

Selective area growth of micro-sized AlGaIn array structures on GaN stripes

Seunghyun Lee, Hyungsoo Ahn and Min Yang[†]

Department of Electronic Materials Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received September 14, 2015)

(Revised October 6, 2015)

(Accepted October 12, 2015)

Abstract The growth and characterization of micro sized AlGaIn array structures selectively grown by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) on GaN stripes are reported. The shape of the AlGaIn array structures depends on the size of exposed area for selective growth. The AlGaIn array structures grown selectively on relatively large exposed area have regular shapes resembling those of the GaN stripes on the substrate, while samples selectively grown on relatively small exposed area have irregular shapes. The phonon frequency of the AlGaIn array structures increases with increasing Al composition in the AlGaIn structure. However, at relatively high Al composition ($x=0.28$ in this research), the phonon frequency decreases slightly from the expected value not only because of large tensile strain associated with large differences between the lattice constants of the AlGaIn structure and underlying GaN stripes but also changes of crystal facet direction during the selective growth.

Key words GaN, AlGaIn, GaN stripe, Selective growth, AlGaIn structure, MOCVD, Strain, Raman spectroscopy

GaN 스트라이프 꼭대기 위의 AlGaIn 어레이 미세구조의 선택적 결정 성장

이승현, 안형수, 양민[†]

한국해양대학교 전자소재공학과, 부산, 49112

(2015년 9월 14일 접수)

(2015년 10월 6일 심사완료)

(2015년 10월 12일 게재확정)

요약 GaN 스트라이프 구조의 정상 부분에 Metal Organic Chemical Vapor Deposition(MOCVD) 방법에 의해 선택적으로 결정 성장된 마이크로 크기의 AlGaIn 어레이 구조의 성장과 그 특성에 관해 연구하였다. AlGaIn 어레이 구조의 형태 변화가 선택 성장을 위한 노출 면적에 의존한다는 것을 확인하였다. 상대적으로 넓게 노출된 성장 영역 위에서 선택 성장된 AlGaIn 어레이 구조는 기판 위의 GaN 스트라이프와 유사한 규칙적인 모양을 가지는 반면 상대적으로 좁게 노출된 영역 위에서 선택 성장된 AlGaIn 어레이 구조는 불규칙한 모양을 가진다. 한편, Al 조성비가 증가함에 따라 AlGaIn 어레이 미세 구조에 대한 고유 포논 진동수도 높아짐을 확인할 수 있었다. 하지만 상대적으로 높은 Al 조성비에서는 고유 포논 진동수는 AlGaIn 구조와 그 아래의 GaN 스트라이프 사이의 큰 격자상수 차이와 선택적 결정 성장 과정 동안의 결정면 방향의 변화에 의해 강한 tensile strain으로 인해 다시 감소하는 경향을 보임을 확인하였다.

1. 서론

질화물 반도체인 AlGaIn과 AlN은 자외선 스펙트럼 영역에서의 유용한 응용분야 때문에 큰 주목을 받아왔다[1, 2]. 특히 light emitting diodes(LEDs)와 hetero-structure field-effect transistors(HFETs)의 발전을 포함하여 광학적, 전기적 소자 제작에 주목할 만한 성과가 있었다[3, 4].

그럼에도 불구하고 아직까지는 고기능 UV-LED, 트랜지스터 또는 다른 기능성 소자들의 성능 향상을 위해 고품질의 AlGaIn 결정 성장 기술 및 다양한 형태의 AlGaIn 구조 형성을 위한 결정 성장 기술의 개발이 절실히 필요한 상황이다. 최근의 AlGaIn 소자의 발전을 저해하는 데에는 두 가지 중요한 요소가 있다. 첫 번째는 고품질의 AlGaIn 박막을 성장하기가 쉽지 않다는 점이며, 두 번째는 기판과 에피택시 박막 사이의 큰 격자 상수 차이에 의해 필연적으로 strain이 존재한다는 것이다[5-7]. 이에 따라서 고품질의 AlGaIn 결정과 strain의 영향을 최소화하기 위해 선택적 결정 성장 방법과 무극성 또는 반극성

