Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology
Vol. 30, No. 3 (2020) 96-102
https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2020.30.3.096

p-ISSN 1225-1429
e-ISSN 2234-5078

Properties of AlN epilayer grown on 6H-SiC substrate by mixed-source HVPE method

Jung Hyun Park, Kyoung Hwa Kim, Injun Jeon*, Hyung Soo Ahn†, Min Yang, Sam Nyung Yi, Chae Ryong Cho* and Suck-Whan Kim**

Department of Electronic Material Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea
**Department of Nanoenergy Engineering and Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Busan 46241, Korea*
***Department of Physics, Andong National University, Andong 36729, Korea*

(Received May 25, 2020)
(Revised June 2, 2020)
(Accepted June 8, 2020)

Abstract In this paper, AlN epilayers on 6H-SiC (0001) substrate are grown by mixed source hydride vapor phase epitaxy (MS-HVPE). AlN epilayer of 0.5 μm thickness was obtained with a growth rate of 5 nm per hour. The surface of AlN epilayer grown on 6H-SiC (0001) substrate was investigated by field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Dislocation density was considered through HR-XRD and related calculations. A fine crystalline AlN epilayer with screw dislocation density of 1.4×10^9 cm^{-2} and edge dislocation density of 3.8×10^9 cm^{-2} was confirmed. The AlN epilayer on 6H-SiC (0001) substrate grown by using the mixed source HVPE method could be applied to power devices.

Key words 6H-SiC, AlN epilayer, Mixed-source, HVPE method, Power semiconductor device

6H-SiC 기판 위에 혼합소스 HVPE 방법으로 성장된 AlN 에피층 특성

박정현, 김경화, 전인준*, 안형수†, 양민, 이삼녕, 조채용*, 김석환**

한국해양대학교 전자소재공학과, 부산, 49112
*부산대학교 나노에너지공학과 나노융합기술과, 부산, 46241
**안동대학교 물리학과, 안동, 36729

(2020년 5월 25일 접수)
(2020년 6월 2일 심사완료)
(2020년 6월 8일 게재확정)

요 약 본 논문에서는 6H-SiC (0001) 기판 위에 AlN 에피층을 혼합 소스 수소화물 기상 에피택시 방법에 의해 성장하였다. 시간당 5 nm의 성장률로 0.5 μm 두께의 AlN 에피층을 얻었다. FE-SEM과 EDS 결과를 통해 6H-SiC (0001) 기판 위에 성장된 AlN 에피층 표면을 조사하였다. HR-XRD와 계산식을 통해 전위 밀도를 예측하였다. 1.4×10^9 cm^{-2}의 나사 전위 밀도와 3.8×10^9 cm^{-2}의 칼날 전위 밀도를 가지는 우수한 결정질의 AlN 에피층을 확인하였다. 혼합소스 HVPE 방법에 의해 성장된 6H-SiC 기판 위의 AlN 에피층은 전력소자 등에 응용이 가능할 것으로 판단된다.

1. 서 론

GaN, InGaN 그리고 AlGaN와 같은 질화물 계열의 반도체 중 AlN는 6.2 eV의 넓은 에너지 밴드갭을 가진 직접천이형 반도체 물질로 높은 열전도도와 전기적 특성을 가지고 있어 자외선(ultraviolet ray) 영역의 광소자(optical devices)를 비롯하여 고출력 전자소자(high power electronic devices) 제작의 핵심 재료로 주목받고 있다[1,2]. 특히 전력 반도체 소자(power semiconductor devices)로는 높은 열적 내구성에 의해 SiC 기반의 소자가 가장 안정화된 재료로 활용되고 있으며, 이 중 SiC와 함께 질화물 반도체인 AlN의 결합은 새로운 차세대 전력 반도체 소자로서 매우 중요한 연구 분야이며, 응용 수요가 급속히 늘어날 것으로 전망된다[3-5]. 전력 반도체 소자의 응용 분야 중 전기 에너지 생산과 저장 그리고 전송 분야에서의 적용은 에너지 사용의 효율 향상이 매우 중요한 요소

†Corresponding author
E-mail: ahnhs@kmou.ac.kr

www.kci.go.kr

라 할 수 있다. 생산된 전기를 저장하고 변환하는 효율을 향상시켜 에너지 손실 문제를 해결하기 위한 고효율의 전력 반도체 소자 분야의 중요성은 세계적으로 부각되고 있다. SiC와 같이 고전압에 손상되지 않는 소자 재료와 더불어 AlN와 같은 높은 주파수(약 10^7 Hz 영역)를 낼 수 있는 소재를 이용한 전력반도체의 연구는 에너지 효율성을 높이는 매우 중요한 분야라고 판단된다. SiC, GaN, Ga_2O_3 그리고 AlN와 같은 새로운 소재들은 Si과 같이 매우 안정된 공정에 기반을 두며, 3 eV 이상의 큰 에너지 밴드를 가지고 높은 스위칭 주파수 능력, 항복전압 그리고 열전도율을 가져 고온 환경의 초고전력에서 사용 가능한 전력 변환 장치의 핵심 재료로 응용이 가능하다. 또한 넓은 에너지 밴드갭(wide band gap, WBG)을 가진 반도체 재료의 융합은 차세대 고효율의 전력 반도체 소자 분야에 있어 반드시 필요할 것으로 생각된다.

