[논 문] 한국재료학회지
Korean Journal of Materials Research
Vol. 8, No. 1 (1998)

AlN 완충층이 형성된 (001) Si 기판위에 GaN의 성장과 특성

이영주 · 김선태 · 정성훈* · 문동찬*

대전산업대학교, 재료공학과
*광운대학교, 전자재료공학과

Growth and Properties of GaN on (001) Si Substrate with an AlN Buffer Layers

Y. J. Lee, S. T. Kim, S. H. Chung* and D. C. Moon*

Department of Materials Engineering, Taejon National University of Technology, Taejon, 300-717
**Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 139-701*

(1997년 7월 21일 받음, 1997년 11월 18일 최종수정본 받음.)

초 록 RF 스퍼터링법으로 (001) Si 기판위에 AlN 완충층을 성장하고, 그 위에 HVPE법으로 GaN를 성장하였다. GaN의 성장률은 1030℃의 온도에서 AlN 완충층의 두께가 각각 500Å과 2000Å 일 때 65㎛/hr와 84㎛/hr로서 AlN 완충층의 두께가 증가함에 따라 증가하였다. AlN 완충층위에서 GaN의 성장초기에는 수 ㎛ 크기의 결정들이 임의의 방향으로 성장된 후 성장시간이 경과함에 따라 수평방향으로의 성장에 의하여 합쳐지게 되며, c-축 방향으로 배향된 평탄한 표면을 갖는 다결정체가 성장되었다. 20K의 온도에서 측정된 광루미네센스(PL) 스펙트럼에서는 3.482eV에서 자유여기자에 의한 발광과 3.472eV에서 반치폭이 9.6meV인 도너 구속여기자 발광 및 3.27eV 부근에서의 도너-억셉터 쌍 사이의 재결합과 LO포논 복제에 의한 발광이 나타났다. 그러나 2.2eV 부근에서의 황색발광은 관찰되지 않았다.

Abstract GaN layers were grown on (001) Si substrates by the hydride vapor phase epitaxy (HVPE) method using RF-sputtered thin film AlN as buffer layers. The GaN growth rates depends on thicknesses of AlN buffer layers, and found to be 65㎛/hr and 84㎛/hr for the AlN thickness of 500Å and 2000Å, respectively, at the GaN growth temparature of 1030℃. At the initial stage of the GaN grown on (001) Si substrate covered with AlN intermediate layer, randomly oriented crystallites of a few ㎛ size were deposited, leading to rough surface morphology. Thereafter with increasing the growth time, each crystallites grew two dimensionally and coalesced with each ones to be smooth surface, and became highly c-oriented polycrystalline. At the photoluminescence spectrum measured at 20K, free-exciton emission at 3.482eV, neutral donor bound exciton emission at 3.472eV which had the full-width half at maximum of 9.6meV, and donor-acceptor pair emission at 3.27eV with LO phonon replicas were observed, but yellow-band around at 2.2eV was not detected.

1. 서 론

GaN는 실온에서 에너지 갭이 3.39eV이고, 직접천이형 밴드구조를 갖고 있기 때문에 청색부터 자외영역에서 동작하는 발광다이오드(LED), 레이저 다이오드(LD) 및 수광소자 등의 광전자소자 제작에 유용한 반도체이다[1]. GaN는 융점에서 질소의 해리압이 높기 때문에 통상적인 방법으로 양질의 벌크 결정을 성장하는 것이 곤란하여 GaN의 homoepitaxy를 위한 기판이 제공되지 않고 있다.

벌크 GaN 단결정을 성장하기 위한 연구가 지속적으로 이루어졌지만 아직까지 성공적이지 못한 실정이며[2,3], 최근에는 다른 결정성장방법에 비해 성장속도가 빠른 HVPE (hydride vapor phase epitaxy) 법으로 두껍게 GaN층을 성장한 후 이를 GaN의 homoepitaxy를 위한 기판으로 사용하고자 하는 연구가 이루어지고 있다[4~6]. 이와 같이 HVPE법으로 성장시킨 두꺼운 GaN를 MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition)에 의한 GaN의 homoepitaxy에 기판으로 사용함으로써 GaN 에피층의 광학적 특성과 결정학적 특성이 개선됨은 물론, p형 도핑특성도 개선되었다[7].

이 연구에서는 HVPE법으로 (001) Si기판 위에 두껍게 GaN를 heteroepitaxy 성장시키고, 구조적 특성과 광학적 특성을 조사하여 GaN 기판으로의 제작 가능성을 알아보았다. 여기서 GaN의 heteroepitaxy를 위하여 기판으로 채택한 Si은 대면적, 고품질, 저렴한 가격 및 높은 융점 등 다른 기판에 비하여 우수한 장점을 갖고 있으며, 특히 Si 기판위에 GaN를 성장하는 것은 상대적으로 Si의 에칭이 용이하기 때문에 HVPE법으로 두껍게 성장한 GaN를 Si 기판으로부터 쉽게 분리하여 GaN 기판을 제작할 수 있을 것으로 기대된다. Si 기판위에 GaN의 성장은 주로 MBE (molecular beam epitaxy) 법으로 (001) Si 위에 zincblende GaN를 성장하거나[8], MOCVD법으로 (111) Si 위에 육방정 GaN의 성장에 대하여 이루어졌다[9].