[†]Corresponding author

Tel: +82-51-410-4782

Fax: +82-51-404-3986

E-mail: myang@kmou.ac.kr

결정 성장에 관한 많은 연구가 진행되고 있다[8, 9]. 그러나 종래의 연구 결과에서 시도되었던 일반적인 2차원 결정 성장 방법에서는 기판과 그 위에 성장되는 AlGaIn 박막 사이에 넓은 접촉 면적이 존재하여 기판과 AlGaIn 박막 층간의 여러 가지 물리, 화학적 상수들의 큰 차이로 인해 strain이 완화된 고품질의 AlGaIn 구조를 얻기가 쉽지 않은 상황이다. 또한, 일부 영역에만 선택적 결정 성장을 실시하는 경우에도 2차원적인 결정 성장 방법에 의해서는 구현할 수 있는 구조적 형태의 다양성에 한계가 있기 때문에 최근에는 3차원 결정 성장 기술 개발을 위한 여러 가지 시도들이 이루어지고 있다[10, 11].

본 연구에서는 단면이 삼각형인 GaN 스트라이프 구조를 사파이어 기판 위에 형성한 후에 GaN 스트라이프 구조의 꼭지점 영역에서만 선택적 결정 성장을 실시함으로써 최소한의 접촉 면적을 가지는 AlGaIn 어레이 미세 결정 구조를 3차원적으로 형성하였다. 선택적 결정 성장을 위한 마스크 노출 영역의 크기에 변화를 주어 결정 성장 조건에 따른 AlGaIn 어레이 미세 구조의 형상 변화에 대해 논의하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 3차원적 AlGaIn 어레이 미세구조의 선택적 결정 성장 방법에서는 매우 좁은 노출 영역에서만 선택적 결정 성장이 이루어지기 때문에 격자상수 차이에 의한 strain을 완화하는 동시에 AlGaIn 미세구조로 전파되는 threading dislocation 밀도를 크게 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구에서 제안하는 3차원적 미세 영역 AlGaIn 어레이 선택적 결정 성장 기술은 휴대용 홀로그래프, 마이크로 디스플레이, 광학적 통신 배열 모듈과 같은 고기능 시스템의 제작을 위한 기반 결정 성장 기술로도 활용될 수 있을 것으로 기대한다[12, 13].

선택 성장된 AlGaIn 어레이 미세 구조의 결정 성장 조건에 따른 형상 변화 특성은 주사전자현미경(SEM)을 통해 확인하였으며, AlGaIn 어레이 구조의 Al 조성비의 변화에 따른 strain의 상관 관계는 XRD와 Raman 측정법을 이용해 평가하였다.

2. 실험

AlGaIn 어레이 구조의 성장에 앞서 undoped GaN(u-GaN)/사파이어 기판 위에 RF sputter를 이용하여 SiO₂를 100 nm 증착하고 포토리소그래피 공정과 BOE를 이용한 습식 식각 공정을 통해 <11 $\bar{2}$ 0> 방향과 평행하도록 3 μ m 폭의 스트라이프(20 μ m 간격)를 생성하였다. SiO₂ 스트라이프 패턴을 형성한 후 GaN 스트라이프의 단면이 뾰족한 정상 부분을 가지는 삼각형 모양이 되도록 1050°C에서 40분간 성장하였다. GaN 스트라이프를 성장하는 동안 trimethylgallium(TMGa)와 ammonia(NH₃)의

