

## 결정밀도가 낮은 Gallium Nitride Epitaxy 막 제조

황진수  
한국화학연구소

### Gallium Nitride Epitaxy films Growth with Lower Defect Density

Jin Soo Hwang

KRICT, PO BOX 107, Yoosung Postoffice, Taejeon 305-606, Korea

#### 요약

결정결함의 밀도가 낮은 GaN epitaxy 막을 MOCVD(metal organic chemical vapour deposition) 방법에 의해 성장시켰다. 기판은 6H-SiC를 사용하였으며, AlN과 GaN으로 구성된 이중 buffer 층을 도입하였다. GaN buffer 층은 반응원료인 trimethyl gallium(TMg)과 NH<sub>3</sub> 가스를 교호식펄스공급(alternating pulsative supply, APS)방법에 의해 만들었다. AlN buffer/6H-SiC 위에 초기단계에 형성되는 GaN 섬은 APS처리에 의해 크기가 커지는 것을 AFM(atomic force microscope)으로 관찰하였다. Buffer 층의 역할은 그 위에 성장시킨 GaN epitaxy 막의 결정성과 결함밀도에 의해 조사하였다. 성장된 GaN의 결정구조와 결정성은 DCXRD(double crystal X-ray diffractometer)에 의해 측정하였다. 결정결함은 EPD(etching pit density)를 측정하는 방법으로 알칼리혼합용액에서 처리된 막을 SEM(scanning electron microscope)으로 관찰하였다.

#### Abstract

GaN epitaxy films of low defect density have been prepared by metal organic chemical vapour deposition (MOCVD) on 6H-SiC substrate with AlN and GaN double buffer layers. The GaN buffer layers are made by alternating pulsative supply (APS) of trimethyl gallium (TMG) and NH<sub>3</sub> gases. The sizes of GaN islands on AlN buffer/6H-SiC at the initial stage observed by AFM (atomic force microscope) have increased by APS treatment. The roles of buffer layers are investigated by both crystallinity and defect density in GaN epitaxy films. The crystal structure and crystallinity of the resulting GaN films is measured by DCXRD (double crystal X-ray diffractometer). As concerns the defect density, GaN films having been dipped in mixed alkali solution by etching pit method is evaluated by SEM (scanning electron microscope).

#### 1. 서론

Gallium Nitride(GaN)는 wide band gap energy를 가지는 화합물 반도체로서 고효율 청색 Light Emitting Diode(LED)와 단파장 영역의 반도체 Laser Diode(LD) 등의 용도로서 활발하게 연구되고 있다.<sup>1,2)</sup> GaN은 GaN 단결정을 boule형태로 얻을 수가 없으므로, heteroepitaxy 방법에 의해 소재

화하고 있다. Heteroepitaxy 소재로는 주로 sapphire가 기판으로 사용되고 있다.<sup>3,4)</sup> Sapphire 기판 위에서 성장된 GaN 박막은 buffer 층을 도입하여 최적의 조건에서 결정결함을 최소화하였음에도 불구하고 전위(dislocation) 밀도가 10<sup>10-12</sup>개/cm<sup>2</sup> 정도로 매우 높게 나타나고 있다.<sup>5)</sup> 전위는 비발광 재결합 센터로 작용하는 dark line을 형성하여 디바이스의 수명을 줄이는 것으로 Guha의 ZnSe계 화합물

반도체박막의 연구에서 처음 알려졌다.<sup>6)</sup> 최근에는 Rosner<sup>7)</sup>와 Sugahara<sup>8)</sup>가 GaN에서도 전위가 비발광센터로 작용하는 것을 발견하였다.

