

PAMBE를 이용하여 성장된 AlN 박막의 미세구조에 미치는 Al/N 비율영향

Effects of Al/N Ratio on Microstructure of AlN Films Grown by PAMBE

홍성익*, 한기평*, 백문철*, 조경익*, 윤순길**

(Sung-Ui Hong*, Gee-Pyeong Han*, Mun-Cheol Paek*, Kyung-Ik Cho*, Soon-Gil Yoon**)

Abstract

Some effects of Al/N ratio on microstructure of AlN films grown on Si(111) substrates by PAMBE were investigated. Al/N ratio was controlled by rf power of N₂ plasma source system. Al excess or N excess conditions were obtained below or above 350 W rf power, respectively. Surface roughness and morphology of AlN film grown at Al/N=1.0 showed the best result. Under Al excess condition, it was suggested that excess Al atoms which did not contribute to the growth of AlN film prevent the normal crystal growth and make abnormal growth of some columns. However, under N excess condition, it was explained that some of the excess active N source turned into gas state and then desorbed out from substrate.

Key Words : AlN, plasma assisted molecular beam epitaxy, columnar structure, desorption, droplet

1. 서론

1.9~6.2 eV의 폭넓은 에너지 밴드갭을 갖고 있는 III-V 질화물 반도체는 전기적, 물리적으로 특별한 성질을 가지고 있어 많은 연구자들의 관심을 불러 일으켜왔다. 이 가운데에서, 6.2 eV의 넓은 밴드갭 에너지를 갖고 있는 AlN는 높은 항복전압과 우수한 물리적 강도를 가지고 있어서, 고온 고전력 전자소자로서 많은 연구가 되어지고 있다.[1] 그리고, 기존의 단결정 압전기판에 비해 2 배 가까운 표면탄성파(SAW) 전파속도와 적절한 압전특성을 갖고 있어 GHz 대역의 표면탄성파 필터 소자로도 연구가 되어지고 있다.[2] 최근에는 단파장

레이저 및 내환경 전자소자의 제작을 위하여 연구되고 있는 GaN 단결정 성장의 이중접합구조 성장을 위한 완충층으로 사용되어지고 있다.[3] AlN 박막 성장을 위해서 고온에서의 안정적인 특성과 동일한 육방정계 구조 등의 장점을 갖는 Al₂O₃ 기판이 많이 사용되어지고 있지만, Al₂O₃ 기판은 가격이 비싸고, 대면적의 기판을 얻을 수 없다는 단점이 있다. 그래서, 최근에는 Al₂O₃ 기판에 비해 많은 장점을 갖고 있는 Si 기판을 이용한 연구가 증대되고 있다. 즉, Si 기판은 쉽게 p- 또는 n-type으로 제작할 수 있으며, 값이 싸고, 대면적의 기판을 얻을 수 있는 점 외에도 이미 축적된 Si 반도체 기술에 질화물 반도체를 접목[4]할 수 있다는 장점이 있기 때문에, 상업화에 적용이 된다면 아주 커다란 가치를 갖게 된다. AlN 박막의 성장에는 일반적으로 MOCVD[5], 스퍼터[6,7], 그리고 MBE[8] 등의 성장기술이 사용되어 진다. 이 중에서 *in-situ* 측정이 가능한 MBE는 AlN 박막의 결정성을 제어하기에 유리한 특성이 있다.

* : 한국전자통신연구원 정보저장소자팀
(대전광역시 가정동 161,
Fax : 042-860-5202
E-mail : hse61924@etri.re.kr)

** : 충남대학교 재료공학과 세라믹박막실
2001년 9월 17일 접수, 2001년 10월 15일 1차심사완료
2001년 11월 12일 2차심사완료

MBE로 AlN 박막을 성장시킬 때 중요하게 취급되는 변수는 성장온도와 III/V(Al/N)의 비율이며, 성장온도에 따른 AlN 박막의 미세구조에 대해서는 지난 연구에서 이미 수행하였다.[9] 따라서, 본 연구에서는 플라즈마 공급시스템을 부착한 PAMBE를 이용하여 Si(111) 기판 위에 AlN 박막을 성장시키고, 성장된 박막의 Al/N의 비율에 따른 미세구조 변화에 대해 연구하고자 하였다. 이러한 비율의 변화에 따라 AlN 박막의 결정성과 표면형상 특성은 많이 영향을 받는다. 이 값이 1.0에 근접할수록 양질의 박막이 얻어지며, Al 및 N 과잉조건인 경우에 각각의 미세구조 특성이 변하는 것으로 알려져 있다.[10-12] 따라서, 이러한 미세구조의 변화를 Al 및 N 과잉인 경우에 대해서 Al/N=1.0인 경우와 비교하여 그 차이를 분석하고, 이러한 원인에 대해 고찰하고자 하였다.