혼합소스 HVPE(mixed-source hydride vapor phase epitaxy, MS-HVPE) 방법은 성장하고자 하는 재료를 흑연 보트에 혼합하여 사용하는 방법으로 성장하는 물질의 재료 종류와 무관하게 간단한 구조의 장비로 공정이 가능하다. 일반적인 HVPE(hydride vapor phase epitaxy) 방법은 화합물 반도체 에피층의 가장 오래된 성장 방법 중 하나로, 3족 원소로써 염화물(chloride)을 사용하는데, GaN 성장의 경우 $GaCl_3$를, AlN의 경우 $AlCl_3$ 나 AlCl을 사용하여, 성장영역에서 NH_3와의 반응으로 에피층을 성장시키는 원리이다. HVPE 방법으로 도핑된 AlGaN 에피층을 성장하기 위해서는 Al 소스와 Ga 소스 그리고 도핑 소스 영역을 따로 만들어야 하기 때문에 장비가 복잡하고, 에피층의 종류에 따라 소스 영역을 여러 개로 만들어야 하는 단점이 있다. 그러나 상용화된 유기 금속 화학 기상 증착(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 방법과 비교하여 성장속도가 매우 빨라 수십~수백 마이크로미터(μm)의 두께를 갖는 후막층을 쉽게 성장시킬 수 있다는 장점이 있다. 본 논문의 혼합소스 HVPE 방법은 AlGaN 등의 3원소 화합물이나 n형, p형 질화물 반도체 에피층 성장의 경우 도펀트와 에피층 재료를 흑연 보트 내에 혼합하여 사용하기 때문에 장비가 간단하며, 혼합된 금속 원료 간의 원자 분율(atomic fraction)을 변화시키거나 소스영역의 온도를 변화시킴으로써 조성비나 도핑 농도 조절에 용이하다[6-16].

본 논문에서는 전력 반도체 소자 분야에서 매우 유용한 6H-SiC (0001) 기판 위에 AlN를 직접 성장한 후 그 특성을 분석하였다. 혼합소스 HVPE 방법은 성장하고자 하는 금속 원료를 하나의 보트에 혼합하여 사용하는 HVPE 방식으로써 간단한 구조를 사용하여 질화물 에피층을 성장할 수 있다는 장점이 있다. 혼합소스 HVPE 장비는 소스영역과 성장영역으로 구성되어 있으며, 각 영역 별 온도는 독립적으로 950°C부터 최대 1200°C까지 제어할 수 있다. 최적의 AlN 에피층을 성장하기 위하여 소스영역은 750°C 그리고 성장영역은 1150°C로 설정하여 실험하였다. 성장 시간은 100 시간으로 하였다. 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)과 에너지 분산 X선 분광기(energy dispersive spectrometer, EDS) 스펙트럼 등을 이용한 AlN 에피층의 표면 관찰을 통해 성장 초기 모드를 설명하였고, X선 회절 방법(X-ray diffraction, XRD)으로 구조적인 특성을 확인하였다. 그 결과 혼합소스 HVPE 방법으로 6H-SiC (0001) 기판 위에 버퍼층 없이 직접 AlN 층의 성장이 가능하며 앞으로 차세대 전력 반도체 소자 제작을 위한 AlN 재료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

Figure 1은 CREE사의 6H-SiC (0001) 기판을 사용하여 AlN 에피층 성장을 위해 사용한 수평형 혼합소스 HVPE 장비의 모식도이다. 혼합소스 HVPE 장비에서 금속 원소들은 개별적으로 소스 영역(source zone)에 혼합하고 기체 형태의 금속-염화물(metal-chloride)을 만들기

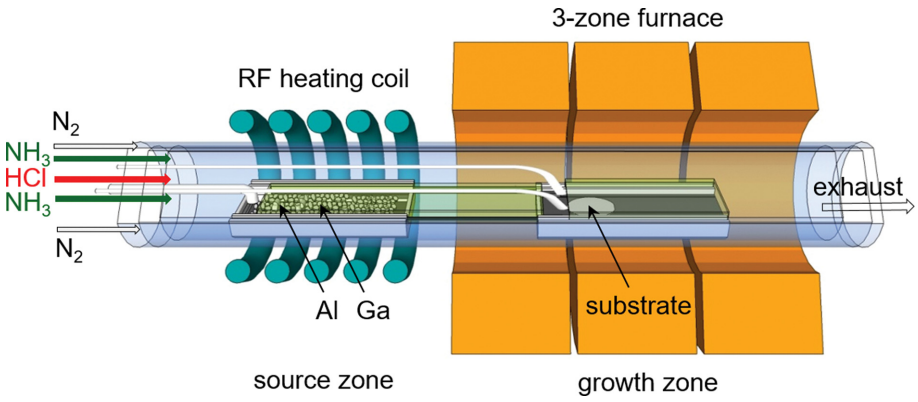


Fig. 1. Schematic diagram of a mixed-source HVPE for the growth of AlN epilayer on 6H-SiC (0001) substrate.

www.kci.go.kr

위하여 HCl 기체를 금속 물질에 흘려준다.

Al 금속은 일정한 비율의 HCl을 이용하여 금속-염화물을 형성한다. 이때 소스영역의 온도가 1000°C 이하일 경우 $AlCl_3$가 형성이 되며 그 이상일 경우 AlCl이 형성이 된다. AlCl과 $AlCl_3$ 기체의 형성 관계는 성장 영역에서의 반응에 대한 평형 상수 값을 온도의 함수로 표현할 수 있다. Al에 대한 분압(partial pressure)은 $AlCl_3$가 가장 크고 다음은 AlCl 그리고 $AlCl_2$ 순이다[17]. 따라서 분압이 높은 $AlCl_3$ 기체가 AlN 성장을 위한 전구체로 사용되게 된다. $AlCl_3$를 이용한 AlN 성장은 AlCl 보다 석영관에 대한 영향을 무시할 수 있다. 따라서 AlN 기판이나 결함 없는 후막 AlN 성장을 위해서는 $AlCl_3$의 이용이 효과적이라 할 수 있다[18-21]. 5족 원소인 N은 암모니아(NH_3) 기체를 흘려 금속-염화물 기체와 반응시켜 AlN 에피층을 성장시킨다.

