

## R-면 사파이어 기판 위에 플라즈마 분자선 에피택시법을 이용한 산화아연 박막의 성장 및 특성평가

### Growth and Characterization of ZnO Thin Films on R-plane Sapphire Substrates by Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy

한석규<sup>1</sup>, 홍순구<sup>1,a</sup>, 이재욱<sup>2</sup>, 이정용<sup>2</sup>  
(Seok Kyu Han<sup>1</sup>, Soon-Ku Hong<sup>1,a</sup>, Jae Wook Lee<sup>2</sup>, and Jeong Yong Lee<sup>2</sup>)

#### Abstract

Single crystalline ZnO films were successfully grown on R-plane sapphire substrates by plasma-assisted molecular beam epitaxy. Epitaxial relationship between the ZnO film and the R-plane sapphire was determined to be  $[-1101]Al_2O_3 \parallel [0001]ZnO$ ,  $[11-20]Al_2O_3 \parallel [-1100]ZnO$  based on the *in-situ* reflection high-energy electron diffraction analysis and confirmed again by high-resolution X-ray diffraction measurements. Grown (11-20) ZnO films surface showed mound-like morphology along the  $\langle 0001 \rangle ZnO$  direction and the RMS roughness was about 4 nm for  $2 \mu m \times 2 \mu m$  area.

**Key Words** : ZnO, MBE, R-plane  $Al_2O_3$ , Nonpolar substrate, Polarization

#### 1. 서론

II-VI족 반도체인 ZnO는 GaN와 마찬가지로 wurtzite 구조를 가지는 와이드 밴드갭 (상온에서  $E_g=3.37$  eV) 반도체로서 청색에서 자외선 영역의 빛을 내는 발광 다이오드, 레이저 다이오드 등의 응용으로 주목받고 있다. 광소자 응용을 위한 에피택셜 성장된 단결정 ZnO 박막은 대개 (0001) 사파이어나 6H-SiC 기판 위에 c-축 방향으로 성장되는데 이 때 wurtzite 구조가 이 방향으로 반전대칭이 없으므로 이로 인하여 박막은 극성을 가지며 [1], 따라서 막내에는 변형에 의한 압전분극과 더불어 결정자체가 가지고 있는 고유한 자발분극이 존재하게 된다. 이러한 압전분극과 자발분극은 결국 막내에 전계를 형성하게 되며 이와 같은 분극 유발 전계는 계면에 2차원 전자가스의 생성을 용

이하게 하여 전자소자에서는 유리하게 작용할 수 있으나 [2] 양자우물의 에너지 밴드구조를 변화시켜 광소자의 특성에 있어서는 불리하게 작용한다.

압전분극과 자발분극에 의해 유도된 전계가 광소자의 특성에 미치는 영향은 GaN계 광소자에서 많은 연구가 보고되었다. 여기서 좀 더 자세히 설명하면, 압전분극과 자발분극으로 유발된 전계는 양자우물의 에너지 밴드구조를 변화시키고 따라서 전자와 홀은 거의 삼각형 형태의 potential well에 존재하게 되어 [3,4] 광소자의 전기적, 광학적 특성에 커다란 영향을 끼치게 된다 [5]. 이와 같은 에너지 밴드 구조변화는 양자 국한 스타크 효과를 야기하는데 이는 분극으로 유발된 전계가 양자우물 구조에서 전자와 홀의 파동함수를 분리시키고 전하밀도가 양자우물 구조의 계면에 축적됨에 따라 파동함수 중첩이 감소하며 [6] 따라서, 밴드 간 재결합 속도가 감소하게 되는 현상을 말한다. 이와 유사한 거동은 전계하의 II-VI족 양자우물 구조에서도 관찰되는 것으로 보고되었다 [7]. 이와 같은 전자와 홀의 공간적 분리는 전자와 홀의 용이한 재결합이 요구되는 발광 다이오드에서는 피해야 할 현상이다. 더욱이 깊은 UV 발광을 위한 다층

1. 충남대학교 재료공학과  
(대전시 유성구 궁동 220)  
2. 한국과학기술원 신소재공학과  
a. Corresponding Author : soonku@cnu.ac.kr  
접수일자 : 2006. 8. 25  
1차 심사 : 2006. 9. 12  
심사완료 : 2006. 9. 18

양자 우물구조에서 양자 국한 스타크 효과는 발광 스펙트럼의 적색이동 현상을 야기하는 것으로 보고되었으며[8] 압전분극 전계는 레이저 다이오드의 문턱 전류 밀도를 높이는 것으로 알려져 있다[9]. 특히 GaN계 광소자에서 다층 양자 우물구조를 구성하는 AlGaN나 InGaN의 조성변동은 압전분극의 민감한 변화를 가져오므로 결국 소자의 방출광장의 변화를 가져온다.