그러나, Si과 GaN 사이의 열팽창계수 차는 약 37% 정

도로서 Si 기판위에 GaN를 직접 성장하는 것은 매우 곤란하다. 따라서 Si 기판과 GaN 사이의 격자부정합과 열팽창계수의 차에 의한 응력을 최소화시키기 위한 완충층으로 3C-SiC와 AlN가 사용되었다[10,11]. Si위에 GaN를 heteroepitaxy를 하는데 있어서 완충층으로는 AlN가 같은 질화물이므로 SiC에 비하여 유리하다고 판단되며, AlN는 (111) 또는 (001) Si 기판위에 c-축으로 배향된 다결정체로 용이하게 성장할 수 있다. 특히, (111) Si 위에서는 60nm의 크기를 갖는 AlN 결정립들이 기판의 표면에 대하여 ±7° 회전하여 c-축으로 배향되고, (001) Si 위에서는 20nm의 크기를 같은 AlN 결정립들이 기판의 표면에 대하여 수직인 방향으로 c-축 배향된다[12,13].

따라서 이 연구에서는 RF 스퍼터링법으로 (001) Si 기판위에 AlN 박막을 성장하여 Si 기판과 GaN 사이의 완충층으로 사용하였다. HVPE법으로 일정 성장온도에서 성장시간을 달리하여 AlN가 성장된 Si 기판위에 GaN를 두껍게 성장시키고, 성장된 박막의 구조적 특성과 광학적 특성을 평가하였으며, 이로부터 GaN 기판의 제작 가능성을 알아보았다.

2. 실 험 방 법

RF 스퍼터링법으로 AlN 박막을 성장하기에 앞서 크기가 1.25×1.25mm인 (001) Si 기판을 유기용제로 초음파 세척한 후, $HF+H_2O$ 용액으로 표면에 형성되어 있는 산화막을 제거하고 Al 타켓에 대향되게 위치시켰다. 진공조 내부를 10^{-6}torr까지 진공 배기한 후 Ar 가스와 질소 가스를 주입하여 진공조 내부의 압력이 10^{-4}torr가 유지되도록 배기구를 조정한 후에 RF power를 인가하여 스퍼터링하였다. 최적의 조건에서 제작한 두께 500Å, 1000Å 및 2000Å의 AlN 박막을 완충층으로 사용하였다. RF 스퍼터링에 의하여 (001) Si 기판위에 성장된 AlN에 대한 X-선 회절분석 결과 c-축으로 배향된 결정성을 나타내었으며, AlN의 두께가 2000Å일 때 AFM으로 측정한 표면 거칠기의 RMS 값은 약 19Å 정도이었다[13].

GaN의 결정성장에는 수평형 대기압 HVPE장치를 사용하였다. HVPE 장치는 수평형 3단 전기로와 내경 48mm인 석영 반응관, 가스 유량 조절부 및 배기계로 구성되어 있다. 3단 전기로의 850℃로 유지된 낮은 온도 영역에 Ga을 담은 석영 보트를 위치시키고, 1030℃로 유지된 고온 영역에는 AlN가 스퍼터링된 Si 기판을 석영관 위에 얹어 위치시켰다. 반응관 내부를 10^{-4}torr 정도의 진공으로 배기한 후 전기로의 온도를 승온시키면서 600℃의 온도에서 질소와 NH_3를 주입하여 완충층인 AlN가 열적으로 분해되는 것을 방지하였다. 전기로의 온도가 성장온도에 달하면 Ga이 놓여져 있는 영역에 HCl가스를 주입하여 GaCl가 형성되도록 한 후 석영관을 통하여 질소가스와 함께 기판이 놓여져 있는 영역에 주입되도록 하였고, 별도의 석영관을 통하여 주입되는 NH_3와 함께 분해반응이 이루어져 기판위에 GaN가 성장되도록 하였다. 성장시간이 경과되면 HCl의 공급을 중지하고 질소와 NH_3를 600℃의 온도까지 공급하면서 전기로의 온도를 10℃/min의 속도로 냉각시켰다.

AlN 완충층을 형성한 (001) Si 기판위에 HVPE법으로 성장시킨 GaN의 성장시간 변화에 따른 표면 상태와 성장률을 금속현미경과 SEM으로 평가하였고, 결정성을 알아보기 위하여 X-선 회절장치를 사용하였다. GaN의 광학적 성질은 광출력이 13mW인 He-Cd 레이저를 광원으로 사용하여 20K 온도에서의 광루미네센스(PL)를 측정하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

AlN 완충층을 이용하여 Si 기판위에 성장된 GaN는 AlN의 두께가 500Å일 때는 냉각과정중에 Si 기판으로부터 GaN가 분리되었으며, 시료의 표면에 작은 회색 덩어리들이 존재하였다. 그러나, AlN 완충층의 두께가 1000, 2000Å로 도포된 Si 기판 위에 성장된 GaN는 기판으로부터 분리되지 않았으며, 기판 전체에 걸쳐 균일하게 성장되었다.

