

Si (111) 기판 위에 다양한 AlN 완충층을 이용한 GaN 성장과 특성 비교

신희연† · 이정욱 · 정성훈 · 유지범 · 양철웅

성균관대학교 금속재료공학부
(논문접수일 : 2002년 2월 19일)

Comparison of growth and properties of GaN with various AlN buffer layers on Si (111) substrate

Hui-Youn Shint†, Sung-Hoon Jung, Jeong-Wook Lee, Ji-Beom Yoo, and Cheol-Woong Yang

School of Metallurgical and Materials Engineering, Sungkyunkwan University
(Received February 19, 2002)

요 약

Si 기판 위에 GaN의 성장은 Si이 사파이어보다 값이 저렴하고, 기존의 Si의 직접회로 공정에 GaN를 쉽게 접목시킬 수 있는 측면에서 다양한 장점이 있다. 그러나, Si은 GaN와의 격자상수와 열팽창계수의 차이가 사파이어보다 크며, 이로 인해 격자부정합에 의한 여러 결함을 발생시킨다. 따라서, Si 기판 위에 고품질의 GaN를 얻기 위해서는 AlN과 같은 완충층을 사용하여 격자부정합에 의한 결함을 줄여야 한다. 본 연구에서는 Si (111) 기판 위에 MOCVD, 스퍼터링과 MOMBE의 3가지 방법으로 결정성이 다른 3가지 유형의 AlN 완충층을 얻은 후, MOCVD 법으로 GaN를 증착시켜 각각의 성장특성을 비교하였다. AlN 완충층과 GaN의 격자결합, 완충층의 표면 거칠기가 격자결합에 미치는 영향, 결정성, 성장방향, 결함(공공, 적층결함, 전위) 등을 TEM, XRD를 이용해 비교 분석하였다. AlN 완충층의 결정성은 GaN의 성장에 있어 매우 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 초기 성장과정에서 MOCVD과 MOMBE 법으로 성장시킨 AlN 완충층은 GaN 초기 성장에서 out-of-plane의 성장방향이 틀어지는 것을 감소시켜 주었다.

Abstract

The growth of GaN films on Si substrate has many advantages in that Si is less expensive than sapphire substrate and that integration of GaN-based devices with Si substrate is easier. The difference of lattice constant and thermal expansion coefficient between GaN and Si is larger than those between GaN and sapphire. However, which results in many defects into the grown GaN. In order to obtain high quality GaN films on Si substrate, we need to reduce defects using the buffer layer such as AlN. In this study, we prepared three types of AlN buffer layer with various crystallinity on Si (111) substrate using MOCVD, Sputtering and MOMBE methods. GaN was grown by MOCVD on three types of AlN/Si substrate. Using TEM and XRD, we carried out comparative investigation of growth and properties of GaN deposited on the various AlN buffers by characterizing lattice coherency, crystallinity, growth orientation and defects formed (voids, stacking faults, dislocations, etc). It is found that the crystallinity of AlN buffer layer has strong effects on growth of GaN. The AlN buffer layers grown by MOCVD and MOMBE showed the reduction of out-of-plane misorientation of GaN at the initial growth stage.

† E-mail : shk2th@hanmail.net

1. 서 론

GaN는 에너지 갭이 3.39 eV로 다른 반도체 화합물에 비해 상당히 크기 때문에 짧은 파장의 빛을 낼 수 있으며 따라서, 광학적인 저장 매체(DVD, LD)의 기록 밀도를 높일 수 있다. 또한, 청색 광소자에 응용되어 디스플레이 장치(LED)에도 사용될 수 있다. 기본적으로 공유결합을 이루며 소자로 쓰이는 결정 구조는 wurtzite(hcp 형태) 구조이다. 이미 GaN는 1930년대부터 그 물성이 연구되었으며 [1] 1970년대에는 넓은 에너지 갭에 따른 청색발광이 실험을 통해 확인되었다. [2] 이러한 광학적 특성을 가짐에도 불구하고 1990년도 초반까지 소자로써 기대를 받지 못했던 이유는 단결정으로 성장시키는 것이 불가능했기 때문이다.

GaN는 녹는점과 질소의 해리압이 높기 때문에 Si 등 다른 반도체처럼 벌크로 성장시켜 얻는 것이 곤란하다. 따라서, 대체되는 방법 중에 주목 받고 있는 것이 Si이나 사파이어 기판 위에 완충층을 성장시킨 후, 다른 결정 성장방법에 비해 성장속도가 빠른 HVPE법으로 GaN를 두껍게 성장시키는 후막 성장 방법이다. 그러나, 완충층을 사용하여 HVPE법으로 GaN 후막을 성장시킨 결과, 격자부정합에 의한 높은 결함 밀도로 많은 문제점이 나타났다. 따라서, 최근에는 완충층 위에 MOMBE, MOCVD 법으로 고품질의 GaN를 1 μ m 정도로 얇게 성장시킨 후, HVPE법으로 두껍게 성장시키는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 본 연구에서도 MOCVD 법으로 고품질의 GaN를 얻기 위하여 AlN 완충층의 특성이 GaN 성장에 있어 어떤 효과가 나타날 것인가를 알아보고자 한다.

