

Selective growth of GaN nanorods on the top of GaN stripes

Yeonsu Yu, Junhyeong Lee, Hyungsoo Ahn, Kisam Shin*, Yincheng He* and Min Yang[†]

Department of Applied Sciences, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

*School of Nano and Advanced Materials Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

(Received June 27, 2014)

(Revised July 18, 2014)

(Accepted July 21, 2014)

Abstract GaN nanorods were grown on the apex of GaN stripes by three dimensional selective growth method. SiO₂ mask was partially removed only on the apex area of the GaN stripes by an optimized photolithography for the selective growth. Metallic Au was deposited only on the apex of the GaN stripes and a selective growth of GaN nanorods was followed by a metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE). We confirmed that the shape and size of the GaN nanorods depend on growth temperature and flow rates of group III precursor. GaN nanorods were grown having a taper shape which have sharp tip and triangle-shaped cross section. From the TEM result, we confirmed that threading dislocations were rarely observed in GaN nanorods because of the very small contact area for the selective growth. Stacking faults which might be originated from a difference of the crystal facet directions between the GaN stripe and the GaN nanorods were observed in the center area of the GaN nanorods.

Key words GaN, GaN nanorod, GaN stripe, MOVPE, Nanostructure

GaN stripe 꼭지점 위의 GaN 나노로드의 선택적 성장

유연수, 이준형, 안형수, 신기삼*, Yincheng He*, 양민[†]

한국해양대학교 응용과학과, 부산, 606-791

*창원대학교 나노신소재공학과, 창원, 641-773

(2014년 6월 27일 접수)

(2014년 7월 18일 심사완료)

(2014년 7월 21일 게재확정)

요약 3차원적 선택적 결정 성장 방법에 의해 GaN stripe 구조의 꼭지점 부분에만 GaN 나노로드를 성장하였다. GaN stripe의 꼭지점 부분의 SiO₂ 마스크를 최적화된 포토리소그래피 공정을 이용하여 제거하고 이를 선택적 결정 성장을 위한 마스크로 사용하였다. SiO₂가 제거된 꼭지점 부근에만 Au 금속을 증착하고, metal organic vapor phase epitaxy(MOVPE) 방법에 의해 GaN stripe의 꼭지점 부분에만 GaN 나노로드의 선택적 성장을 실시하였다. GaN 나노로드의 형상과 크기는 결정 성장 온도와 III족 원료의 공급량에 의해 변화가 있음을 확인하였다. Stripe 꼭지점에 성장된 GaN 나노로드는 단면이 삼각형 형태를 가지고 있으며 끝으로 갈수록 점점 폭이 좁아지는 테이퍼 형상을 가지며 성장되었다. TEM 관측 결과, 매우 좁은 영역에서만 선택적 결정 성장이 이루어졌기 때문에 GaN 나노로드에서 관통전위(threading dislocations)는 거의 관찰되지 않음을 확인하였다. 선택성장이 시작되는 부분의 결정면과 GaN 나노로드의 성장방향의 결정면 방향의 차이에 기인하는 적층 결함(stacking faults)들이 GaN 나노로드의 중심영역에서 생성되는 것을 관찰할 수 있었다.

1. 서론

GaN는 뛰어난 발광 특성과 우수한 열 전도도 그리고 화학반응과 방사선 노출에 견고하기 때문에 광소자, 고

속, 고온 및 고출력을 필요로 하는 전자소자에 이르기 까지 다양하게 응용할 수 있어서 GaN를 기반으로 하는 III-V족 질화물 반도체에 관한 연구가 진행되고 있다[1-3]. 나노 및 마이크로 크기의 GaN의 1차원 구조물(나노 와이어, 나노로드)은 질화물 반도체를 기반으로 하는 여러 가지 소자로 응용이 가능해 많은 연구 결과들이 발표되고 있다[4-7]. 최근에는 불합치 전위(dislocation)와 변형(strain)이 없는 나노크기의 GaN 피라미드구조물