그림 1은 500Å 두께의 AlN 완충층을 갖는 Si 기판위에 성장시간을 달리하여 성장시킨 GaN의 X-선 회절도를 분말 GaN의 X-선 회절도[14]와 비교하여 나타낸 것이다. 10분 동안 성장된 GaN의 경우 32.44°, 34.64°, 36.99°, 48.31°, 57.97°의 회절각에서 육방정 구조를 갖는 GaN의 (10.0), (00.2), (10.1), (10.2), 및 (11.0)면에 의한 회절

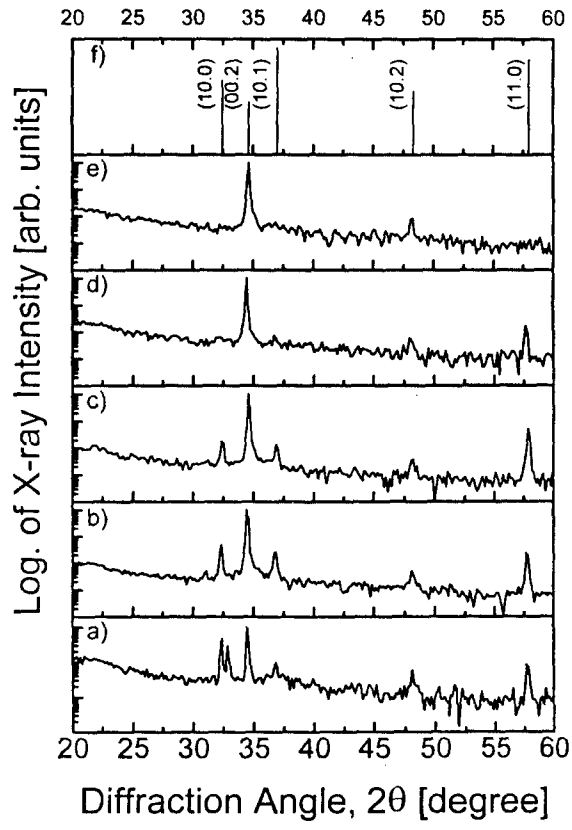


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of GaN films on (001) Si substrate with 500Å thickness of AlNbuffer layers for the growth time of (a) 10min, (b) 30min, (c) 60min, (d) 120min, and (e) 240min, respectively, and (f) is the JCPDS data for GaN.