GaN 박막에서 전위의 중요성이 인식됨에 따라 그 근원에 대하여 많은 연구가 최근에 이루어지고 있다. Qian<sup>9)</sup>은 sapphire 기판을 사용하면 GaN에 대하여 격자부정합(lattice mismatch)이 14%로 매우 크므로, 초기 성장시 점모양으로 자란 GaN 결정들이 접합될 때 소각입계(low-angle grain boundaries)를 형성하게 되고, 이들이 전위의 주 원인이 된다고 제안하였다. Ponce<sup>10)</sup>는 GaN 박막내의 전위를 연구하기 위하여 6H-SiC 기판 위에 AlN buffer 층을 입히고 그 위에 성장시킨 GaN 박막을 투과전자현미경으로 관찰하였다. 그 결과 GaN 박막의 전위는 AlN buffer에 형성된 소각결정입계(low-angle domain boundary)부터 시작되는 것을 알게 되었다. 각각의 결정입계들은 국부적 응집을 하기 때문에 GaN 박막이 성장하는 동안에 전위를 일으키게 된다. AlN buffer 층의 결정입계로부터 시작된 결함은 GaN 박막표면까지 실처럼 이어진 선 전위(line dislocation)를 만든다. Tanaka<sup>11)</sup>는 1.5 nm 이하의 얇은 AlN 박막을 6H-SiC(0001) 면위에 성장시키면 고품위의 AlN 단결정 막이 형성되는 것을 발견하였다. 이는 기판위에 성장하는 박막이 입계 두께 이하에서는 pseudomorphic 관계가 만들어지면서 전위와 같은 결정결함이 매우 적어지게 되는 것으로 관찰되었다. 또한 그 위에 GaN 박막을 입히므로써  $10^8$ 개/cm<sup>2</sup>로 낮은 전위밀도의 단결정을 얻었다. Hwang<sup>12,13)</sup>은 6H-SiC 기판 위에 AlN buffer 층을 입히고, 그 위에 반응원료의 교호식펄스공급(alternating pulsative supply, APS)방법에 의해 GaN buffer 층을 얇게 입히므로써, 그 위에 성장된 GaN 박막의 전위밀도를 낮추었다. 이는 결정성장시 초기의 핵화단계에서 GaN 층을 강하게 점착(adhesive)시키므로써, 그 위에 성장하는 GaN epitaxy 막의 전위밀도가 낮아지고 결정성 및 광학적 특성이 개선되었다.

본 연구에서는 6H-SiC 기판 위에 AlN 과 GaN buffer 층을 입히고, 그 위에 GaN epitaxy 막을 성장시키므로써 buffer 층이 GaN 박막의 결정성 및 전위 밀도에 미치는 영향을 조사하였다. Heteroepitaxy 성

장시 buffer 층의 역할에 대한 정확한 이해는 고품위의 단결정막을 만드는데 뿐만 아니라 디바이스를 만드는데도 도움이 될 것으로 기대된다.

## 2. 실험

### 2-1. 결정성장

6H-SiC 위에 AlN 및 GaN buffer 층과 GaN epitaxy 막을 성장시키기 위한 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition) 방법은 이미 문헌에 보고하였다.<sup>13)</sup> 연구에서 사용한 6H-SiC 기판은 미국 Cree사의 제품이었다. 기판의 on-axis 6H-SiC (0001)면의 Si면을 세정하고 성막에 사용하였다. 기판 표면의 산화물막을 제거하기 위하여 10% HF용액으로 10분간 초음파 세척하였다.

세정한 기판을 반응기 안에 SiC로 도포된 graphite susceptor 위에 탑재하고 밀폐하여 실온에서 진공도가  $2 \times 10^{-5}$  mbar까지 내려가도록 pumping하였다. 그후 반응기 밸브를 닫아 pumping을 중지시키고 반응기내에 N<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub> 가스를 서서히 주입하였다. 반응기내 압력은 76 torr로 일정하게 유지시켰다.

