

실리콘 기판 위에 UHV-ICB 증착법으로 적층 성장된 Y_2O_3 박막의 BS/channeling 연구

김효배 · 조만호 · 황보상우 · 최성창* · 최원국* · 오정아** · 송종한** · 황정남

연세대학교 이과대학 물리학과, *한국과학기술연구원 세라믹스부

**한국과학기술연구원 특성분석센터

(1997년 6월 11일 접수)

BS/channeling studies on the heteroepitaxially grown Y_2O_3 films on Si substrates by UHV-ICB deposition

H. B. Kim, M. H. Cho, S. W. Whangbo, S. C. Choi*, W. K. Choi*, J. A. Oh**,
J. H. Song**, and C. N. Whang

Department of Physics, Yonsei University, Seoul, 120-749, Korea

*Division of Ceramics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 130-650, Korea

**Division of Ceramics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 130-650, Korea

(Received June 11, 1997)

요 약 - 실리콘 기판위에 초고진공 Ionized Cluster Beam(UHV-ICB)증착법으로 적층 성장시킨 Y_2O_3 박막의 결정성 및 구조를 Backscattering Spectroscopy(BS)/channeling을 이용하여 분석하였다. 현재까지 타증착법에 의해 성장된 Y_2O_3 박막의 channeling 최소수율은 0.8~0.95로 거의 비정질이거나 다결정이었다. 이에 반해 UHV-ICB법으로 Si(100), Si(111) 기판 위에 적층 성장시킨 Y_2O_3 박막의 channeling 최소수율은 각각 0.28, 0.25로 UHV-ICB법으로 성장시킨 Y_2O_3 박막이 타증착법으로 성장시킨 박막보다 상대적으로 우수한 결정성을 지니고 있었다. 또한 실리콘 기판의 방향에 관계없이 Y_2O_3 박막의 표면 영역이 계면 영역보다 결정성이 좋았다. Si(111) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막은 실리콘 결정과 0.1° 어긋나서(111)면으로 성장하였고, Si(100) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막은 실리콘 결정과 평행하게 double domain 구조를 지닌 (110)면으로 성장하였다. 산소공명 BS/channeling 결과 Si(111) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 산소는 결정성을 갖고 있으나 Si(100) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 산소는 random하게 분포하고 있음을 확인하였다.

Abstract - The crystallinity and the structure of heteroepitaxially grown Y_2O_3 films on the silicon substrates deposited by Ultra High Vacuum Ionized Cluster Beam(UHV-ICB) were investigated by Backscattering Spectroscopy(BS) /channeling. The channeling minimum values, χ_{min} , of the Y_2O_3 films deposited by other methods were 0.8~0.95 up to the present, which indicates amorphous or highly polycrystalline nature of the Y_2O_3 films. On the contrary, the channeling minimum value of heteroepitaxially grown Y_2O_3 films on Si(100) and Si(111) deposited by UHV-ICB are 0.28 and 0.25 respectively. These results point out fairly good crystalline quality. It is also observed that the top region of Y_2O_3 films have less crystalline defects than the bottom region regardless of the crystal direction of the Si substrates. The axis of Y_2O_3 <111> epitaxially grown on Si(111) is tilt by 0.1° with respect to Si<111>. That of Y_2O_3 <110> on Si(100) is parallel to the Si<001>. The Y_2O_3 film on Si(100) grew with single domain structure and that on Si(111) grew with double domain structure. From the result of oxygen resonance BS/channeling, the oxygen atoms in heteroepitaxially grown Y_2O_3 film on Si(111) substrate have the crystallinity, but that on Si(100) shows almost channeling amorphous state.

1. 서 론

Y_2O_3 는 실리콘과 작은 격자 부정합(2.4%), 상대적으로 큰 유전상수(9~17), 높은 방전장도(1~5 MV/cm) 등과 같은 성질을 가지고 있어 silicon-on-insulator(SOI) 소자[1]와 실리콘 위에 초전도체 물질의 적층 성장시 완충층[2]으로 활용할 수 있는 등, 잠재적인 응용성 때문에 Y_2O_3 박막의 적층 성장은 많은 관심을 끌고 있다. 또한, Y_2O_3 는 중간굴절률을 지니고 있어 광학 코팅용으로도 사용되며 열적으로 안정하고 강도가 우수하여 보호코팅 용으로도 사용된다[3].