[†]Corresponding author

Tel: +82-51-410-4782

Fax: +82-51-404-3986

E-mail: myang@kmou.ac.kr

(pyramidal hillocks)[8]이나 주상구조물(columnar structure) [9, 10]이 얻어진다고 발표되고 있다. 나노로드를 성장할 때 대부분 chemical vapor transport(CVT), hydride vapor phase epitaxy(HVPE), molecular beam epitaxy(MBE) 그리고 metal organic vapor phase epitaxy(MOVPE) 결정 성장방법을 이용하여 GaN 기반의 나노구조를 형성하고 있다. 일반적으로 나노로드의 기술은 2차원 성장을 기반으로 촉매를 이용한 무작위 성장 이거나[11] 혹은 복잡한 건식 식각 공정을 통한 위치 제어를 해야 했다. 자발적으로 형성되는 나노구조들은 밀도나 위치를 제어하는 것이 용이하지 않고, 나노로드의 끝 부분에 촉매로써 작용된 금속이 남기 때문에 후속 공정을 위해서는 이 금속을 제거해야만 하는 공정이 다시 필요하다는 문제가 있다. 건식 식각 공정을 이용하여 나노구조를 형성하는 경우, 나노크기의 마스크패턴 제작 및 건식 식각 공정의 미세 제어 등을 포함하는 복잡한 공정과정이 필요하다는 문제점들이 있다. 따라서 비교적 간단한 공정을 이용하는 한편, 나노구조의 위치 제어를 효율적으로 할 수 있는 결정 성장 기술의 개발이 필요할 것으로 생각한다. 한편, GaN 나노구조를 초소형 광 공진기나 그 밖의 광소자 그리고 집적형 네트워크 시스템 등에 이용하기 위해서는 평면에서의 위치뿐만 아니라 높이 까지도 제어가 가능하며 GaN 나노로드의 성장 방향의 제어가 가능한 3차원적인 성장 기반의 GaN 나노로드 구조의 성장이 매우 중요하다. 본 저자들은 GaN 피라미드 구조의 꼭지점 위에 습식 에칭 공정만을 이용하여 3차원적인 위치 제어가 가능한 GaN 나노로드 결정구조를 선택적으로 결정 성장할 수 있음을 발표한 바 있다 [12]. 본 연구에서는 삼각형 단면을 가지는 GaN stripe 구조의 꼭지점 영역을 이용하여 성장온도 및 원료공급비율 등의 결정 성장 조건들의 변화가 GaN 나노로드의 형상에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서 확인하고, 선택적 결정 성장이 이루어지는 경계 영역에서의 결정 결합 분포에 대해서 알아보았다. 3차원적으로 위치 제어가 가능한 선택적 결정 성장을 위하여 GaN stripe 구조를 우선 형성하고, 그 위에 선택적 성장을 위한 SiO₂ 마스크를 증착하였다. 최적화된 포토리소그라피 공정을 통해 GaN stripe 구조의 꼭지점 부분만 SiO₂막을 제거한 후, Au를 증착하여 이 영역에서만 GaN 나노로드 결정구조들이 선택적으로 성장될 수 있도록 하였다. 결정성장은 metal organic vapor phase epitaxy(MOVPE) 결정 성장방법을 이용하여 상압에서 실시하였으며, TMG(trimethylgallium)와 암모니아를 III족 원료와 V족 원료로서 각각 이용하였다. 결정 성장 조건에 따른 GaN 나노로드의 미세구조들의 형상 변화는 field emission scanning electron microscope(FE-SEM)을 이용해 관찰하였다. GaN 나노로드들이 형성되기 시작하는 영역의 구조적 특성과 결정