2. 실험

본 실험에 사용된 MBE 장비는 RIBER사에서 제작된 MBE 45 모델을 기본으로 Al 원료를 위하여 표준형 도가니 셀(effusion cell)을 사용하였고, 기체원료인 N₂ 가스를 분해하기 위해 SVTA사에서 제작된 rf 플라즈마 공급 시스템을 덧붙인 것이다. 그림 1은 본 실험에 사용된 rf 플라즈마 공급 시스템에 대해 개략적으로 나타낸 것이다. 기체상태로 공급된 N₂ 가스는 플라즈마 발생영역에서 분해가 되어 성장 챔버 내로 유입되어진다. 플라즈마 발생장치는 13.56 MHz의 rf를 사용하며, 600 W까지 사용이 가능하다. rf 정합은 가변콘덴서로써 reflection power를 1% 이하로 조절 할 수 있다. N₂ 가스의 유량은 MKC사의 MFC를 사용하여 일정하게 유지시킴으로써 안정된 플라즈마를 형성하도록 하였다. 성장 챔버는 터보 분자펌프, 이온 펌프, 그리고 티타늄 승화펌프를 사용하여 초기진공을 4×10^{-11} torr로 유지하였고, 장착-잠금식(load-lock) 챔버는 터보 분자펌프로써 진공도를 8×10^{-8} torr로 유지하였다. 사용된 기판은 직경 5 inch(125 mm)의 p-type Si(111) 웨이퍼이다. 장착-잠금식 챔버를 통하여 성장 챔버로 장입된 Si 기판은 850 °C에서 30 분 동안 열처리를 하여 기판의 표면에 존재하는 자연산화막을 제거하였다. 자연산화막의 제거는 RHEED를 이용하여 Si 표면의 7×7 구조를 관찰함으로써 확인하였다.

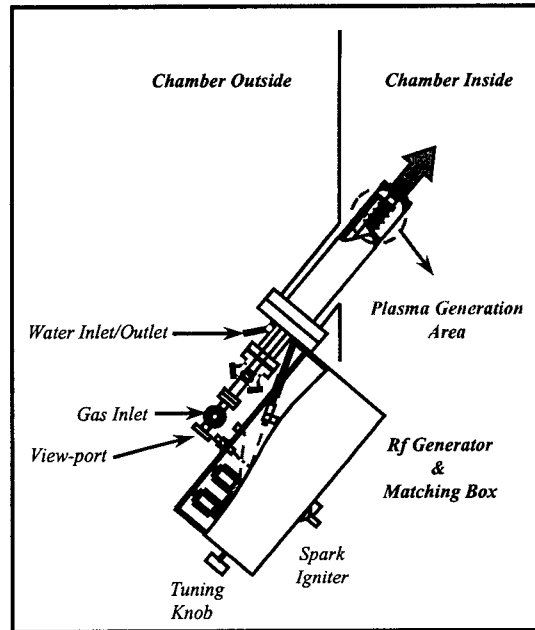


그림 1. rf 플라즈마 공급시스템 개략도.

Fig. 1. Schematic diagram of rf plasma source system.

AlN 박막의 성장은 성장온도, Al 셀의 온도와 성장시간을 각각 850 °C, 1150 °C와 30 분으로 고정시키고, N의 공급을 위한 rf power만을 변화시켜가며 수행하였다. N 원료의 공급은 N₂ 기체의 유량을 1.5 sccm으로 고정시키고, rf power를 250~450 W까지 50 W씩 증가시킴으로써 변화시켰다. AlN 박막을 성장하기 직전에 Al 원료를 약 10 초 정도 Si 기판의 표면에 증착 하였다. 이렇게 증착된 Al 초박막은 Si 표면에서 N 플라즈마에 의해서 발생하는 SiN의 생성을 억제해 주는 효과가 있는데, SiN가 생성될 경우 양질의 AlN 성장을 방해하는 것으로 보고되어지고 있다.[10, 13] 성장된 AlN 박막에서 Al/N 비를 측정하기 위하여 RBS(Rutherford backscattering spectroscopy)로써 정량분석을 하였고, SEM(scanning electron microscope)과 AFM(atomic force microscopy)을 이용하여 AlN 박막의 표면 형상을 관찰 및 표면거칠기를 분석하였으며, XRD(X-ray diffractometer)를 이용하여 성장된 AlN 박막의 결정성을 분석하였다.