이러한 이유로 최근에 GaN계 광소자 연구에 있어서 (0001) 사파이어와 같은 극성기판을 탈피하여 (1-102) 사파이어와 같은 비극성기판을 사용하여 박막을 성장함으로써 극성에 의한 전계생성의 영향을 제거하고자 하는 연구가 많이 진행되어 새로운 결과들이 보고되고 있다[10]. 비극성기판을 이용한 wurtzite 구조 와이드 밴드갭 반도체 재료의 에피성장은 GaN 박막에 대한 연구가 주를 이루며 현재 ZnO계 광소자가 상용화되지 않은 관계로 비극성 기판 위 ZnO 박막에 대해서는 많은 연구가 진행되지 않은 실정이나 결국 ZnO 물질계에서도 비슷한 연구의 진행은 증가할 것으로 예상할 수 있다. 특히 ZnO의 자발분극 계수는 GaN의 2배에 가까운 큰 값을 가지며[11] 이는 곧 ZnO의 경우 GaN에 비하여 분극에 의한 전계생성과 이로 인한 소자에 미치는 영향은 더 클 수 있다는 것을 의미한다.

본 논문에서는 비극성기판인 R-면 사파이어 기판, 즉 (1-102) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판위에 PAMBE (Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy) 방법으로 ZnO 박막 성장 시의 성장특성 및 기본적인 특성을 알아보고자 하였다. 분자선 에피택시 성장의 장점인 *in-situ* RHEED (Reflection High-Energy Electron Diffraction)을 이용하여 성장 중의 성장 거동을 관찰하여 R-면 사파이어 기판 위에 성장된 ZnO 박막의 RHEED 패턴 분석을 체계적으로 수행하였으며 이는 GaN와 같은 다른 wurtzite 재료의 R-면 사파이어 기판 위 성장에 적용이 가능하다. 관찰된 RHEED 패턴 분석을 통하여 ZnO 박막의 결정성 및 ZnO 박막과 R-면 사파이어 기판과의 에피택셜 방향관계를 규명하였으며 그 결과는 다양한 면에 대한 고분해능 X-선 회절분석으로 재차 확인하였다.

## 2. 실험

본 연구에서 ZnO 박막 성장을 위해 사용된 PAMBE 시스템은 도입챔버, 준비챔버, 성장챔버로 구성되어 있으며 준비챔버 및 성장챔버에서는

1000 °C까지 기판가열이 가능하다. 진공시스템은 도입챔버와 중간챔버에 각 1개씩, 성장챔버에 2개, 총 4개의 터보분자 펌프와 이에 연결된 로타리 펌프로 구성되며 각 챔버의 초기 진공도는 도입챔버는  $5 \times 10^{-7}$  torr, 준비챔버는  $5 \times 10^{-9}$  torr, 성장챔버는 액체질소 공급 없이는  $1 \times 10^{-9}$  torr, 액체질소 공급 시는  $2 \times 10^{-10}$  torr 이하이다. ZnO 박막을 성장하기 위한 산소소스와 Zn 소스로는 최대전력용량 600 W의 RF 산소플라즈마 셀과 방출 셀을 각각 사용하였다. 그림 1은 본 연구에 사용된 PAMBE 시스템의 개략도이다.

Zn 방출셀에 사용된 고체 Zn의 순도는 6 N이며 산소플라즈마 셀에 사용된 산소가스는 6 N의 가스를 세라믹촉매 가스 purifier를 통과시켜 다시 정화 후 플라즈마 셀에 공급하였다. Zn flux는 수정센서를 사용하는 두께측정기를 사용하여 기판홀더 중앙의 약 5 cm 아래에서의 측정값을 셀 온도에 따라 측정 후 사용하였다. 성장 전 및 성장 중의 표면상태와 성장거동은 RHEED를 이용하였다.