실리콘 위에 Y_2O_3 를 적층 성장하기 위하여 전자살 증착[1,4], 진공 증착[3], 여열산화법[5,6], CVD법[7], Langmuir-Blodgett법[8]과 스퍼터 증착[9] 등과 같은 여러 방법을 이용하고 있으나, 현재까지 양질의 Y_2O_3 박막을 성장하지 못하였다.

본 연구에서 Y_2O_3 박막을 적층 성장하기 위해 UHV-ICB 증착법을 이용하였으며 다른 증착 방법에 비해 결정성이 우수한 Y_2O_3 박막을 얻을 수 있었고, Y_2O_3 박막의 결정성 및 구조에 관한 정보를 얻기 위해 BS/channeling 분석법을 이용하였다.

2. 실험방법

Y_2O_3 박막은 Si(100)와 4° 경사진 Si(111) 기판 위에 UHV-ICB 증착 장치를 이용하여 증착하였다. 증착함의 기본 진공도는 5×10^{-10} Torr 였고, Y_2O_3 박막은 ICB 발생 장치에서 생성된 Y 금속 cluster와 시료 거치대 아래에 장착된 가스관을 통해 증착함내로 산소 가스를 유입시키며 증착하였다. 증착속도는 초당 0.2 \AA 을 유지하였고, 실리콘 기판들은 RCA 방법으로 세척하였다[10]. 증착전에 실리콘 기판을 e-beam 조사하여 1000°C 까지 가열하였다. 깨끗한 실리콘 표면 상태를 RHEED로 관찰하였다. 이 때 Si(100)의 경우 2×1 표면 구조를 보였고, Si(111)의 경우 7×7 표면 구조를 보였다. 그 후 실리콘 기판을 증착 온도까지 식혔다. 기판온도가 평형상태에 도달한 후 진공도가 2×10^{-5} Torr가 될 때까지 산소 가스를 증착함내로 유입시켰다. Y_2O_3 박막의 성장시 cluster 가속전압은 5 kV로 유지하였고, 기판온도는 Si(100)는 700°C 에서 Si(111)는 620°C 에서 각각 이행하였다.

실리콘 기판 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 두께, 조성비와 깊이에 따른 박막의 결정성에 대한 정보를 얻기

위해 한국과학기술연구원에 있는 2 MV Tandem형 가속기(NEC-6SDH2)를 이용하였다. 시료들은 세계의 회전축과 두개의 병진축이 있는 goniometer에 장착하였으며, 분석시 산란각은 170° , 분해능이 14 keV인 반도체 검출기를 사용하였으며, 입사이온으로는 2 MeV He^{++} , 3.05 MeV He^{++} 를 이용하여 BS/channeling 분석을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Si(100)위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 BS/channeling 분석

그림 1은 Si(100) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 BS/channeling 스펙트럼이다. RUMP code에 의한 모의 실험 결과, 적층성장한 Y_2O_3 박막의 두께는 1080 \AA 이고, yttrium과 산소의 조성비는 1:1.5 이었다. 시료의 결정성을 나타내는 channeling 최소수율 χ_{min} 은 0.28을 나타내었으며, 이 값은 Fukumoto[4], Varhue[12]등에 의해 지금까지 보고된 channeling 최소수율값 $0.8 \sim 0.95$ 에 비해 매우 작은 것으로 UHV-ICB 법으로 성장시킨 Y_2O_3 박막의 결정성이 타증착법에 의해 성장된 Y_2O_3 박막에 비해 좋은 것임을 보여준다.

그림 1에서 yttrium의 channeling 신호를 보면, 계면 영역의 기울기가 표면 영역과는 달리 매우 급격하다. 이것은 계면 영역에서 Y_2O_3 박막의 결정성이 표면 영역의 결정성 보다 나쁠 것이라는 것을 암시한다.[11] 이것을 보다 명확하게 보기 위해 yttrium 표면 영역(ROI I), 계면 영역(ROI II), 실리콘 계면 영역(ROI III)으로 나누어 channeling dip을 측정된 결과를 그림 2에 나타내었다. yttrium 계면 영역의 적분 최소수율(channeling 스펙트럼

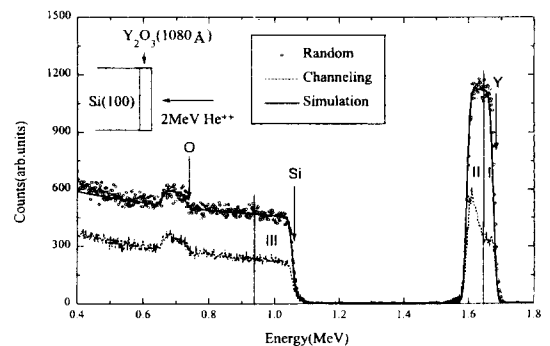


그림 1. Si(100)위에 적층성장한 Y_2O_3 박막의 BS/channeling 스펙트럼과 RUMP code의 모의실험 결과.