3. 분석 결과

위의 조건으로 성장된 시편의 표면 상태를 알아보기 위해, AFM을 이용하여 rms(root mean square) 표면거칠기값(roughness)을 측정하였고, 그 결과를 그림 2에 나타내었다.

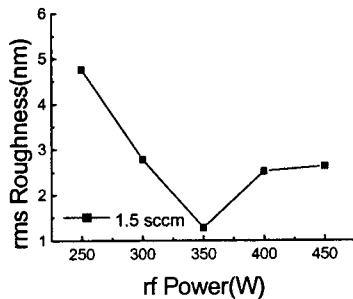


그림 2. rf power에 따라 성장된 AlN박막의 표면 거칠기값.

Fig. 2. Rms surface roughness of AlN films grown at various rf power.

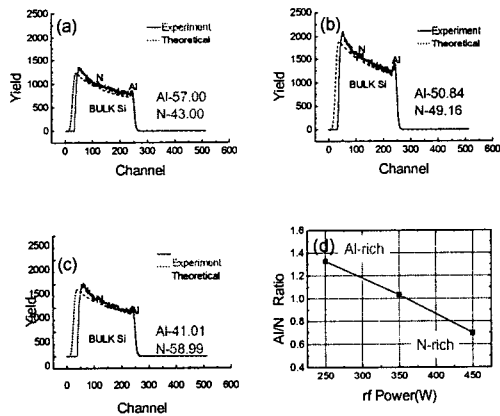


그림 3. (a) 250, (b) 350, 그리고 (c) 450 W rf power에서 성장한 AlN박막의 Al/N 비율에 대한 RBS 정량분석. (d)는 RBS결과 그래프.

Fig. 3. RBS quantitative analysis of Al/N ratio in AlN films grown at various rf power. (a) 250, (b) 350, and (c) 450 W rf power. (d) is a Al/N ratio graph according to rf power.

그림 2에서 보면 350 W에서 표면 거칠기 값이 제일 낮게 나타났다. 이 rf power값을 경계로 하여 rf power가 커지거나 적어짐에 따라 표면 거칠기는 증가하여 표면의 요철이 더욱 심해지는 것을 알 수 있다.

본 실험에서 선정된 변수는 rf power 뿐이므로 rf power가 증가할수록 원료기체인 N₂의 분해가 활발해지고, [11] 성장에 참여하는 활성화 N의 양이 상대적으로 증가할 것으로 생각된다. 이를 확인하기 위하여 각각의 rf power에서 성장된 AlN 박막에 대해 Al과 N 원자의 성분비율을 RBS 정량분석으로 측정하였고, 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

RBS 분석에서는 실제 측정값과 시물레이션에 의한 계산치를 비교하여 분석결과의 정확도를 증가시켰다. 표면거칠기가 가장 적은 350 W에서 Al/N의 비율이 1.03으로 1.0에 거의 접근하였다. 그리고, 그 이하의 rf power에서는 Al의 양이, 그 이상에서는 N이 상대적으로 많은 것으로 분석되었다. 즉, 300 W이하에서는 Al 과잉(Al-rich)의 조건

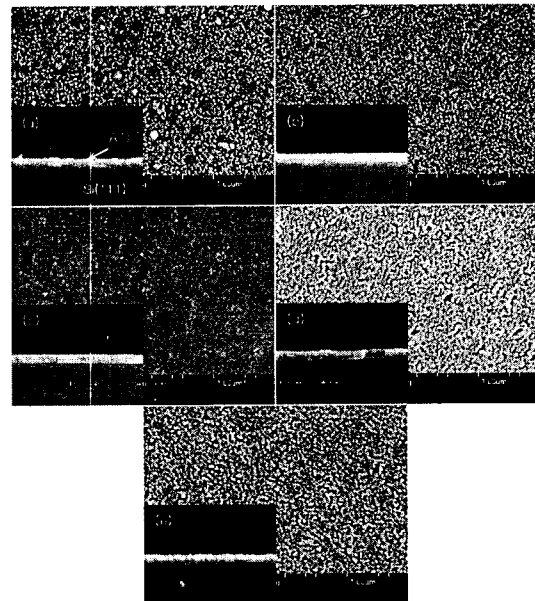


그림 4. (a) 250, (b) 300, (c) 350, (d) 400, 그리고 (e) 450 W의 rf power에서 성장한 AlN 박막의 SEM 표면사진과 단면사진.