6H-SiC 위에 AlN buffer 층의 도입시 반응기체 흐름속도는 H<sub>2</sub> 운반기체와 함께 TMA(trimethyl aluminum)를 분당 2.4  $\mu$ mol로, NH<sub>3</sub>를 분당 2 l로 동시에 흘려주었다. 이때의 성막온도와 성막시간은 1060°C의 온도에서 90초 동안 성장시켰다. GaN buffer 층은 먼저 6H-SiC 기판 위에 AlN을 얇게 입힌 후, 교호식펄스공급(APS) 방법에 의해 얇은 층을 형성시켰다. APS 방법은 AlN 층 표면 위에 1060°C에서 TMG(trimethyl gallium)+H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>와 H<sub>2</sub>를 각각 1초씩 흘려주는 것을 한 주기로 하여 5회에서 30회까지 반응원료를 교대로 공급하여 GaN buffer 층의 형성시 계면에 완전한 wetting이 이루어지게 하였다. APS 방법에서의 반응기체 흐름속도는 H<sub>2</sub> 운반기체와 함께 분당 32  $\mu$ mol의 TMG와 분당 2 l의 NH<sub>3</sub>를 교대로 공급하였다. TMG+H<sub>2</sub>와 NH<sub>3</sub>는 각 주기별로 표면에 완전히 wetting시키기 위하여 각각의 공급시간을 1초로 하였다. 또한 TMG+H<sub>2</sub>와 NH<sub>3</sub>의 반응 사이에는 표면 정화를 위하여 수소를 1초씩 흘렸다.

그 위에 GaN epitaxy 막을 성장시키기 위하여 1060°C에서 20분 동안 분당 2 l의 H<sub>2</sub> 운반기체와 함께 분당 32 μmol의 TMG, 분당 2 l의 NH<sub>3</sub>와 분당 0.5 l의 N<sub>2</sub>를 동시에 공급하였다. N<sub>2</sub>는 고온에서 반응기체의 확산을 방지하고 반응기체가 기판에 충돌할 수 있도록 압력기체로 사용하였다.

**2-2. 결정분석**

GaN epitaxy 막의 결정구조와 결정성은 double crystal x-ray diffractometer(DCXRD)로 확인하였다. 6H-SiC 기판의 표면, AlN buffer 층, GaN buffer 층과 GaN epitaxy 막의 초기성장과정은 atomic force microscopy(AFM)로 관찰하였다. 성장된 GaN epitaxy 막은 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)으로 표면 조직 및 형태를 관찰하였다. 결정결함은 etching pit density (EPD)방법에 의해 측정하였다.<sup>14)</sup> GaN 박막을 280°C의 KOH:NaOH=5:1 용액에 2분간 넣어 결함이 있는 부분을 녹여낸 후, 결함의 개수를 SEM으로 관찰하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**3-1. GaN epitaxy 막의 제조**

GaN epitaxy 막의 제조과정은 Fig. 1과 같다. 6H-SiC 기판(Fig. 1a) 위에 GaN을 직접 성장시키면 기판과 막간의 격자불일치(lattice mismatch)에

의해, 육각형의 결정립계(grain boundary)가 3차원적으로 매우 선명한 거친 단결정막이 형성된다(Fig. 1b). 이러한 격자불일치를 완화시키기 위하여 일반적으로는 AlN buffer 층(Fig. 1c)이 도입되고 있다.<sup>10,15)</sup> 본 연구에서도 격자불일치를 완화시키는 한편 기판위에 성장하는 박막이 임계두께 이하에서 pseudomorphic 관계가 만들어지도록 1.5 nm 이하의 얇은 AlN buffer 층을 6H-SiC (0001) 면위에 성장시켰다. 그 위에 MOCVD 방법에 의해 GaN epitaxy 막을 1060°C의 온도에서 20분간 입힌 결과, Tanaka<sup>11)</sup>와 같이 10<sup>8</sup>개/cm<sup>2</sup> 정도로 결정결함의 밀도가 낮고 2차원적으로 깨끗하게 성장한 거울면의 GaN 단결정 막(Fig. 1d)을 얻었다.