R-면 사파이어 기판의 세정은 (0001) 기판의 일반적인 화학적 세정공정을 거쳐 준비하였다. 즉, 아세톤과 메탄올에서 각각 10분간 초음파 세정을 하고 초순수로 10분간 세정한 후 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> = 3:1 (부피비) 용액을 사용하여 160 °C에서 15분간 세정 후 초순수로 충분히 세정하고 질소 블로우로 건조하였다. 화학적 세정공정이 끝난 기판은 바로 챔버에 장착되어 열적 세정공정을 하였다. 우선 도입챔버에 장착된 기판은 진공도가  $2 \times 10^{-6}$  torr 까지 도달된 후  $5 \times 10^{-9}$  torr의 진공도인 준비챔버로 이송되었다. 준비챔버로 이송된 기판은 700 °C에서 1시간 동안 열적 세정을 하였다. 준비챔버에서 열적 세정 완료 직전의 진공도는 약  $5 \times 10^{-7}$  torr 이었다. 준비챔버에서 열적 세정된 기판은 최종적으로 액체질소가 공급되는  $2 \times 10^{-10}$  torr 진공도의 성장챔버로 이송되어 성장챔버에서 최종 열적 세정을 하였다. 성장챔버에서의 최종 열적 세정은 처음 15분간은 800 °C에서 약  $5 \times 10^{-9}$  torr의 진공상태에서 한 후, 산소플라즈마 하에서 30분간 세정하였다. 이때의 진공도는 약  $2 \times 10^{-5}$  torr 이다. 이와 같은 절차로 열적 세정이 완료되면 산소플라즈마는 켜져 있고 플라즈마 셔터는 닫은 상태에서 기판온도를 성장온도인 700 °C로 낮추었다. 기판온도가 성장온도에 도달하면 산소플라즈마 셔터를 열고 Zn 방출 셀의 셔터를 열어 성장을 시작하였다. 성장 중의 산소플라즈마 조건은 350 W의 파워에 산소 유량은 2 sccm 이고 Zn flux는 2 Å/sec 이었으며 성장 중의 챔버진공도는 약  $2 \times 10^{-5}$  torr 이다.

