

논문 2010-1-2

MBE로 성장한 GaN 에피층의 급속 열처리

Rapid Thermal Annealing of GaN EpiLayer grown by Molecular Beam Epitaxy

최성재*, 이원식**

Sung Jai Choi*, Won Sik Lee**

요 약 질소 분위기하에서 분자선 에피택시 장치로 성장한 GaN 에피층을 고온 열처리 하였다. 시료는 적절한 조건 하에서 급속 열처리 후 구조적인 특성의 향상을 나타내었다. 시료의 결정성의 향상은 에피층의 격자 관련 요소들의 흐트러짐의 감소에 기인한다. 에피층의 열처리는 950도의 급속 열처리로를 이용하여 수행하였다. 고온 급속 열처리가 GaN 에피층의 구조적인 특성들에 미치는 효과는 x선 회절을 통하여 연구하였다. x선 회절 스펙트럼에 있어서 Bragg 피크는 열처리 시간이 증가할수록 각도가 큰 쪽으로 이동하였다. 또한 피크의 FWHM은 열처리 시간이 증가함에 따라 약간의 증가 후 감소하였으며 이후 다시 증가하였다. 이와 같은 결과는 급속 고온 열처리된 GaN 에피층에서 격자 상수에 영향을 미치는 인자들이 에피층의 품질을 좋게 하는 방향으로 일률적으로 변화하는 것이 아니라 에피 품질을 나쁘게 하는 방향으로도 변화한다는 것을 의미한다. 적절한 조건 하에서의 급속 열처리는 에피층의 격자 상수에 관여하는 인자들의 흐트러짐을 감소시켜 에피 결정의 질을 향상시킨다.

Abstract We have investigated effects of the rapid thermal annealing of GaN epilayers by molecular beam epitaxy in nitrogen atmosphere. The improvement of structural properties of the samples was observed after rapid thermal annealing under optimum conditions. This improvement in crystal quality is due to a reduction of the spread in the lattice parameter in epilayers. The annealing has been performed in a rapid thermal annealing furnace at 950°C. The effect of rapid thermal annealing on the structural properties of GaN was studied by x-ray diffraction. The Bragg peak shifts toward larger angle as the annealing time increases. As the thermal treatment time increases, FWHM(full width at half maximum) of the peak slightly increase with its decreases followed and it increases again. Results demonstrate that rapid thermal annealing did not always promote qualities of GaN epilayers. However, rapid thermal annealing under optimum conditions improve structural properties of the samples, elevating their crystal quality with a reduction of inaccuracy in the lattice parameter of the epilayers.

Key Words : GaN, 급속 열처리, 에피층, Molecular Beam Epitaxy, X-ray diffraction

1. 서 론

화합물 반도체 물질인 GaN는 발광소자와 고온 전자 소자 등으로 응용되고 있으며 이로 인하여 많은 관심을 끌고 있다. GaN를 소자로 제작하기 위해서는 어떠한 소

자로 응용하는가에 관계없이 고품질의 결정 구조를 제작할 수 있는 기술^[1-3]을 확보하는 것이 필수적이다. 질화합물 계열 반도체의 밴드갭은 물질의 구성비에 따라서 6.3eV(AlN)에서 1.9eV(InN)까지 연속적으로 분포되어 있으며 그 중에서도 GaN는 직접 천이 특성과 넓은 밴드갭에 기인하는 고온 안정성을 가지고 있어서 광전소자와 고온전자 소자에 적용할 수 있는 이상적인 반도체 물질