Fig. 4. SEM surface and cross section images of AlN films grown at various rf power. (a) 250, (b) 300, (c) 350, (d) 400, and (e) 450 W.

이, 400 W 이상에서는 N 과잉(N-rich)의 조건이 된 것으로 나타났다. 그러나, 결과적으로 Al 과잉 또는 N 과잉인 경우에는 모두 표면형상의 요철이 심해지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 표면 거칠기에 대하여 수치적인 분석 이외에 형상을 관찰하기 위하여 SEM 분석을 수행하였다. 다음의 그림 4는 각각의 rf power에서 성장한 AlN 박막의 형상을 관찰한 것이다.

AlN 박막은 각 표면사진에 삽입된 단면사진과 표면사진에서 볼 수 있듯이, 주상구조의 형태로 성장한 것을 알 수 있다. 표면사진에서는 그림 2에서 분석한 AFM의 표면거칠기 결과와 마찬가지로 Al/N 비가 1.0에 근접한 350 W의 경우에 표면형태가 가장 매끄럽고, 기둥(column) 사이의 공간이 거의 없이 치밀하게 성장한 형상을 보이고 있다. 300 W 이하의 Al 과잉인 경우에는 기둥의 굵기가 가늘어지고, 고른 크기의 기둥 사이에 불규칙적으로 큰 입자형태의 모양이 자리하고 있으며, 그 정도는 250 W에서 더욱 심해지고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 표면을 거칠게 한 주요 원인이 되며, 과잉으로 존재하는 Al의 양과 관련이 있는 것으로 판단된다. 반면에 rf power가 400 W 이상이 되어 N의 양이 상대적으로 많아지게 되면, Al 과잉의 경우에서 보였던 크고 불룩한 형태가 사라짐이 관찰된다. 기둥의 굵기와 높이는 Al/N=1.0의 경우와 거의 같으나, 각 기둥 간에 공극이 커지는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 rf power가 높을수록, 즉 N 과잉이 심해질수록 심화되며, 표면의 거칠기가 증가하는 것으로 나타났다.

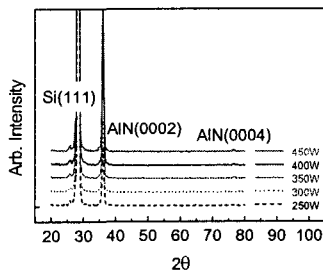


그림 5. rf power에 따라 성장된 AlN박막의 XRD 패턴.

Fig. 5. XRD patterns of AlN films grown at various rf power.

이러한 시편들의 결정상태를 살펴보기 위해 XRD 분석을 수행하였고, 그 결과를 그림 5에 나

타내었다. 그림에서 보면 각 경우에 AlN의 피크는 (0002)와 (0004)외에는 관찰되지 않으므로 wurtzite 구조의 AlN 결정이 Si 기판과 수직방향으로 c-축 우선성장 되었음을 알 수 있다. 특히, 350 W 이상에서 AlN(0004) 피크가 발생하고 있어 N 과잉조건이 Al 과잉조건에 비해 결정성이 더 좋아짐을 나타내고 있다.