결합들을 확인하기 위하여 X-선 회절 및 transmission electron microscope(TEM) 분석을 실시하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 undoped GaN 기판 위에 RF sputter를 이용하여 SiO₂ 막을 증착한 후에 포토리소그라피 공정을 통하여 폭 3 μm, 주기 10 μm의 stripe 패턴을 (1100) 방향에 평행하도록 형성하였다. 패턴이 형성된 기판 위에 MOVPE 결정성장 방법을 이용하여 단면이 삼각형인 GaN stripe 구조를 형성하였다. GaN stripe 구조 형성이 완료된 후에 다시 SiO₂ 막을 전체 표면에 증착하였으며, 꼭지점 부분의 SiO₂ 막을 제거하기 위하여 포토리소그라피 공정을 다음과 같이 실시하였다. 우선, 감광액(photoresist: AZ5214)을 3000 rpm으로 시료 전면에 도포하고 90°C에서 10분간 hot plate 위에서 baking하였다. 그 후, 마스크가 없는 상태에서 노광을 실시(235 watt, 7초)한 뒤, 현상액(MIF 500) 속에서 3초 동안 반응시켜 꼭지점 부분만 감광 물질을 제거하였다. 마지막으로 꼭지점 부분에 노출된 SiO₂ 막을 buffered oxide etchant(BOE)를 이용하여 제거하였다. 위의 공정이 모두 완료된 후 시료 위에 E-beam evaporator를 이용하여 Au를 5 nm 증착하고, lift-off 공정을 이용하여 GaN stripe 꼭지점 위에만 Au 금속이 남도록 하였다. GaN stripe 구조의 꼭지점 부근에만 금속 증착이 완료된 시료를 다시 MOVPE 반응관에 장착하여 GaN stripe 구조의 꼭지점 부분에 GaN 나노로드 구조를 선택적으로 성장하였다. 분위기 가스로는 N₂를 사용하였으며, 암모니아의 유량과 성장 시간은 6.70×10^{-2} mol/min과 20분으로 각각 일정하게 유지하면서 TMG의 양은 22.92~65.50 μmol/min, 성장 온도는 820~880°C의 범위에서 변화를 주며 GaN 나노로드 구조를 성장하였다.

3. 결과 및 고찰

TMGa 공급량의 변화에 대한 GaN 나노로드 구조들의 모습을 Fig. 1에 나타내었다. 성장 온도는 820°C, 성장 시간은 모두 20분으로 일정하게 하였다. TMGa 공급량은 각각 22.92, 32.75 그리고 65.50 μmol/min으로 변화를 주면서 GaN 나노로드를 형성하였다. 세 가지 경우의 공통적인 특징을 살펴보면, 우선적으로 GaN stripe의 꼭대기 영역을 따라서 1차원적으로 불규칙한 선형결정이 형성되면서 동시에 특정 방향으로 삼각형 형태의 단면을 가지는 GaN 나노로드들이 형성되고 있으며, GaN 나노로드 길이 방향의 끝부분으로 갈수록 굽기가 가늘어지는

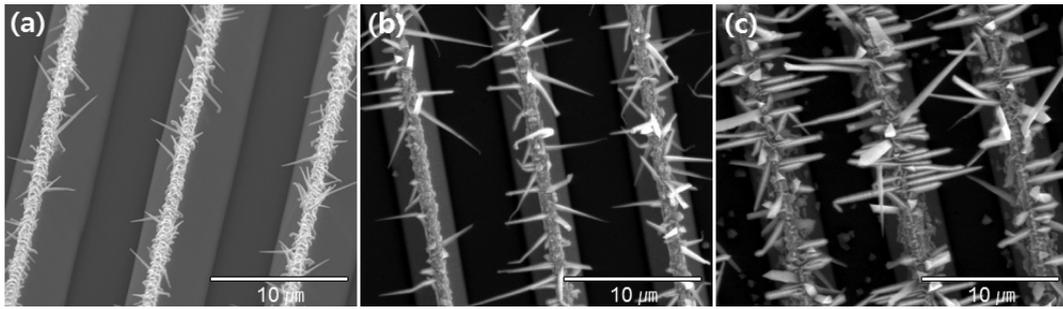


Fig. 1. SEM images of the GaN nanostructures depending on the flow rates of TMGa source (a) 22.92 $\mu\text{mol}/\text{min}$ (b) 32.75 $\mu\text{mol}/\text{min}$ (c) 65.50 $\mu\text{mol}/\text{min}$.

경향을 보이고 있다. TMGa의 공급량이 22.92 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 인 경우(Fig. 1(a)) 길이 1~2.5 μm , 굵기 100 nm 이하의 GaN 나노로드들이 주로 (10 $\bar{1}0$) 및 (01 $\bar{1}0$) 방향으로 성장되는 것을 확인할 수 있었다. TMGa 공급량이 32.75 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 로 증가한 경우 GaN 나노로드의 길이와 굵기는 각각 4~5 μm , 250 nm로 증가 하였다. 그리고 65.50 $\mu\text{mol}/\text{min}$ (Fig. 1(c))의 경우에는 길이와 굵기가 각각 5~8 μm , 300 nm로 증가하였으며, (10 $\bar{1}0$) 및 (01 $\bar{1}0$)방향에 비해서 (11 $\bar{2}0$)방향으로 성장되는 GaN 나노로드의 수가 상대적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