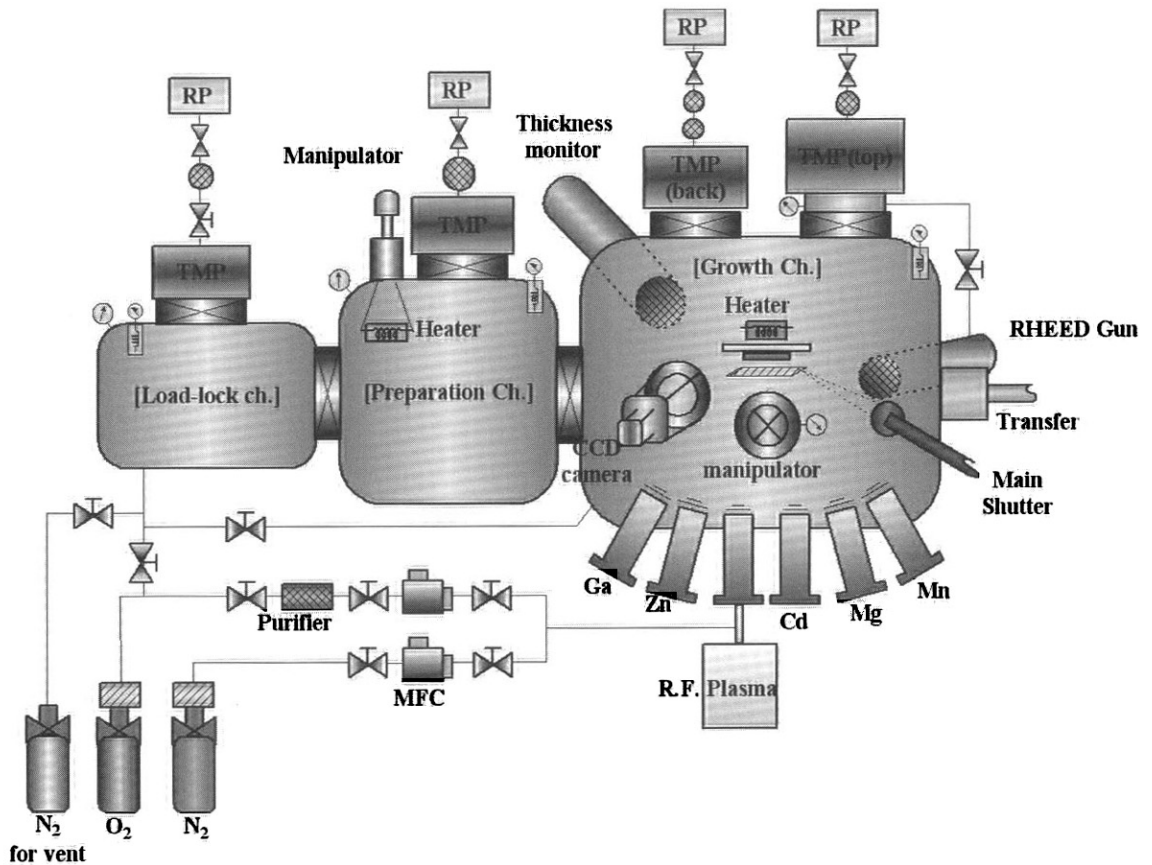


그림 1. 플라즈마 분자선 에피택시 시스템의 개략도.  
 Fig. 1. Schematic diagram of plasma assisted molecular beam epitaxy system.

ZnO 박막 성장 전 및 성장 중에는 25 keV에서 동작하는 RHEED를 이용하여 기판 및 성장면의 표면상태와 성장거동을 *in-situ* 분석하였으며 성장 후 시료는 Philips사의 X'Pert MRD 모델 HRXRD(High-Resolution X-Ray Diffraction)와 Seiko Seiki사의 S300 모델 AFM(Atomic Force Microscope)을 사용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 ZnO 박막 성장 바로전의 R-면 사파이어 기판과 ZnO 박막 성장후의 RHEED 패턴이다.

우선 RHEED 패턴으로부터 ZnO 박막이 단결정으로 성장되었음을 알 수 있다. 전자회절패턴에서 회절면의 결정은 기본적으로  $rd = \lambda L$ 로 결정할 수 있다. 여기서  $r$ 은 촬영된 회절패턴 사진에서 반사 빔과 회절빔 사이의 거리이고  $d$ 는 해당 회절면의

면간거리이다. 따라서 사용한 전자총의 가속전압으로부터 결정된 전자의 파장  $\lambda$ 와 촬영된 패턴이 얻어진 카메라상수  $L$ 를 구하면  $\lambda L$ 을 구할 수 있고 이 값을 사용하여 미지의 회절패턴에서의  $r$ 을 측정하여  $rd = \lambda L$  식을 이용하면 해당되는 미지의 회절패턴의 면간거리  $d$ 를 결정할 수 있고 이로부터 이러한 회절패턴이 나올 수 있는 azimuth를 결정할 수 있다. 그러나 여기서 우리가 실질적으로 필요로 하는 값은  $\lambda$ 와  $L$ 의 개별적인 정확한 값이 아니라  $\lambda$ 와  $L$ 의 곱인  $\lambda L$ 이므로 가속전압, 빔의 입사각도, 촬영에 사용된 카메라의 줌 상태 등이 동일한 조건에서 azimuth와 회절면을 알고 있는 시편에서의 RHEED 패턴을 얻으면 결국  $r$ 과  $d$ 를 아는 것이고 따라서, 동일한 RHEED 촬영조건에서의  $\lambda L$ 을 결정할 수 있다. 그림 2의 특정 azimuth에서 얻은 R-면 사파이어 기판과 ZnO 박막 성장후의 RHEED 패턴으로부터 azimuth와 회절면의 면지수

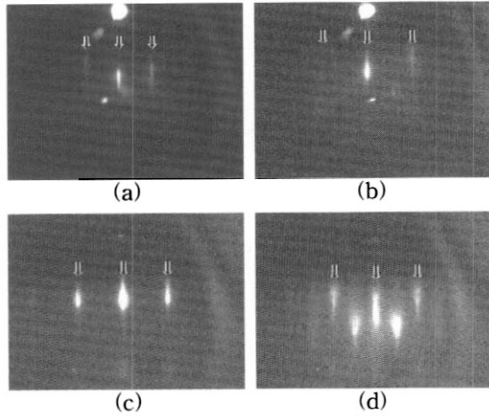


그림 2. R-면 사파이어 기판 위 ZnO 박막 성장 시 얻은 사파이어 기판과 ZnO 박막의 RHEED 패턴. (a), (b)는 성장 전 특정 azimuth에서의 사파이어기판의 패턴이고 (c), (d)는 1시간 동안 ZnO 성장 후의 패턴임.

Fig. 2. RHEED patterns for R-plane sapphire substrates and ZnO films. (a) and (c) are patterns for substrates before the growth. (c) and (d) are patterns for the ZnO films grown for 1 hr.

를 결정하기 위해서는 기본적으로  $\lambda L$  값을 알아야 하므로 앞서 언급한 바와 같이 azimuth와 회절면을 알고 있는 c-면 사파이어 기판 위에 성장된 300 nm 두께 ZnO 박막의 RHEED 패턴으로부터  $\lambda L$  값을 결정하였으며 그 값은  $7.097 \text{ nm} \cdot \text{mm}$  이었다.