유량은 각각 65.50 μ mol/min, 4.46 $\times 10^{-2}$ mol/min이 되도록 공급하였다. GaN 스트라이프 성장이 완료된 후에, 시료 표면 전체에 다시 두 번째 SiO₂를 100 nm 두께로 증착하였다. 그 후 시료 표면 전체에 photo resist (PR)을 스핀 코팅 한 후, 포토리소그래피 공정을 이용하여 GaN 스트라이프와 수직인 방향으로 노출 영역의 폭이 3 μ m 그리고 주기는 20 μ m가 되도록 꼭대기 부분의 PR만 제거하였다. 이 때 PR의 자외선 노출 시간과 현상 시간을 조절하여 선택적 성장 영역의 면적의 변화를 주었다. 이후 꼭대기 부분의 SiO₂를 BOE를 이용한 습식 식각 공정으로 제거한 후 1100°C에서 AlGaIn를 60분간 성장하였다. AlGaIn 어레이 구조를 성장하는 동안 TMGa의 유량은 5 cc(6.37 μ mol/min), 그리고 NH₃의 공급량은 500 cc(2.23 $\times 10^{-2}$ mol/min)으로 유지하였다. Al 조성비가 서로 다른 AlGaIn 어레이 구조를 성장하기 위해 TMAI 유량은 10 cc(10.89 μ mol/min), 20 cc(20.57 μ mol/min) 그리고 40 cc(41.14 μ mol/min)으로 변화를 주었으며, 비교를 위하여 동일한 조건의 AlGaIn 박막을 u-GaN 기판 위에 동시에 성장하였다. AlGaIn을 성장하는 동안 반응로의 압력은 대기압이며 캐리어 가스로는 질소가스를 이용하였다.

3. 결과 및 토론

Fig. 1(a), (b)는 GaN 스트라이프 위에 선택적으로 성장된 AlGaIn 구조의 SEM 이미지이다.

Fig. 1(a)의 경우는 삼각형 단면을 가지는 GaN 스트라이프의 수직 높이를 H라고 하였을 때 H/5까지 SiO₂를 제거하여 선택성장 영역을 비교적 넓게 한 후 AlGaIn 어레이 구조를 성장 한 모습이며, (b)의 경우는 약 H/10

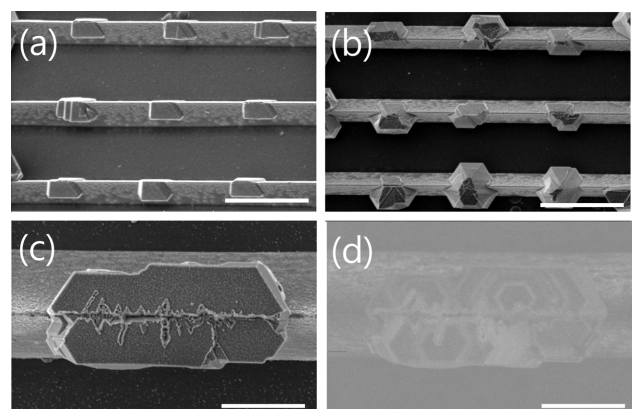


Fig. 1. SEM images of AlGaIn array structures on GaN stripes with (a) large window area (b) small window area (c) SEM image of AlGaIn array growth terminated at the (0002) facet and (d) panchromatic CL image of the image shown in (c). ((a), (b) Scale bars = 5 μ m; (c), (d) scale bars = 1 μ m).