본 연구에서는 보다 결함밀도가 낮은 GaN epitaxy 막을 얻기 위하여 얇은 AlN buffer 층위에 APS방법에 의해 5회-30회의 일정한 두께로 GaN buffer 층(Fig. 1e)을 도입한 후, MOCVD 방법에 의해 GaN epitaxy 막을 1060°C의 온도에서 20분간 성장시켰다. 그 결과 AlN buffer 층위에 성장시킨 GaN epitaxy 막보다 2×10<sup>7</sup>개/cm<sup>2</sup> 정도로 결정결함의 밀도가 한 차수 낮고 2차원적으로 깨끗한 거울면의 GaN 단결정 막(Fig. 1f)을 얻었다. 2차원적 구조로 성장된 거울면 같이 깨끗한 GaN 박막 표면은 주사전자현미경이나 광학현미경으로는 어떠한 결정결함도 관찰할 수 없었다. GaN epitaxy 막의 성장속도는 성장된 결정의 파단면을 고 분해능 주사전자현미경으로 측정한 결과 분당 300 Å 두께로

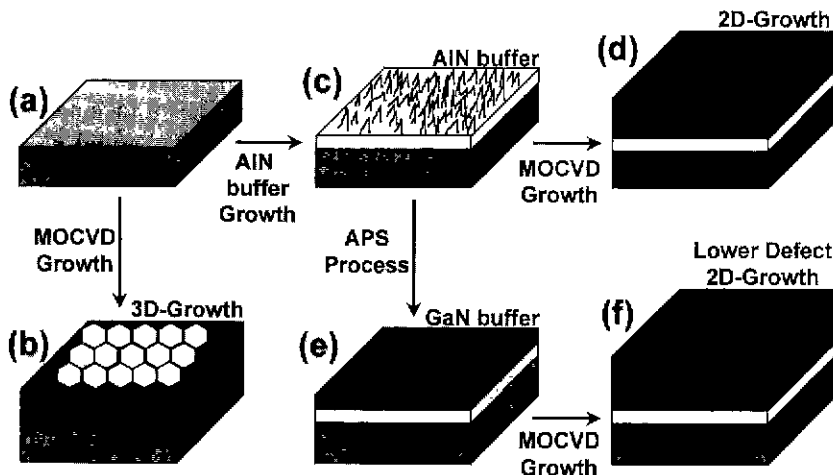


Fig. 1. GaN epitaxy process grown on 6H-SiC substrate.

평가되었다.

### 3-2. GaN epitaxy 막의 결정구조 및 결정성

GaN은 hexagonal wurzite형 구조와 cubic zinc blende형 구조의 두가지 결정형태가 존재한다. 이 중에서 wurzite형은 ABAB 층을 가지는 hcp (hexagonal close packed) 구조이다. Wurzite형 GaN는  $a=3.186 \text{ \AA}$ ,  $c=5.178 \text{ \AA}$ 의 격자상수를 가지며 Ga-N 간의 결합거리는  $1.98 \text{ \AA}$ 이다. 6H-SiC는 격자상수가  $a=3.08 \text{ \AA}$ ,  $c=15.12 \text{ \AA}$ 인 hexagonal 구조를 갖고 있다. 본 연구에서 얻어진 모든 GaN 결정은 wurzite형으로 Cu target를 사용하여 XRD를 측정한 결과 Bragg의 회절식에 의해  $2\theta=34.62^\circ$ 에서 GaN(0002)면에 해당하는 peak를 관찰할 수 있었다. 한편 기판인 6H-SiC의 peak는  $2\theta=35.67^\circ$ 에서 관찰되었다.

GaN 막의 결정성은 DCXRD에 의해  $\omega$ - $2\theta$  scan으로 측정하였다. 그 결과 GaN 박막의 결정성은 APS 방법으로 처리한 횟수에 의해 영향을 받는 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 APS 처리없이 AlN buffer layer/6H-SiC 위에 20분간 성장시킨 GaN의 x-ray peak의 FWHM 값은

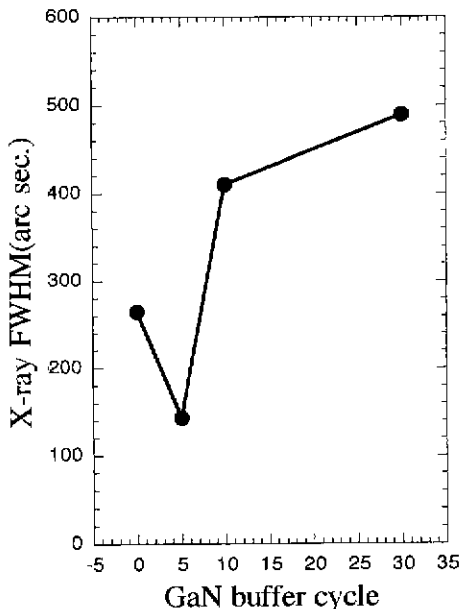


Fig. 2. Dependence of crystallinity in GaN films on GaN buffer thickness.