혼합소스 HVPE 장비의 구조는 Fig. 1에서와 같이 소스영역과 성장영역으로 분리되어 있다. 소스를 담는 보트는 흑연으로 제작하여 RF(Radio Frequency) 방식으로 가열할 수 있게 하였다. 소스 영역에 HCl을 일정하게 흘려주어 금속-염화물 기체를 성장영역으로 공급하였다. 3개의 히터 퍼니스를 이용하여 성장영역의 온도를 조절한다. AlN 에피층 성장은 3족 재료인 Al 금속을 사용하며, 성장 영역으로 이동한 금속-염화물 기체는 5족 물질로 사용한 NH_3 기체와 반응하여 6H-SiC 기판 위에 AlN 에피층이 성장된다. NH_3 기체는 2개의 석영관을 통해 일정하게 성장 영역으로 공급해 주며, 운반 기체와 분위기 기체는 질소를 사용하였다. 소스영역과 성장영역의 온도는 각각 750°C와 1150°C로 일정하게 유지하였다. HCl, NH_3 그리고 질소 기체는 각각 100 sccm, 1000 sccm, 5000 sccm으로 일정하게 공급하였다. 소스로 사용한 Al의 양은 85 g, Ga의 경우 에피층의 특성에는 영향을 미치지 못하는 정도의 양인 3 g을 첨가하였다. Al + Ga 혼합 소스(Al 85 g + Ga 3 g)를 이용하는 이유로는 소량으로 혼합된 Ga이 Al 표면에 생성된 질화막과 산화막을 제거하여 Al 금속을 성장에 참여할 수 있도록 활성화시켜주며, 또한 혼합 소스 내의 Ga은 Al에 비해 빠른 속도로 소모되고, Ga이 소진되기 전까지는 Al 조성이 높은 AlGaN 에피층의 핵이 성장된다. Ga이 소진된 이후에는 남아있는 Al에 의해서 AlN 성장이 연속적으로 진행되며, 장시간 성장시킨 에피층에서는 Ga이 없는 AlN 에피층을 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 성장 시간을 100 시간 유지하여 양질의 AlN 에피층을 성장할 수 있었다.

3. 결과 및 토론

Figure 2는 6H-SiC (0001) 기판 위에 성장된 AlN 에피층의 표면과 경사면(plan-view)의 SEM 모습을 나타내었다. Figure 2(a)의 표면인 경우 6H-SiC (0001) 기판 위에 성장초기의 AlGaN 핵(seed)들이 형성되어 있으며(성장 시간 2 시간), Fig. 2(b)를 통해 핵들 위에 AlN 에피층이 빈틈없이 성장된 모습을 확인할 수 있다(성장 시간 100 시간). 그리고 Fig. 2(c)의 경사면 SEM 모습에서는 6H-SiC (0001) 기판에 AlN 에피층이 성장된 것을 확인할 수 있다. 성장 초기의 핵들은 Al의 특유의 구조인 육각형 구조의 핵이 관찰되었으며, 불규칙하게 분포되어 있다. 이는 6H-SiC (0001) 기판 위에 별도의 버퍼층 없이 AlN 에피층을 직접 성장하는 방법으로 100 시간의 긴 성장 시간에도 불구하고 6H-SiC (0001) 기판 위에는 평균 0.5 μm 정도의 AlN 에피층이 확인되었다. 따라서 혼합소스 HVPE 방법으로 6H-SiC (0001) 기판 위에 후막(thick film)의 AlN 에피층을 성장하기 위해서는 성장률이 시간당 5 nm로 매우 긴 성장 시간이 필요할 것으로 판단된다.

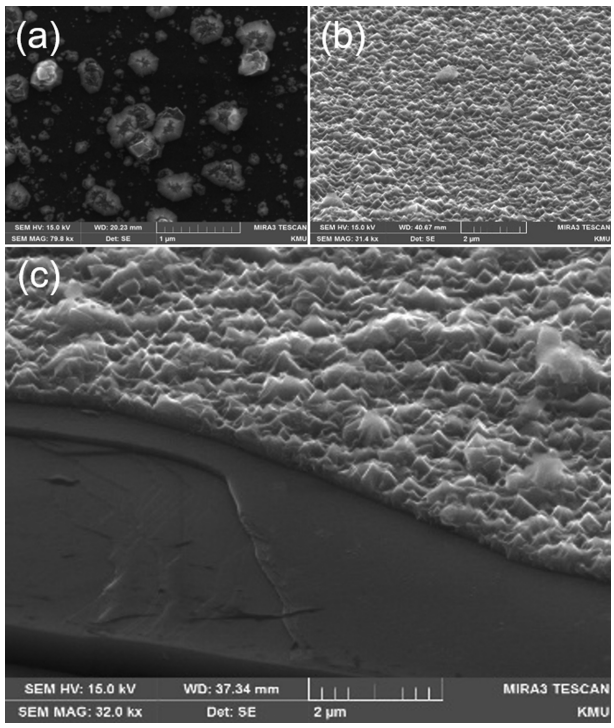


Fig. 2. SEM images of AlN epilayer on 6H-SiC substrate. The growth stage of AlN epilayer by nucleation: (a) 2 hours, (b) 100 hours, (c) plan-view SEM image of epilayer grown on 6H-SiC (0001) substrate.