4. 고찰

위의 분석결과로부터, Al과 N의 상대적인 양의 차이에 의해서 AlN 박막의 미세구조가 변화하는 현상에 대해서 다음과 같이 설명되어진다. 먼저, M. A. Sanchez-Garcia 등은 GaN와 AlN의 성장실험으로부터 850 °C의 온도에서는 기판 표면에 액상으로서 존재하는 Al은 Ga에 비해서 거의 탈착이 되지 않는다고 보고하였다.[10] 따라서, 본 실험조건에서는 Al 원료의 공급량을 고정하였으므로 Si 기판에 도달되는 Al의 양은 거의 고정되어져 있다고 볼 수 있다. 결국 rf 플라즈마에 의해 활성화된 N양에 따라 Al/N의 값이 변하게 된다. 그러므로, 위의 RBS 실험결과로부터 rf power가 350 W일 때에는 Al/N 비율이 거의 1.0에 근접하므로 350 W 보다 낮은 rf power에서는 Al이 많은 Al 과잉조건이 되며, 전체 박막의 성장속도는 N의 양에 의해 결정되는 N-제한성장(N-limited growth) 조건이 된다. 마찬가지로 350 W 보다 높은 rf power에서는 N 과잉조건으로 Al-제한성장(Al-limited growth) 조건이 된다.

Al 과잉(N-제한성장) 조건에서는 공급된 활성화 N은 바로 AlN 성장에 기여하게 되어서, 활성화 N의 공급량이 전체박막의 성장속도를 결정하게 된다. 그러므로, 일정한 양의 Al이 공급되더라도 박막 성장에 기여하는 Al의 양은 N의 양에 의해 제한을 받게 되며, 결과적으로 주상구조에서 기둥의 굵기와 높이가 활발히 성장하지 못하게 된다. 따라서, 박막의 두께가 250 W의 rf power에서 가장 작게 나타난 것으로 보인다. 성장에 기여하지 못한 잉여 Al이 존재하게 되는데, 이에 대해서 G. Ferro 등[12]은 AlN 성장에 기여하지 못하고 탈착하지 못한 Al의 축적에 의해 표면에 Al금속 입자가 형성된다고 보고하였고, S. H. Cho 등[14]은 입계와 전위와 같이 에너지가 불안정한 곳에서 Ga이 과잉 함유된 GaN가 성장된다고 하였다. 결국, 과잉 함유된 Al(Ga)에 의해 표면 형상이 나빠지게 되며, 이

로 인해 표면거칠기가 증가되는 것으로 보고하였다. 그러나, XRD 분석결과에서 보듯이 Al 금속의 결정구조는 관찰되지 않았으며, 기타 분석결과에서도 Al 금속의 존재증거가 발견되지 않았다. 그리고, 250 W의 경우에는 이러한 현상이 심화하여 전체 박막성장이 방해받을 것으로 보인다. 또한, 성장된 박막에서 주상구조의 결정성에도 영향을 미치는데, c-축 우선성장의 형태는 유지하고 있으나, AlN(0004) 피크가 나타나지 않는다. 그리고, AlN(0002) 피크에 대한 상대적인 Si(111) 피크의 높이가 비교적 높은 것으로 분석되어 상대적으로 낮은 결정성을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 위의 실험분석 결과를 종합하여 볼 때, Al 원자의 탈착이 쉽게 일어나지 않는다는 전제 하에서 AlN 결정을 형성하지 못한 Al 원자가 전체 주상구조의 성장을 방해하며, 또한 불규칙한 비정상적 성장을 야기시키는 것으로 생각된다. 즉, 잉여 Al은 탈착되지 않은 채 제 2차 상(second phase)를 형성하지도 않으며, 박막 내에 그대로 존재하는 것으로 보아 AlN 결정의 점 결합 형태로 있거나, 결정결합 계면에 미세하게 응집하고 있을 것으로 판단된다. 이것은 잉여 Al이 없을 때, 즉 350 W rf power 이상인 경우에 주상구조의 성장이 이루어져 박막의 두께가 거의 일정하며, 불규칙 비정상 성장 현상도 나타나지 않는 것으로 보아 알 수 있다.

한편, N 과잉(Al-제한성장) 조건에 대한 미세구조의 변화에 관해서는 아직 구체적으로 설명되어진 예가 없으며, GaN의 경우에서 N-제한성장 조건에 비해 PL 특성이 우수하여 각 주상구조의 결정성이 우수한 것으로 보고된 바 있다.[10] 본 실험결과에서도 결정성 및 표면거칠기가 비교적 N-제한성장 조건에 비해 상대적으로 좋게 나타났다. 다만, Al/N=1.0인 경우와 비교해 볼 때, 주상구조의 기둥간격이 넓으며 기둥의 높이가 불균일한 것으로 분석되었다. 이러한 현상에 대해서는 전반적으로 성장 분위기가 과잉의 활성화 N에 의한 것으로 설명된다. 즉, 고정된 Al의 양에 의해 성장된 주상구조의 높이 및 크기는 거의 일정하며, 과잉 공급된 활성화 N의 일부는 기체화하여 탈착하는 것으로 보인다. MBE 챔버는 매우 높은 진공도를 유지하고 있으므로 높은 분압을 가진 N₂ 기체는 쉽게 탈착될 수 있다. 이것은 GaN를 MBE에서 성장할 경우에 N-동공(vacancy)의 문제점이 항상 존재하는 것[15]으로도 알 수 있다. 본 실험에서도 높은 rf power에서는 박막의 성장에 참여하고 남은 과잉으로 공급된 활성화 N의 일부가 기체화되