*정희원, 경원대학교 IT대학 전자통신공학부 전자공학과, 교신저자

**정희원, 경원대학교 교양대학 자율전공학부

접수일자 2009.12.18, 수정일자 2010.1.20

로서 각광을 받고 있다. 더불어서 GaN는 높은 온도 또는 고밀도의 방사선 피폭 등과 같은 가혹한 조건에서 사용 가능한 소자 제작의 후보로도 관심을 끌고 있다. 하지만 GaN 에피 성장 기술의 발전에 따른 다양한 응용과 신기능 소자 개발 연구의 다양함에도 불구하고 아직도 에피층 성장에 있어서 질소격자의 빈자리와 산소의 혼입, 표면 결함^[4] 등과 같은 문제들을 조절해야 하는 과제를 안고 있다. 최근 발표된 고품질 GaN 에피층 성장에 대한 여러 결과들^[5-10]에는 고품질 GaN 에피를 성장하기 위한 성장 파라미터, 혹은 저온에서 버퍼 층을 성장하는 방법에 의하여 표면 morphology와 전기적 특성을 향상시킨 결과 등 과 같은 것들이 있다. 하지만 GaN 에피의 성장함에 있어서 근본적으로 GaN와 격자 상수가 정확하게 일치하는 기판이 없기 때문에 사파이어, 갈륨비소, 실리콘 등의 기판을 사용하여 성장하고 있다. 또한, 이로 인하여 에피와 기판과의 격자 부정합, 열팽창 계수 차이 등은 고품질 GaN 에피층 획득에 근본적인 장애로 작용하고 있다. 기판과 성장 층과의 격자 부정합과 열팽창 계수의 차이는 성장 층의 높은 결함 밀도를 이끌게 되는 결과를 낳게 된다^[11]. 급속 열처리는 성장 층과 기판간의 격자 부정합 조건에서 성장한 에피층의 구조적, 전기적, 광학적 특성을 향상시키는데 유용한 것으로 보고되어^[12-14] 왔다. 따라서 급속 열처리 기술은 부자연스럽게 변형되어 있는 결정들을 회복시키거나 재결정하는 도구로서 널리 사용되어 왔다. 실제로 GaN 에피층에 있어서 열처리 효과는 결정의 품질과 결정내의 결함의 특성에 크게 의존하기 때문에 GaN 에피층의 구조적 특성의 열처리 효과는 매우 분석하기 어려운 것으로 알려져 있다. 이와 같은 이유로 인하여 서로 상반되는 결과가 보고된 바도 있다^[15-16]. MOVPE로 성장한 n형 GaN 에피층을 열처리함에 따라 전자 이동도와 캐리어 농도가 감소하였다는 결과가 보고된 바^[15]있으며, 다른 한편으로는 MBE로 성장한 n형 GaN 에피층의 경우 열처리에 의해 전자 이동도와 캐리어 농도가 증가하였다는 결과도 보고^[16]되었다. 이와 같은 다양한 연구와 GaN 성장 기술의 발전에 힘입어서 성장된 양질의 GaN 에피는 light emitting diodes (LEDs)^[17], laser diodes (LDs), high-electron mobility transistors (HEMT)^[18], metal semiconductor field effect transistors (MESFET)^[19], UV detectors^[20] 등으로 개발되어 사용되고 있다.

하지만, 이와 같은 에피 성장 기술의 발전과 다양한 소

자의 개발 및 상용화에도 불구하고 에피 품질 개선에 대한 논의들이 계속되고 있는 이유는 성장한 에피층을 열처리함에 의해 물리적 특성이 변화하게 되는 기구에 대해 명확하게 알고 있지 못하기 때문이다. 따라서 GaN 에피층의 물리적인 특성에 대한 열처리 효과에 대한 연구는 급속 열처리 중에 일어나는 과정의 이해와 더불어 더 나아가서 여러 에피층을 가진 소자의 제작에 필요한 성장 후 기술 등의 발전에 꼭 필요한 것이다.

본 연구에서는 열처리 전, 성장된 GaN 표면의 구조적인 특성을 확인하기 위하여 성장한 GaN 에피의 표면을 AFM(Atomic Force Microscopy)으로 관찰하였으며, GaN 에피의 열처리에 따른 구조적 특성 변화를 관찰하기 위하여 고온 급속 열처리된 GaN 에피의 구조 변화 분석을 X 선 회절 실험을 통하여 조사하였다.