정도까지 SiO₂를 제거하여 (a)에 비하여 선택 성장을 위한 노출 면적을 좁게 한 상태에서 AlGa_xN 어레이 구조를 성장한 모습이다. (a)의 경우는 AlGa_xN 어레이 구조 아래에 존재하는 GaN 스트라이프의 (11 $\bar{2}$ 2) 결정면을 따라서 경사면을 가지는 형태로 AlGa_xN 어레이가 성장되는 모습을 보이고 있다. 한편, (b)의 경우는 선택 성장을 위한 노출 영역의 결정면이 (11 $\bar{2}$ 2) 결정면임에도 불구하고 (1 $\bar{1}$ 01) 방향의 결정면으로 둘러싸인 피라미드 형태를 유지하며 (0002) 방향으로 성장되고 있음을 알 수 있다. 위의 두 결과로부터 선택적 결정 성장을 위한 노출면적이 어느 정도 이상 넓으면 (11 $\bar{2}$ 2) 결정면의 표면 에너지가 (0002) 결정면에 비해 크에도 불구하고 (11 $\bar{2}$ 2) 결정면을 유지하면서 결정 성장이 되는 반면, (b)의 경우와 같이 선택 성장을 위한 노출 면적이 좁은 경우에는 하부 구조의 결정면을 유지하기보다는 표면에너지가 낮은 결정면 방향으로 전환되어 선택적 결정 성장이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 선택적 결정 성장을 위한 노출 결정면을 종래 실시되던 (0002) 면이 아닌 반극성 (11 $\bar{2}$ 2) 면으로 하여 선택적 결정 성장을 하는 경우에는 원하는 형상의 AlGa_xN 어레이 구조를 얻기 위해 노출면적의 조절을 주의 깊게 할 필요가 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 1(c)에는 H/10보다 훨씬 작은 부분만 노출이 되도록 하고 AlGa_xN 어레이 구조를 선택적으로 성장한 경우의 모습을 보였다. {11 $\bar{2}$ 0} 결정면들이 포함된 육각기둥 형태로 넓은 (0002) 결정면을 가지고 성장되고 있음을 알 수 있다. 선택적 성장을 위해 노출한 면적이 매우 좁기 때문에 어느 정도의 면적이 (b)와 (c) 형태를 형성하는 정확한 기준이 되는 가는 현재로서는 판단하기 어렵지만 (c)의 결과는 극단적으로 좁은 노출 면적과 더불어서 캐리어 가스로 수소 대신 질소 가스를 사용하여 측면 성장률을 증가 시킨 효과[14]가 함께 나타난 영향이라고 추측한다. 한편, Fig. 1(d)는 Fig. 1(c)에 대응하는 AlGa_xN 어레이 구조의 panchromatic CL 이미지를 보이고 있다. CL 이미지로부터 SEM 이미지에서 보는 바와 같이 처음부터 하나의 육각기둥 형태로 성장이 된 것이 아니라 여러 개의 작은 육각 판상 형태들이 서로 다른 위치에서 성장되어 가면서 병합되는 형태를 가짐을 알 수 있다. 특히, 중심부분 즉, GaN 스트라이프의 꼭대기 부분을 경계로 하여 두 영역으로 크게 분리되어 있음을 알 수 있다. 따라서 선택적 결정 성장은 GaN 스트라이프의 정상부분을 기준으로 양쪽에 있는 각각의 (11 $\bar{2}$ 2) 경사면에서 wurtzite AlGa_xN 결정의 가장 안정적인 결정면 방향인 (0002) 면 방향으로 육각 판상 형태로 성장하다가 점차 여러 개의 판상 형태들이 성장되면서 병합되는 것으로 판단된다.

지금까지의 결과들로부터 노출 영역 면적의 크기와 캐리어 가스의 종류 등이 결정 성장 방향의 우세성을 결정

하는 중요한 요인으로서 3차원적 AlGa_xN 어레이 구조의 형태 변화에 큰 영향을 줄 수 있는 것으로 판단한다.

Al 조성비 변화가 AlGa_xN 어레이 구조의 strain에 미치는 영향을 알아보기 위하여 XRD 및 Raman 분석을 실시하였다. AlGa_xN 박막의 조성비는 XRD에 의해 TMAI의 유량의 함수로서 알 수 있다. Hexagonal AlGa_xN 시스템에서 격자 상수들간의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{c - c_0}{c_0} = -2 \frac{c_{13}}{c_{33}} \frac{a - a_0}{a_0} \quad (1)$$

이 때, c_{13} 과 c_{33} 는 탄성 계수이다[15, 16].

GaN와 AlN 조성비에 따른 격자 상수의 변화를 선형적인 값으로 추론하면 AlGa_xN의 Al 조성비를 결정할 수 있다. 부정형 성장을 가정하면 두 축의 격자 상수는 다음과 같다[17].

$$\text{격자 상수:} \\ a_0(x) = (3.189 - 0.077x)10^{-10} \text{ m} \quad (2)$$

$$c_0(x) = (5.185 - 0.203x)10^{-10} \text{ m} \quad (3)$$

$$\text{탄성 계수:} \\ C_{13}(x) = (103 + 5x) \text{ GPa} \quad (4)$$

$$C_{33}(x) = (405 - 32x) \text{ GPa} \quad (5)$$

앞서 언급한대로 TMAI의 유량은 각각 10, 20, 40 cc (10.89 $\mu\text{mol}/\text{min}$, 20.57 $\mu\text{mol}/\text{min}$, 41.14 $\mu\text{mol}/\text{min}$)으로 변화를 주었다. u-GaN template 위에 성장된 AlGa_xN 박막을 TMAI 유량에 따라 각각 A(10 cc)와 B(20 cc), C(40 cc)로 하였고, GaN 스트라이프 꼭대기 위에 성장된 AlGa_xN 구조는 유량에 따라 D(10 cc)와 E(20 cc), F(40 cc)로 표기하였다. (A, D), (B, E), (C, F)의 Al 조성비는 각각 $x = 0.13$, $x = 0.16$, $x = 0.28$ 로 이는 Table 1에 표시하였다.