본 연구에서 사용되는 각 층의 물리적 특성을

Table 1에 비교해 보았다. Si은 GaN와 다른 입방정(diamond) 결정구조를 가지며 GaN와 격자부정합도가 16.9%로 사파이어보다 다소 크다. 그럼에도 불구하고, GaN의 기판으로써 연구되는 이유는 값이 싸고 기존의 Si의 직접회로 공정에 GaN를 쉽게 접목시킬 수 있는 측면에서 다양한 장점이 있기 때문이다. 또한, 전자소자 제작시 기판을 분리하는 과정에서 사파이어는 부도체이기 때문에 열적, 전기적 문제를 일으키지만 Si은 열 및 전기전도도가 좋기 때문에 이러한 문제점을 줄일 수 있다. [3]

완충층은 GaN와 기판의 격자부정합을 감소시키기 위해 사용되므로 GaN와 비슷한 결정구조를 가져야 하며 기판의 결정성을 이어받는 성장을 해야 한다. 가장 널리 연구되고 있는 ZnO, AlN 완충층은 기판의 결정성을 이어받아 기판에 수직인 일방향 정렬을 형성하며, 완충층 없이 직접 GaN를 성장시키는 방법에 비해 많은 GaN seeds를 형성시켜 균일도를 높여준다고 보고 되었다. [4] 또한, 사파이어 기판 위에 ZnO, AlN 완충층을 사용하여 성장시킨 GaN는 우수한 품질로써 성장된다고 보고되었다. [5]

AlN는 III-V 족 nitride 화합물 반도체중의 하나로써 2000 $^{\circ}$ C 이상의 용점을 가진 단결정 성장이 매우 어려운 물질로 알려져 있다. 그러나, GaN와 마찬가지로 hcp의 결정구조를 가지며 GaN와 격자부정합도가 2.7%로 매우 작다. 1986년 Akasaki는 사파이어 기판 위에 비정질 AlN 완충층을 사용하여 GaN 성장을 시도하였다. [6-7] 한편, Si 기판 위에 Chubachi 등은 MOCVD 법, Meng 등은 Reactive sputtering 법[8], Bourret 등은 MOMBE 법을 이용하여 AlN (0001) 단결정을 성장시켰으며 [9] 최근에 H.M.Liaw 등은 3C-SiC (111) 완충층이 증착된 Si (111) 기판 위에 MOCVD 법을 이용하여 2H-AlN 완충층을 성장시켜 GaN를

Table 1. Properties of materials.

Material	Crystal structure	Lattice constant		Thermal mismatch		Lattice mismatch
		(a)	(c)	(a)	(c)	
GaN	Hexagonal	3.18	5.18	5.59	3.17	0
AlN	Hexagonal	3.104	4.966	4.2		-2.7
Si	Cubic	5.43	5.43	3.59		16.9
Al ₂ O ₃	Hexagonal	4.758	12.99	7.5	8.5	16.1

단결정으로 성장시켰다고 보고하였다. [10] AlN 완충층 위에 생성된 GaN seeds는 초기 성장과정에서 다양한 결정방위를 갖는다. 따라서, 격자부정합에 의해 AlN 완충층과 GaN의 계면이 혼란스러운 상태가 되며 이것은 많은 결함을 가진 천이 영역(transition region)을 형성시킨다. [11] 이 영역에 관해서는 현재 다양한 연구가 진행 중이며 초기성장에서 발생한 큰 계면 에너지를 낮추기 위한 방향으로 GaN가 성장한다고 보는 견해가 많다. 즉, 기판에 수직한 방향인 GaN (0001) 면의 우선성장이 계면 에너지를 낮추는 가장 효율적인 방식이라는 것이 다.

본 연구를 통해, 격자부정합에 의한 AlN 완충층과 GaN의 계면의 혼란스러운 상태는 천이 영역을 형성시키고 이 영역을 통해서 격자부정합이 완화되어 그 위로 결함이 거의 없는 고품질의 GaN가 성장되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, GaN 단결정 성장에 있어 초기조건은 매우 중요하며 이 초기조건을 제어하기 위해 고품질의 AlN 완충층의 사용이 필수적인 것을 확인할 수 있었다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Si (111) 기판 위에 결정성이 다른 3가지 유형의 AlN 완충층을 얻기 위하여 MOCVD, 스퍼터링과 MOMBE의 3가지 방법으로 성장시켰다.