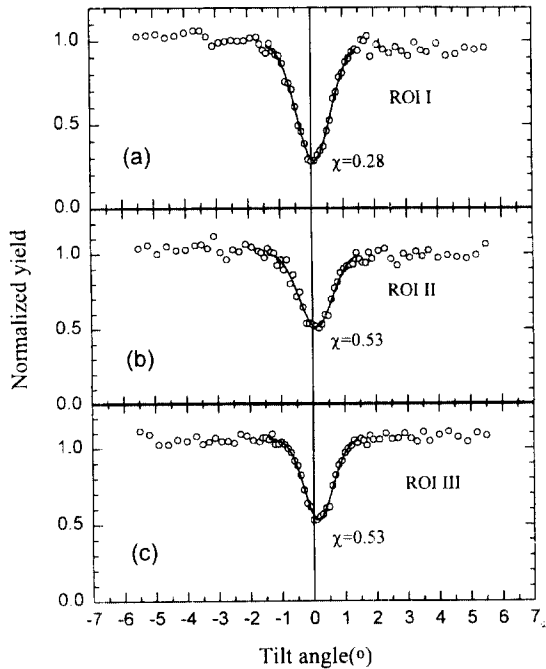


그림 2. Si(100)위에 적층성장한 Y₂O₃박막의 각 영역(ROI I, ROI II, ROI III)에서의 channeling dip.

의 면적 대 random spectrum의 면적 비)은 yttrium 표면 영역의 적분 최소수율보다 크나, 실리콘 계면 영역의 적분 최소수율과는 같은 것으로 나타났다. 이것은 Y₂O₃의 표면 영역이 계면 영역보다 결정성이 좋다는 것을 보여 주고 있다. 계면 근처의 표면 결정성이 좋지 않은 이유는 크게 두가지 원인으로 생각할 수 있다. 첫째는 Y₂O₃와 Si의 계면에서 lattice misfit에 따른 strain energy를 완화시키기 위하여 계면 영역에서의 격자 결함이 증가한 때문으로 생각할 수 있고, 두 번째는 초기 박막성장 시 흡착된 산소에 기인한 비정질 산화층의 존재가 계면 근처의 결정성을 저하시키는 것으로 생각된다. 그러나 그림 3의 HRTEM 그림에서 보는 바와 같이 계면 근처에서의 산화층은 존재하지 않는 반면, dislocation과 같은 격자 결함을 관찰할 수 있다. 따라서 계면 근처에서의 결정성의 저하는 격자결합에 의한 원인으로 생각되어진다. 또한, 각 영역의 적분 최소수율이 동일한 기울임 각도에서 나타나므로 실리콘의 결정축 channel과 yttrium의 결정축 channel의 방향이 일치한다는 것을 알 수 있고, 이는 Y₂O₃ 박막이 실리콘의 결정 방향에 평행하게 적층 성장했음을 의미한다.