Al 조성비 변화에 따른 AlGa_xN 박막과 AlGa_xN 구조의 strain을 평가하기 위해 Raman 분석을 시행하였다. Raman 분석을 위한 AlGa_xN 어레이 구조는 Fig. 1(c)에서 보인 GaN 스트라이프 위에서 육각 판상형태의 (0002)면이 노출된 형상으로 성장이 완료된 시료를 선택하였다. 이 시

Table 1
Al compositions of each samples: (A, B and C correspond to the AlGa_xN thin films grown on undoped GaN templates, and D, E and F correspond to AlGa_xN array structures grown on GaN stripes

	Al compositions in Al _x Ga _{1-x} N
Sample A, D	0.13
Sample B, E	0.16
Sample C, F	0.28

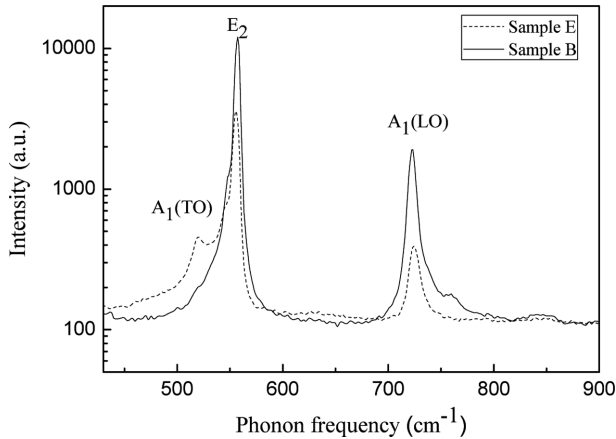


Fig. 2. Raman spectra of Sample B and E (Al composition $x = 0.16$). Sample B is the AlGaIn thin film grown on an undoped GaN template and Sample E is the AlGaIn array structure grown on GaN stripes.

료의 Raman 측정 결과를 (0002) 면 u-GaN 기판 위에 2차원적으로 성장한 AlGaIn 박막과 비교하였다. Raman 측정에는 상온에서 Ar 레이저를 사용하였다. 모든 샘플들의 Raman 스펙트럼은 E_2 피크의 약간의 이동을 제외하면 비슷한 경향을 보였기 때문에 대표적으로 샘플 B와 E의 Raman 스펙트럼만을 Fig. 2에 나타내었다.

u-GaN 기판 위에서 2차원 박막 성장된 샘플 B의 스펙트럼에서는 선명한 E_2 와 $A_1(LO)$ 피크만 나타나는 반면 GaN 스트라이프 위에서 3차원 성장된 샘플 E는 낮은 포논 진동수에서 $A_1(TO)$ 로 표시된 추가적인 피크를 보인다. 일반적으로 A_1 피크는 (0002) 결정방향에서는 나타나지 않지만 AlGaIn 어레이 구조(샘플 E)에서 A_1 피크가 관측되는 것은 AlGaIn 어레이 구조가 $\{11\bar{2}2\}$ 의 기울어진 GaN 스트라이프 위에서 선택적으로 성장이 시작되기 때문에 AlGaIn 어레이 구조에 (0002) 방향으로부터 벗어난 결정면을 포함하고 있다는 점과 CL 관찰 결과에서도 지적하였듯이 미세 결정립들의 병합과정에서 새로운 strain이 AlGaIn 어레이 구조에 발생한 것으로 판단할 수 있다. AlGaIn 박막과 AlGaIn 어레이 구조의 strain 분포 비교를 위해 stress에 의존적인 E_2 피크를 분석하였다. E_2 피크는 일반적으로 낮은 쪽으로 이동하는 경우에는 tensile stress를 받고 높은 쪽으로 이동하는 경우는 compressive stress를 받는 것으로 알려져 있다[18]. 동일한 Al 조성비에서 샘플 E의 E_2 피크가 샘플 B보다 낮은 쪽으로 이동한 것으로 보아 tensile stress를 더 받는 것으로 보여진다.