II. 실험

기판으로 사용한 사파이어(0001)은 $H_2SO_4:H_3PO_4(1:1)$ 용액에 160°C에서 10분 동안 에칭하고 질소 가스로 불어 말린 후 Mo 홀더에 In을 이용하여 붙인 후 성장실에 집어넣었다. 본 연구에서 사용한 MBE 시스템은 ERC 소스를 갖춘 일반적인 형태의 MBE 시스템이었으며 시스템의 기본 압력은 1.33×10^{-7} Pa, 성장에 사용한 Ga의 순도는 6N, 질소 기체의 순도는 5N이었고 성장실은 터보 펌프로 배기하였다. 질소를 활성화시키기 위해 흘리는 질소의 양은 mass flow controller를 사용하여 조절하였다. 사파이어 기판 위에 GaN 에피를 성장하기 위해서 버퍼층으로 얇은 AlN 에피를 증착하였다. 이를 위하여 GaN 에피 성장 전에 AlN 에피를 성장하기 위하여 기판을 800°C에서 20분간 열처리 하였다. 이후, 기판온도 680°C에서 0.33 μ m/h의 성장률로 하여 1 μ m 두께의 GaN 에피를 성장하였다. 본 실험에서 사용한 두 시료는 모두 이와 같은 동일한 성장조건으로 제작하였다. 성장한 그대로의 GaN 에피 시료에 대한 표면 morphology 관찰은 비접촉 모드(noncontact mode) AFM(Atomic Force Microscopy)시스템으로 수행하였다. AFM시스템은 시료 표면과 AFM(Atomic Force Microscopy)시스템의 팁 사이에 작용하는 반데르발스 힘을 이용하여 원자 단위의 수준으로 물질의 표면 morphology 특성을 관찰한다. AFM시스템의 팁과 표면사이에 작용하는 힘은 cantilevers를 구부러

지게 하며 이 cantilevers 뒷면에 쏘아 반사된 레이저광을 position sensitive photo detector가 감지하여 시료의 표면 morphology 특성을 원자 단위의 수준으로 관찰할 수 있다.

이 시료들에 대한 급속 열처리는 950℃, 질소 분위기 하에서 10초부터 50초까지 10초 간격으로 열처리되었다. 각 시료는 비교를 위하여 각각 5조각으로 나누어져서 급속 열처리 되었으며, 석영관 내 실리콘 홀더 위에서 열처리 되었다. 급속 열처리된 GaN 에피층은 θ -2 θ X-ray diffraction (XRD)로 조사되었다.

III. 결과 및 논의

성장한 GaN 에피층의 표면은 거울과 같은 형태로서 색깔은 띠고 있지 않았다. 그림 1은 성장한 그대로의 GaN 에피층의 PL 측정 결과이다. 저온(77K)에서 보이는 피크의 에너지는 3.47eV이었으며 이는 중성 도우너에 위치한 엑시톤의 재결합에 기인하는 피크로서 FWHM은 59meV이었다. 실온에서의 강한 세기를 나타내는 피크의 에너지는 3.41eV 이었으며 이 피크는 밴드 갭 에너지에 가까운 값이며 이 피크의 FWHM은 108meV 이었다.

사파이어 기판 위에 성장한 그대로의 GaN 에피층의 표면을 AFM 시스템으로 관찰한 사진을 그림 2에 보였다. AFM 시스템으로 관찰한 사진에 의하면 사파이어 기판 위에 성장한 그대로의 GaN 에피층의 표면은 GaN 원자들이 column의 형태로 올라가 있음을 나타내고 있다.

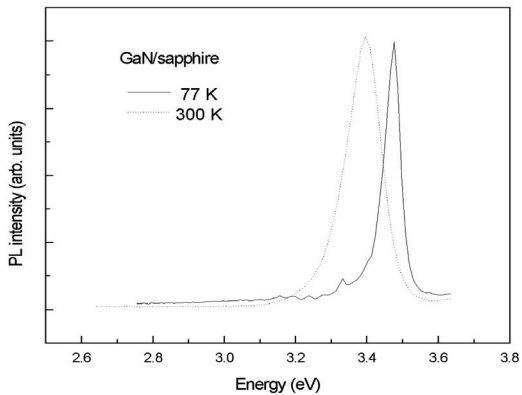


그림 1. 사파이어 기판에 성장된 갈륨나이트라이드의 PL 스펙트럼
Fig. 1. Photoluminescence spectra from as grown GaN on sapphire.

AFM 시스템으로 시료 1의 표면을 측정된 결과에 의하면 원자 단위의 수준으로 나타나는 시료 1의 요철은 RMS(root mean square)값으로 0.014nm이며 시료 2에 대한 표면의 요철은 RMS 값으로 0.54 nm이었다. 사파이어 기판 위에 성장한 그대로의 GaN 에피층의 표면에서 에피층 표면의 요철을 나타내는 이 값과 에피층 표면의 낮은 곳으로부터 높은 곳까지의 간격, 또는 GaN의 격자 상수 등을 비교할 때 매우 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 결과는 사파이어 기판 위에 GaN 에피층을 성장하는 경우에 원자 단위의 수준에서 에피층이 한 층, 한 층 쌓여 올라가는 layer by layer 성장이 아니라 column에 의한 에피층 성장이 이루어지고 있음을 확인하는 하나의 증거라고 할 수 있다.