는 것을 고려할 수 있다. 따라서, 이러한 N₂ 기체가 탈착되고 난 이후의 공간이 주상구조의 기둥 사이에 그대로 존재하는 것으로 판단된다. 이 과정에서 각 기둥간의 높이와 굵기는 균일도가 저하하게 되고, 기둥간의 공간도 증가하게 되어 결과적으로 표면거칠기가 다시 증가된 원인으로 판단된다. 즉, 과잉 공급된 활성화 N의 일부는 AlN 결정 내의 점 결합 형태로 존재하고, 일부는 기체화하여 탈착되는데, 이 과정에서 AlN 박막의 결정성은 저하되지 않으며, c-축 우선성장의 형태를 가지는 것으로 생각된다.

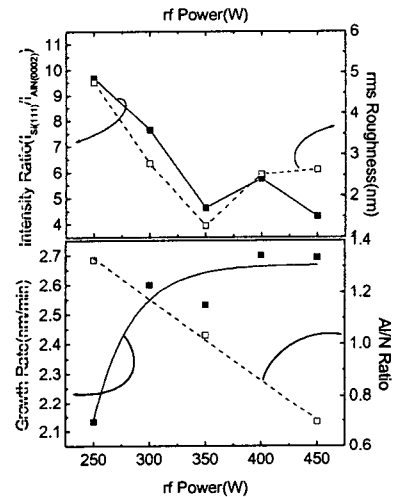


그림 6. rf power에 따른 AlN의 Al/N 비율, 성장률, XRD 피크 비율, 그리고 표면거칠기 값.

Fig. 6. Al/N ratio, growth rate, XRD peak ratio, and rms surface roughness of AlN grown at various rf power.

그림 6에는 AFM, RBS, SEM, 그리고 XRD 분석의 결과를 종합적으로 정리한 것이다. 성장속도는 250 W의 Al 과잉의 경우에 낮게 나타났으나, 350 W 이후에는 거의 일정하게 유지되었고, XRD에서의 Si(111)/AlN(0002) 피크의 상대적인 비율 구하여 결정성을 표현하였을 때에도 표면형상과 결정성이 비슷한 경향을 나타내었다.

결과적으로, Al과 N의 상대적인 양에 의해서 AlN가 성장되는 양상이 서로 다르게 되고, 미세구

조 특성에 차이가 발생하였으며, Al/N=1.0일 때에 가장 좋은 AlN 박막을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

PAMBE를 이용하여 Si(111) 기판 위에 성장된 AlN 박막의 미세구조 특성에 대해 Al/N 비율에 따른 변화를 연구하였다. N₂ 플라즈마 공급시스템의 rf power를 변수로 하여 활성화 N의 양을 조절하여 Al/N 비율을 변화시켰으며, 300 W 이하의 낮은 rf power에서는 Al 과잉이, 400 W 이상의 높은 rf 파워에서는 N 과잉의 조건이 형성되었다. 각각의 경우 미세구조는 Al/N=1.0인 경우에 비해 표면거칠기, 결정성, 그리고 미세형상 등이 좋지 않은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 Al 과잉의 경우, AlN 박막성장에 참여하지 못하고 남은 잉여 Al이 박막성장을 저해하고, 주상구조의 기둥에 대해 불규칙한 비정상 성장을 야기시키는 것으로 판단되었다. 그리고, N 과잉인 경우에는 박막성장에 참여하고 남은 잉여 활성화 N이 일부는 점결함 형태로 잔류하지만, 일부는 기체화하여 탈착함으로써 주상구조에서 기둥간의 간극을 형성하는 것으로 설명되었다. 결과적으로 가장 우수한 AlN 박막의 형성은 Al/N=1.0일 때인 것으로 나타났다.