그림 2(a)는 ZnO 박막을 성장하기 전 열적 세정이 끝난 R-면 사파이어 기판의 특정 azimuth에서 얻은 RHEED 회절패턴이며 그림 2(c)는 동일한 azimuth에서 ZnO 박막을 성장한 후 얻은 패턴이다. 마찬가지로 그림 2(b)와 (d)는 또 다른 특정 azimuth에서 얻은 R-면 사파이어와 ZnO 박막에서의 RHEED 회절패턴이다. 여기서 한 가지 언급할 것은 그림 2(b)와 (d)의 azimuth는 그림 2(a)와 (c)의 azimuth에서 기판을 90도 회전시킨 후의 azimuth라는 것이다. 즉 그림 2(b)와 (d)의 azimuth와 그림 2(a)와 (c)의 azimuth는 서로 수직이다.

다음에는 구체적으로 그림 2의 RHEED 회절패턴의 면지수와 azimuth를 결정하여 보자. 우선 그림 2(c)의 경우를 살펴보면 화살표로 표시한 회절빔 간 거리의 평균값은  $25.06 \text{ mm}$ 이며 이로부터  $rd = \lambda L = 7.097 \text{ nm} \cdot \text{mm}$  식을 이용하여 계산한 d 값은  $2.832 \text{ \AA}$ 이다. 이는 ZnO (1-100) 면의 면간거리  $2.814 \text{ \AA}$ 과 거의 일치하며 화살표로 표시한 회절빔

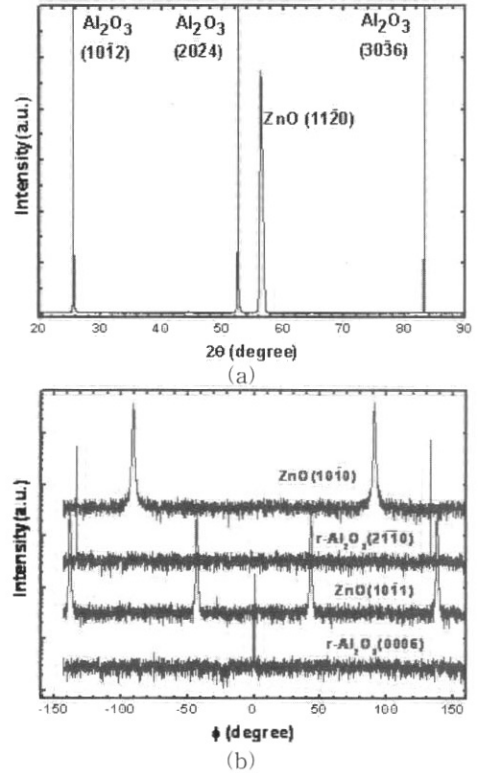


그림 3. R-면 사파이어 기판위에 성장한 ZnO 박막의 HRXRD 결과. (a)  $\Theta$ -2 $\Theta$  scan 과 (b)  $\phi$  scan

Fig. 3. HRXRD results from the ZnO film on R-plane sapphire. (a)  $\Theta$ -2 $\Theta$  scan and (b)  $\phi$  scan

은 {1-100} 면의 회절패턴 임을 유추할 수 있다. 그림 2(d)의 경우는 화살표로 표시한 회절빔 간 거리의 평균값은  $26.83 \text{ mm}$ 이고 동일한 방법으로 구한 d값은  $2.645 \text{ \AA}$ 이며 이는 ZnO {0002} 면의 면간거리  $2.603 \text{ \AA}$ 과 거의 일치하므로 {0002} 면임을 확인할 수 있다. 이로부터 그림 2(c)와 그림 2(d)의 ZnO azimuth는 각각 [0001]과 [-1100]임을 알 수 있다. 이와 동일한 방법으로 R-면 사파이어의 azimuth를 정하게 되면 그림 2(a)와 (b)는 각각 [-1101]와 [11-20]이며 따라서 R-면 사파이어와 그 위에 성장된 ZnO 박막의 결정학적 방향관계는  $[-1101]_{\text{sapphire}}/[0001]_{\text{ZnO}}$ ,  $[11-20]_{\text{sapphire}}/[-1100]_{\text{ZnO}}$  로 결정할 수 있다. 이는 R-면 사파이어 기판 위에 성장한 ZnO 박막이 (11-20) 방향으로 성장하여 성장방향으로 비극성을 가지는 a면({11-20}면) ZnO가 에피박막으로 성장했음을 의미한다.