260 arc sec.을 보여 주었다. 반면에 APS 방법의 해 원료를 5회 공급하여 GaN buffer 층을 도입하고 그 위에 20분간 성장시킨 GaN의 x-ray FWHM 값은 143 arc sec.으로 감소하면서 결정성이 크게 향상되었다. 반면에 10회와 30회로 APS 처리 횟수를 늘이면 성장된 GaN은 각각 410 arc sec.와 489 arc sec.로 증가하면서 결정성이 더 나빠졌다. 이는 Tanaka가 관찰하였듯이 buffer 층의 두께를 임계 두께 이상으로 성장시키면 기판 면과 buffer 층 사이에 탄력적인 당김이 크게 작용하여 결정성이 더 나빠지는 결과와 잘 일치하고 있다.<sup>11)</sup>

### 3-3. AlN, GaN buffer 층과 GaN epitaxy 막의 초기 성장과정

6H-SiC (0001) 기판과 그 위에 성장된 buffer 층의 표면조직을 AFM으로 관찰하였다. 6H-SiC 기판의 표면조직은 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 연마층의 기계적인 마모에 의하여 거친 면이 관찰되었다. 그 후에  $1060^\circ\text{C}$ 에서 90초동안 성장시킨 AlN buffer 층의 표면조직은 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 기판 전면에 무수한 점모양의 결정입자가 나타나고 있다. AFM에 의해 측정된 AlN 섬들의 평균거치름 값(average surface roughness values)은  $500 \times 500 \text{ nm}^2$ 의 영역에서 약 1 nm로써, 균일한 크기의 섬들이 기판 전체에서 평탄한 거울면을 형성하였다. Tanaka는 AFM과 고분해능 투과 전자 현미경(HR-TEM)을 사용하여 AlN buffer 층의 평탄성이 성장된 두께에 의존한다고 보고하였다.<sup>11)</sup> AlN buffer 층의 두께가 약 9 nm 정도로 두꺼우면  $30 \times 30 \text{ nm}^2$ 의 범위내에서 측정된 평균 거치름 값이 1.16 nm인 반면, 두께가 1.5 nm로 얇으면 평균 거치름 값도 0.38 nm로 매우 평탄한 면이 형성되었다.

GaN buffer 층에 관한 연구는 얇은 AlN 층 위에 GaN막을 APS 방법으로 5회 성장시킨것(Fig. 3c)과, 종래의 MOCVD 방법으로 5초 성장시킨것(Fig. 3d)의 초기 표면조직을 각각 AFM으로 조사, 비교하였다. APS 방법에 의하는 경우는 AlN buffer layer에 TMG+ $\text{H}_2$ 와  $\text{NH}_3$ 를 교대로 5회(cycle) 공급하여 GaN 섬들을 생성시키고 초기단계의 AFM image를 관찰하였다. GaN buffer 층을 AlN buffer 층위의 계면에 완전히 wetting시키는 전자의 경우

