0.6})_2O_3$ films deposited on 3at.%W-Ni substrates by H_2O vapor supply with deposition temperatures.

반경이 한층 큰 원소가 합금화되는 경우 격자상수가 증가하는데, 이러한 경향은 본 연구진에 의하여 제조된 3at.%W-Ni합금의 경우에서도 관찰되었다. 즉, 3.524\AA 의 격자상수를 갖는 입방 구조의 순수 Ni에 3%의 W이 합금화된 경우 격자상수는 3.534\AA 으로 증가하였으며, 이로부터 Y_2O_3 및 Sm_2O_3 와의 이론적인 격자 불일치 정도도 6.38과 9.61%에서 6.08과 9.31%로 각각 감소하게 되므로, Fig. 5에서 관찰되는 YSmO 결정성장 양상은 격자 불일치 관점에서 살펴본 박막 성장의 일반적 양상과 상반된다.

이러한 현상을 해석하기 위하여 고려된 우선적인 원인은 합금화 및 수증기 사용에 따른 열 전달 특성의 변화이다. 이는 본 연구에 사용된 MOCVD 반응기가 원료 기판의 하부만을 가열하는 cold wall 형태이며, 따라서 기판의 상부 표면은 반응기 내부 환경에 그대로 노출되어 있다는 사실로부터 출발되었다. 즉, 합금화에 따

라 기판의 열 전도도가 증가되면 증착온도에 도달하여 안정화되는데 필요한 시간이 짧아지는 반면 냉각속도 증가에 따른 열 손실 속도도 증가하게 되므로, 본 연구에서와 같이 상대적으로 낮은 온도의 수증기 등과 지속적으로 접촉하는 경우 동일 온도 조건에서도 3at.%W-Ni 기판의 온도가 Ni 기판보다 낮게 유지된다는 것이다. 실제로, 500sccm의 수증기가 연속 공급되는 조건에서 동등한 증착 위치에 놓인 두 기판의 온도는 Ni 표면에서 8% 가량 높게 측정되었으며, 이는 800°C 의 증착온도를 가정하는 경우 약 60°C 이상의 온도 차로 나타난다. 결국, 증착 환경에서 매 순간 충분한 열 에너지를 획득하지 못한 반응 원자들은 보다 낮은 에너지가 요구되는 (222) YSmO를 생성하게 되며 이로부터 (400) 배향성은 상대적으로 저하된다.

다음의 Fig. 6에 수증기 공급환경에서 증착된 YSmO / 3at.%W-Ni 박막의 표면 분석결과를 도시하였다. Fig. 3과 비교할 때 모든 증착온도에서 상대적으로 얇은 두께의 박막이 형성되었으며, 500°C 의 낮은 온도에서 증착된 시료의 경우 기판의 입계(grain boundary)가 관찰될 정도로 증착두께가 얇았다. XRD 분석결과로부터 예상된 바와 같이 증착온도 500°C (Fig. 4 (a))에서

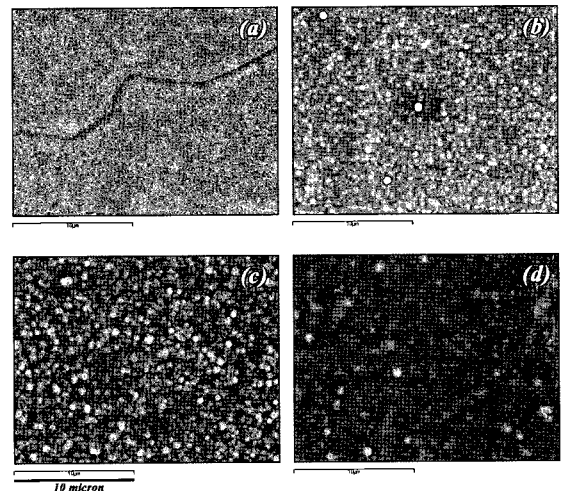


Fig. 6. SEM planar morphologies of $(Y_{0.4}Sm_{0.6})_2O_3$ films deposited on pure Ni-3at.% substrates by H_2O vapor supply at; (a) 500°C , (b) 600°C , (c) 700°C and (d) 800°C .

Ni 기판에 증착된 박막의 표면 형태는 600°C (Fig. 6 (b))의 3at.%W-Ni 기판에서 유사하게 나타났으며, Fig. 4 (b)의 경우 상대적으로 높은 온도에서 증착된 Fig. 6 (c)의 박막 형태와 매우 유사하였다. 증착온도 800°C에서 수증기를 사용하여 Ni 및 3at.%W-Ni 기판 상에 증착된 YSmO 박막의 두께는 대략 1.6 μ m로 측정되었다.

앞서 살펴본 YSmO 박막의 표면특성 등을 감안할 때 현장 적용을 위하여 아직까지 여러 가지 개선의 여지가 남아있음이 분명하다. 그러나, Ni 모재의 기판 상에서도 표면의 산화를 효율적으로 억제시키면서 YBCO와의 격자 불일치가 기존의 완충층보다 현저히 작은 MOCVD / YBCO용 단일 완충층을 성공적으로 제조하였다는 점에서 시사하는 바가 크다.