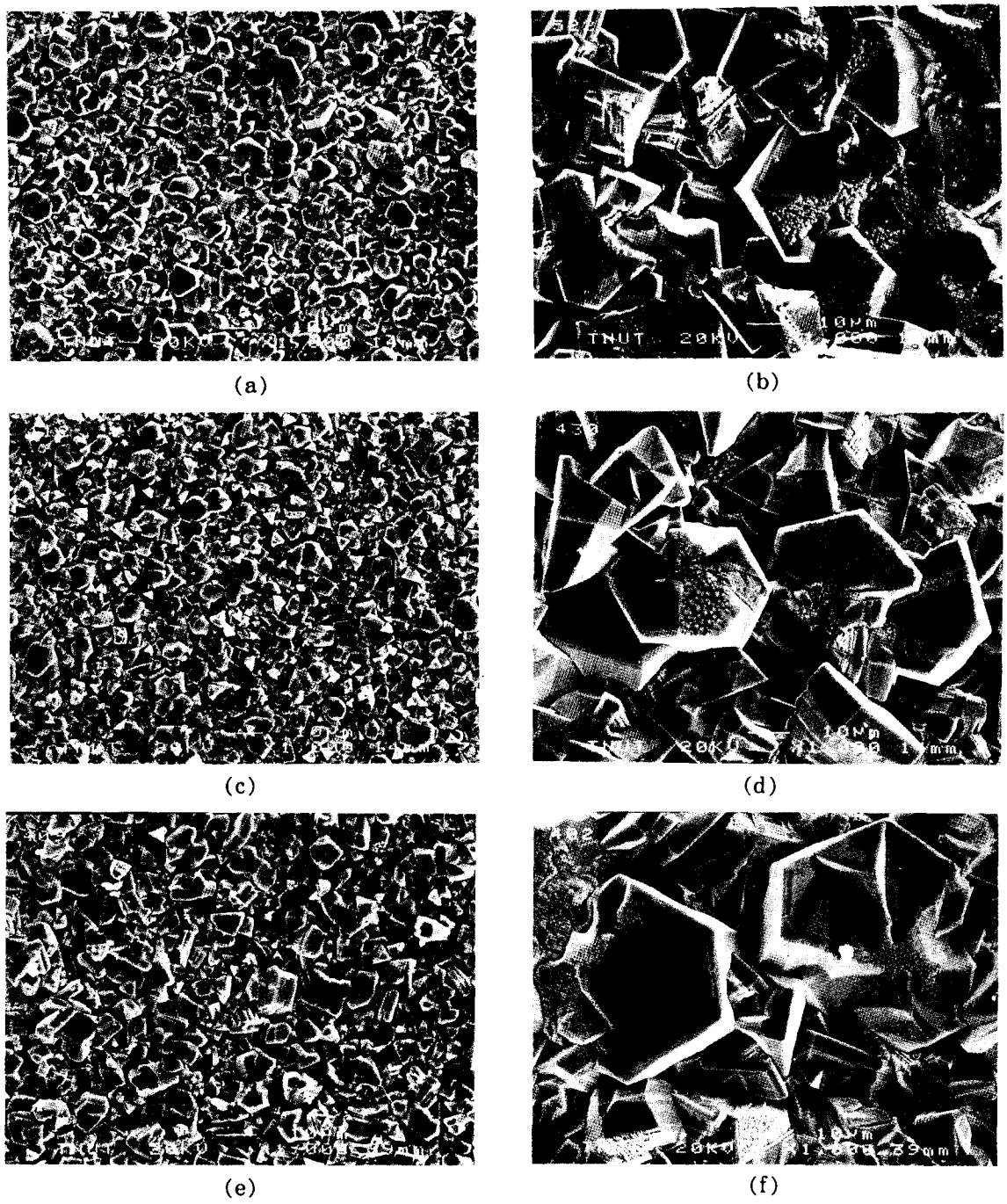


Fig. 2. Scanning electron microscope surface images for the HVPE method grown GaN films on (001) Si substrate using an AlN buffer layers with different thicknesses of (a, b) 500Å, (c, d) 1000Å and (e, f) 2000Å, respectively, for the growth time of (a, c, e) 10 min, and (b, d, f)60min, respectively.

이 나타났다.

성장시간이 증가함에 (00.2) 면의 회절 강도가 다른 면으로부터의 회절 강도에 비하여 상대적으로 증가하였으며, 성장시간이 240분에서는 (00.2) 면으로부터 강한 강도의 회절과 (10.2) 면으로부터 약한 강도의 회절이 함께 나타났다. 일반적으로 사파이어 기판위에 c-축방향으로 성장된 GaN 단결정의 경우에는 (00.2) 면에 의한 회절만이 나타난다. 그러나, AlN 완충층을 사용하여 (001) Si 기판위에 성장시킨 GaN는 성장시간이 짧을 때는 GaN 결정들이 임의의 방향으로 배향되어 GaN 분말의 X-선 회절특성을 보이고, 성장시간이 증가함에 따라 GaN의 basal plane인 c-축 방향으로의 성장이 지배적으로 이루어져 (00.2) 면에 의한 회절이 주되게 나타나지만 다결정체인 관계로 R-면에 해당하는 (10.2) 면으로부터의 회절이 함께 나타났다.

그림 2는 AlN 완충층의 두께가 각각 500Å, 1000Å 및 2000Å인 각각의 Si 기판 위에 10분과 60분 동안 성장시킨 GaN의 표면상태를 나타낸 것이다. 서로 다른 두께의 AlN 완충층 위에 10분 동안 성장된 GaN의 표면은 수 μm 정도 크기를 갖는 섬(island) 모양의 결정들이 임의의 방향으로 배향되어 표면의 거칠기가 심하였다. AlN 완충층의

두께가 500Å인 경우(그림 2-a)에는 C면이 Si 기판의 표면에 대하여 평행하게 배향된 육각형의 결정들이 주로 성장되었으며, 2000Å 두께의 AlN 완충층 위에서는(그림 2-c) 육각형 결정들이 Si 표면에 대하여 임의의 각도로 기울어진 결정들이 성장되었다.

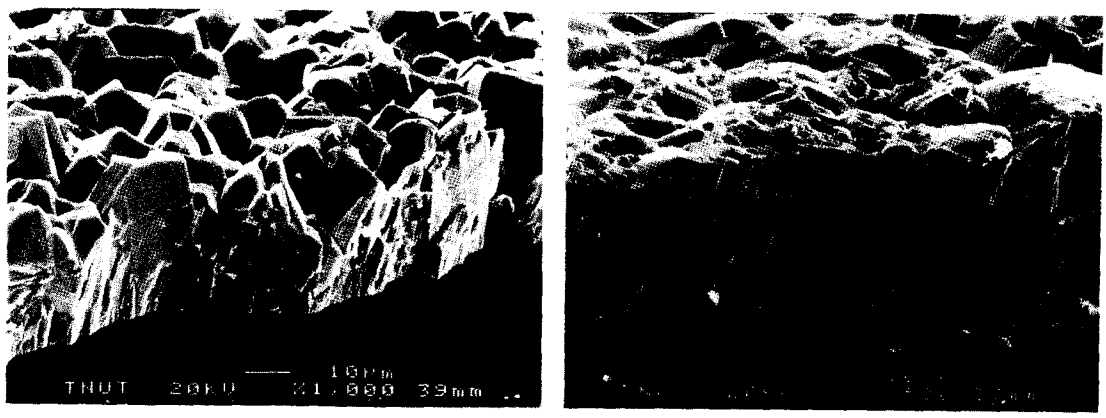
또한, 성장시간이 10분에서 60분으로 증가함에 따라 GaN 결정의 크기는 그림 2-b, d, f)에서와 같이 증가하였으며, AlN 완충층의 두께에 따라 GaN 결정의 크기가 증가하는 경향을 보였다. 성장시간이 증가함에 따라 각각의 GaN 결정들이 수평방향으로의 성장에 의하여 서로 합쳐지면서 거대화된 육각형 결정들에 의하여 평탄한 표면이 부분적으로 형성되었다. 이와 같이 수평방향으로의 성장에 의하여 합쳐진 GaN 결정들 사이에는 미쳐 합쳐지지 못한 작은 결정들이 존재하였다.