이에 대한 자세한 연구와 적층 성장한 Y₂O₃ 박막의

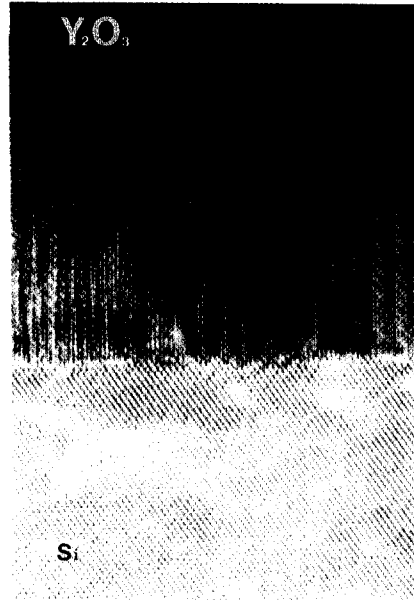
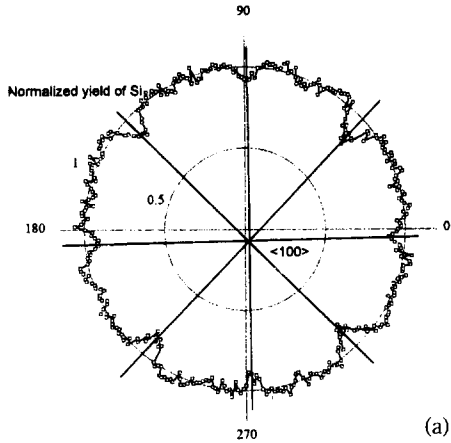
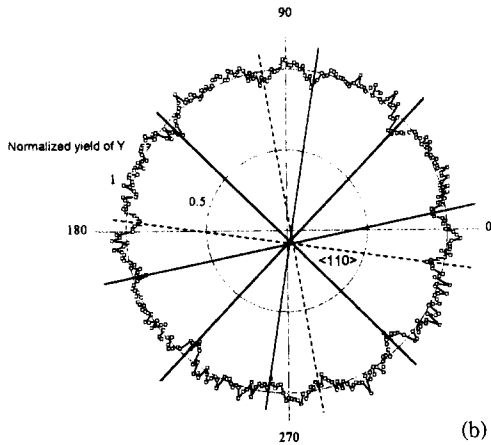


그림 3. Y₂O₃(011)/Si(100) 단면의 HRTEM 그림.

결정 성장면에 대한 정보를 얻기 위해 시료를 5° 기울인 후 시료면의 수직 축에 대해 1° 간격으로 360° 회전하면서 channeling dip을 측정하여 입체 무늬(stereographic pattern)를 그림 4에 표시하였다. 이와 같은 입체 무늬로부터 시료의 방향에 대한 정보를 얻을 수 있는데 이는 시료의 구조와 방향에 따라 입체 무늬가 다르게 나타나기 때문이다. 그림 4(a)는 Si(100) 기판에 대한 입체 무늬로 여기서 직선은 면 channel이고 면 channel들의 교차점은 결정축 channel이다. 그림 4(b)는 yttrium의 입체 무늬로 Si(100)위에 Y₂O₃ 박막이 (110)면으로 성장하였음을 보여주고 있다. 그림 4(a)와 (b)를 겹쳐보면 실리콘 결정축 channel과 yttrium 결정축 channel이 일치하는데, 이는 상기한 바와 같이 실리콘의 결정축 방향 <100>와 yttrium의 결정축 방향 <110>가 평행한 것을 나타낸다. Y₂O₃는 단위세포에 8개의 불완전한 형식 구조를 포함하는 정방형 Mn₂O₃ 구조이다. 또한, cubic구조의 경우 (110)면으로 성장하였을 경우 bcc구조를 제외하고는 (211)면 minima가 현저하게 나타나지 않는 것으로 보고 되어 있다[12]. 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 (111)면 minima와 (211)면 minima사이의 yield 차이가 크지 않다. 이것은 <110> 방향에 대한 stereographic pattern에서 (100)면 minima를 90° 회전시 (111)면 minima와 (211)면 minima가 서로 뒤바뀌어 정확하게 일치하게 되므로 나



(a)



(b)

그림 4. (a) Si(100)에 대한 stereographic projection(ROI III)과 (b) Si(100)위에 적층성장한 Y_2O_3 박막의 yttrium 신호에 대한 stereographic projection(ROI I)의 polar plot.

타나기 때문이다. 따라서, Si(100) 위에 성장한 Y_2O_3 박막은 single domain으로 성장한 것이 아니라 double domain 구조로 성장하였고, 두 domain들은 서로 90° 회전한 상태임을 알 수 있다.