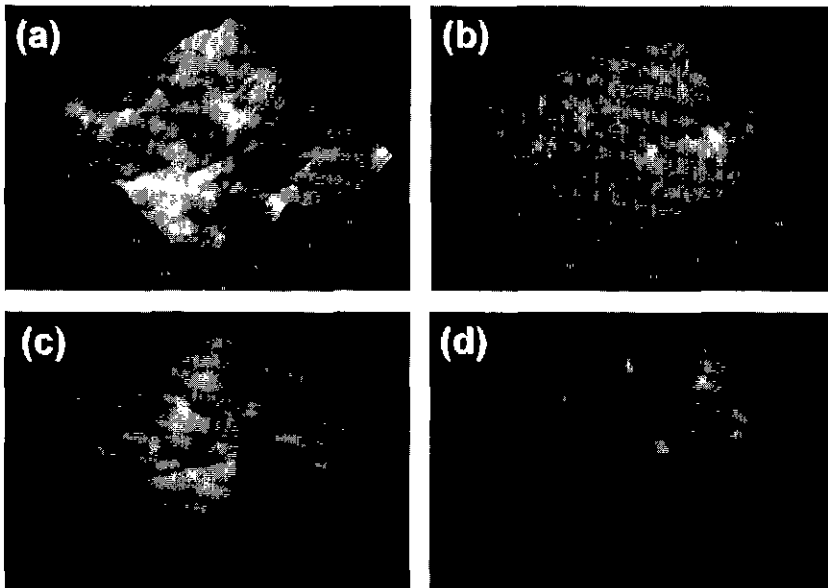


Fig. 3. AFM images of (a) 6H-SiC substrate (scan area:  $420 \times 420 \text{ nm}^2$ ), (b) AlN buffer layer on 6H-SiC substrate (scan area:  $490 \times 490 \text{ nm}^2$ ), (c) GaN islands buffered by alternating pulsative supply (APS) for 5 cycles on AlN buffer/6H-SiC (scan area:  $525 \times 525 \text{ nm}^2$ ) and (d) GaN islands grown by MOCVD method for 5 seconds on AlN buffer/6H-SiC (scan area:  $520 \times 520 \text{ nm}^2$ ).

에는 Fig. 3(c)에서 보는 바와 같이 초기단계에 커다란 GaN 섬들이 형성되고 있었다. 한편으로 AlN buffer 층위에  $\text{TMG} + \text{H}_2$ 와  $\text{NH}_3$ 를 함께 5초 동안 MOCVD 방법으로 공급하여 초기에 생성된 GaN 섬들을 APS 방법에 의한 것들과 비교하였다. 이 경우에는 Fig. 3(d)에서 보는 바와 같이 APS 방법에 비하여 크기는 작지만 많은 양의 GaN 섬들이 형성되었다. 이러한 섬모양의 GaN 입자들은 계속해서 성장하면서 전위의 원인이 되는 소각입계를 만들게 된다.<sup>10)</sup> 따라서 성장 초기에 GaN 섬들이 적게 형성되는 APS 방법이 결정결함을 줄일 수 있었다.

Fig. 3(c,d)의 AFM 분석결과를 Table 1에 요약하였다. APS 방법과 MOCVD 방법을 각각 5회와 5초 동안 적용한 후, 이때 생성된 GaN 섬들의 개수, 섬들의 평균면적과 섬들로 이루어진 표면조직의 평균 거치름 값을 서로 비교하였다. APS 방법으로 5회 처리한 경우에는 초기 성장된 GaN 섬들의 평균 거치름 값이 3 nm인데 반하여, MOCVD 방법으로 5초 동안 반응시킨 경우에는 그 거치름 값이 2.4 nm였다. 초기 평탄성은 MOCVD 방법에 의한 것이 약간 좋은 것으로 평가된다. 그러나 결정결함의 원

Table 1. AFM analysis for initial stage of GaN islands grown on AlN buffer/6H-SiC

|   | 5 cycle APS method   | 5 sec MOCVD method   |
|---|----------------------|----------------------|
| # of GaN islands ( $\text{개}/\text{cm}^2$ )           | $1.9 \times 10^{10}$ | $3.2 \times 10^{10}$ |
| average surface area of GaN islands ( $\text{nm}^2$ ) | 12000                | 2700                 |
| average surface roughness of GaN islands (nm)         | 3                    | 2.4                  |

인을 제공하는 것으로 알려진 섬들은 APS 방법에 의하는 경우가 MOCVD 방법에 비하여 그 평균면적이 4배 정도 커지는 반면, 섬들의 개수는 반으로 줄어든 것을 관찰할 수 있었다.