한편, 모든 샘플의 E_2 피크 위치는 Fig. 3에 Al 조성비의 함수로 표시되었으며 비교를 위해 Demangeot et al. [19]의 결과 또한 같은 그래프에 표시하였다. Demangeot et al.의 결과에 따르면 Al 조성비가 증가함에 따라 E_2 피크 진동수 역시 증가하였다. 본 연구에서도 비슷한 경

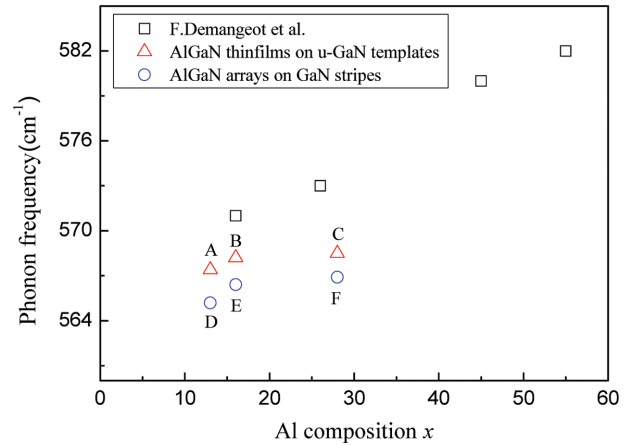


Fig. 3. E_2 peak positions of phonon frequency as a function of Al composition: Squares report data from F. Demangeot et al.'s, triangles report data for AlGaIn thin films grown on undoped GaN templates (A ($x = 0.13$), B ($x = 0.16$), C ($x = 0.28$)), and circles report data for the AlGaIn array structures grown on GaN stripes (D ($x = 0.13$), E ($x = 0.16$), F ($x = 0.28$)).

향을 보였으나 Demangeot et al.에 비해 전 영역에서 낮은 포논 진동수를 확인하였다. 이는 본 연구에 비해 Demangeot et al.이 더 두꺼운 AlGaIn 박막($2 \mu\text{m}$)을 사용하여 박막 두께가 증가함에 따라 tensile strain이 완화되었기 때문이다. 한편, Al 조성비가 $x = 0.28$ 일 때 포논 진동수는 $x = 0.13$, $x = 0.16$ 에서 증가하던 경향에 비추어 기대한 값에 비해 낮은 값을 보인다. 이러한 결과는 $x = 0.28$ 일 때 Al 유량의 증가로 인해 AlGaIn 성장률이 감소하여 $x = 0.13$, $x = 0.16$ 에 비해 상대적으로 AlGaIn 박막 두께가 얇아졌기 때문인 것으로 생각된다. strain은 u-GaN 기판 위의 AlGaIn 박막과 GaN 스트라이프 위의 AlGaIn 구조 사이의 strain 차이는 다음 식에 의해 계산되었다[20].

$$\Delta\omega_{E_2(\text{high})} = \sigma_{xx} \times 4.2 \text{ cm}^{-1}/\text{GPa} \quad (6)$$

$\Delta\omega_{E_2(\text{high})}$ 는 포논 진동수 변화이며 σ_{xx} 는 biaxial strain이다.

Table 2에서 요약한 바와 같이 샘플 A와 D, B와 E 그리고 C와 F 사이에서 상대적인 biaxial strain은 각각 0.524, 0.429 그리고 0.381 GPa으로 계산되었다. 이 결과들로부터 AlGaIn 어레이 구조와 GaN 스트라이프 사이의 strain이 u-GaN 기판 위에 성장한 AlGaIn 박막에 비해 더 큰 strain을 포함하고 있음을 확인할 수 있었다. AlGaIn 어레이 구조와 GaN 스트라이프 사이의 strain의 발생 원인들로서는 다음과 같은 요인들이 크게 영향을 미쳤을 것으로 판단한다. 첫째, AlGaIn 어레이 구조의 선택적 결정 성장의 성장 초기에는 GaN 스트라이프의 $\{11\bar{2}2\}$ 경사면에서 결정 성장이 이루어지다가 최종적으로는 선택적 결정 성장이 (0002) 결정면을 표면 방향으로 하여 결정 성장이 종료되기 때문에 이러한 성장 과정