첫번째, MOCVD 법으로 성장시킨 AlN 완충층의 성장온도는 1020℃, 성장 압력은 55 mbar 이며, 질소와 알루미늄의 소스로 각각 암모니아 (NH₃)와 trimethylaluminum(TMAL)이 사용되었다. 암모니아와 TMAL 유동속도는 각각 2 slm와 40 sccm로 하였고, 반응기내에서 반응가스의 유속을 일정하게 하기 위해서 H₂를 12 slm 의 속도로 사용하였다. 두번째, 스퍼터링 법으로 성장시킨 AlN 완충층의 성장온도는 350℃, 성장 압력은 6 mTorr (9.3×10^{-3} mbar)이며, 아르곤과 질소의 비율을 5 : 0.7로 하였고 플라즈마 파워를 300 W로 하였다. 세번째, MOMBE 법으로 성장시킨 AlN 완충층의 성장온도는 830℃, 성장 압력은 1 mTorr 이며 질소와 알루미늄의 소스로 각각 암모니아와 trimethylaluminum이 사용되었다. V/III 비는 66으로 하였다. 위의 3가지 종류의 AlN 완충층

을 가진 Si 기판 위에 각각 MOCVD 법으로 GaN를 성장시켰다. 우선 112초 동안 525℃에서 LT-GaN를 성장시켰고, 이어서 5분 동안 1060℃로 온도를 서서히 상승시킨 후 그 온도에서 GaN를 성장시켰다. 성장 시간은 60 min 이며 성장 압력은 740 Torr로 하였다. 질소와 갈륨의 소스로 각각 암모니아와 trimethylgallium(TMGa)이 사용되었으며, 암모니아와 TMGa 유동속도는 각각 5.6 slm 와 36 sccm 로 하였다. 반응기내에서 반응가스의 유속을 일정하게 하기 위해서 N₂를 14 slm 의 속도로 사용하였다. AlN 완충층 위에 525℃에서 LT-GaN를 112초간 성장시키는 이유는 GaN 핵생성을 고르게 잘 일어나게 하고 AlN 완충층의 거친 굴곡을 어느 정도 감소시킬 수 있기 때문이다. 따라서, 격자부정합에 의한 전위를 감소시킬 수 있다. 또한, GaN의 성장 온도인 1060℃이기 때문에 기판, 완충층과의 열팽창계수 차이를 줄이기 위해 성장시킨다.

분석장비는 TEM(Transmission electron microscopy)과 XRD(X-ray diffractometer)를 이용하였다. TEM은 계면과 column에서 원자단위의 결정결함을 밝혀낼 수 있는 유용한 도구이다. 그 동안 공공(void), 적층결함, nanopipe, threading dislocation, inversion domain boundary 등의 결함이 TEM을 통해 밝혀졌다. 본 연구에서는 고분해능 기법으로 계면에서의 나노 단위의 미세구조와 격자부정합을, 암시야상 기법으로 전위, 전위밀도를 분석하였다. 또한, 회절도형(diffraction pattern)을 통해 결정학적인 정보를 얻을 수 있었다. 그리고, XRD를 통해 결정성과 성장방향을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 AlN 완충층과 GaN의 계면

Figure. 1(a)는 Si 기판 위에 MOCVD 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 후, MOCVD 법으로 GaN를 성장시킨 시편의 계면 부근의 TEM 사진이다. AlN 완충층 위에 넓은 지역에 걸쳐 공공이 형성되었으며 그 위로 많은 결함을 가진 천이 영역이 형성되었다. (b)의 확대사진을 통해 전위가 (0001) 면에 놓여 있는 것이 관찰되며, (c)에서는 coalescence boundary 즉,



Fig. 1. High resolution TEM images of GaN/LT-GaN/AlN(MOCVD)/Si specimen; (a) Overall image showing GaN/LT-GaN/AlN/Si structure, (b) Dislocation, (c) Coalescence boundary, (d) Lattice mismatch

column 간의 계면이 형성된 것으로 볼 때 AlN 완충층의 결정성이 다소 떨어진다고 판단된다. (d)에서는 AlN 완충층과 GaN의 격자부정합, 격자변형의 모습이 관찰된다. 이것은 전위생성의 가장 큰 원인이다. Fig. 2(a)는 Si 기판 위에 스퍼터링 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 후, MOCVD 법으로 GaN를 성장시킨 시편의 계면 부근의 TEM 사진이다. AlN 완충층

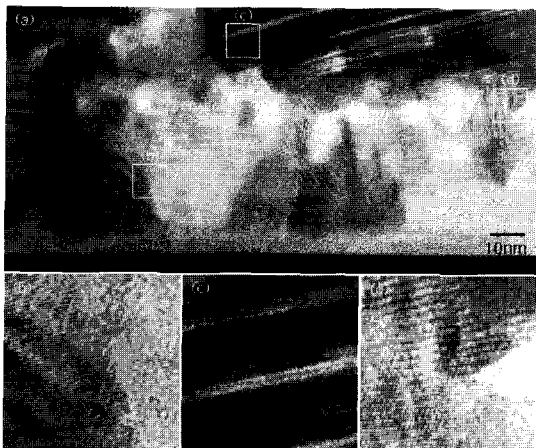


Fig. 2 High resolution TEM images of GaN/LT-GaN/AlN(Sputtering)/Si specimen; (a) Overall image showing GaN/LT-GaN/AlN/Si structure, (b) Poor crystalline AlN, (c) Transition region, (d) Lattice mismatch