Figure 3은 6H-SiC (0001) 기판 위에 성장시킨 AlN 에피층의 시간에 따른 성장 메커니즘을 SEM 모습과 도식도를 차례로 나타내었다. Figure 3(a), (b), (c), (d), (e)는 각각 2, 5, 10, 50, 100 시간 동안 성장시킨 AlN 에피층의 SEM 모습을 나타내고 있다. Figure 3(f), (g), (h), (i), (j)는 각각 2, 5, 10, 50, 100 시간 동안 성장시

www.kci.go.kr

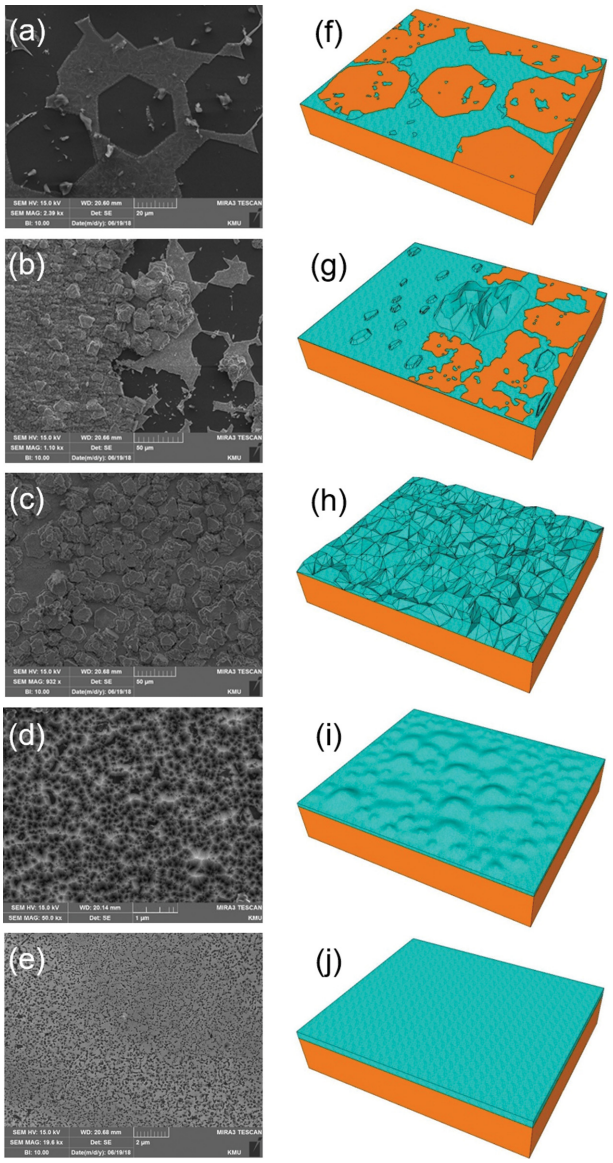
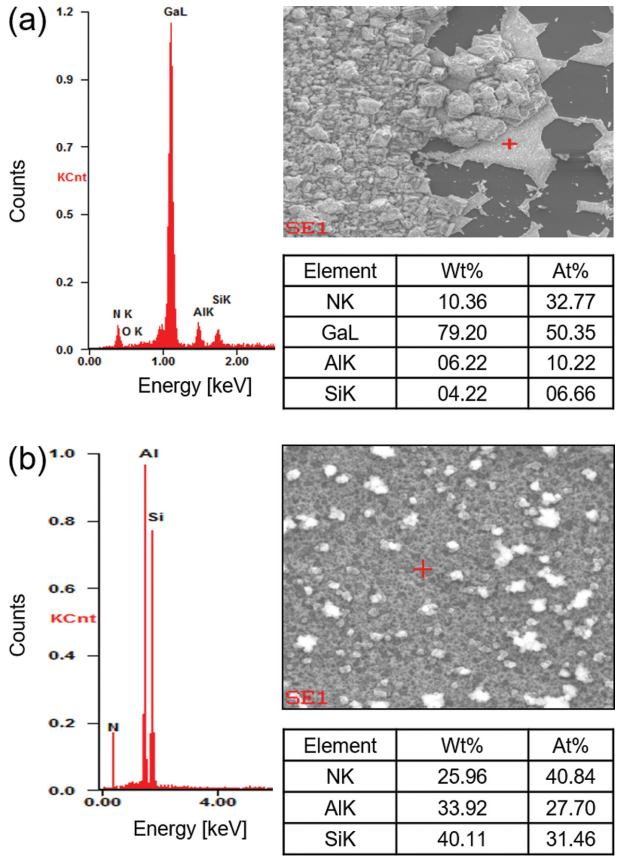


Fig. 3. Growth mechanism of AlN epilayer on 6H-SiC (0001) substrate: (a) SEM image in 2 hours, (b) 5 hours, (c) 10 hours, (d) 50 hours, (e) 100 hours, (f) schematic diagram in 2 hours, (g) 5 hours, (h) 10 hours, (i) 50 hours (j) 100 hours.

킨 AlN 에피층의 모식도이다. 성장 초기에는 불규칙한 핵들을 기반으로 부분적인 에피층이 관찰되었으며 (Fig. 3(a), (f)) 이러한 핵의 옆방향 성장에 의해 빈 공간들이 메워진 것을 확인할 수 있다(Fig. 3(b), (g)). 시간이 지남에 따라 균일하지 않은 에피층이 성장되고(Fig. 3(c), (h)) 이후 전반적인 AlN 에피층이 형성된다(Fig. 3(d), (i)). 최종적으로 100 시간 동안 고른 두께의 AlN 에피층이 성장된 것을 확인할 수 있다(Fig. 3(e), (j)).

Figure 4는 AlN 에피층에 대한 EDS 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 짧은 시간 성장시킨 시료 표면에서는 Ga, Al, N 그리고 Si 원소의 스펙트럼이 관찰되었으며 100 시간 성장시킨 표면에서는 Al과 N 그리고 Si 원



Element	Wt%	At%
NK	10.36	32.77
GaL	79.20	50.35
AlK	06.22	10.22
SiK	04.22	06.66

Element	Wt%	At%
NK	25.96	40.84
AlK	33.92	27.70
SiK	40.11	31.46

Fig. 4. EDS spectra of the AlN epilayers on 6H-SiC (0001) substrate: (a) 5 hours, (b) 100 hours.