Table 2

E_2 peak position, phonon frequency shift and calculated biaxial strain differences between the AlGaIn thin films grown on undoped GaN templates and AlGaIn array structures grown on GaN stripes

Al Compositions in $Al_xGa_{1-x}N$	0.13	0.16	0.28
E_2 peak positions (cm^{-1}) (AlGaIn thin film on u-GaN template)	556.4 (Sample A)	557.2 (Sample B)	557.5 (Sample C)
E_2 peak positions (cm^{-1}) (AlGaIn array on GaN stripe)	554.2 (Sample D)	555.4 (Sample E)	555.9 (Sample F)
$\Delta\omega_{E_2}$ (cm^{-1})	2.2	1.8	1.6
σ_{xx} (GPa)	0.524	0.429	0.381

중의 결정면 방향의 변화가 strain 생성에 큰 기여를 했을 것으로 판단한다. 둘째로는 AlGaIn 어레이 구조의 Al 조성비와 u-GaN 기판 위의 AlGaIn 박막의 Al 조성비를 같다고 가정하고 strain을 계산하였으나, u-GaN 기판의 경우에는 (0002) 결정면 위에서 2차원적으로 AlGaIn 박막이 성장되는 반면에 AlGaIn 어레이 구조는 $\{11\bar{2}2\}$ 결정면 위에서 3차원적으로 성장이 시작된다. 두 경우에 있어서 III족 원료(TMGa 및 TMAI)들의 공급 효율성의 차이로 인해 서로 다른 Al 조성비를 가지기 때문에 strain에 차이를 보였던 것으로 해석할 수도 있다. 일정한 III족 원료 공급에 대해 여러 가지 형상의 AlGaIn 어레이 구조에서의 Al 조성비 변화에 대한 연구 결과는 추후 발표할 예정이다.

4. 결 론

GaN 구조체의 정상 부분에서만 3차원적으로 AlGaIn 어레이 미세 구조를 형성하는 것이 가능하다는 것을 확인하였다. 선택 성장을 위한 넓은 노출 영역이 균일한 AlGaIn 구조를 형성시키는 반면, 상대적으로 작은 노출 영역에서는 불규칙한 모양의 구조를 형성한다는 결과를 얻을 수 있었다. AlGaIn 어레이 구조의 Al 조성비의 변화에 따른 strain 변화에 의해 고유 포논 진동수도 변화함을 확인할 수 있었다. GaN 스트라이프 위의 AlGaIn 구조의 strain은 AlGaIn 박막보다 큰 값을 가지는 것으로 관찰 되었는데 이는 2차원 AlGaIn 박막이 u-GaN 기판의 (0002)면 위에서 성장하는 반면 AlGaIn 어레이 구조는 선택 영역 성장 동안 초기에는 $\{11\bar{2}2\}$ 경사면에서 결정 성장이 시작되다가 (0002)면으로 결정 성장 방향이 바뀌는데 이 과정에서 새로운 성분의 strain이 AlGaIn 어레이 구조 안에 형성되기 때문인 것으로 판단한다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2013R1A1A4A01005797).