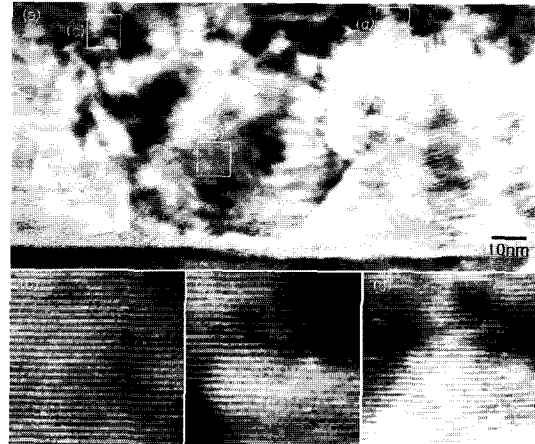


Fig. 3 High resolution TEM images of GaN/LT-GaN/AlN(MOMBE)/Si specimen; (a) Overall image showing GaN/LT-GaN/AlN/Si structure, (b) High quality AlN (c),(d) Good consolidation of lattice

위에 비정질의 GaN seeds가 많이 생성되었다. 그림 오른쪽에는 격자영상을 띠는 결정성을 가진 GaN seeds가 생성되어 C-축에서 틀어진 방향으로 성장하는 것이 관찰된다. 또한, GaN 영역에서 천이 영역과 결정립계가 형성되었다. (b)의 확대사진을 통해 AlN 완충층의 결정성이 나쁘다고 판단되며, (c)에서는 천이 영역이 관찰된다. 또한, (d)에서는 AlN 완충층과 GaN의 격자부정합, 격자변형의 모습이 관찰된다.

Figure. 3(a)는 Si 기판 위에 MOMBE 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 후, MOCVD 법으로 GaN를 성장시킨 시편의 계면 부근의 TEM 사진이다. AlN 완충층 위에 공공이 거의 형성되지 않았으며 그림 오른쪽에 비정질의 GaN seeds도 생성되었다. 그러나, 앞의 경우와는 다르게 천이 영역이 형성되지 않았다. (b)의 확대사진을 통해 AlN 완충층의 결정성이 우수한 것으로 판단되며 (c),(d)에서는 AlN 완충층과 GaN의 격자결합이 잘 이루어진 것으로 볼 때 전위생성이 적을 것이라고 판단된다.

3.2 전위, 전위 밀도

GaN는 Wurtzite 구조로써 hcp 격자점에 Ga와 N의 두 개의 원자가 배치된 형태이기 때문에 hcp 결

정구조와 비슷한 격자결함과 슬립계를 갖는다. 전위의 발생 원인은 완충층과의 격자부정합, 완충층의 표면상태, GaN column의 성장방향, 기판 원소의 확산 등이 제시되고 있다. 또한, 초기 핵생성 과정 중에 결정질의 GaN seeds와 비정질의 GaN seeds가 생성되는데 이 seeds들이 성장하면서 격자부정합을 일으키는 것도 전위 발생의 중요한 원인이다. Seeds 중에서 기판에 수직인 (0001) GaN column들이 우선 성장을 하게 되는데, 이 과정에서 column 간의 구조적인 차이가 칼날 유형의 <0001> 전위를 형성한다. 그리고, 각 column들은 작은 각도의 결정 방위차 (in-plane misorientation)가 있는데 이는 나선전위의 원인이 되어 칼날전위와 결합된 형태로 존재한다. 대부분의 전위들은 column 위쪽으로 갈수록 급격히 감소한다. 그러나, 계면에서 발생되어 막의 표면까지 영향을 미치는 전위인 threading dislocation은 소자의 품질을 저하시키는 가장 치명적인 결함이다.

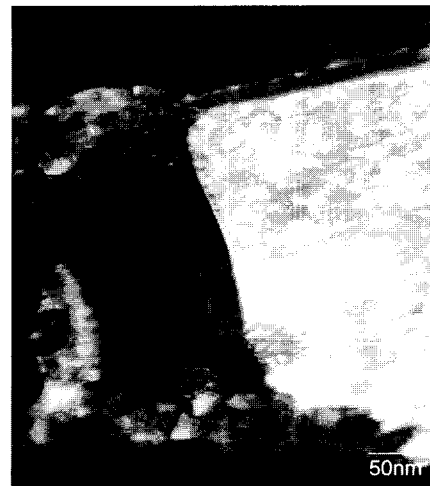
Figure. 4는 (0002)를 사용한 TEM의 암시야상 사진이다. (a)는 MOCVD 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 후, MOCVD 법으로 GaN를 성장시킨 시편의 사진이다. 성장 높이는 약 500nm이며 계면 부근에는 상당히 많은 전위들이 존재한다. 따라서, 이 부분을 제외하고 표면으로부터 아래쪽으로 400nm 범위에서 측정된 전위 밀도는 약 $5.12 \times 10^9/cm^2$ 로 나타났다. 전위 밀도의 측정에는 Keh가 제안한 방법을 이용하였다. [12]

(b)는 스퍼터링 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 후, MOCVD 법으로 GaN를 성장시킨 시편의 사진이다. 성장 높이는 약 400 nm이고 결정립계가 확연하게 존재하며, GaN의 결정성이 매우 나쁘기 때문에 TEM 기법인 two-beam 조건(specimen-tilt)으로 전위 밀도를 측정할 수 없었다.