소의 스펙트럼만 관찰되었다. 여기서 Si 원소는 6H-SiC (0001) 기판의 영향으로 판단된다. Figure 4(a)를 통해 성장 초기에는 Al 표면의 산화막 및 질화막을 제거하는 목적으로 사용된 소량의 Ga이 함께 성장되어 AlGaN 에피층이 형성된 것으로 판단된다. Figure 4(b)에서와 같이 Ga이 소진된 이후에는 남아있는 Al에 의해 AlN 에피층이 성장되었음을 알 수 있다. 이 결과로부터 혼합소스 HVPE 방법을 이용하여 6H-SiC (0001) 기판 위에 버퍼층 없이 AlN를 성장하기 위해서는 초기 핵성장을 원활하게 하는 Ga의 역할이 매우 중요하다는 것을 확인할 수 있다.

Figure 5는 6H-SiC (0001) 기판 위에 성장된 AlN 에피층에 대한 2θ 값을 20°에서 80° 범위에서 측정한 XRD 2theta/omega 결과이다. Rigaku사의 Smartlab 고분해능 X선 회절 장치(high resolution X-ray diffraction, HR-XRD)를 사용하여 분석하였으며, CuKα(λ = 1.54059 Å) 선의 2 반사 평행빔(2-bounce Parallel Beam, PB) 모드로 측정하였다. 2θ = 36.10°에서 AlN(0002) 면에 해당하는 피크가 관찰되었다. 또한 2θ = 76.48°에서 AlN (0004) 면의 피크도 관찰되었다. 6H-SiC (0001) 기판은 15.117 Å의 c 축 격자상수를 가지고, 하나의 단위 격자 내에 6개

www.kci.go.kr

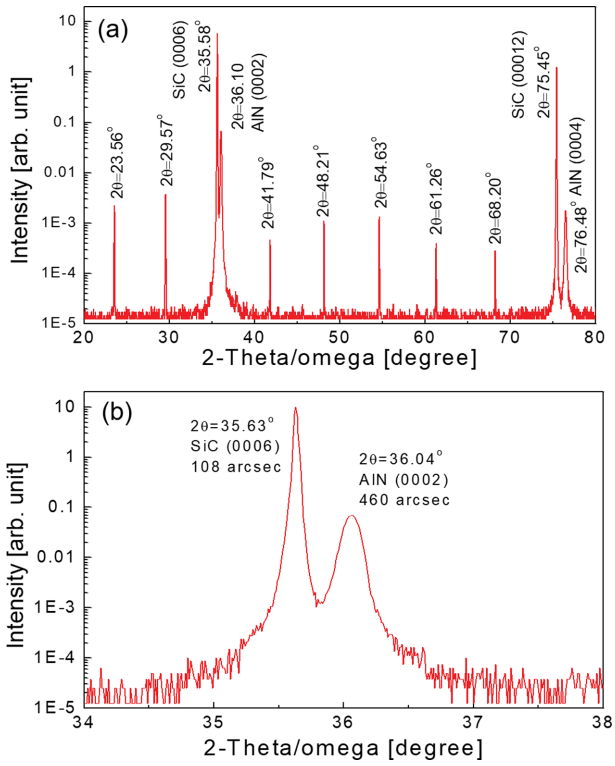


Fig. 5. XRD 2theta/omega spectra of the AlN epilayer on 6H-SiC (0001) substrate. (a) XRD result in log scale, plotted from 20 degree to 80 degree, (b) XRD result in log scale, plotted from 34 degree to 38 degree.

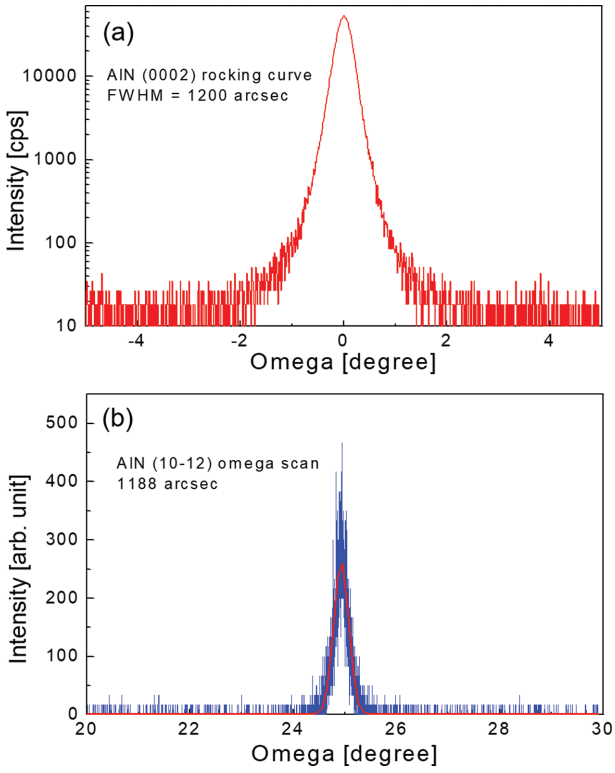


Fig. 6. Results of the XRD omega scan. (a) AlN (0002) rocking curve, (b) AlN (10$\bar{1}$2) rocking curve.

의 격자층이 존재한다. 따라서 브래그 회절 법칙(Bragg diffraction law)에 따라 주기적인 각도에서 회절이 발생한다. Figure 5(a)에서 약 6.1°에서 7.2° 정도 간격의 주기적인 피크를 확인할 수 있었다. 그 중 2θ = 35.58° (0006) 면 그리고 2θ = 75.45° (00012) 면에 해당하는 강한 기판 회절 피크가 관찰되었다. Figure 5(b)는 2θ 값이 34°에서 38° 범위에서 측정한 XRD 2theta/omega 결과이다.