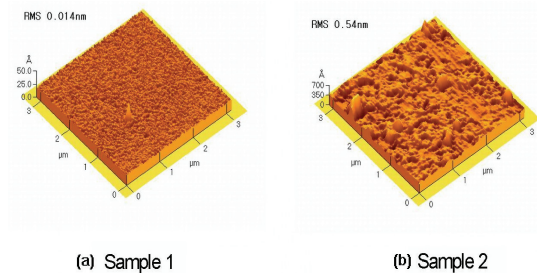


그림 2. 사파이어 기판에 성장된 갈륨나이트라이드 표면의 AFM 이미지
Fig. 2 The AFM image of GaN/sapphire surface.

MBE로 성장한 GaN 에피층에 대한 열처리 효과를 좀 더 세밀하게 분석하기 위해서 급속 열처리된 각각의 GaN 에피층의 XRD rocking curve를 통해서 이들 급속 열처리된 에피층의 결정학적 품질을 조사해 보았다. 급속 열처리 후 Normarski 현미경으로 관찰한 GaN 에피층의 표면 형태는 거울과 같은 형태로서 색깔은 띠고 있지 않았으며 성장한 그대로의 GaN 에피층에서 바뀌지 않았음을 알 수 있었다. 그림 3은 시료1에 대한 에피 성장 직후 및 열처리 후의 XRD 회절 곡선이다. 열처리 시간이 증가함에 따라 Bragg 피크는 34.91도 쪽으로 이동한다. 시료 1의 성장 직후의 에피에 대한 GaN 피크의 FWHM은 16.8 min. 이었다. 열처리를 10초 한 후 피크의 FWHM은 17.0 min. 으로 약간 증가했다가 다시 30초 열처리를 하면 15.7 min. 으로 감소한다. 열처리를 50초 한 후에는 16.8 min. 으로 증가한다. 열처리 시간이 30초 일 때 피크의 세기는 최고가 되고 가장 작은 FWHM을 갖게

된다. 스펙트럼의 FWHM은 GaN 에피층의 격자 상수에 관여하는 인자들에 대한 정보를 반영한다. 열처리 시간이 증가하면 피크의 폭은 약간 넓어지다가 다시 좁아지며, 그 후 다시 넓어진다.

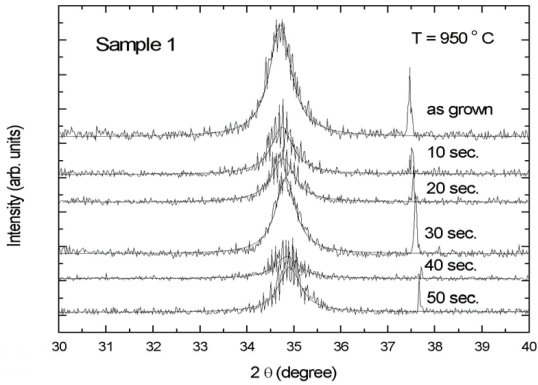


그림 3. 사파이어 기판에 성장된 갈륨나이트라이드 시료 1의 에피 성장 직후 및 950°C에서 10초, 20초, 30초, 40초, 50초 열처리 후 X선 회절 곡선

Fig. 3 X-ray diffraction spectra of GaN on sapphire sample 1 before and after annealing at 950°C during 10, 20, 30, 40, and 50 seconds. Lorentzian fits was obtained with one peak for each X-ray diffraction spectrum.

그림 4는 시료 2의 성장 직후 및 열처리 후의 XRD 회절 곡선을 나타내고 있다. Bragg 피크 이동은 열처리 시간이 증가함에 따라 34.69도 쪽으로 이동한다. 시료 2의 성장한 그대로의 GaN 에피층에 대한 피크의 FWHM은 9.3 min.이었고, 10초 및 30초 열처리 후 10.4 min. 으로 증가한 후 다시 8.5 min. 으로 감소하였다. 열처리를 50초 한 후에는 11.1 min. 으로 증가하였다. XRD 회절 곡선 결과에 따르면 Bragg 피크는 열처리 시간이 증가함에 따라 더 큰 각도 쪽으로 움직이게 되며, 피크의 FWHM은 열처리 시간이 증가함에 따라 약간 증가한 후 감소하며 다시 증가하며 된다. 이와 같은 결과로부터 유추하여 볼 때, 성장한 그대로의 GaN 에피층에 대한 열처리 시간이 증가함에 따라 GaN 에피층의 격자 상수에 관여하는 인자들은 전체적으로 일정치 않은 값을 나타내는 쪽으로 변하였다가, 이후에 일정한 값을 나타내는 쪽으로 이동하며, 다시 일정치 않은 값을 나타내는 쪽으로 변한다는 것을 나타낸다. GaN 에피층에 있어서 에피를 구성하는 원자 간의 거리가 사파이어 기판의 각 원자 간의 거리와 다