3.2 Si(111)위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 BS/channeling 분석

Si(111) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 BS 스펙트럼과 모의 실험 결과를 그림 5에 나타내었다. 모의 실험 결과 Y_2O_3 박막의 두께 및 조성비는 Si(100) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막과 같이 각각 1080 \AA , yttrium대 산소의 비는 1:1.5 이었다. Y_2O_3 박막의 결정성을 나타내는

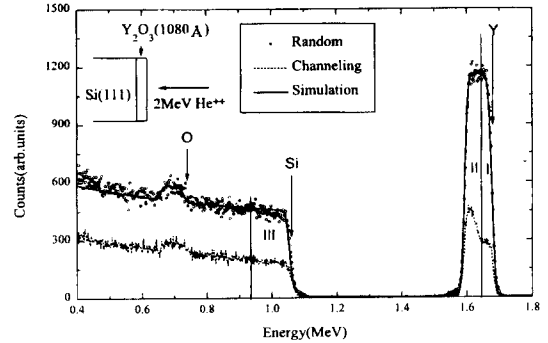


그림 5. Si(111)위에 적층성장한 Y_2O_3 박막의 BS/channeling 스펙트럼과 RUMP code의 모의실험 결과.

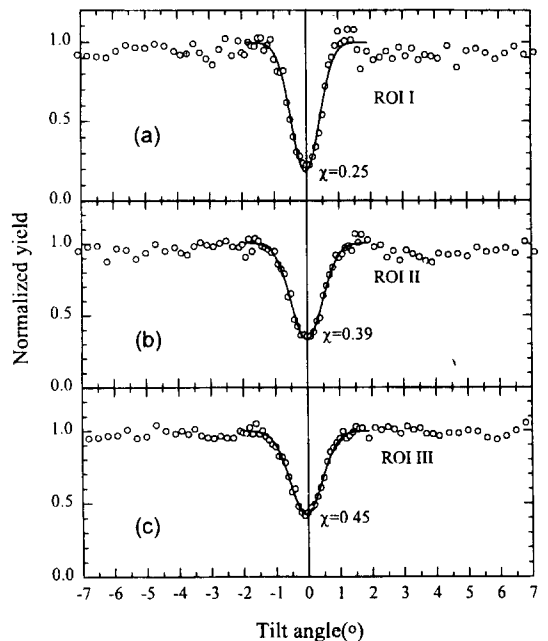


그림 6. Si(111)위에 적층성장한 Y_2O_3 박막의 각 영역(ROI I, ROI II, ROI III)에서의 channeling dip.

channeling 최소수율은 0.25로, Si(100) 위에 적층성장한 Y_2O_3 박막의 channeling 최소수율 보다는 약간 작았으며, channeling 스펙트럼의 yttrium 신호는 유사한 형태를 띠고 있다.

그림 6는 Si(100)에 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 경우처럼 세 개의 영역으로 나누어 channeling dip을 측정할 결과이다. 적분 최소수율은 Y_2O_3 표면 영역, 계면 영역, 실리콘 계면 영역에서 각각 0.25, 0.39, 0.45 이었다. Y_2O_3 /Si(100)의 경우처럼 Y_2O_3 박막의 계면 영역이 표면 영역보다 결정성이 좋지 않았다. 그리고 Y_2O_3 /Si(111)의 경

우 박막의 계면 영역과 실리콘의 계면 영역의 적분 최소 수율의 차이가 나는 것은 Si(100)의 경우는 Y₂O₃ 박막이 실리콘 결정방향에 대해 평행하게 성장하는 반면에, Si(111)의 경우, 실리콘 영역과 Y₂O₃ 계면 영역에서, 적분수율이 최소치를 나타내는 기울임 각도가 0.1° 차이가 있기 때문이다. 즉, Y₂O₃ 박막의 결정 성장 방향이 실리콘 결정축 방향과 평행하지 않고 0.1° 어긋나 있기 때문이다.

그림 7은 Y₂O₃/Si(111)에 대한 입체 무늬이다. 그림 7(a)에서 실리콘의 결정축 channel이 좌표의 중심에서 벗어나 있는 것은 실리콘 표면과 실리콘 결정의 방향이 어긋나 있기 때문에 나타나는 것이고 그 값은 2.9°로 측정되었고, Y₂O₃ 박막의 경우는 3.0°로 측정되었다. 이는 channeling dip으로부터 얻은 상기 결과와 같이 Y₂O₃ 박

막의 결정 성장 방향이 실리콘 결정축 방향과 평행하지 않고 0.1° 어긋나 있음을 의미한다. 이러한 결과로부터 4° 경사진 Si(111)위에 적층성장한 Y₂O₃ 박막이 실리콘 결정 방향에 어긋나 있는 기판 면에 관계없이 실리콘의 결정 축을 따라 적층 성장함을 알 수 있다. 그림 7(b)에서 보는바와 같이 실리콘과 Y₂O₃ 박막 모두 결정 방향이 <111>방향임을 보여준다. 즉, 실리콘 기판의 결정 방향이 Y₂O₃ 박막의 결정 성장 방향에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