AlN 완충층의 두께가 500Å인 (001) Si 기판위에 성장된 GaN의 표면 morphology[그림 2-a)]에서 육각형의 결정은 육방정 GaN의 basal plane인 C면, 즉 (00.1)면이 Si 기판의 표면에 대하여 평행하게 성장되었음을 의미한다. 그러나 완충층의 두께가 2000Å Si 기판위에 성장된 GaN는 그림 2-e)에서와 같이 GaN의 (00.1)면이 기판의 표면에 대하여 수직인 방향 즉, 육방정의 c-축이 기판의 표면에 평행하게 혹은 임의의 각도로 기울어져 육방정의 측면에 해당하는 (10.0)면이 Si 기판 표면에 대하여 위쪽으로 향하여 성장되었다. 한편 AlN 완충층의 두께가 1000Å의 경우에는 (00.1)면이 Si 기판의 표면에 대하여 임의의 각도로 기울어져 성장된 GaN 결정들이 많이 존재하였다.

이와 같이 RF 스퍼터링법으로 성장시킨 AlN 완충층을 이용하여 HVPE법으로 Si 기판위에 성장한 GaN의 결정면 방향이 완충층의 두께에 의존하는 것은 AlN 완충층의 표면 morphology에 의한 영향을 고려할 수 있다. Si 기판위에 RF 스퍼터링법으로 성장시킨 500Å과 2000Å의 두께를 갖는 AlN 박막의 표면 morphology를 각각 그림 3에 나타내었다. 두께가 500Å인 AlN의 경우에는 그림 3-a)에서와 같이 직경이 0.03㎛ 정도인 구형의 결정립들이 응집되었으며, 2000Å의 경우에는 그림 3-b)와 같이 길이가 약 0.13㎛이고 폭이 약 0.03㎛ 정도인 유선형의 결정립들이 응집되었다. 이와 같은 AlN의 morphology를 고려하면, AlN 결정립의 형태가 원형일 때 GaN의 (00.1)면이 Si 기판의 표면에 대하여 평행하게 성장이 이루어지고, 결정립의 형태가 유선형일 때는 (00.1)면이 Si 기판의 표면에 대하여 수직 혹은 임의의 각도로 기울어져 (10.0)면이 위쪽으로 배향되어 성장되었다. 이와 같이 AlN 박막 결정의 형태에 따라 GaN의 결정구조가 달라지는 이유에 대해서는 검토 중에 있다.

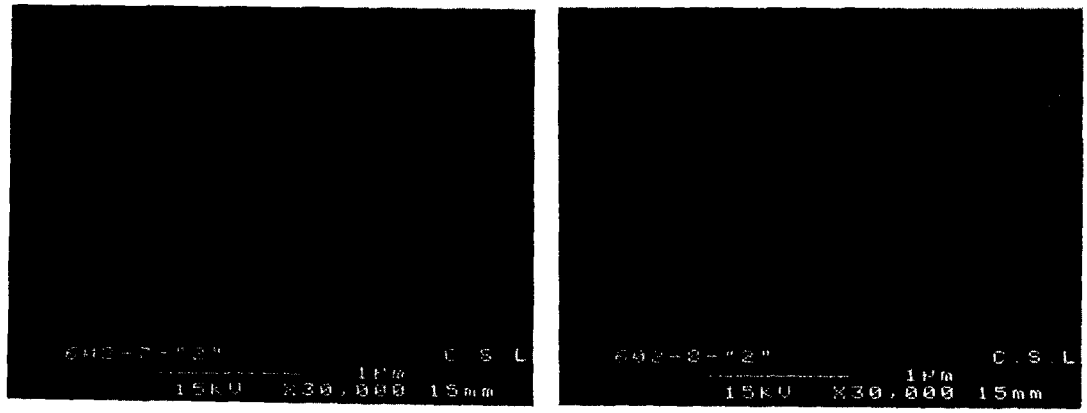
그림 4는 2000Å 두께의 AlN 완충층 위에 각각 30분과 120분 동안 성장시킨 GaN의 파단면을 표면에 대하여 60도 각도로 기울여 촬영한 것이다. 성장시간이 10분일 때에는 Si 기판의 표면에 대하여 (10.0)면이 평행한 결정과 (00.1)면이 임의의 각도로 기울어진 GaN 결정들이 불규칙하게 성장되어 표면의 요철이 매우 심하였다. 그러나, 120분 동안 성장된 GaN의 파단면에서는 서로 다른 방향으로 성장된 GaN 결정들이 3차원적인 성장보다는 수평방향으로의 2차원적 성장에 의하여 개개의 결정들이 합쳐져 어느 정도 평탄한 표면을 형성하였다.