Figure 5(a)의 2θ 값과 작은 차이가 있지만 2θ = 35.63°에서 6H-SiC (0006) 면 피크가 확인되었으며, 반치폭(full width at half maximum, FWHM)은 108 arcsec로 확인되었다. AlN 에피층은 2θ = 36.04°에서 AlN (0002) 면에 해당하는 피크가 관찰되었으며, 반치폭은 460 arcsec로 모두 육방정계(wurtzite) 구조의 AlN이 c 축 방향으로 성장되었음을 보여준다. 또한 매우 양질의 AlN 에피층이 성장되었음을 확인할 수 있다.

Figure 6는 6H-SiC (0001) 기판 위에 성장된 AlN 에피층의 X선 회절 요동 곡선(XRD rocking curve) 측정 결과를 보여준다. 결정의 질(crystalline quality) 측면에서 X선 회절 요동 곡선을 측정하여 반치폭에 의해 관통 전위 밀도(density of threading dislocation)를 예측할 수 있다. 일반적으로 요동 곡선의 반치폭은 관통 전위 밀도와 관계가 있으며, 육방정계 구조에서 (0002) 면은 칼날 전위 밀도(density of edge dislocation), (10$\bar{1}$2) 면은 나사 전위 밀도(density of screw dislocation) 연관이 있다 [22,23]. 성장한 AlN 에피층의 (0002) 면에 대한 omega 스캔 결과를 Fig. 6(a)에서 확인할 수 있다. 반치폭은 1200 arcsec 정도이다. Figure 6(b)는 성장한 AlN 에피층의 (10$\bar{1}$2) 면에 대한 omega 스캔 결과를 보여준다. Figure 6(b)에서와 같이 1188 arcsec의 반치폭을 가진다. 비교적 양호한 반치폭을 가지는 요동 곡선 결과를 얻었다. 이를 통해 결정의 질에 있어 양질의 AlN 에피층을 성장되었음을 확인할 수 있다. (0002) 면에 대해 1200 arcsec 그리고 (10$\bar{1}$2) 면에 대해 1188 arcsec로 두 값은 유사한 값을 가진다. 이는 6H-SiC (0001) 기판과 AlN 에피층의 격자 부정합에 의해 에피층 내에 존재하는 관통 전위가 칼날 전위 밀도와 나사 전위 밀도의 방향성에 큰 차이가 없음을 보여주고 있다. 이는 AlN 에피층과 6H-SiC (0001) 기판과의 격자 부정합 차가 0.9 % 정도로 유사하기 때문에 좋은 결정질을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 성장된 AlN 에피층은 c 축 배향성을 가지고 있으며, 혼합 Ga에 의한 AlGaN 등 다른 물질에 의한 결정상이 관찰되지 않았으므로 혼합 Ga에 의한 영향은 없는 것으로 판단된다. Table 1은 에피층의 X선 회절 요동 곡선의 반치폭 수치와 결함 밀도 계산 값을 나타내었다.

X선 회절 요동 곡선의 FWHM 값으로 AlN의 전위

www.kci.go.kr

Table 1
FWHMs of XRD rocking curve, corresponding threading dislocation densities of AlN epilayer on 6H-SiC (0001) substrate

Threading dislocation density calculation by XRD results	
$N_{SCREW} = (FWHM0002)^2/9\beta_{SCREW}^2$ $N_{EDGE} = (FWHM1012)^2/9\beta_{EDGE}^2$	
β_{SCREW}	0.3111 nm
β_{EDGE}	0.4979 nm
FWHM 0002	1200 arcsec
FWHM $10\bar{1}2$	1188 arcsec
N_{SCREW}	1.4×10^9 cm^{-2}
N_{EDGE}	3.8×10^9 cm^{-2}

밀도를 계산할 수 있다. 나사 전위 밀도(density of screw dislocation)는 (0002) 면에 대한 요동 곡선의 반치폭과 연관이 있으며, ($10\bar{1}2$) 면에 대해서는 칼날 전위 밀도와 관련이 있다. 따라서 아래 식을 이용하면 전위 밀도를 계산할 수 있다[24].

$$N_{screw} = (FWHM(0002))^2/(9\beta_{screw})^2 \quad (1)$$

$$N_{edge} = (FWHM(10\bar{1}2))^2/(9\beta_{edge})^2 \quad (2)$$

여기서, N_{screw} =screw dislocation density[/cm^2], β_{screw} = burgers vector of screw dislocation, N_{edge} = edge dislocation density[/cm^2], β_{edge} = burgers vector of edge dislocation

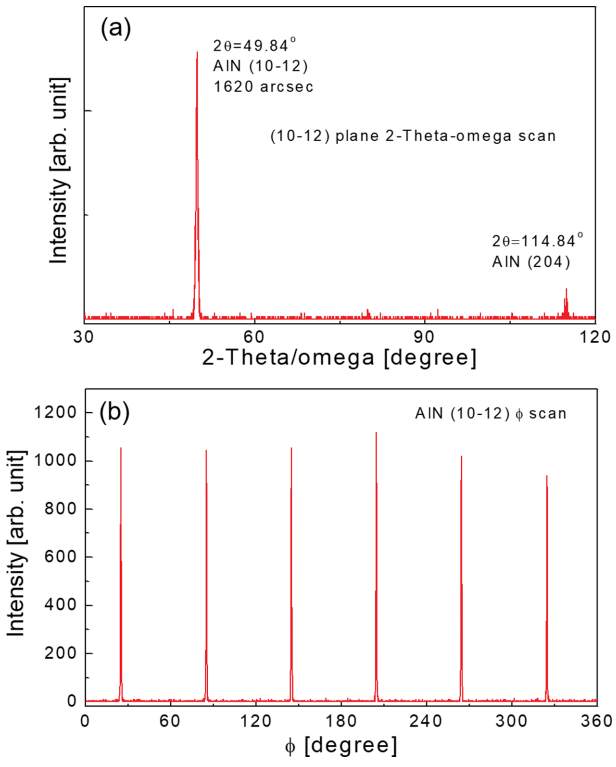


Fig. 7. (a) XRD intensity as function of 2θ, (b) X-ray rocking curve intensity as function of ϕ of epilayers grown for 100 hours. The diffraction vector was aligned to AlN ($10\bar{1}2$).