3.3 산소 공명 BS/channeling 분석

Si(100), Si(111) 위에 적층 성장한 Y₂O₃ 박막의 BS/channeling 스펙트럼들(그림 1, 5)의 channeling 스펙트럼의 yttrium 신호의 수율은 거의 유사하나 산소 신호를 비교해 보면 Si(111) 위에 성장된 Y₂O₃ 박막은 Si(100) 위에 적층 성장한 Y₂O₃ 박막의 경우보다 수율이 많이 감소하였음을 볼 수 있다. Inoue 등에 의해 보고된[13] 실리콘 위에 적층 성장한 CeO₂ 박막의 경우를 살펴보면, 본 연구의 결과처럼 Si(100) 위에 적층 성장된 CeO₂ 박막의 channeling 스펙트럼의 산소 신호의 수율 감소가 Si(111) 위에 적층 성장한 경우에 비해 작게 나타나는 동일한 현상을 보인다. BS/channeling시 2 MeV He⁺⁺를 입사이온으로 사용하였을 경우 산소에 대한 러더포드 산란 단면적이 작기 때문에 산소 신호의 변화를 정확히 판단하는데 어려움이 있다. 입사 He 이온의 에너지가 3.05 MeV일때 nuclear effect에 의해 산소에 대한 He 이온의 산란 단면적이 러더포드 산란 단면적보다 커지게 된다. 이러한 산소 공명 BS를 이용함으로써 산소 혼합물 내 산소 조성비를 결정하는데 정확도를 향상시키는 장점이 있다[14]. 따라서 본 연구에서는 3.05 MeV의 He⁺⁺를 이용하여 산소 신호의 변화를 관찰하였다.

그림 8의 산소 공명 BS/channeling 결과에서 보는 바와 같이 Si(111) 위에 적층 성장한 Y₂O₃ 박막의 BS/channeling 스펙트럼(그림 8(b))에서 channeling 스펙트럼의 산소 신호 수율의 현저한 감소를 보이고 있다. 실리콘 기판에 따른 산소 신호의 차이를 명확히 보기 위해 Y₂O₃ 박막의 channeling dip을 yttrium과 산소에 대해 측정된 결과를 그림 9에 표시하였다. 이 때 산소 신호는 실리콘 신호에 의해 중첩되기 때문에 산소에 의한 신호만을 얻기 위하여 산소 신호가 나오는 영역(ROI III)의 양 옆의 영역을 택하여 평균한 후 빼주었다. 그림 9(a), (b)는 각각Si(100), Si(111) 위에 적층성장한 Y₂O₃ 박막

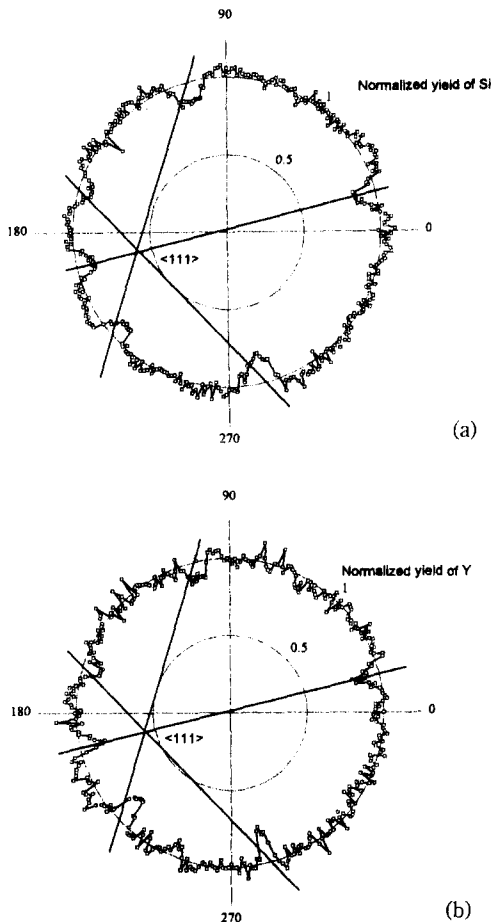


그림 7. (a) Si(111)에 대한 stereographic projection(ROI III)과 (b) Si(100)위에 적층성장한 Y₂O₃박막의 yttrium 신호에 대한 stereographic projection(ROI I)의 polar plot.