(c)는 MOMBE 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 후, MOCVD 법으로 GaN를 성장시킨 시편의 사진이다. 성장 높이는 약 500 nm이며 전위가 계면 부근에는 일부 존재하지만 표면까지 성장한 전위는 관찰할 수 없다. 전위 밀도는 표면부터 아래쪽으로 400nm를 측정된 결과, $2.35 \times 10^6/cm^2$ 로 나타났다. 일반적으로 전위 밀도는 $10^{10}/cm^2$ 이하여야 소자로 사용이 가능한데 [13] (a)와 (c)의 경우, 다른 조건을 제외하고 전위 밀도 값으로만 판단할 때 소자로써 충분히 사용될 수 있다고 판단된다.



(a) GaN/LT-GaN/AlN(MOCVD)/Si



(b) GaN/LT-GaN/AlN(Sputtering)/Si



(c) GaN/LT-GaN/AlN(MOMBE)/Si

Fig. 4 TEM dark field images using beam (0002)

3.3 XRD 분석

Figure. 5(a)에서 (A)는 Si 기판 위에 MOCVD 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 시편의 XRD pattern이며 (G)는 (A)시편 위에 MOCVD 법으로 GaN를 성장시킨 시편의 XRD pattern이다. (A)에서 28.3° 의 Si (111), 59.3° 의 Si (222) 피크와 36.2° 의 AlN (0002) 피크를 얻었다. 이 결과로 볼 때 AlN 완충층이 C-축 방향을 가지고 우선 성장한 것으로 판단된다. (G)에서는 34.7° 의 GaN (0002), 72.9° 의 GaN (0004) 피크를 얻었다. 따라서, GaN도 C-축 방향을 가지고 우선 성장한 것으로 판단된다. (b)에서 (A)는 Si 기판 위에 스퍼터링 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 시편의 XRD pattern이며 (G)는 (A)시편 위에 MOCVD 법으로 GaN를 성장시킨 시편의 XRD pattern이다. (A)에서 28.3° 의 Si (111), 59.3° 의 Si (222) 피크를 얻었지만 AlN 피크는 존재하지 않았다. TEM 사진에는 AlN 완충층이 부분적으로 결정성을 띠는 영역을 볼 수 있지만 극히 일부이기 때문에 XRD 피크가 존재하지 않는다고 판단된다. TEM 회절도형에서 해당 회절점들을 전혀 관찰할 수 없었던 것도 이를 뒷받침해준다. 이 결과로 볼 때 특별한 우선 성장이 없으며 결정성이 좋지 않은 것으로 판단된다. (G)에서는 34.7° 의 GaN (0002) 피크를 얻었지만 다른 2가지의 (G)와 비교 해볼 때 그 높이가 현저하게 낮다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, GaN가 일부 column들만 C-축 방향으로 우선 성장했거나, 낮은 두께로 성장된 것으로 판단된다. (c)에서 (A)는 Si 기판 위에 MOMBE 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 시편의 XRD pattern이며 (G)는 (A)시편 위에 MOCVD 법으로 GaN를 성장시킨 시편의 XRD pattern이다. (A)에서 (a)-(A)와 마찬가지로 28.3° 의 Si (111) 피크와 36.2° 의 AlN (0002), 75.9° 의 AlN (0004) 피크를 얻었다. 피크가 높으며, TEM 회절 도형의 결과로 볼 때 AlN 완충층이 C-축 방향을 가지고 에피 성장한 것으로 판단된다. (G)에서는 34.7° 의 GaN (0002), 72.9° 의 GaN (0004) 피크를 얻었다. 따라서, GaN도 C-축 방향을 가지고 에피 성장한 것으로 판단된다.