르기 때문에 GaN 에피는 표면에서 압력 또는 장력을 받게 된다. 그런 까닭에 사파이어 기판 위에 성장한 GaN 에피의 격자 상수가 열처리에 의해서 스트레스의 완화가 진행됨에 따라 격자 상수는 작아지게 된다. 격자 상수의 차이로 인하여 에피층에 작용하는 압력이 완화되어감에 따라 격자 상수도 벌크의 격자 상수에 근접하게 된다. 하지만, 사파이어 기판에 성장한 GaN 에피의 경우, 에피층이 높은 전위밀도를 가지고 있으며 가늘고 긴 기둥들이 자라나는 형태로 성장하는 경우에 있어서 각 기둥들의 격자 축은 서로 약간씩 다르게 비틀려 있고 이와 같은 각 기둥들 간의 축의 비틀림은 작은 값에 불과하여도 급속 열처리에 의하여 각 기둥의 축 방향의 재배열이 일어나고, 이 재배열이 각 기둥의 축 방향이 서로 다르게 진행되어 전체 결정의 방향에 예민하게 작용하게 된다면, 성장한 그대로의 시료에 대한 열처리가 진행됨에 따라 FWHM이 감소하고 다시 증가하는 것을 보이게 될 것이다.

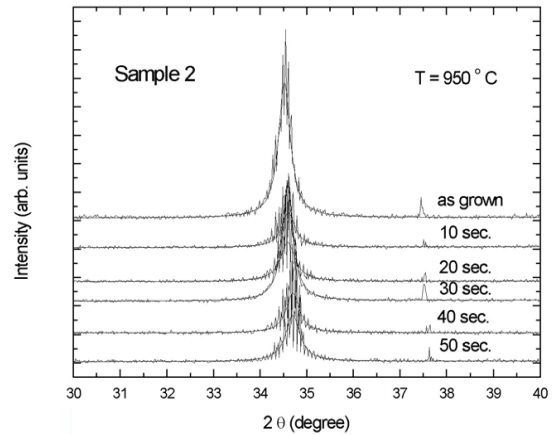


그림 4. 사파이어 기판에 성장된 갈륨나이트라이드 시료 2의 에피 성장 직후 및 950°C에서 10초, 20초, 30초, 40초, 50초 열처리 후 X선 회절 곡선

Fig. 4 X-ray diffraction spectra of GaN on sapphire sample 2 before and after annealing at 950°C during 10, 20, 30, 40, and 50 seconds. Lorentzian fits was obtained with one peak for each X-ray diffraction spectrum.

그림 5는 성장한 그대로의 시료와 열처리한 시료들에 대한 X선 회절 곡선에서 피크의 위치를 보여준다. GaN 에피층에 대한 X선 회절 곡선에서 피크의 위치는 GaN 에피층의 격자 상수와 밀접한 관계를 가지고 있다.

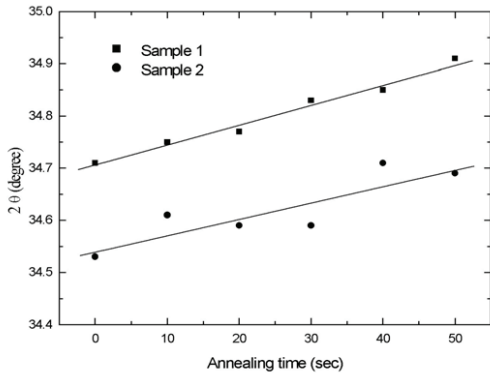


그림 5. 사파이어 기판에 성장된 갈륨나이트라이드 시료의 열처리 후 X선 회절 곡선
 Fig. 5 X-ray diffraction angle of GaN on sapphire with annealing time.