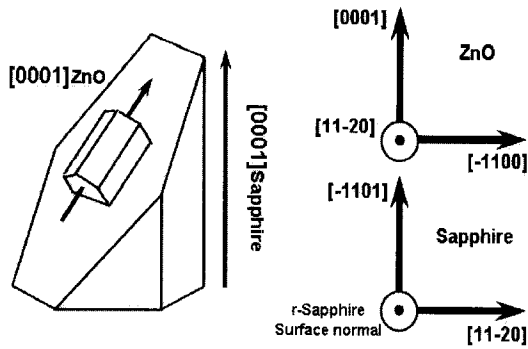


그림 4. ZnO 박막과 R-면 사파이어기판과의 에피택셜 방향관계를 보여주는 개략도.

Fig. 4. Schematic illustration of the epitaxial relationship between ZnO and R-plane sapphire.

그림 3(a)는 R-면 사파이어 기판위에 성장한 ZnO 박막시료의 XRD  $\theta$ -2  $\theta$  분석결과이다. 그림 3(a)에 표시한 바와 같이 사파이어 (10-12), (20-24), (30-36) 피크가 관찰되며 2  $\theta$ =56.255°에서 관찰되는 나머지 하나는 ZnO (11-20) 피크이며 ZnO (0002) 피크(2  $\theta$ =34.604°)는 관찰되지 않음을 알 수 있다. 따라서 ZnO 박막은 wurtzite 구조를 가지며 ZnO (11-20) 면이 사파이어 R면 (1-102)에 평행하게 성장되었다는 것을 의미한다. 이는 성장 방향으로 극성이 존재하지 않는 비극성 ZnO 박막이 성장되었음을 의미하는 것이다. 그림 3(b)는 ZnO 박막과 사파이어 기판의 여러 면들에 대한 XRD  $\phi$  scan 결과를 보여준다. 우선 ZnO (10-10)의  $\phi$  scan에서 180도 간격으로 피크가 나타나는 것은 180도 회전대칭을 가짐을 보여주며 이는 곧 ZnO 박막이 단결정으로 성장되었음을 의미한다. 또한 그림 3(b)의 사파이어와 ZnO의 각 면들의  $\phi$  위치와의 관계를 고려하면 R-면 사파이어와 그 위에 성장된 ZnO 박막의 결정학적 방향관계는  $[-1101]_{\text{sapphire}} // [0001]_{\text{ZnO}}$ ,  $[11-20]_{\text{sapphire}} // [-1100]_{\text{ZnO}}$ 임을 알 수 있으며 이 결과는 RHEED 패턴 분석에서 결정된 에피택셜 방향관계와 동일한 결과이다. 그림 4는 RHEED와 HRXRD 분석으로부터 동일하게 결정된 ZnO 박막과 R-면 사파이어와의 결정학적 방향관계를 개략적으로 보여준다.

그림 5는 결정된 에피택셜 방향관계에 따른 격자부정합을 설명하기 위한 개략도이다. 그림 5에서 보듯이 도메인 에피택시[12,13]를 고려하여 계산하면 사파이어  $[-1101]$  방향 (또는 ZnO  $[0001]$  방향)

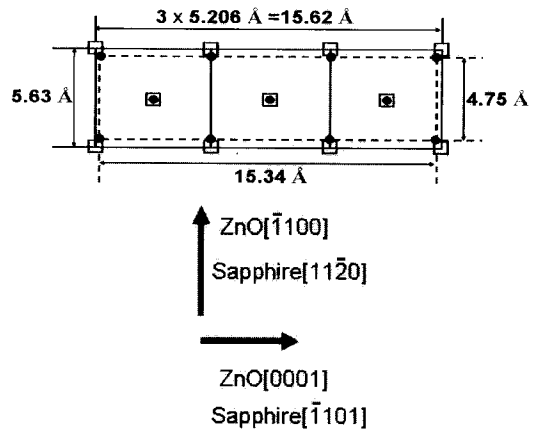


그림 5. 결정된 에피택셜 관계에 대한 R-면 사파이어와 a-면 ZnO의 양이온 위치를 보여주는 개략도. 채워진 원은 Al 원자 위치, 점선은 R-면 사파이어 단위격자를 나타내며, 빈 사각형은 Zn 원자 위치, 실선은 ZnO a-면 단위격자를 나타낸다.