TMGa 양을 22.92 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 로 고정시키고 성장 온도를 850°C와 880°C까지 높인 경우의 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 850°C에서 성장한 GaN 나노로드들(Fig. 2(a))은 평균 길이와 굵기가 각각 2~3 μm , 150 nm로서 820°C에서 성장한 경우(Fig. 1(a))에 비하여 GaN 나노로드의 길이와 굵기가 약간 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, GaN 나노로드의 방향도 거의 대부분 (11 $\bar{2}0$) 방향으로 형성되고 있음을 알 수 있었다. GaN 결정 성장의 경우, 성장 온도에 따라서 결정면 방향들의 표면에너지 차이에 의해서 각 결정면 들의 성장 속도에 차이가 생기고 이에 따라서 성장된 GaN 결정 구조들의 형상에 변화가 생기는 것이 일반적이다. 성장온도를 820°C에서 850°C로 증가한 경우, 성장온도가 높아짐에 따라 (10 $\bar{1}0$) 및 (01 $\bar{1}0$)

결정면보다는 (11 $\bar{2}0$) 결정면 방향의 표면에너지가 점차 낮아져서 (11 $\bar{2}0$) 방향으로의 GaN 나노로드 성장이 우세해지는 것으로 판단된다. 한편, 880°C까지 성장 온도를 높인 경우(Fig. 2(b))에는 나노로드의 형상은 보이지 않고, 육각 판상 형태를 포함하는 불규칙한 GaN 입자들만 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로, Au와 같은 금속 촉매를 사용하여 저온 및 2차원적 평면 성장을 실시하는 경우 vapor-liquid-solid(VLS) 성장 기구에 의해 GaN 나노로드는 불규칙한 방향성, 일정한 굵기 그리고 끝 부분의 금속 뭉침 현상들을 보여주는 것으로 알려져 있다[13-16]. 본 실험에서는 금속 촉매로서 Au를 사용하였지만 GaN 나노로드의 방향성을 제어하기 위한 목적으로 820°C 이상으로 성장온도를 높이고, 또한 매우 좁은 영역에서의 선택적 결정 성장을 실시하였기 때문에 VLS 성장 기구가 아닌 다른 성장 기구에 의해서 방향성이 뛰어나고 끝이 뾰족한 GaN 나노로드들이 형성된 것으로 판단한다. 끝이 뾰족하고 방향성이 우수한 GaN 나노로드들의 형성의 가능한 성장 기구에 대해 알아보기 위하여 820°C에서 성장된 GaN 나노로드(TMGa: 22.92 $\mu\text{mol}/\text{min}$)에 대하여 X-ray 회절 분석을 실시하였다. X-ray 회절 스캔방법은 θ -2 θ , 가속전압은 30 kV, 그리고 X선의 파장은 Cu의 $K\alpha_1$ 에 대응하는 1.5405 Å이었으며, X-ray 회절 결과를 Fig. 3에 보였다.

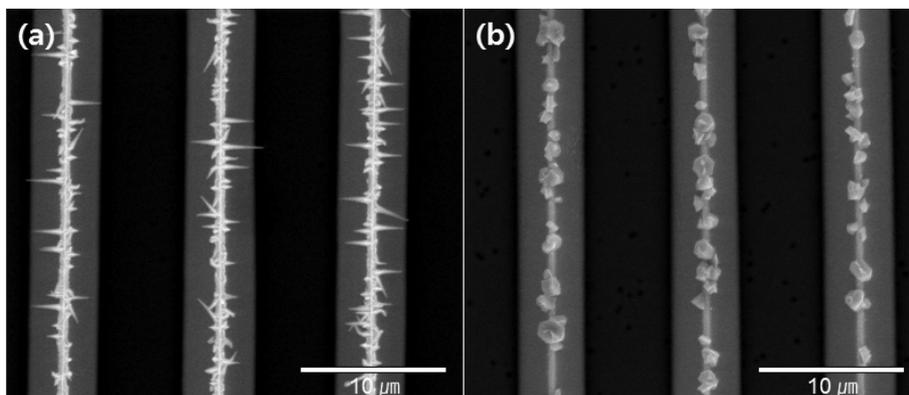


Fig. 2. SEM images of the GaN nanostructures depending on the growth temperature (a) 850°C (b) 880°C.