3.4 AlN 완충층의 결정성에 따른 GaN 성장특성

Figure. 6(a)는 Si (111) 기판 위에 MOCVD 법으로

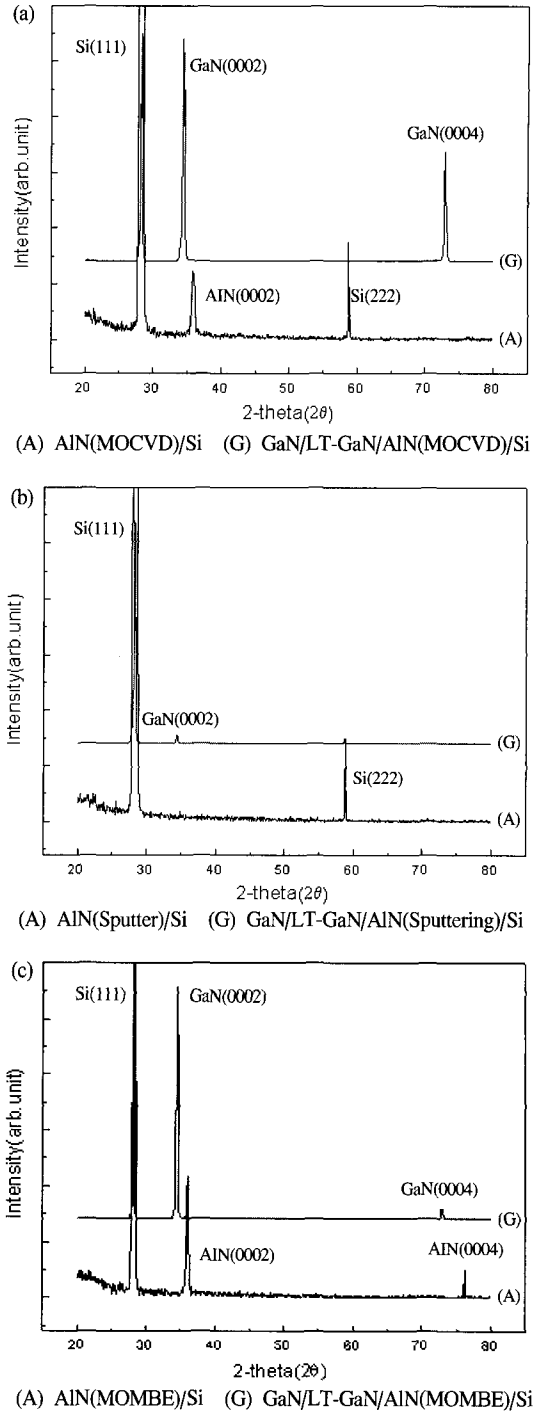
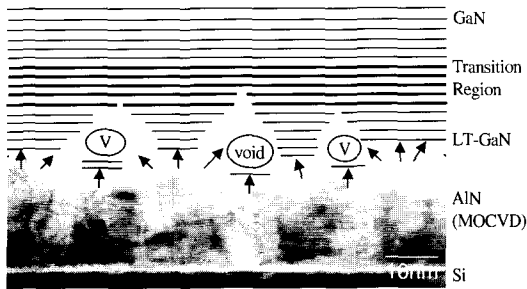


Fig. 5 X-ray diffraction patterns

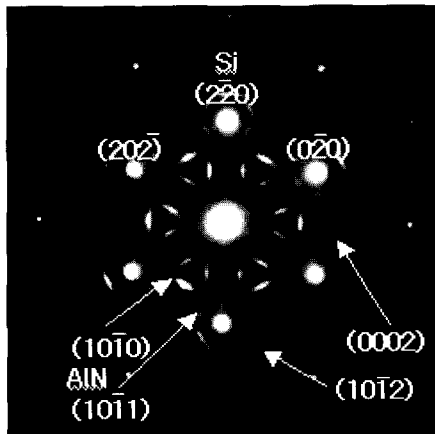
AlN 완충층을 성장시킨 시편(TEM 사진) 위에 MOCVD 법으로 GaN를 성장시킬 경우 일어나는 과정을 도



(a) Schematic growth mechanism of GaN on AlN/Si



(b) High resolution TEM image of GaN region



(c) Electron diffraction pattern of AlN/Si region(plan-view)

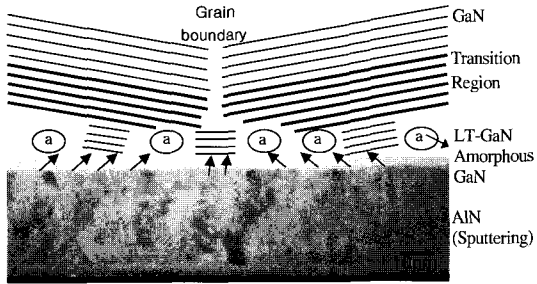
Fig. 6 Growth mechanism of GaN on AlN(MOCVD)/Si

식적으로 그려본 것이다. 우선 AlN 완충층은 평균 25 nm의 성장 높이에 굴곡이 있는 거친 표면을 가진다. LT-GaN의 초기 핵생성 후 비정질의 GaN seeds는 성장이 멈추고 결정성을 갖는 GaN seeds만 계속 성장하게 된다. GaN의 초기성장에서 AlN 완충층의