그림 6은 성장한 시료와 열처리 시간에 따른 열처리 시료들에 대한 회절 피크들의 FWHM을 보이고 있다. 각 시료의 경우에 있어서, 열처리 시간이 증가함에 따라 피크의 FWHM은 약간 증가하다가 감소한 뒤 다시 증가하였다. 시료들의 FWHM의 개선은 950도에서 30초 간 급속 열처리한 시료의 경우 관찰할 수 있었다. 피크의 FWHM은 에피층의 결정성에 대하여 민감하고, 이 FWHM은 에피층의 결함 농도 및 전이의 형태, stocking fault 등에 좌우되며, 이것들은 광학적인 특성에도 영향을 미친다. GaN 에피층의 경우에도 고품질의 에피층은 Normarski 현미경으로 관찰할 경우, 거울과 같은 표면 형태를 보이며, X선 회절 곡선에서는 피크의 FWHM이 작은 값을 나타낸다.

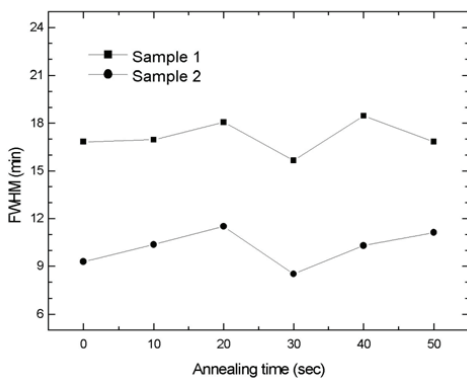


그림 6. 사파이어 기판에 성장된 갈륨나이트라이드 시료의 열처리 시간에 따른 X선 회절 곡선의 FWHM 값
 Fig. 6 FWHM value of XRD peaks of GaN on sapphire with annealing time.

GaN 에피층의 경우 높은 전위밀도를 가지고 있음은 잘 알려진 사실이다. 사파이어 기판에 성장한 GaN 에피층의 경우 가늘고 긴 기둥들이 자라나는 형태로 성장하는 것은 이미 보고된 바^[6, 21-23] 있다. 하지만, 이러한 경우에 있어서 각 기둥들의 격자 축은 서로 약간씩 다르게 비틀려 있게 된다. 물론 이와 같은 각 기둥들 간의 축의 비틀림은 매우 작은 값에 불과하다. 만약 급속 열처리에 의하여 각 기둥의 축 방향의 재배열이 일어나고, 이 재배열이 각 기둥의 축 방향이 서로 다르게 진행된다면, 그리고 이것이 전체 결정의 방향에 예민하게 작용하게 된다면, 성장한 그대로의 시료보다도 열처리한 시료가 더 넓은 FWHM을 보이게 될 것이다. GaN 에피층에 있어서 에피층을 구성하는 원자 간의 거리가 사파이어 기판의 각 원자 간의 거리와 다르기 때문에 GaN 에피층은 표면에서 압력 또는 장력을 받게 된다. 즉 사파이어 기판 위에 성장한 GaN 에피층은 벌크 GaN 와는 다른 격자 상수를 갖는다는 것을 유추할 수 있다. GaN에서 질소 원자 간의 간격은 사파이어 기판의 산소 원자 간의 간격보다 크다, 따라서 사파이어 기판 위에 성장한 GaN 에피층에는 표면에 평행한 compressive biaxial stress와 표면에 수직인 tensile uniaxial stress가 존재하게 된다. 그런 까닭에 사파이어 기판 위에 성장한 GaN 에피층의 격자 상수가 bulk GaN의 격자 상수에 비해 크다는 것을 예상할 수 있으며 열처리에 의해서 스트레스의 완화가 진행됨에 따라 격자 상수는 작아지게 된다. 격자 상수의 차이로 인하여 에피층에 작용하는 압력이 완화되어감에 따라 격자 상수도 벌크의 격자 상수에 근접하게 된다. 이와 같은 현상에 의하여 회절각은 증가하고, FWHM은 감소하게 된다. 이와 유사한 결과로서, 다양한 성장 조건에서 제작한 GaN 에피층의 X선 회절각과 XRD의 FWHM 값 간의 관계가 보고된 바 있다^[11]. 본 연구에서는 성장한 GaN 에피층에 대한 다양한 시간에 따른 급속 열처리를 통하여 이와 유사한 경향의 결과를 보였다.