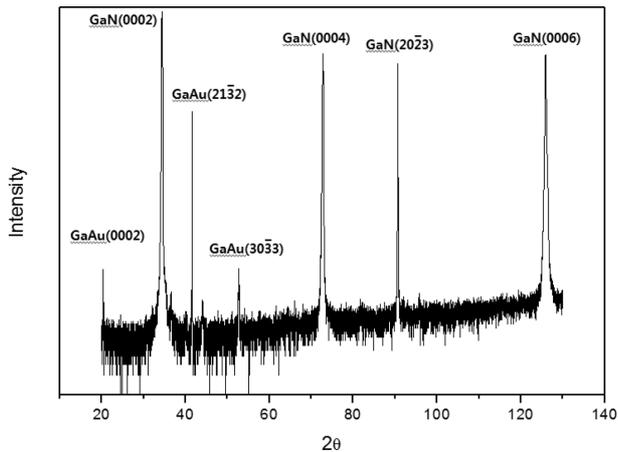


Fig. 3. Result of x-ray diffraction of the selectively grown GaN rods on the apex of GaN stripe.

(0002)와 (2023) GaN 결정면들에 의한 피크와 함께 Ga와 Au의 화합물 형태인 Ga_2Au_7 (0002), Ga_2Au_7 (2132) 그리고 Ga_2Au_7 (3033)면에서의 피크들이 관찰되었다. 어떤 성장 기구에 의해서 이들 GaAu 화합물이 GaN 나노로드의 형성에 영향을 주는가에 대해서는 향후 더욱 다양하고 정밀한 분석을 실시할 예정이지만, 현재로서는 이들 GaAu 화합물이 VLS와는 다른 메커니즘을 통해 GaN 나노로드가 형성될 수 있도록 결정 성장 초기의 핵생성 단계에 영향을 주었을 것으로 추측된다.

Fig. 4에는 GaN stripe 구조 꼭지점 위의 GaN 나노로드의 TEM 이미지와 나노로드의 영역별 SADP(selected area diffraction patterns) 결과를 나타내었다. SADP에 의해 관찰된 GaN 나노로드는 단결정으로 잘 성장되었으며, (1120) 방향으로 조밀육방구조(HCP)를 가지고 성장됨을 확인할 수 있었다. GaN 나노로드의 중심 영역 근방(Fig. 4(a)의 1, 2 영역)에서는 c축 방향으로의 압축 변형(compressive strain)이 발생함을 확인하였다. 이러한

변형(strain)의 원인으로는 선택적 결정 성장이 시작되는 결정면은 GaN stripe의 (1122) 결정면인 반면에 나노로드의 성장은 (0002) 결정면과 (1120) 결정면을 포함하는 구조로 형성되고 있기 때문에 이들 각 결정면들의 원자 배열의 차이에 의해서 발생하는 것으로 판단한다. 한편, 선택적 결정 성장을 위한 GaN stripe과 GaN 나노로드의 경계 지점으로부터 멀어질수록 GaN 나노로드의 변형(strain)은 점차적으로 완화되며 GaN 나노로드 중심에서 약 1500 nm 떨어진 영역(Fig. 4(a)의 4 영역)에서는 완전히 완화되는 경향을 보이고 있다.

Fig. 5에는 GaN stripe의 꼭지점 위에 성장시킨 GaN 나노로드의 단면 TEM 사진을 보였다. Fig. 5의 A 영역은 undoped GaN 기판과 GaN stripe이 성장된 계면부분이다. GaN stripe 영역에 기판으로부터 전이된 관통전위(threading dislocation) 이외에도 stacking faults(SF)들이 많이 발생하였음을 알 수 있는데, 이는 GaN stripe의 성장을 위한 MOVPE 성장 조건들이 최적화 되지 않았기 때문인 것으로 추측된다. 한편, GaN stripe 꼭지점에 선택적 결정 성장에 의해 형성된 GaN 나노로드 영역에는 관통전위(threading dislocation)들을 관찰할 수 없었는데, 이는 매우 좁은 GaN stripe의 꼭지점 영역에서만 선택적 결정 성장이 가능하도록 SiO_2 마스크를 제작하여 관통전위가 GaN 나노로드까지 진행하는 것을 효과적으로 막을 수 있었기 때문인 것으로 판단한다. 한편, 관통전위(threading dislocations)는 관찰되지 않았지만 뒤에서 설명하게 되는 바와 같이, GaN 나노로드 중심 영역에 많은 적층 결함(stacking fault)들이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. GaN 나노로드 중심 영역(Fig. 5(b)의 B 영역)에서의 적층 결정 결함 분포를 좀 더 확실하게 확인하기 위하여 역푸리에변환(inverse fast Fourier transform(IFFT)) 분석을 실시하였다.