이와 같은 사실로부터 RF 스퍼터링법으로 AlN 완충층을 도포한 Si 기판위에 HVPE법으로 120분 이상 성장시킨 GaN는 basal-plane인 (00.1)면이 Si 기판의 표면에 대하여 평행하게, 즉 c-축이 기판의 표면에 수직하게 배향된 다결정체로 성장되었음을 알 수 있다. MOCVD법으로 사파이어 (Al_2O_3) 기판위에 저온에서 성장한 AlN 완충층 위에 성장되는 GaN는 초기에는 기판의 표면에 대하여 (00.1)면이 평행한 방향으로 배향된 섬모양의 결정들이 3차원적으로 성장된 후 개개의 결정들이 수평방향으로의 2차원 성장에 의하여 합쳐지면서 평탄한 표면을 갖는 단결정체로 성장된다. 그러나 HVPE법은 MOCVD법에 비하여 결정의 성장속도가 상대적으로 빠르기 때문에 AlN 완충층을 이용하여 GaN를 성장하더라도 결정성장에 참여하는 원자들이 빠른 속도로 결합하게 되어 MOCVD법으로 성장한 GaN



(a) (b)

Fig. 3. Scanning electron microscope surface images for the AlN films on (001) Si substrate for the thickness of 500Å (a) and 2000 Å (b), respectively.



(a) (b)

Fig. 4. Tilted angle view of GaN films on (001) Si substrate with 2000Å thickness of AlN buffer layers for the growth time of (a) 10min and (b) 240min.

와는 달리 다결정체가 성장된다[15]. 그러나, AlN/Si 기판위에서 GaN의 결정성장과정은 Hiramatsu 등이 AlN/Al_2O_3 기판위에서 GaN의 성장모델로 제시한 것과 같은 방법으로 이루어지는 것을 추정할 수 있다. 즉, AlN 완충층 위에 GaN가 성장되는 초기 단계에서는 임의 방향으로 배열된 수 μm 크기의 개개 결정들이 2차원적으로 성장하기 보다는 3차원적으로 성장된다. 성장시간이 경과함에 따라 수평방향으로의 2차원적 성장에 의하여 수십 μm 크기의 결정들이 서로 합쳐지면서 c-축 방향으로 성장되어 어느 정도 평탄한 표면을 갖는 다결정체로 성장된다.

그림 5는 서로 다른 두께의 AlN 완충층 위에 성장된 GaN의 두께를 성장시간에 대하여 나타낸 것이다. 그림의 기울기로부터 구한 GaN의 성장률은 AlN 완충층의 두께가 각각 500, 1000, 2000Å일 때 65μm/hr, 74μm/hr 및 88 μm/hr 으로서 AlN의 완충층의 두께가 증가함에 따라 GaN의 성장률이 증가하는 것으로 나타났다. AlN 완충층의 두께에 따라 GaN의 성장률이 증가하는 이유에 대해서는 현재 검토 중에 있다.

그림 6은 AlN 완충층의 두께가 500Å인 Si기판 위에 30분 동안 성장시킨 두께가 약 30μm인 GaN에 대하여 20K의 온도에서 측정한 광루미네센스(PL) 스펙트럼을 나타낸 것이다. 20K의 온도에서 측정된 광루미네센스 스펙트럼은 3.3~3.5eV 영역에서 자유여기자와 구속여기자에 의한 여기자 관련 발광과 3.27eV 이하에서 불순물 준위와 관련된 피크들로 구성되었다. 이와 같은 스펙트럼의 형태는 불순물이 첨가된 GaN의 PL 스펙트럼과 매우 유사하다[16~18]. 3.482eV 부근에서 약한 강도의 피크(FX)가 관찰되었는데, 이는 Eckey 등이 50μm 두께의 GaN에 대하여 보고한 자유 여기자로부터의 발광 피크 에너지와 잘 일치한다[19]. 저온에서 GaN의 에너지 갭을 3.504eV로 하면 자유여기자의 결합에너지는 약 22meV가 된다. 이와 같은 여기자 결합에너지는 Chen 등이 wurtzite-GaN에 대한 local density approximation법으로 구한 A-엑시톤의 이론적 결합 에너지와 잘 일치한다[19]. 따라서 3.482eV 부근에서의 피크는 자유 여기자의 소멸에 의한 발광임을 알 수 있다.