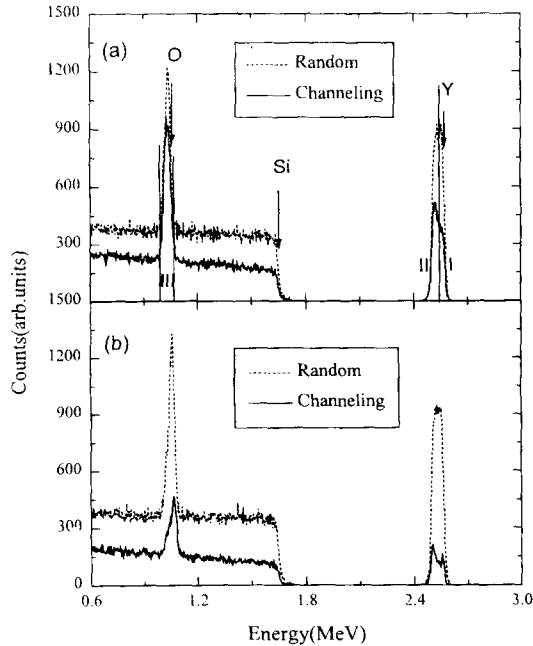


그림 8. (a) Si(100)위에 적층성장한 Y_2O_3 박막의 oxygen resonance BS/channeling 스펙트럼과 (b) Si(111)위에 적층성장한 Y_2O_3 박막의 oxygen resonance BS/channeling 스펙트럼.

의 yttrium 신호와 산소 신호의 channeling dip의 측정 결과이다. 그림 9(a), (b)에서 yttrium의 channeling dip의 형태는 2 MeV He^{++} 이온을 이용한 측정 결과(그림 2와 6)와 큰 차이가 없었다. $Y_2O_3/Si(111)$ 박막의 산소 신호에 대한 channeling dip의 형태는 yttrium 신호 측정 결과와 유사하나, $Y_2O_3/Si(100)$ 박막의 경우 산소에 대한 channeling dip은 yttrium에 대한 channeling dip과는 전혀 다른 형태를 보이고 있다. 이러한 형태는 산소가 random하게 분포하고 있음을 보여주는 것이다. 산소와 yttrium가 stoichiometry를 만족하는 것을 고려한다면 이와 같은 현상이 나타나는 것은 산소 원자가 빈자리를 형성하고 격자간 위치에 존재하기 때문이라 생각할 수 있다. Yttrium과 산소의 화학 결합 상태를 XPS로 측정한 결과, Si(100)와 Si(111) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막들 간의 O1s, Y3d 신호의 차이점이 없었다. Si(100)와 Si(111) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 산소의 결정성의 차이가 나타나는 원인과 그로 인해 발생하는 결과에 대해서는 Y_2O_3 박막에 대해 더 많은 연구가 수행되어야 정확히 알 수 있을 것이며, 현재로서는 Y_2O_3 박막에서 산소의 분포의 차이가 Y_2O_3 박막의 전기적 성질에 커다란 영향을 미칠 것으로 생각되어진다.

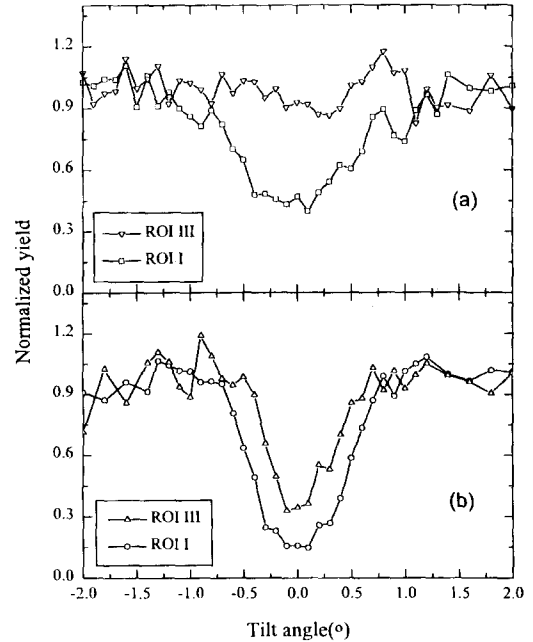


그림 9. (a) Si(100)위에 적층성장한 Y_2O_3 박막의 각 영역(ROI I, ROI III)에서의 channeling dip과 (b) Si(111)위에 적층성장한 Y_2O_3 박막의 각 영역(ROI I, ROI III)에서의 channeling dip.