Fig. 6의 (a)와 (b)는 각각 (0002) 면과 (1120) 면에

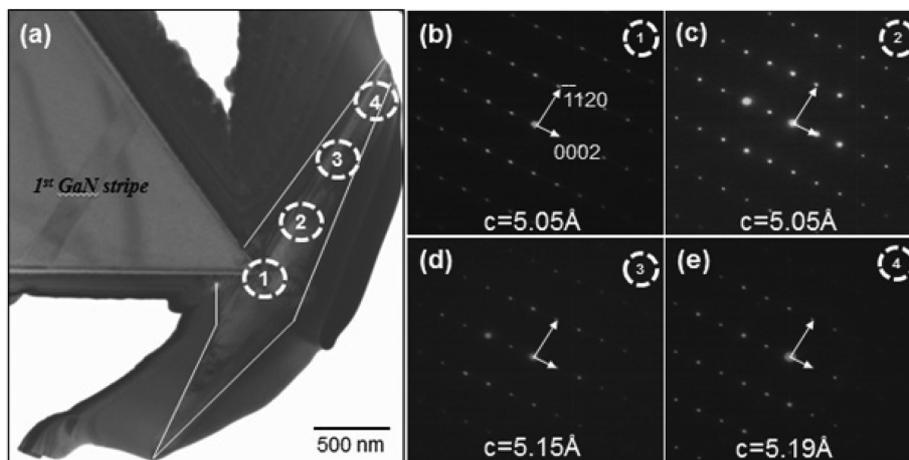


Fig. 4. TEM image of GaN nanorod (a) and selected area diffraction patterns (SADP) (b, c, d, e) at different positions in the GaN nanorod.

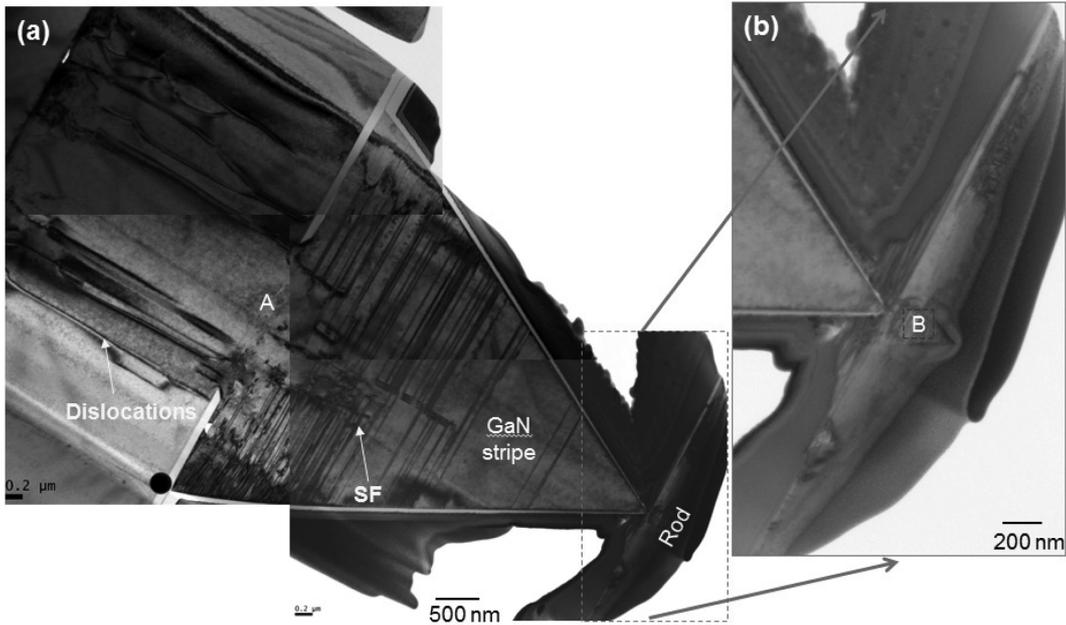


Fig. 5. TEM image of the selectively grown GaN nanorod on the apex of GaN stripe (a) overall structure including substrate (b) enlarged image around the apex of the GaN stripe.