이다.

본 논문에서 성장된 AlN 에피층의 N_{screw} 값은 1.4×10^9 cm^{-2}를 이며, N_{edge} 값은 3.8×10^9 cm^{-2}으로 전위 밀도를 예측할 수 있다.

Figure 7은 AlN의 비대칭면에 대한 XRD 측정 결과를 나타내었다. AlN 면을 비대칭면으로 하여 XRD 장비의 χ(chi) 축을 AlN ($10\bar{1}2$) 면과 42.73°의 각도로 기울여서 측정하였다. AlN ($10\bar{1}2$) 면으로 정렬하고 측정한 2θ/ω 스캔 결과를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 2θ = 30~120°의 측정 범위 내에 2θ = 49.84°, 그리고 2θ = 114.84°에서 피크가 관찰되었다. 49.84°와 114.84°에서 관찰되는 피크는 각각 AlN ($10\bar{1}2$) 면과 AlN ($20\bar{2}4$) 면의 회절 피크로서, 회절 각으로 계산한 a 격자 상수는 3.111 Å이며 이는 이론적인 AlN의 격자상수와 일치한다. 이 결과는 c 축과 a 축으로 AlN 에피층이 성장되었음을 의미한다. Figure 7(b)는 AlN ($10\bar{1}2$) 면을 정렬하고 ϕ 축 요동 곡선 측정 결과를 나타낸다. 25.09°, 85.37°, 145.06°, 204.69°, 264.38° 그리고 324.67°의 값으로 대략 60°의 각도 간격으로 관찰되었다. wurtzite 구조의 6-fold 대칭 관계가 성립함을 의미하고 a 축 방향으로의 결정질도 우수한 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 성장하고자 하는 재료를 흑연 보트에 혼합하여 물질의 재료 종류와 무관하게 간단한 구조의 장비로 공정이 가능한 혼합소스 HVPE 방법을 이용하여 6H-SiC (0001) 기판 위에 AlN 에피층을 버퍼층 없이 직접 성장한 후 그 특성을 분석하였다. 양질의 AlN 에피층을 성장하기 위하여 소스영역은 750°C, 성장영역은 1150°C로 설정하였으며 성장 시간은 100 시간으로 하였다. SEM 결과 성장 초기 모드를 관찰할 수 있었으며 평균 0.5 μm의 AlN 에피층을 성장하였다. X선 회절 방법을 통하여 성장된 AlN 에피층의 c 축 배향성을 확인하였으며, N_{screw} 값은 1.4×10^9 cm^{-2}, N_{edge} 값은 3.8×10^9 cm^{-2}으로 전위 밀도를 예측할 수 있었다. 회절 각으로 계산한 3.111 Å의 a 격자 상수는 벌크 AlN의 이론적인 격자상수와 일치하였다. X선 회절 결과로부터 성장된 에피층이 c 축과 a 축으로 벌크 상태인 AlN이 성장되었음을 확인하였다. 또한 ϕ 축 요동 곡선 측정 결과에서 60°의 각도 간격인 wurtzite 구조의 6-fold 대칭 관계를 확인할 수 있었다. 이는 a 축 방향으로의 결정질도 우수한 것으로 판단된다. 따라서 혼합소스 HVPE 방법으로 6H-SiC (0001) 기판 위에 버퍼층 없이 AlN 층의 성장이 가능하며 앞으로 차세대 전력 반도체 소자 제작을 위한 AlN 재료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

www.kci.go.kr

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0012451, 2020년 산업전문인력역량강화사업).