4. 결 론

Si(100)와 Si(111) 위에 UHV-ICB법에 의해 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 channeling 최소수율은 각각 0.28, 0.25 이었으며, 이 값들은 현재까지 보고된 타증착법에 의해 실리콘 기판위에 적층성장한 Y_2O_3 박막의 channeling 최소수율 보다 매우 작은 값들이다. 즉 UHV-ICB법을 이용할 경우 타증착법에 의해 성장시킨 Y_2O_3 박막에 비해 상대적으로 우수한 결정성을 지닌 박막을 성장시킬 수 있었다. 그리고 적층 성장한 Y_2O_3 박막은 실리콘 기판에 상관없이 Y_2O_3 박막의 표면 영역의 결정이 계면 영역의 결정성 보다 좋았다. 계면 영역의 결정성이 표면영역보다 좋지 않은 이유는 Si과 Y_2O_3 의 lattice misfit에 따른 strain을 완화 시키기 위하여 형성된 격자결함에 기인한 것으로 판단된다.

Si(100) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막은 double domain 구조를 가지고 (110)면으로 성장하였으며 실리콘 결정의 방향과 Y_2O_3 박막의 결정 방향이 평행하였다. 반면에 Si(111) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막은 (111)면으로 성장하였고, Y_2O_3 박막의 결정 방향은 실리콘 면의

mis-orientation에 관계없이 실리콘의 결정 방향에 대해 0.1° 어긋나서 성장하였다.

산소공명 BS/channeling결과 Si(111) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 산소는 결정성을 가지고 있으나, Si(100) 위에 적층 성장한 Y_2O_3 박막의 산소는 channeling 비정질 상태로 존재하고 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 연세대학교 초미세표면과학연구센터를 통한 과학재단의 재정지원과 삼성전자(주)와 산학연구과제 및 한국과학기술연구원의 전문성 심화과제(2E14974)에 의해 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. A. C. Rastogi and R. N. Sharma, J. Appl. Phys. **71**, 5041 (1992).
2. K. Harada, H. Nakanishi, H. Itozaki and S. Yazu, Jpn. J. Appl. Phys. **30**, 934 (1991).
3. D. F. Benzuidenhost and R. Pretorius, Thin Solid Films, **139**, 121 (1986).
4. Fukumoto, T. Imura and Y. Osaka, Appl. Phys. Lett. **55**, 360 (1989).
5. M.Gruvitch, L. Manchanda and J. M. Gibson, Appl. Phys. Lett. **51**, 919 (1987).
6. L. Manchanda and M. Gurvitch, IEEE Electron Device Lett. **9**, 180 (1988).
7. Y. Akiyama, T. Sato and N. Imaishi, J. Cryst. Growth, **147**, 130 (1995).
8. T.Laursen, D. J. Johnson, D. T. Amm and J. E. Hayson, Thin Solid Films, **250**, 135 (1994).
9. A. F. Jankowski, L. R. Schrawyer and J. P. Hayes, J. Vac. Sci. Technol. **A11**, 1548 (1993).
10. W. Kein and D. A. Puotinen, RCA Review **187** (1970).
11. W. J. Varhue, M. Massimo, J. M. Carrulli, V. Baranauskas, E. Adams and E. roitman, J. Vac. Sci. Technol. **A11**, 1870 (1993).
12. B. R. Appleton and G. Foti, in *Ion Beam Handbook for Material Analysis*, edited by J. W. Mayer and E. Rimini (Academic Press, New York, 1977) Chapter 3.
13. T.Inoue, Y. Yamamoto, S. Koyama, S. Suzuki and Y. Ueda, Appl. Phys. Lett. **56**, 1332 (1999).
14. M. L. Swanson, in *Handbook of modern ion beam materials analysis*, edited by J. R. Tesmer and M. Natsi (Material Research Society, Pittsburgh, 1995) Chapter 10.