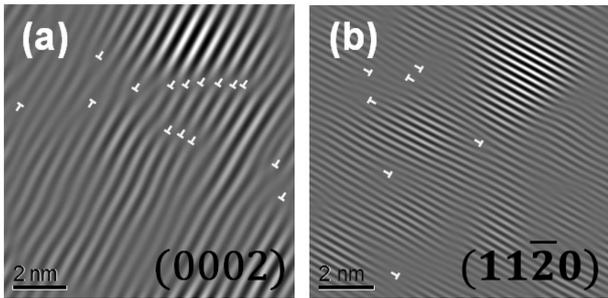


Fig. 6. IFFT images of the GaN rod (a) (0002) plane, (b) (1120) plane.

대한 역푸리에 변환 결과이다. GaN 나노로드의 중심영역은 GaN stripe 구조로부터 직접적인 영향을 받으며, 선택적 결정 성장이 시작되는 영역 부근이기 때문에 비교적 높은 밀도의 적층결함을 보이고 있다. 그림에 적층결함 부분들은 “T” 모양으로 표시를 하였는데, GaN stripe으로부터 직접적인 영향을 받는 c축 성장 면인 (0002) 면에 비해서 측면 성장이 이루어지는 (1120) 면의 적층결함(SF) 밀도가 비교적 낮음을 확인할 수 있었다. 적층결함(SF) 발생 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나, 본 연구에서 제안한 방법에 의하면 앞에서도 언급한 바와 같이, 선택적 결정 성장이 시작되는 결정면 방향과 GaN 나노로드가 성장되는 결정 방향에 차이가 있는데 이러한 점도 적층결함의 발생에 중요한 원인이 될 수 있을 것으로 판단한다. GaN 나노로드는 GaN stripe의 (1122) 면에서 초기 성장이 이루어졌음에도 불구하고, GaN 나노로드는 (1122) 방향이 아닌 (1120) 방향으로

성장되었다. (1122) 면에는 Ga과 N의 두 원자가 동시에 결정단면을 구성하며 반극성 면을 가지는 반면에, (1120) 면은 무극성 면으로 Ga과 N의 표면 원자들이 지그재그로 형태로 배열 되어있다. 따라서 두 결정면들의 원자배열 및 결정면 표면의 퍼텐셜 에너지 장벽의 차이 등에 의해 적층결함(stacking fault)들이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

GaN stripe의 꼭지점 영역이라는 특정 위치에 GaN 나노로드 구조를 형성할 수 있음을 확인하였으며, 방향과 크기의 제어는 III족 원료의 공급량과 성장온도의 조절에 의해서 가능함을 확인하였다. III족 원료의 공급량에 비례하여 GaN 나노로드의 크기가 커지는 경향을 보이며, 성장온도가 820°C에서 850°C로 증가한 경우, (1120) 방향으로의 GaN 나노로드 성장이 우세해지는 결과를 보였다. Au를 촉매로 사용하였으나 결정 성장 온도 및 선택적 성장 영역의 극히 좁은 면적 등을 포함하는 특정 성장 조건에서는 VLS 성장기구가 아닌 새로운 성장기구에 의해 GaN 나노로드의 형성이 가능함을 확인하였다. GaN 나노로드 중심영역에서는, 선택적 성장이 시작되는 GaN stripe 경사면의 결정면과 GaN 나노로드의 성장방향의 차이로 인한 스트레인이 존재하지만 GaN 나노로드의 성장이 (1120) 방향으로 진행함에 따라서 스트레인은 점차 완화되며, 중심에서 약 1500 nm 거

리에서 완전히 제거됨을 확인하였다. 또한, GaN stripe의 경사면의 결정면 방향과 GaN 나노로드의 성장방향의 차이가 GaN 나노로드 중심 영역의 적층결합들의 발생원인이 될 수 있음을 제시하였다. GaN 나노로드 전체 영역에 대한 결정 결합 분포와 발생원인 그리고 Au가 GaN 나노로드 형성 기구에 미치는 영향에 대해서는 보다 세밀한 분석을 진행중이며 추후 그 결과들에 대해 발표할 예정이다. 최적화된 결정 성장을 통하여 결합밀도를 대폭 감소할 수 있도록 결정 성장 기술을 보다 최적화 한다면, 본 연구에서 제안하는 3차원 위치제어가 가능한 GaN 나노로드 성장 방법은 그의 응용분야가 상당히 넓을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2013R1A1A4A01005797).