참고 문헌

- [1] B. Monemar, and G. Pozina, "Group III-nitride based hetero and quantum structure", Prog. Quantu. Electron., 24, pp. 239-290, 2000.
- [2] F. Engelmarm, G. Fucntes, I. V. Katardjiev, A. Harsta, U. Smith, and S. Berg, "Synthesis of highly oriented piezoelectric AlN films by reactive sputter deposition", J. Vac. Sci. Technol., A 18(4), pp. 1609-1612, 2000.
- [3] T. Ito, K. Ohtuska, K. Kuwahara, M. Sumiya, Y. Toyoda, and S. Fuke, "Effect of AlN buffer layer deposition conditions on the properties of GaN layer", J. Cryst. Growth, 205, pp. 20-24, 1999.
- [4] V. Lebedev, J. Jinschek, U. Kaiser, B. Schroter, and W. Richter, "Epitaxial relationship in the AlN/Si(100) heterosystem", Appl. Phys. Lett., 76, pp. 2029-2031, 2000.
- [5] M. A. Khan, Q. Chen, C. J. Sun, M. Shur, and B. Gelmont, "Two-dimensional electron gas in GaN-AlGaN heterostructures deposited using trimethylamine-alane as the aluminum source in low pressure metalorganic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett., 75, pp. 1429-1431, 1999.
- [6] 김경석, 황영한, 김희대, 남창우, 이규철, "RF 마그네트론 스퍼터링으로 증착한 AlN 박막의 구조적 특성과 전기적 특성", 전기전자재료학회논문지, 12권 10호, pp. 887-895, 1999.
- [7] 김형택, 황지현, 정황희, 최성을, 박인호, 권명희, "반응성 스퍼터링에 의한 AlN 박막의 증착 및 특성", 전기전자재료학회논문지, 12권 8호, pp. 672-678, 1999.
- [8] A. Bourret, A. Barski, J. L. Rouviere, G. Renaud, and A. Barbier, "Growth of aluminum nitride on (111) silicon : Microstructure and interface sturcture", J. Appl. Phys., 83, pp. 2003-2009, 1998.
- [9] 홍성의, 한기평, 백문철, 조경익, 윤순길, "실리콘 기판위에 플라즈마 분자선 에피택시를 이용하여 성장된 질화알루미늄 박막의 특성분석", 전기전자재료학회논문지, 13권 10호, pp. 828-833, 2000.
- [10] M. A. Sanchez-Garcia, E. Calleja, E. Monroy, F. J. Sanchez, F. Calle, E. Munoz, and R. Beresford, "The effect of the III/V ratio and substrate temperature on the morphology and properties of GaN- and AlN-layers grown by molecular beam epitaxy on Si(111)", J. Cryst. Growth, 183, pp. 23-30, 1998.
- [11] H. P. D. Schenk, U. Kaiser, G. D. Kipshidze, A. Fissel, J. KrauBlich, H. Hobert, J. Schulze, and W. Richter, "Growth of atomically smooth AlN films with a 5:4 coincidence interface on Si(111) by MBE", Mater. Sci. Engi., B 59, pp. 84-87, 1999.
- [12] G. Ferro, H. Okumura, T. Ide, and S.

- Yoshida, "RHEED monitoring of AlN epitaxial growth by plasma-assisted molecular beam epitaxy", *J. Cryst. Growth*, 210, pp. 429-434, 2000.
- [13] U. Kaiser, P. D. Brown, I. Khodos, C. J. Humphreys, H. P. D. Schenk, and W. Richter, "Effect of growth condition on the structure of 2H-AlN films deposited on Si(111) by plasma-assisted molecular beam epitaxy", *J. Mater. Res.*, 14, pp. 2036-2042, 1999.
- [14] S. H. Cho, U. Tanaka, T. Maruyama, K. Akimoto, H. Okumura, and S. Yoshida, "Cathodoluminescence of GaN films grown under Ga and N rich conditions by radio-frequency-molecular beam epitaxy", *J. Cryst. Growth*, 175/176, pp. 112-116, 1997.
- [15] J. Karpinsky, J. Jun, and S. Porowski, "Equilibrium pressure of N₂ over GaN and high pressure solution growth of GaN", *J. Cryst. Growth*, 66, pp. 1-10, 1984.