#### 3-4. GaN epitaxy 막의 결정결함

GaN은 heteroepitaxy 방법에 의해 소재화하기 때문에 기판과 막간의 격자불일치에 의해 기판 위에 직접 성장시키면 항상 육각형의 결정립계(grain

boundary)가 3차원적으로 매우 선명한 거친 단결정막이 형성된다(Fig. 4a). 초기에 형성된 GaN 섬들이 무질서하게 성장하면서 섬들간의 접촉면에서 결정립계가 형성되는 면결함(face defect)이 발생한다. 이러한 면결함의 원인이 되는 격자불일치를 완화시키기 위하여 buffer 층(Fig. 1c,e)을 도입하면 2차원적 구조로 거울면같이 깨끗하게 성장된 GaN 박막을 얻게되는데, 그 표면은 주사전자현미경이나 광학현미경으로는 어떠한 결정결함도 관찰

할 수 없다. 일반적으로는 고 분해능 투과전자현미경으로 전위에 기인하여 결정내에 형성된 선결함(line defect)을 관찰하고 있다. 본 연구에서는 표면까지 형성된 선결함을 알칼리혼합용액으로 280°C에서 2분간 녹여낸 후, etching pit의 밀도를 관찰하였다.<sup>14)</sup> APS 방법을 도입하지 않고 AlN buffer layer/6H-SiC 위에 성장시킨 GaN의 결정결함 밀도는  $1 \times 10^8$ 개/cm<sup>2</sup>(Fig. 4b)로써 Tanaka<sup>11)</sup> 등이 보고한 결과와 잘 일치하였다. APS 방법에 의해 5회-30회의 원료공급으로 GaN buffer 층을 도입한 후 성장한 경우의 결정결함 밀도는  $2 \times 10^7$ 개/cm<sup>2</sup>(Fig. 4c)로써 매우 적은 양의 결정결함밀도를 보여주었다. APS 방법에 의해 GaN buffer 층의 도입시, 3-2에서 살펴본 바와 같이 GaN epitaxy 막의 결정성은 buffer 층의 두께에 의해 영향을 받는 것에 반하여, 결정결함의 밀도는 buffer 층의 두께에 의해 영향을 받지 않았다. GaN epitaxy 막의 결정성은 임계두께 이하로 buffer 층을 도입하면 pseudomorphic 관계가 형성되어 박막의 결정성이 크게 향상되는 것으로 사료된다. 그러나 결정결함은 buffer 층의 두께와는 상관없이 3-3의 AFM 결과에서 보는바와 같이 초기 형성시에 2차원적으로 강하게 점착(adhesion)되는 정도와 섬들이 2차원적으로 얼마나 크게 잘 성장하느냐에 의해 결정되었다.

#### 4. 결 론

6H-SiC 위에 AlN buffer 층과 GaN buffer 층을 이중으로 도입하여 결정결함의 밀도가 낮은 GaN epitaxy 막을 성장시킨 후, 막의 결정성과 결정결함에 미치는 buffer의 영향을 관찰하였다. AlN buffer 층과 GaN epitaxy 막은 MOCVD 방법에 의하였고, GaN buffer 층은 APS 방법에 의하였다.

GaN epitaxy 막의 결정성은 DCXRD로 측정하였으며, buffer 층의 두께에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 결정결함은 EPD 방법에 의해 관찰하였으며, 결함밀도는 buffer 층의 두께와는 상관없이 초기 성장시에 buffer 층이 2차원적으로 강하게 점착(adhesion)되는 정도와 초기 형성된 섬들이 2차원적으로 얼마나 크게 잘 성장하느냐에 의해 결정되는 것을 AFM으로 관찰하였다.