IV. Conclusion

MOCVD 공정을 이용하여 Y과 Sm을 성분원으로 하면서 YBCO와의 격자 불일치가 -0.126%에 이르는 우수한 특성의 MOCVD / YBCO용 산화물계 단일 완충층을 제조하였다. 분말야금 및 냉각압연 공정을 거쳐 자체 제조된 순수 Ni 및 3at.%W-Ni 합금 선재를 기판으로 사용하였으며, 순수 산소 및 수증기가 반응기체 공급원으로 사용되었다. 산소 공급 하에서 증착된 박막에서는 증착온도 상승에 따라 기판의 산화반응이 크게 가속화되었으나, 산소를 수증기로 대체함으로써 이러한 산화반응을 효과적으로 억제할 수 있었다. 800°C 이상의 온도에서 순수 Ni 기판 상에 증착된 (Y_{0.4}Sm_{0.6})₂O₃ 박막으로부터 강한 (400) epitaxial growth가 관찰되었으며, YBCO coated conductor용 단일 완충층으로의 높은 적용 가능성이 확인되었다.

Acknowledgments

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] K. Fosheim, T. Laegreid, E. Sandvold, F. Vassenden, K. A. Müller and J. G. Bednorz. "Wide-temperature instability in high-Tc superconductors, La_{1.85}Ba_{0.15}CuO₄", Solid State Communications, 63, 6 (1987) 531-533.
- [2] G. Balestrino, S. Barbanera and P. Paroli, "Growth of single crystals of the high-temperature superconductor YBa₂Cu₃O_{7-x}", J. of Crystal Growth, 85, 4 (1987) 585-587.
- [3] A. Maeda, K. Noda, S. Takebayashi and K. Uchinokura, "Preparation and physical properties of Bi₂Sr₂Ca_{n-1}Cu_nO_y", Physica C: Superconductivity, 162, 2 (1989) 1205-1206.
- [4] A. Maeda, Y. Nakayama, S. Takebayashi and K. Uchinokura, "1/f conduction noise in the high-temperature superconductor Bi-Sr-Ca-Cu-O system", Physica C: Superconductivity, 160, 5 (1989) 443-448.
- [5] Yasuji Yamada, Junichi Kawashima, Yusuke Niiori and Izumi Hirabayashi, "Liquid phase epitaxy for the production of YBa₂Cu₃O_{7.8} coated conductor", Applied Superconductivity, 4, 10 (1996) 497-506.
- [6] P. N. Arendt, S. R. Foltyn, J. R. Groves, R. F. DePaula, P. C. Dowden, J. M. Roper, et al., "YBCO/YSZ coated conductors on flexible Ni alloy substrates", Applied Superconductivity, 4, 10 (1996) 429-434.
- [7] D. K. Finnemore, K. E. Gray, M. P. Maley, D. O. Welch, D. K. Christen, D. M. Kroeger, "Coated conductor development: an assessment", Physica C 320 (1999) 1-8.
- [8] V. Selvamanickam, H. G. Lee, Y. Li, X. Xiong, Y. Qiao, J. Reeves, et al., "Fabrication of 100 A class, 1 m long coated conductor tapes by metal organic chemical vapor deposition and pulsed laser", Physica C 392 (2003) 859-862.
- [9] Takeharu Kato, Hirokazu Sasaki, Hiroyuki Iwai, Akira Ibi, Naoji Kashima, Toshiharu Niwa, et al., "Transmission electron microscopy studies of YBCO coated conductors prepared by pulsed-laser deposition and multiple-stage chemical vapor deposition processes", Physica C: Superconductivity, 22 July (2005) in Press.
- [10] A. Goyal, D. P. Norton, D. K. Christen, E. D. Specht, M. Paranthaman, D. M. Kroeger, et al., "Epitaxial

- Superconductors On Rolling-Assisted Biaxially-Textured Substrates (Rabits): A Route Towards High Critical Current Density Wire”, *Applied Superconductivity*, 4, 10 (1996) 403-427.
- [11] Y. Iijima, M. Kimura, T. Saitoh, K. Takeda, “Development of Y-123-coated conductors by IBAD process”, *Physica C* 335 (2000) 15-19.
- [12] Y. Shiohara, “Progress and future prospect of R&D on coated conductors in Japan”, *Physica C: Superconductivity*, 412, 1 (2004) 1-9.
- [13] V. Selvamanickam, G. B. Galinski, G. Carota, J. DeFrank, C. Trautwein, P. Haldar, et al., “High-current Y-Ba-Cu-O superconducting films by metal organic chemical vapor deposition on flexible metal substrates”, *Physica C* 333 (2000) 155-162.
- [14] Zainovia Lockman, Xiaoding Qi, Andrey Berenov, Rainer Nast, Wilfried Goldacker, Judith MacManus-Driscoll, “Study of thermal oxidation of NiO buffers on Ni-based tapes for superconductor substrates”, *Physica C* 351 (2001) 34-37.
- [15] T. J. Jackson, B. A. Glowacki, J. E. Evetts, “Oxidation thermodynamics of metal substrates during the deposition of buffer layer oxides”, *Physica C* 296 (1998) 215-224.