적절한 조건에서 GaN 에피층을 급속 열처리하면 격자 상수에 관여하는 인자들의 흐트러짐을 감소시킬 수 있다는 것을, 에피 표면에 대한 Normarski 현미경 관찰과 에피층에 대한 XRD 실험 결과로부터 유추할 수 있다. 결정 특성의 개선은 성장한 에피층의 격자 상수에 관련된 인자들의 흐트러짐이 감소되는 것에 의한 것임이 분명하지만, GaN 에피층의 성장 방법과 그에 따른 에피층의 결함이 다양하다는 근본적인 에피층의 특성으로 인하

여 GaN 에피층의 급속 열처리 효과에는 다양한 변화 기구가 존재한다. 이와 같은 이유로 인하여 아직도 GaN 에피층에 대한 열처리와 결정 특성 개선의 관계가 명확하게 정량화 되어 있지 못하며 이를 해결하기 위해서는 체계적이고 다양한 추가적인 연구들이 요구된다.

IV. 결론

질소 분위기 하에서 GaN 에피층에 대한 열처리 효과에 대하여 관찰하였다. MBE로 성장한 GaN 에피층은 열처리 시간의 증가에 따라 Bragg 피크는 큰 각도 쪽으로 이동하며, 열처리 시간을 증가시키에 따라서 X선 회절 곡선 피크의 FWHM은 증가 후 감소와 증가를 거듭한다. 본 연구에서 사용한 시료들에 있어서는 950도에서 30초 동안의 급속 열처리가 최적의 열처리 효과를 나타내는 것을 알 수 있었다.

이와 같은 결과들은 급속 고온 열처리된 GaN 에피층에서 격자상수에 영향을 미치는 인자들이 에피층의 품질을 좋게 하는 방향으로 일률적으로 변화하는 것이 아니라 에피 품질을 나쁘게 하는 방향으로도 변화한다는 것을 의미한다. 적절한 조건에서 GaN 에피층을 급속 열처리하면 격자 상수에 관여하는 인자들의 흐트러짐을 감소시킬 수 있다는 것을 에피 표면에 대한 Normarski 현미경 관찰과 에피층에 대한 XRD 실험 결과로부터 유추할 수 있다. 따라서 비록 급속 고온 열처리에 의해서 GaN 에피층의 품질을 좋게 한다는 여러 결과가 보고된 바 있으나, GaN 에피층의 성장 방법과 그에 따른 에피층의 결함이 다양하다는 근본적인 에피층의 특성으로 인하여 아직도 급속 고온 열처리 효과가 에피층에 미치는 영향이 모두 명확하게 밝혀져 있지 않기 때문에 급속 고온 열처리를 통하여 GaN 에피의 품질 개선을 제어하기 위해서는 더욱 많은 연구가 필요하다. 본 연구는 급속 열처리를 이용하여 GaN 에피층의 결정 특성을 향상시킬 수 있다는 가능성을 제시하고, 아울러 체계적이고 다양한 연구들이 추가적으로 행하여져서 이와 같은 에피층의 급속 열처리 방법이 효과적인 GaN 에피층의 결정 특성 개선 방법으로 정착되어야 한다는 당위성을 제시한다.

참고 문헌

- [1] V. E. Bougrov, M. A. Odnoblyudov, A. E. Romanov, T. Lang, O. V. Konstantinov, *physica status solidi (a)* 203, R25 (2006)
- [2] T. Lang, M. A. Odnoblyudov, V. E. Bougrov, S. Suihkonen, M. Sopanen, H. Lipsanen, *Journal of Crystal Growth* 292, 26 (2006)
- [3] Bertness, K.A., *Devices, Lasers and Electro-Optics Society*, 2007., The 20th Annual Meeting of the IEEE, 405-406(Oct. 2007)
- [4] Hirai, B. A. Haskell, M. B. McLaurin, F. Wu, M. C. Schmidt, K. C. Kim, T. J. Baker, S. P. DenBaars, S. Nakamura, and J. S. Speck, *Appl. Phys. Lett.* 90, 121119 (2007)
- [5] S.H.Cho, H.Sakamoto, K.Akimoto, Y.Okada and M.Kawabe, *Jpn.J.Appl.Phys.* 34, L236(1995)
- [6] T.S. Ko, T.C. Wang, R.C. Gao, H.G. Chen, G.S. Huang, T.C. Lu, , H.C. Kuo and S.C. Wang, *Journal of Crystal Growth Volume* 300(2), 308-313(2007)
- [7] Horng-Shyang Chen, Dong-Ming Yeh, Yen-Cheng Lu, Cheng-Yen Chen, Chi-Feng Huang, Tsung-Yi Tang, C C Yang, Cen-Shawn Wu and Chii-Dong Chen, *Nanotechnology* 17, 1454-1458(2006)
- [8] Drew Hanser, Mike Tutor, Ed Preble, Mark Williams, Xueping Xu, Denis Tsvetkov, Lianghong Liu, *Journal of Crystal Growth* 305(2), 372-376(2007)
- [9] Sumiya, K. Yoshimura, T. Ito, K. Ohtsuka, S. Fuke, K. Mizuno, M. Yoshimoto, H. Koinuma, A. Ohtomo, M. Kawasaki, *J. Appl. Phys.* 88, 1158 (2000)
- [10] S. Craft, J. F. Ihlefeld, M. D. Losego, R. Collazo, Z. Sitar, and J-P. Maria, *Appl. Phys. Lett.* 88, 212906 (2006)
- [11] Vispute, V. Talyansky, S. Choopun, R. P. Sharma, T. Venkatesan, M. He, X. Tang, J. B. Halpern, M. G. Spencer, Y. X. Li, L. G. Salamanca-Riba, *Appl. Phys. Lett.* 73, 348 (1998)