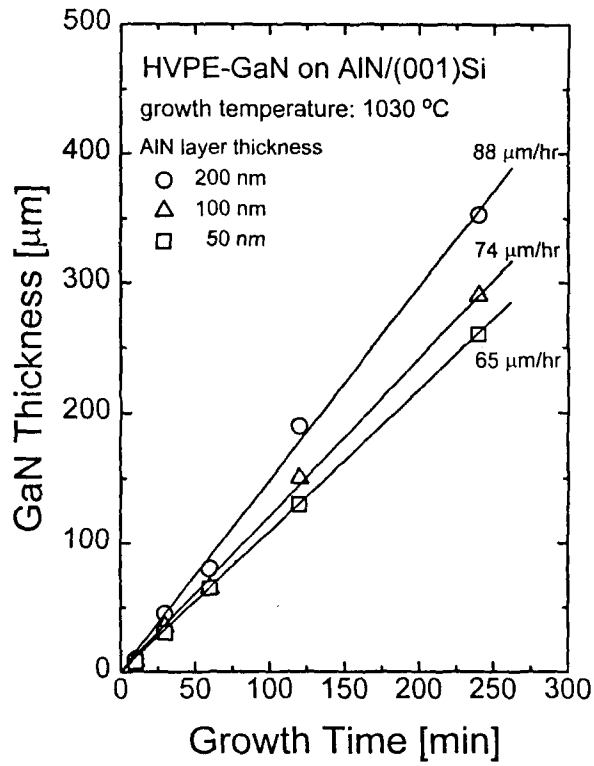


Fig. 5. The relationships between GaN thickness and growth time for the different thickness of AlN buffer layers.

3.472eV에서 반치폭이 약 9.6meV인 강한 강도의 피크가 나타났다. 많은 연구자들에 의하여 GaN에서 중성도너에 구속된 여기자 (D^0X)와 관련된 발광이 3.471 부근에서 보고되었다[16,18]. 이 발광과 관련되는 도너는 결정 결함인 질소 공격자점(vacancy)이라 여겨지고 있다. 또한 D^0X보다 약 17meV 낮은 에너지인 3.455eV에서는 중성 억셉터에 구속된 여기자(A^0X)와 관련된 재결합 발광이 나타났다. 이로부터 중성 도너에 구속된 여기자와 중성 억셉터에 구속된 여기자의 결합에너지는 각각 8meV와 25meV 임을 알 수 있으며, 이는 Chen 등이 보고한 값과 잘 일치한다[19]. 이와 같이 GaN의 에너지 갭부근에서 자유여기자와 구속여

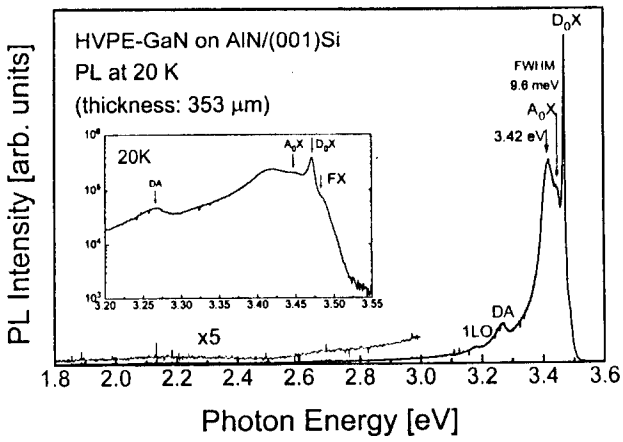


Fig. 6. Photoluminescence spectrum measured at 20K for the GaN films on (001) Si substrate with 500Å thickness of AlN buffer layers.

기자 관련 발광 피크가 나타나는 것과, D_0X 피크의 반치폭이 작게 나타난 사실로부터 HVPE법으로 Si 기판위에 성장시킨 GaN 결정의 광학적 성질은 비교적 양호한 상태의 것임을 알 수 있다.

3.27eV의 위치에서는 얕은 준위의 도너와 억셉터 쌍 사이의 재결합에 의한 피크가 나타났으며, 이보다 낮은 에너지 쪽에서 92meV의 간격을 갖고 3.182eV의 위치에서 도너-억셉터 쌍의 LO포논 복제에 의한 피크가 나타났다[19]. 통상적으로 깊은 준위의 도너-억셉터 쌍 사이의 재결합에 의하여 2.25eV 부근에서 관찰되는 황색발광은 나타나지 않았다.

한편 저온에서의 에너지 갭보다 약 80meV 낮은 에너지인 3.42eV 에서 피크가 관찰되었다. MOCVD 또는 MBE법으로 성장된 GaN에서 3.42eV 부근의 발광이 종종 관찰되었으나 그 원인에 대해서는 논란이 있으며, 대체적으로 도너로 작용하는 산소 원자에 구속된 전자와 가전도대 사이의 재결합 천이 또는 가전도대 위에 90meV 위에 형성된 Mg 억셉터와 관련된 도너-억셉터 쌍사이의 재결합천이에 의한 것이라 해석되고 있다[20, 21].