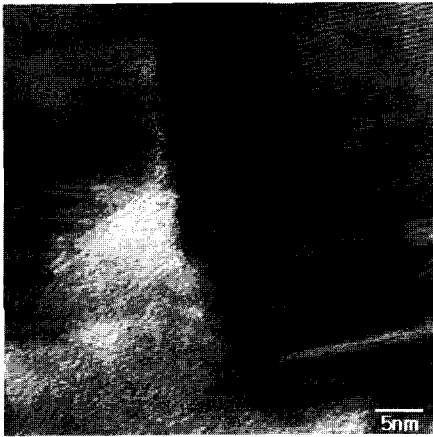
거친 표면이 GaN 성장에 영향을 주어 공공을 형성시킨다. 또한, AlN 완충층의 다결정성과 거친 표면에 의해 GaN 초기 성장방향이 C-축 방향에서 틀어지면서 일어나는 AlN 완충층과 GaN의 격자부정합은 전위를 발생시킨다. 한편, C-축 방향성을 가진 GaN seeds는 C-축 방향으로 성장한 AlN 완충층의 방향성을 이어받아 C-축 방향으로 잘 성장한다. 이것은 실제 GaN 영역의 TEM 사진인 (b)를 통해 확인할 수 있으며 천이 영역 위로는 결함이 거의 없는 것을 관찰할 수 있다. 즉, 격자부정합에 의해 AlN 완충층과 GaN의 계면이 혼란스러운 상태가 되며 이것은 많은 결함을 가진 천이 영역을 형성시킨다. 이 영역을 통해서 격자부정합이 완화되고 그 위로 결함이 거의 없는 고품질의 GaN가 성장되는 것이다. (c)는 Si 기판 위에 MOCVD 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 시편을 plan-view로 회절도형을 얻은 것이다. 정대축이 (111)-Si로 분석되었으며 단결정인 Si의 점도형과 AlN의 도형을 동시에 얻을 수 있었다. AlN 완충층은 기판 표면에 대하여 약 $\pm 3\sim 4^\circ$ 정도 회전하여(in-plane misorientation) C-축으로 성장하는 즉, 선택적 방위를 갖는 다결정으로 성장하는 것을 알 수 있다. 또한, Si 층과 AlN 완충층의 간섭으로 인한 다수의 이중회절도형이 얻어졌으며, 각 회절점에 대응되는 면지수는 (c)에 표시하였다.

Figure. 7(a)는 Si (111) 기판 위에 스퍼터링 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 시편(TEM 사진) 위에 MOCVD 법으로 GaN를 성장시킬 경우 일어나는 과정을 도식적으로 그려본 것이다. 우선 AlN 완충층은 평균 40 nm의 성장 높이에 평탄한 표면을 가진다. 또한, TEM의 회절도형을 통해 결정성이 좋지 않음을 확인할 수 있었다. LT-GaN의 초기 핵생성 과정 중에 AlN 완충층의 결정성이 좋지 않아 대부분의 지역에서 비정질의 GaN seeds가 발생하지만, 대부분 성장이 멈추고 일부 결정성을 갖는 GaN seeds만 계속 성장한다. 또한, AlN 완충층은 C-축 방향성이 없으므로 GaN의 초기 성장방향에 영향을 주지 못해 GaN는 C-축에서 틀어진 방향으로 성장한다. 그 위로 성장방향이 비슷한 column들은 서로 결합하고 그렇지 못한 column들은 결정립계를 형성하면서 성장한다. 이러한 과정들은 전위 생성에도 매우 큰 영향을 미쳐 높은 전위 밀도를 가질 것이라고 판단된다. 결정

Si (111) 기판 위에 다양한 AlN 완충층을 이용한 GaN 성장과 특성 비교



(a) Schematic growth mechanism of GaN on AlN/Si

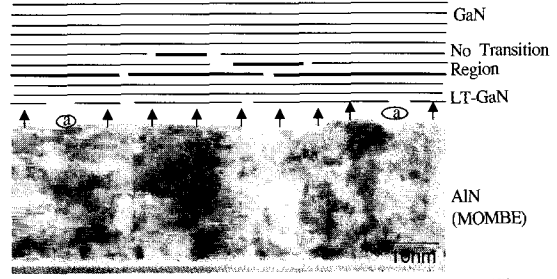


(b) High resolution TEM image of GaN region

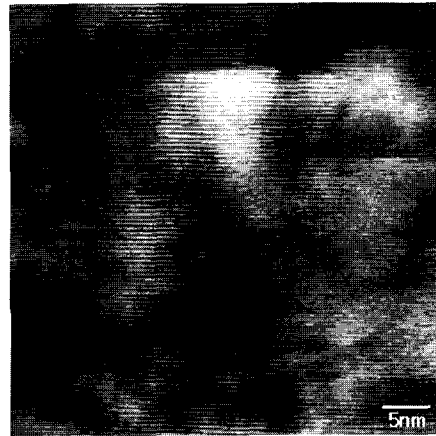
Fig. 7 Growth mechanism of GaN on AlN(Sputtering)/Si

립계의 모습은 실제 GaN 영역의 TEM 사진인 (b)를 통해 확인할 수 있다. 즉, 격자부정합에 의해 AlN 완충층과 GaN의 계면이 혼란스러운 상태가 되며 이것은 각각의 결정에 많은 결함을 가진 천이 영역을 형성시킨다. 이 영역을 통하여 격자부정합이 완화되고 그 위로 결정립계를 가진 다결정의 GaN가 성장되는 것이다.