- [12] Roland Wenzel, Gerhard G. Fischer, Rainer Schmid-Fetzer, Materials Science in Semiconductor Processing 4(4), 357-365(2001)
- [13] K. N. Lee, X. A. Cao, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, A. P. Zhang, F. Ren, R. Hickman, J. M. Van Hove, Solid-State Electronics 44(7), 1203-1208(2000)
- [14] N. Miura, T. Nanjo, M. Suita, T. Oishi, Y. Abe, T. Ozeki, H. Ishikawa, T. Egawa, T. Jimbo, Solid-State Electronics 48(5), 689-695(2004)
- [15] J.C.Zolper, M.H.Crawford, A.J.Howard, J.Ramer, S.D.Hersee, Appl.Phys.Lett. 68, 200(1996)
- [16] J.S.Chan, N.W.Cheung, L.Schloss, E.Jones, W.S.Wong, N.Newman, X.Liu, E.R.Weber, A.Gassman, M.D.Ruin, Appl.Phys.Lett. 68, 2702(1996)
- [17] C. Hsu and C. Y. Liu, Electrochem. Solid-State Lett. 9(5), G171-G173 (2006)
- [18] Micovic, M. Nguyen, N.X. Janke, P. Wong, W.-S. Hashimoto, P. McCray, L.-M. Nguyen, C., Electronics Letters 36(4), 358-359(2000)
- [19] Hoel, V. Guhel, Y. Boudart, B. Gaquiere, C. De Jaeger, J.C. Lahreche, H. Gibart, P., Electronics Letters 37(17), 1095-1096(2001)
- [20] Chang, S.J. Ko, T.K. Su, Y.K. Chiou, Y.Z. Chang, C.S. Shei, S.C. Sheu, J.K. Lai, W.C. Lin, Y.C. Chen, W.S. Shen, C.F. , Sensors Journal, IEEE 6(2), 406- 411(2006)
- [21] F.A.Ponce, MRS Bull. 22, 52 (1997)
- [22] K. L. Averett and J. E. Van Nostrand, J. D. Albrecht, Y. S. Chen and C. C. Yang, J. Vac. S., Technol. B 25(3), 964-968 (2007)
- [23] Sung Jai Choi, Won Sik Lee, Journal of The Institute of Webcasting, Internet Television and Telecommunication 8(6), 105-110 (2008)

※ 본 연구는 2010년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

저자 소개

최 성 재(Sung-Jai Choi) (정회원)



- 1981년 충남대학교 전자공학과(공학사)
- 1985년 한양대학교 전자공학과(공학석사)
- 2004년 명지대학교 전자공학과(공학박사)
- 1988년 ~ 현재 경원대학교 전자통신

공학부 전자공학과 교수

<주관심분야 : 초전도 재료, 반도체 소자 제조공정기술, RF 회로해석>

이 원 식(Won Sik Lee)



- 1970년 동국대학교 물리학과(이학사)
- 1983년 건국대학교 물리학과(이학석사)
- 1979년 ~ 2007년 경원전문대학 전기공학과
- 2007년3월 ~ 현재 경원대학교 자율전공학부 교수

<주관심분야 : 반도체 소자 및 응용분야 >