Fig. 5. Projection of bulk R-plane sapphire and a-plane ZnO cation positions for observed epitaxial relationship. The dots mark aluminum atom positions and the dashed lines show the sapphire R-plane unit cell. The open squares mark zinc atom positions and the solid lines show the ZnO a-plane unit cells.

으로는 격자부정합이 1.8 %로 상당히 작으며 사파이어  $[11-20]$  방향 (또는 ZnO  $[-1100]$  방향)으로는 격자부정합이 15.6 %가 된다.

그림 6은 R-면 사파이어 기판 위 1시간 성장된 ZnO 박막의 AFM 사진이다. 특정 방향으로 길쭉한 제방이 늘어선 것과 같은 morphology를 관찰할 수 있다. 그림 6에 표시한 바와 같이 이 방향은  $\langle 0001 \rangle$ 임을 RHEED 관찰과 XRD  $\phi$  scan으로 확인하였다. 그림 6(a)에 삽입한 RHEED 사진 I, II는 각각 10분 성장 및 1시간 성장후의 패턴이다.

10분 성장 시의 RHEED 패턴에서 좀 더 뚜렷한 chevron-like 패턴을 관찰할 수 있으므로 초기성장 시에 길쭉한 morphology가 더욱 명확히 발달되었을 것으로 생각할 수 있다.  $\langle 0001 \rangle$  방향으로 이러한 morphology를 보이는 것은 앞서 설명한 바와 같이 이 방향으로 격자부정합이 적어 측면성장에 이득이 있는 것에 기인하는 것으로 생각할 수 있으

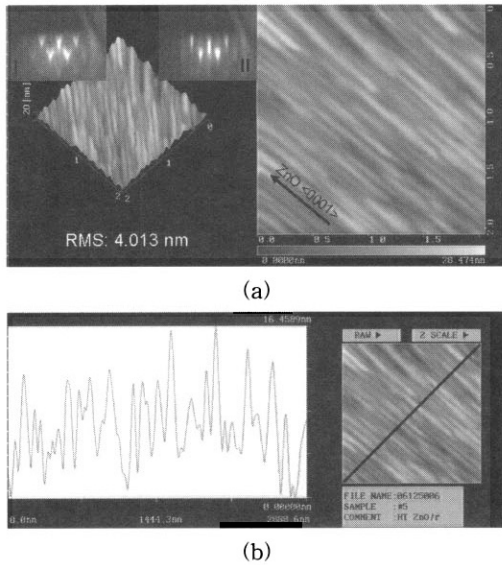


그림 6. (a) R-면 사파이어 기판 1시간 성장된 (11-20) ZnO 박막의 AFM 사진. 삽입된 RHEED 사진 I, II는 각각 10분 및 1시간 성장 시의 패턴을 보여준다. (b) <0001>에 수직인 방향의 대각선으로의 표면 라인 스캔 결과.

Fig. 6. (a) AFM picture for (11-20) ZnO film on R-sapphire substrate grown for 1 h. Inset a and b are RHEED patterns for ZnO films after 10 min and 1 h, respectively. (b) Surface line scan result along the diagonal perpendicular to <0001> ZnO.

나[14] 좀 더 명확한 원인규명이 필요하다. 이러한 morphology를 가지는 ZnO(11-20) 박막의 RMS roughness는 약 4 nm이다. 그림 6(b)는 <0001> 방향에 수직인 방향으로의 표면 라인스캔을 보여준다. 길쭉한 제방의 평균 폭은 약 85 nm이며, 높이는 AFM 스캔의 특성상 정확히는 판단하기 어려우나 약 10 nm 정도 일 것으로 예상된다. 높이나 측면의 면지수 등 정확한 morphology 분석을 위해서는 단면 투과전자현미경 관찰 등의 추가 분석이 요구된다.

#### 4. 결론

R-면 사파이어 즉, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1-102) 기판 위에 ZnO 박막을 플라즈마 분자선 에피택시 방법으로

성장하였다. ZnO 박막은 단결정 에피박막으로 성장되었으며 기판에 평행한 면이 a-plane ZnO인 (11-20)면으로 성장되어 성장방향으로 비극성인 ZnO 단결정 박막을 얻는데 성공하였다. RHEED 패턴분석과 XRD 분석으로부터 R-면 사파이어와 ZnO 박막의 에피택셜 방향관계는 [-1101]Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> || [0001]ZnO, [11-20]Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> || [-1100]ZnO로 결정되었다. ZnO 박막은 ZnO [0001] 방향으로 길쭉하게 늘어선 제방모양의 morphology를 보여주었으며 이는 이 방향으로 격자부정합이 1.8 %로 적고 이에 수직인 ZnO [-1100] 방향으로는 격자부정합이 15.6 %로 커서 <0001> 방향으로의 측면 성장이 촉진된 결과로 생각되지만 구체적인 morphology 형성기구 규명을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국과학재단 특정기초연구사업(R01-2004-000-10104-0)의 연구비지원과 2005년 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2005-205-D00078).