Figure. 8(a)는 Si (111) 기판 위에 MOMBE 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 시편(TEM 사진) 위에 MOCVD 법으로 GaN를 성장시킬 경우 일어나는 과정을 도식적으로 그려본 것이다. 우선 AlN 완충층은 평균 50 nm의 성장높이에 평탄한 표면을 가진다. 또한, TEM의 회절도형을 통해 결정성이 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. LT-GaN의 초기 핵생성 과정 중에 AlN 완충층의 결정성이 매우 좋아 대부분의 지역에서 결정성의 GaN seeds가 발생하고 일부 영역의 비정질의 GaN seeds는 성장이 멈춘다. 따라서, 대부분의 결정성을 갖는 GaN seeds는 계속 성장하



(a) Schematic growth mechanism of GaN on AlN/Si



(b) High resolution TEM image of GaN region

Fig. 8 Growth mechanism of GaN on AlN(MOMBE)/Si

여 AlN 완충층과 격자결합이 매우 잘 이루어진다. 또한, 평탄한 표면과 epitaxial 성장한 AlN 완충층은 GaN의 성장방향에 영향을 주어 GaN를 epitaxial 성장하게 하고 공공도 형성되지 않는다. 따라서, 격자결합이 대부분의 영역에서 잘 이루어져 격자부정합에 의한 전위 생성도 위의 두 가지 경우보다 훨씬 줄어든다. 또한, 천이 영역이 형성되지 않았으며 이것은 실제 GaN 영역의 TEM 사진인 (b)를 통해 확인할 수 있다. 즉, AlN 완충층과 GaN의 계면의 안정된 상태로 인해 천이 영역 없이 결함이 거의 없는 고품질 GaN가 성장되는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 Si (111) 기판 위에 다양한 특성을 가진 AlN 완충층을 사용하여 GaN의 성장과 특성을 비교하였다. 격자부정합에 의해 AlN 완충층과 GaN의 계면이 혼란스러운 상태가 되며 이것은 많은 결

함을 가진 천이 영역을 형성시킨다. 이 영역을 통해서 격자부정합이 완화되고 그 위로 결함이 거의 없는 고품질의 GaN가 성장된다. 그리고, AlN 완충층의 결정성은 GaN의 성장특성에 있어 매우 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 그 예로, 초기 성장과정에서 MOCVD과 MOMBE 법으로 성장시킨 AlN 완충층은 GaN 초기 성장에서 out-of-plane의 성장방향이 틀어지는 것을 감소시켜 주었다. 또한, 고품질의 GaN를 얻기 위한 AlN 완충층의 조건은 증착 방법보다 결정성에 의존한다고 판단된다. 즉, MOCVD 법으로 성장시킨 AlN 완충층도 성장 변수를 제어하여 고품질의 AlN 완충층을 얻을 수 있다면, MOMBE 법으로 성장시킨 경우 만큼의 효과를 얻을 수 있다고 기대된다. 한편, 공공, 적층 결함, threading dislocation 등의 결함은 GaN과 완충층의 격자부정합, 완충층의 표면 거칠기, 우선 성장방향 등 여러 복합적인 원인으로 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 끝으로 MOCVD 법과 MOMBE 법으로 AlN 완충층을 성장시킨 후, MOCVD 법으로 GaN를 성장시킨 두 가지 유형은 결함 밀도와 결정성 등의 결과로 볼 때 소자로서 충분히 사용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 KOSEF(Grant No. 1999-2-30100-002-3)의 도움을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] W. C. Johnson, J. B. Parsons, M. C. Crew, J. Phys. Chem. **234**, 2651 (1932).
- [2] J. I. Pankove, E. A. Miller, J. E. Berkeyheiser, J. Luminescence **5**, 84 (1972).
- [3] S. Zamir, B. Meyler, E. Zolotoyabko, J. Crystal Growth **218**, 181 (2000).
- [4] K. Hiramatsu, S. Itoh, H. Amano, I. Akasaki, J. Crystal Growth **115**, 628 (1991).
- [5] H. Morkoc, *Nitride Semiconductors and Device* (Springer) p.8, p.12, p.20, p.107.
- [6] K. Hiramatsu, S. Itoh, H. Amano, I. Akasaki, J. Crystal Growth **115**, 628 (1991).
- [7] K. Hiramatsu, T. Detchprohm, H. Amano, I. Akasaki, Adv. Crystal Growth Mechanisms **399** (1997).
- [8] W. J. Meng, J. Heremans, Y. T. Cheng, Appl Phys Lett **59**, 2097 (1991).
- [9] A. Bourret, A. Barski, J. L. Rouviere, G. Renaud, A. Barbier, J. Appl. Phys. **83**, 2003 (1998).
- [10] H. M. Liaw, R. Doyle, P. L. Fejes, et al : Solid State Electronics **44**, 747 (2000).
- [11] I. Akasaki, H. Amano, Y. Koide, K. Hiramatsu and N. Sawaki, J. Crystal Growth **98**, 209 (1989).
- [12] 성장모, 투과 전자현미경학 개론, 반도체출판사 155 (1992).
- [13] 신종언, 유태경, 전자전기재료 **13**, 14 (2000).