4. 결 론

이 연구에서는 RF 스퍼터링법으로 (001) Si 기판위에 AlN 완충층을 성장하고, 그 위에 HVPE법으로 GaN를 성장하였다. HVPE법에 의한 GaN의 성장률은 1030℃의 온도에서 AlN 완충층의 두께가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 500Å 두께의 AlN 위에서 성장률은 65㎛/hr이었다.

AlN 완충층위에서 GaN의 성장초기에는 수 ㎛ 크기의 결정들이 임의의 방향으로 성장된 후 성장시간이 경과함에 따라 수평방향으로의 성장에 의하여 c-축 방향으로 배향된 평탄한 표면을 갖게 되지만 결정립이 존재하는 다결정체로 성장되었다.

GaN의 에너지 갭부근에서 자유여기자와 반치폭이 좁은 구속여기자 관련 발광으로부터 AlN 완충층을 이용하여 HVPE법으로 Si 기판위에 성장시킨 GaN 결정의 광학적 성질은 비교적 양호한 상태의 것임을 알 수 있었다.

HVPE법으로 Si 기판위에 GaN를 성장함에 있어 AlN 완충층을 사용함에도 불구하고 다결정체로 성장되는 문제점을 해결한다면 Si기판은 다른 종류의 기판에 비하여 유리한 점이 많으므로 이에 대한 연구가 진행 중에 있다.

감사의 글

이 연구는 광전자반도체(주)의 연구비지원에 의하여 이루어진 것임을 밝히며, 이에 감사드립니다. 또한 GaN 성장에 직접 참여한 강현기, 박성철, 정해연 학생에게도 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. N. Mohammad, A. A. Salvador, and H. Morkoc, Proc. IEEE, 83, 1306, 1995.
2. I. Grzegory, M. Bockowski, B. Lucznik, S. Krukowski, M. Wrobleski, and S. Porowski, MRS Internet J. Nitride Semicon. Res, 1, article 20, 1996.
3. S. Porowski, M. Bockowski, B. Lucznik, M. Wroblewski, S. Krukowski, I. Grzegory, M. Lesczynski, G. Nowak, K. Pakura, and J. Baranowski, MRS. Res. Soc. Symp. Proc. 449,35, 1997.
4. K. Naniwae, S. Itoh, H. Amano, K. Itoh, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, J. Crystal Growth, 99, 381, 1990.
5. R. J. Molnar, R. Aggarwal, Z. I. Liau, E. R. Brown, and I. Melngailis, MRS. Res. Soc. Symp. Proc. 395, 189, 1996.
6. V. V. Bel'kov, V. M. Botnaryuk, L. M. Fedorov, I. I. Diakonu, V. V. Krivolapchyuk, M. P.Schglov, and Y. V. Zhilyaev, MRS. Res. Soc. Symp. Proc. 449, 343, 1997.
7. T. Detchprohm, K. Hiramatsu, N. Sawaki, and I. Akasaki, J. Crystal Growth, 137, 170, 1994.
8. T. Lei, T. Moustakas, R. J. Graham, Y. He, and S. J. Berkowitz, J. Appl. Phys, 71, 4933, 1992.
9. A. Watanabe, T. Takeuchi, K. Hirosawa, H. Amano, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, J. CrystalGrowth, 128, 391, 1993.
10. T. Takeuchi, H. Amano, K. Hiramatsu, N. Sawaki, and I. Akasaki, J. Crystal Growth, 115, 634, 1991.
11. A. Watanabe. T. Takeuchi, K. Hirosawa, H. Amano, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, J. CrystalGrowth, 128, 391, 1993.
12. K. Dovidenko, S. Oktyabrsky, and J. Narayan, J. Appl. Phys, 79, 2439, 1996.
13. S. H. Chung, B. S. Song, P. Y. Hong, D. C. Moon, and S. T. Kim, J. Kor. Phys. Soc, 30, S147 (1997).

14. JCPDS card #2-1078.
15. K. Hiramatsu, S. Itoh, H. Amano, I. Akasaki, N. Kuwano, T. Shiraishi, and K. Oki, J. Crystal Growth, 115, 628, 1991.
16. R. Dingle and M. Ilegems, Solid State Commun, 9, 175, 1971.
17. P. Bergman, G. Ying, B. Monemar, and P. O. Holtz, J. Appl. Phys, 61, 4589, 1987.
18. L. Eckey, J. C. Holst, P. Maxim, R. Heitz, A. Hoffmann, I. Broser, B. K. Meyer, C. Wetzel, E. N. Mokhov, and P. G. Baranov, Appl. Phys. Lett, 68, 415, 1996.
19. G. D. Chen, M. Smith, J. Y. Lin, H. X. Jiang, A. Salvador, B. N. Sverdlov, A. Botchkarv, and H. Morkoc, J. Appl. Phys, 79, 2675, 1996.
20. B. C. Chung and M. Gershenzon, J. Appl. Phys, 72, 651, 1992.
21. G. B. Ren, D. J. Dewsnip, D. E. Lacklison, J. W. Orton, T. S. Cheng, and C. T. Faxon, Materials Sci. and Eng, B43, 242, 1997.