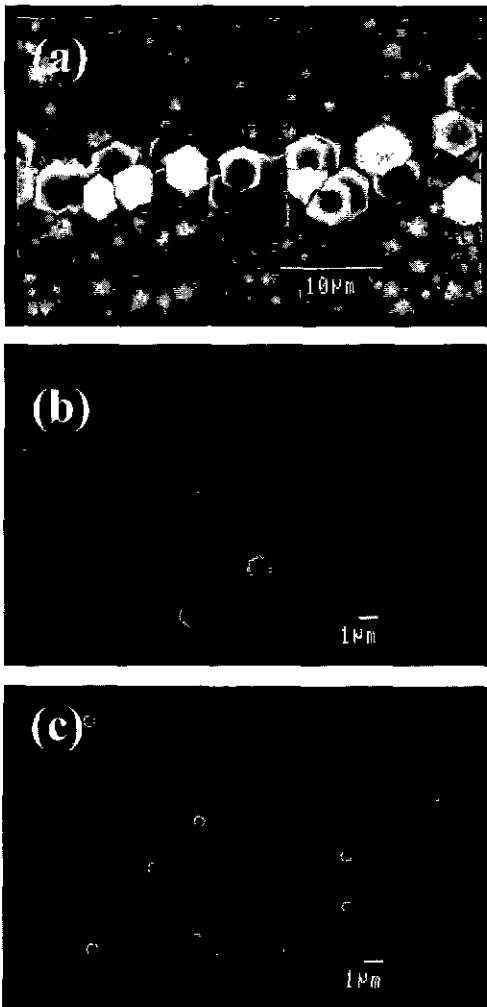


Fig. 4. SEM images of (a) GaN films grown on 6H-SiC substrate without buffer, (b) etching pit density ( $1 \times 10^8$  cm<sup>-2</sup>) in GaN films grown on APS GaN buffer and (c) etching pit density ( $2 \times 10^7$  cm<sup>-2</sup>) in GaN films grown on conventional AlN buffer.

## 참고문헌

- 1) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushida, Y. Sugimoto and H. Kiyoku, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 3034 (1996).
- 2) M. A. Kahn, J. N. Kuznia, D. T. Olson, J. M. ban Hove, M. Blasingame and L. F. Reitz, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 2917 (1992).
- 3) J. S. Hwang, A. V. Kuznetsov, S. S. Lee, H. S. Kim, J. G. Choi and P. J. Chong, *J. Crystal Growth*, **142**, 5 (1994).
- 4) J. S. Hwang, A. V. Kuznetsov, S. S. Lee, H. S. Kim, J. G. Choi and P. J. Chong, *Korean J. Crystallography*, **5**, 24 (1994).
- 5) S. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. Craford and D. A. Steigerwald, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 1249 (1995).
- 6) S. Guha, J. M. DePuydt, J. Qiu, G. E. Hofler, M. A. Haase, B. J. Wu and H. Cheng, *Appl. Phys. Lett.* **63** (1993) 3023.
- 7) S. J. Rosner, E. C. Carr, M. J. Ludowise, G. Girolami and H. I. Erikson, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 420 (1997).
- 8) T. Sugahara, H. Sato, M. Hao, Y. Naoi, S. Kurai, S. Tottori, K. Yamashita, K. Nishino, L. Romano and S. Sakai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, L398 (1998).
- 9) W. Qian, M. Skowronski, M. De Graef, K. Doverspike, L. B. Rowland and D. K. Gaskill, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 1252 (1988).
- 10) F. A. Ponce, B. S. Krusor, J. S. Major, Jr., W. E. Plano and D. F. Welch, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 410 (1995).
- 11) S. Tanaka, S. Iwai and Y. Aoyagi, *J. Crystal Growth* **170**, 329 (1997).
- 12) J. S. Hwang, S. Seong, S. Tanaka, S. Iwai, Y. Aoyagi and P. J. Chong, *Bull. Kor. Chem. Soc.* **18**, 1133 (1997).
- 13) J. S. Hwang, S. Y. Seong, S. Tanaka, S. Iwai and Y. Aoyagi, *J. Crystal Growth*, in press (1999).
- 14) M. Hata, T. Kunisato, T. Kano, Y. Matsushita, J. S. Ito, Y. Ueda, K. Yagi, and A. Ibaraki, *The Japan Society of Applied Physics and Related Societies, The 44th Fall Meeting, Abstracts*, **302** (1996).
- 15) T. W. Weeks, Jr., M. D. Bremser, K. S. Ailey, E. Carlson, W. G. Perry and R. F. Davis, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 401 (1995).