References

- [1] S.P. Den Baars, "Gallium-nitride-based materials for blue to ultraviolet optoelectronics device", Proc. IEEE 85 (1997) 1740.
- [2] G.P. Yin and S.M. Kang, "A study on the dependance of crucible dimension on AlN single crystal growth", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 25 (2015) 1.
- [3] J.J. Kim, S.H. Park, H.M. Kim and D. Ahn, "Piezoelectric and spontaneous polarization effects on exciton binding energies in wurtzite GaN/AlGaIn quantum wells", J. Korean Phys. Soc. 43 (2003) 149.
- [4] W.-H. Lee, K.S. Kim, G.M. Yang, C.-H. Hong, K.Y. Kim, E.-K. Suh, H.J. Lee, H.K. Cho and J.Y. Lee, "Thermal annealing effects on the photoluminescence of InGaIn/GaN quantum wells", J. Korean Phys. Soc. 39 (2001) 136.
- [5] T. Hashizume, J. Kotani and H. Hasegawa, "Leakage mechanism in GaN and AlGaIn Schottky interfaces", Appl. Phys. Lett. 84 (2004) 4884.
- [6] W.P. Hsu, M.J. Manfra, D.V. Lang, S. Richter, S.N.G. Chu, A.M. Sergent, N. Kleiman, L.N. Pfeiffer and R.J. Molnar, "Inhomogeneous spatial distribution of reverse bias leakage in GaN Schottky diodes", Appl. Phys. Lett. 78 (2001) 1685.
- [7] S. Raghavan, I.C. Manning, X. Weng and J.M. Redwing, "Dislocation bending and tensile stress generation in GaN and AlGaIn films", J. Cryst. Growth 359 (2012) 35.
- [8] H. Masui, S. Nakamura, S.P. DenBaars and U.K. Mishra, "Nonpolar and semipolar III-nitride light-emitting diodes: Achievements and challenges", IEEE Trans. Electron. Dev. 57 (2010) 88.
- [9] J. Stellmach, F. Mehnke, M. Frentrup, C. Reich, J. Schlegel, M. Pristovsek, T. Wernicke and M. Kneissl, "Structural and optical properties of semipolar AlGaIn grown on sapphire by metal-organic vapor phase epitaxy", Cryst. Growth 367 (2013) 42.
- [10] I.J. Griffiths, D. Cherns, X. Wang, A. Waag and H.-H. Wehmann, "Characterisation of 3D-GaN/InGaIn nanostructured light emitting diodes by transmission electron microscopy", J. Phys.: Conf. Ser. 471 (2013) 12.
- [11] Y.S. Yu, J.H. Lee, H.S. Ahn, K.S. Shin, Y.C. He and M. Yang, "Selective growth of GaN nanorods on the top of GaN stripes", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 24 (2014) 145.
- [12] S.J. Pearton and F. Ren, "Wide bandgap semiconductor one-dimensional nanostructures for applications in nano-electronics and nanosensors", Nanomater. Nanotechnol. 3 (2013) 1.

- [13] Z.Y. Ma, X. Guo, X. Wu, L. Dai and L. Tong, "Semiconductor nanowire lasers", *Adv. Opt. Photon.* 5 (2013) 216.
- [14] Y. Kawaguchi, S. Nambu, M. Yamaguchi, N. Sawaki, H. Miyake, K. Hiramatsu, K. Tsukamoto, N. Kuwano and K. Oki, "Influence of ambient gas on the epitaxial lateral overgrowth of GaN by metalorganic vapor phase epitaxy", *Phys. Stat. Sol.* 176 (1999) 561.
- [15] A.F. Wright, "Elastic properties of zinc-blende and wurtzite AlN, GaN, and InN", *J. Appl. Phys.* 82 (1997) 2833.
- [16] C. Deger, E. Born, H. Angerer, O. Ambacher, M. Stutzmann, J. Homsteiner, E. Riha and G. Fischerauer, "Sound velocity of Al_xGa_{1-x}N thin films obtained by surface acoustic-wave measurements", *Appl. Phys. Lett.* 72 (1998) 2400.
- [17] O. Ambacher, B. Foutz, J. Smart, J.R. Shealy, N.G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, A.J. Sierakowski, W.J. Schaff and L.F. Eastman, "Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGa_xN/GaN heterostructures", *Appl. Phys.* 87 (2000) 334.
- [18] Ingrid De Wolf, "Raman spectroscopy: about chips and stress", *Spectrosc. Eur.* 15 (2003) 6.
- [19] F. Demangeot, J. Groenen, J. Frandon, M.A. Renucci, O. Briot, S. Ruffenach-Clur and R.L. Aulombard, "Raman study of Ga_{1-x}Al_xN solid solutions", *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.* 2 (1997) 40.
- [20] G. Steude, B.K. Meyer, A. Goldner, A. Hoffmann, A. Kaschner, F. Bechstedt, H. Amano and I. Akasaki, "Strain modification of GaN in AlGa_xN/GaN epitaxial films", *Jpn. J. Appl. Phys.* 38 (1999) 498.