#### 참고 문헌

- [1] S. K. Hong, T. Hanada, H. J. Ko, Y. Chen, T. Yao, D. Imai, K. Araki, M. Shinohara, K. Saitoh, and M. Terauchi, "Control of crystal polarity in a wurtzite crystal: ZnO films grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy on GaN", *Phys. Rev. B*, Vol. 65, No. 11, p. 115331, 2002.
- [2] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger, and J. Hilsenbeck, "Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures", *J. Appl. Phys.*, Vol. 85, No. 6, p. 3222, 1999.
- [3] A. Hangleiter, J. S. Im, H. Kollmer, S. Heppel, J. Off, and F. Scholz, "The role of piezoelectric fields in GaN-based quantum

- wells", MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research, Vol. 3, p. 15, 1998.
- [4] P. Walterelt, O. Brandt, A. Trampert, H. T. Grahn, J. Mennlger, M. Ramstelner, M. Relche, and K. H. Ploog, "Nitride semiconductors free of electrostatic fields for efficient white light-emitting diodes", *Nature*, Vol. 406, p. 865, 2000.
- [5] F. Bernardini and V. Fiorentini, "Macroscopic polarization and band offsets at nitride heterojunctions", *Phys. Rev. B*, Vol. 57, No. 16, p. R9427, 1998.
- [6] T. Deguchi, K. Sekiguchi, A. Nakamura, T. Sota, R. Matsuo, S. Chichibu, and S. Nakamura, "Quantum-confined stark effect in an AlGaIn/GaN/AlGaIn single quantum well structure", *Jap. J. Appl. Phys., Part 2*, Vol. 38, No. 8B, p. L914, 1999.
- [7] L. Calcagnile, G. Coli, M. De Vittorio, R. Rinaldi, P. V. Giugno, R. Cingolani, L. Vanzetti, L. Sorba, and A. Franciosi, "Excitonic nonlinearities in wide gap II-VI multiple quantum wells", *J. Crystal Growth*, Vol. 159, No. 1-4, p. 793, 1996.
- [8] G. Vaschenko, D. Patel, C. S. Menoni, N. F. Gardner, J. Sun, W. Götz, C. N. Tomé, and B. Clausen, "Significant strain dependence of piezoelectric constants in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  quantum wells", *Phys. Rev. B*, Vol. 64, No. 24, p. 241308, 2001.
- [9] V. Fiorentini, F. Bernardini, F. D. Sala, A. D. Carlo, and P. Lugli, "Effects of macroscopic polarization in III-V nitride multiple quantum wells", *Phys. Rev. B*, Vol. 60, No. 12, p. 8849, 1999.
- [10] A. Chakraborty, H. Xing, M. D. Craven, S. Keller, T. Mates, J. S. Speck, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra, "Nonpolar a-plane p-type GaN and pn junction diodes", *J. Appl. Phys.*, Vol. 96, No. 8, p. 4494, 2004.
- [11] F. Bernardini, V. Fiorentini, and D. Vanderbilt, "Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides", *Phys. Rev. B*, Vol. 56, No. 16, p. R10024, 1997.
- [12] J. Narayan, P. Tiwari, X. Chen, J. Singh, R. Chowdhury, and T. Zheleva, "Epitaxial growth of TiN films on (100) silicon substrates by laser physical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 61, No. 11, p. 1290, 1992.
- [13] J. Narayan, K. Dovidenko, A. K. Sharma, and S. Oktyabrsky, "Defects and interfaces in epitaxial  $\text{ZnO}/\text{a-Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{AlN}/\text{ZnO}/\text{a-Al}_2\text{O}_3$  heterostructures", *J. Appl. Phys.*, Vol. 84, No. 5, p. 2597, 1998.
- [14] D. S. Li, H. Chen, H. B. Yu, X. H. Zheng, Q. Huang, and J. M. Zhou, "Anisotropy of a-plane GaN grown on r-plane sapphire by metalorganic chemical vapor deposition", *J. Crystal Growth*, Vol. 265, p. 107, 2004.