References

[1] B.K. Meyer, G. Steude, A. Göldner, A. Hoffmann, H. Amano and I. Akasaki, "Photoluminescence investigations of AlGaN on GaN epitaxial films", Phys. Status Solidi B 216 (1999) 187.
[2] F. Yun, M.A. Reshchikov, L. He, T. King and H. Morkoç "Energy band bowing parameter in $Al_xGa_{1-x}N$ alloys", J. Appl. Phys. 92 (2002) 4837.
[3] Y.F. Wu, B.P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, P. Kozodoy, S.P. DenBaars and U.K. Mishra, "Very high breakdown voltage and large transconductance realized on GaN heterojunction field effect transistors", Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 1438.
[4] N.H. Train, B.H. Le, S. Zhao and Z. Mi, "On the mechanism of highly efficient p-type conduction of Mg-doped ultra-wide-bandgap AlN nanostructures", Appl. Phys. Lett. 110 (2017) 032102.
[5] V. Adivarahan, J. Zhang, A. Chitnis, W. Shuai, J. Sun, R. Pachipulusu, M. Shatalov and M.A. Khan, "Sub-milliwatt power III-N light emitting diodes at 285 nm", Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) L435.
[6] M. Yang, S.L. Hwang, C.H. Lee, H.S. Jeon, K.H. Kim, S.H. Hong, I.H. Heo, H.S. Ahn, J.H. Shim, S.W. Kim, I.S. Cho, W.T. Lim, J.H. Lee and S.K. Shee, "Structural phase variation of InGaN micro-structures grown by mixed-source HVPE", Sae Mulli 56 (2008) 238.
[7] H.S. Jeon, S.L. Hwang, C.H. Lee, I.H. Heo, S.H. Hong, E.J. Kim, Y.H. Han, K.H. Kim, H. Ha, M. Yang, H.S. Ahn, S.W. Kim, J.H. Lee and S.K. Shee, "Characteristics of a non-phosphor white LED grown by using mixed-source HVPE", J. Korean Phys. Soc. 54, (2009) 1262.
[8] K.H. Kim, J.Y. Yi, H.J. Lee, M. Yang, H.S. Ahn, S.N. Yi, J.H. Chang, H.S. Kim, C.R. Cho, S.C. Lee and S.W. Kim, "Hydride vapor phase epitaxy for the growth of AlGaN crystal", Sae Mulli 48 (2004) 546.
[9] K.H. Kim, J.Y. Yi, H.J. Lee, K.S. Jang, M. Yang, H.S. Ahn, C.R. Cho, J.P. Kim, S.W. Kim, W.J. Choi and I.S. Cho, "Growth and characteristics of an AlGaN layer deposited by a hydride vapor phase epitaxy method", Sae Mulli 50 (2005) 175.
[10] I.H. Heo, S.L. Hwang, H.S. Jeon, C.H. Lee, S.H. Hong, Y.H. Han, E.J. Kim, M. Yang, H.S. Ahn, J.H. Shim, S.W. Kim I.S. Cho, J.H. Lee and S.K. Shee, "Doping of nitride semiconductors by using mixed-source HVPE", Sae Mulli 56 (2008) 272.
[11] S.G. Jung, H. Jeon, G.S. Lee, S.M. Bae, W.I. Yun, K.H. Kim, S.N. Yi, M. Yang, H.S. Ahn, S.W. Kim, Y.M. Yu, S.H. Cheon and H.J. Ha, "The properties of AlGaN epi layer grown by HVPE", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 22 (2012) 11.
[12] C. Lee, H. Jeon, C. Lee, I. Jeon, M. Yang, S.N. Yi, H.S. Ahn, S.W. Kim, Y.M. Yu and N. Sawaki, "Characterizations of graded AlGaN epilayer grown by HVPE", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 25 (2015) 45.
[13] H.A. Lee, J.H. Park, J.H. Lee, J.H. Lee, C.W. Park, H.S. Kang, S.H. Kang, J.H. In and K.B. Shim, "Variation of optical characteristics with the thickness of bulk GaN grown by HVPE", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 28 (2018) 9.
[14] W.J. Lee, M.S. Park, Y.S. Jang, W.J. Lee, J.H. Ha, Y.J. Choi, H.Y. Lee and H.S. Kim, "Multi-step growth of α-plane GaN epitaxial layer on γ-plane sapphire substrate by HVPE method", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 26 (2016) 89.
[15] H. Son, Y.J. Choi, Y.J. Lee, M.J. Lee, J.H. Kim, S.W. Kim, Y.H. Ra, T.Y. Lim, J. Hwang and D.W. Jeon, "Effect VI/III ratio on properties of alpha-Ga_2O_3 epilayers grown by halide vapor phase epitaxy", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 28 (2018) 135.
[16] G.S. Lee, K.H. Kim, S.W. Kim, I. Jeon, H.S. Ahn, M. Yang, S.N. Yi, C.R. Cho and S.W. Kim, "p-Type AlN epilayer growth for power semiconductor device by mixed-source HVPE method", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 29 (2019) 83.
[17] Y. Kumagai, T. Yamane, T. Miyaji, H. Murakami, Y. Kangawa and A. Koukitu, "Hydride vapor phase epitaxy of AlN: thermodynamic analysis of aluminum source and its application to growth", Phys. Status Solidi C 7 (2003) 2498.
[18] Y. Kumagai, T. Yamane, T. Miyaji, H. Murakami, Y. Kangawa and A. Koukitu, "Thermodynamics on hydride vapor phase epitaxy of AlN using $AlCl_3$ and NH_3", Phys. Status Solidi B 7 (2006) 1431.
[19] M. Pons, J. Su, M. Chubarov, R. Boichot, F. Mercier, E. Blanquet, G. Giusti and D. Pique, "HVPE of aluminum nitride, film evaluation and multiscale modeling of the growth process", J. Cryst. Growth 468 (2017) 235.
[20] Y. Kumagai, T. Yamane and A. Koukitu, "Growth of thick AlN layers by hydride vapor-phase epitaxy", J. Cryst. Growth 281 (2005) 62.
[21] V. Avrutin, D.J. Silversmith, Y. Mori, F. Kawamura, Y. Kitaoka and H. Morkoc, "Growth of bulk GaN and AlN: Progress and challenges" P IEEE 98 (2010) 1302.
[22] T. Nagashima, M. Harada, H. Yanagi, Y. Kumagai, A. Koukitu and K. Takada, "High-speed epitaxial growth of AlN above 1200°C by hydride vapor phase epitaxy", J. Cryst. Growth 300 (2007) 42.
[23] T.M. Al Tahtamouni, J. Li, J.Y. Lin and H.X. Jiang, "Surfactant effects of gallium on quality of AlN epilayers grown via metal-organic chemical-vapour deposition on SiC substrates", J. Phys. D: Appl. Phys. 45 (2012) 285103.
[24] K.A. Aissa, A. Achour, O. Elmazria, Q. Simon, M. Elhosni, P. Boulet, S. Robert and M.A. Djouadi, "AlN films deposited by dc magnetron sputtering and high power impulse magnetron sputtering for SAW applications", J. Phys. D: Appl. Phys. 48 (2015) 145307.
[25] S. Adhikari, S.K. Patra, A. Lunia, S. Kumar, P. Parjapat, B. Kushwaha, P. Kumar, S. Singh, A. Chauhan, K. Singh, S. Pal and C. Dhanavantri, "Growth and fabrication of GaN/InGaN violet light emitting diode on patterned sapphire substrate", J. Appl. Math. 2 (2014) 1113.

www.kci.go.kr