References

- [1] K.P. O'Donnell, R.W. Martin and P.G. Middleton, "Origin of luminescence from InGaN diodes", *Phys. Rev. Lett.* 82 (1999) 237.
- [2] J.I. Pankove and T.D. Moustakes, "Gallium Nitride II: Semiconductor and semimetals", Academic Press, New York (1999) 57.
- [3] Y. Xia, P. Yang, Y. Sun, Y. Wu, B. Mayers, B. Gates, Y. Yin, F. Kim and H. Yan, "One-dimensional nanostructures: Synthesis, characterization, and applications", *Adv. Mater.* 15 (2003) 353.
- [4] S. Kobayashi, S. Nonomura, T. Ohmori, K. Abe, S. Hirata, T. Uno, T. Gotoh and S. Nitta, "Optical and electrical properties of amorphous and microcrystalline GaN films and their application to transparent TFT", *Appl. Surf. Sci.* 113/114 (1997) 480.
- [5] O. Ambacher, J. Smart, J.R. Shealy, N.G. Weimann, K. Chu, M. Murphy 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.* 85 (1999) 3222.
- [6] F.A. Ponce and D.P. Bour, "Nitride-based semiconductors for blue and green light-emitting devices", *Nature* 386 (1997) 351.
- [7] H. MorKoc and S.N. Mohammand, "High-luminosity blue and blue-green gallium nitride light-emitting diodes", *Science* 267 (1995) 51.
- [8] L.T. Romano and T.H. Myers, "The influence of inversion domains on surface morphology in GaN grown by molecular beam epitaxy", *Appl. Phys. Lett.* 71 (1997) 3486.
- [9] M. Yoshizawa, A. Kikuchi, N. Fujita, K. Kushi, H. Sasamoto and K. Kishino, "Self-organization of GaN/Al_{0.18}Ga_{0.82}N multi-layer nano-columns on (0001) Al₂O₃ by RF molecular beam epitaxy for fabricating GaN quantum disks", *J. Cryst. Growth* 189/190 (1998) 138.
- [10] I.M. Tiginyanu, V.V. Ursaki, V.V. Zalamai, S. Langa, S. Hubbard, D. Pavlidis and H. Foll, "Luminescence of GaN nanocolumns obtained by photon-assisted anodic etching", *Appl. Phys. Lett.* 83 (2003) 1551.
- [11] Yang, Peidong and Charles M. Lieber, "Nanorod-superconductor composites: A pathway to materials with high critical current densities", *Science* 273 (1996) 1836.
- [12] W.I. Yun, D.W. Jo, J.E. Ok, H.S. Jeon, G.S. Lee, S.K. Jung, S.M. Bae, H.S. Ahn and M. Yang, "Formation of GaN microstructures using metal catalysts on the vertex of GaN pyramids", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 21(3) (2011) 110.
- [13] G. Lee, Y.S. Woo, J.E. Yang, D. Lee, C.J. Kim and M.H. Jo, "Directionally integrated VLS nanowire growth in a local temperature gradient", *Angewandte Chemie International Edition* 48.40 (2009) 7366.
- [14] R.S. Wagner and W.C. Ellis, "Vapor-liquid-solid mechanism of single crystal growth", *Applied Physics Letters* 4(5) (1964) 89.
- [15] Y. Wu, Y. Cui, L. Huynh, C.J. Barrelet, D.C. Bell and C.M. Lieber, "Controlled growth and structures of molecular-scale silicon nanowires", *Nano Lett.* 4.3 (2004) 433.
- [16] S. Kodambaka, J. Tersoff, M.C. Reuter and F.M. Ross, "Diameter-independent kinetics in the vapor-liquid-solid growth of Si nanowires", *Physical Review Letters* 96.9 (2006) 096105.