

p-Type AlN epilayer growth for power semiconductor device by mixed-source HVPE method

Gang Seok Lee, Kyoung Hwa Kim, Sang Woo 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 20, 2019)

(Revised June 10, 2019)

(Accepted June 12, 2019)

Abstract In this paper, Mg-doped AlN epilayers for power semiconductor devices are grown by mixed-source hydride vapor phase epitaxy. Magnesium is used as p-type dopant material in the grown AlN epilayer. The AlN epilayers on the GaN-templated sapphire substrate and GaN-templated-patterned sapphire substrate (PSS), respectively, as the base substrates for device application, were selectively grown. The surface and the crystal structures of the AlN epilayers were investigated by field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and high-resolution-X-ray diffraction (HR-XRD). From the X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Raman spectra results, the p-type AlN epilayers grown by using the mixed-source HVPE method could be applied to power devices.

Key words p-Type AlN, Mg-doped, Mixed-source, HVPE method, Power semiconductor device

혼합소스 HVPE 방법에 의한 전력 반도체 소자용 p형 AlN 에피층 성장

이강석, 김경화, 김상우, 전인준*, 안형수†, 양민, 이삼녕, 조채용*, 김석환**

한국해양대학교 전자소재공학과, 부산, 49112

*부산대학교 나노에너지공학과 나노융합기술과, 부산, 46241

**안동대학교 물리학과, 안동, 36729

(2019년 5월 20일 접수)

(2019년 6월 10일 심사완료)

(2019년 6월 12일 게재확정)

요약 본 논문에서는 전력 반도체 소자용 Mg-doped AlN 에피층을 혼합 소스 수소화물 기상 에피택시 방법에 의해 성장하였다. p형 재료로는 Mg를 사용하였다. 소자용을 위한 기초 기판으로서 역할을 하기 위하여 GaN 에피층이 성장된 기판과 GaN 에피층이 성장되어 패턴이 형성된 사파이어 기판 위에 Mg-doped AlN 에피층을 선택 성장하였다. Mg-doped AlN 에피층의 표면과 결정 구조는 FE-SEM 및 HR-XRD에 의해 조사하였다. XPS 스펙트럼과 라만 스펙트럼 결과로부터 혼합소스 HVPE 방법에 의해 성장된 Mg-doped AlN 에피층은 전력소자 등에 응용이 가능할 것으로 판단된다.

1. 서론

화석연료를 대체하고 새로운 에너지를 개발하여 이를 이용하기 위한 신 재생에너지의 전기 에너지 생산과 저장 그리고 전송 분야는 에너지 사용의 효율 향상이 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 그리고 신 재생에너지를

사용하기 위해서는 생산된 전기를 저장하고 변환하는 효율을 높여 에너지 손실문제를 해결하기 위한 고효율 전력 반도체 소자 연구의 중요성이 세계적으로 부각되고 있다. 고전압과 높은 주파수를 낼 수 있는 소재를 이용한 전력반도체의 연구는 에너지 효율성을 높이는 매우 중요한 분야이며, Si과 같이 매우 안정된 공정에 기반을 두고 새로운 소재인 SiC, GaN, Ga₂O₃, 그리고 AlN과 같은 넓은 에너지 밴드갭(WBG; wide band gap)을 가진 반도체 재료에 대한 연구로 전환되고 있다[1-3]. 이들

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

소재들은 3 eV 이상의 큰 에너지 밴드를 가지며 높은 스위칭 주파수 능력과 높은 항복전압 그리고 열전도율이 높아 고온의 초고전력의 전력 변환 장치의 핵심 재료로 응용이 가능할 것으로 기대된다.

넓은 에너지 밴드갭을 가진 재료는 전자 소자로서의 응용을 위해서 특정한 농도의 불순물을 도핑하여 전기 전도성을 가지는 n형 혹은 p형 반도체의 제조가 반드시 필요하다[4-7]. 일반적으로 n형 AlN 에피층은 Si 도핑에 의해 높은 캐리어 농도를 가지는 에피층을 쉽게 형성할 수 있다. 그러나 GaN 혹은 AlN 같은 3족-질화물 반도체에서는 도핑물질의 치환과정과 활성화 에너지의 증가 그리고 이들 에피층과 전극형성 문제 등에 의해 양질의 p형 AlN 에피층을 얻고 이를 이용한 소자 제작을 위한 연구가 매우 중요하다.

3족-질화물 반도체는 p형 도핑 재료로 Zn 혹은 Mg를 주로 사용한다. Zn를 사용할 경우 AlN 에피층에 대하여 Al 부분을 치환하여 점유하고 활성화 에너지가 비교적 낮아 홀의 캐리어 농도를 높일 수 있어 p형 AlN 에피층을 형성하는데 많이 사용되고 있다. 그러나 수소화물 기상 에피택시(hydride vapor phase epitaxy, HVPE)에서는 Zn 소스를 공급하기 위한 장치가 필요하고 금속 Zn 소스를 바로 사용할 경우 고온에서 도핑 전에 기화하는 현상과 반응관 내의 잔류 문제 등에 의해 도핑 재료로는 사용되기 어려운 실정이다. 따라서 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition) 방법에서는 DEZ(diethylzinc: $Zn(C_2H_5)_2$)와 DMZ(dimethylzinc: $Zn(CH_3)_2$) 등을 주로 도핑 소스로 사용하고 있다. 이러한 화합물들은 일정한 온도에서 원자간의 결합 에너지 보다 더 큰 열 에너지를 얻기 때문에 쉽게 분해되어 도펀트로 역할을 하게 되며 p형 도펀트의 소스로는 Cp_2Mg (bis-cyclopentadienyl magnesium: $Mg(C_5H_5)_2$)을 이용하고 있다[10-12]. 그러나 높은 전기 전도성을 위해 Mg 도핑 농도를 증가시키면 결정 성장 단계에서 수소나 산소에 의한 높은 친화력 때문에 결정 결함이 다량 발생하여 고농도의 Mg-doped AlN 에피층을 성장시키기에 문제점이 많이 발생한다[13, 14]. 한편 가장 오래된 결정 성장 방법인 HVPE는 금속 원료를 사용하여 성장하는 방법으로, Mg 도핑과 AlN 성장을 위해서는 Mg 금속과, Al 금속을 사용하기 때문에 원료비 절감과 높은 생산성의 장점이 있다. 그러나 일반적인 HVPE 방법에서는 Mg 경우 활성화 에너지가 높아 고농도의 Mg-doped AlN 에피층 성장이 어려운 반면 본 논문에서 사용된 혼합소스 HVPE 방법에서는 Mg과 Al의 혼합소스를 만들기 유리하며 Mg의 양을 직접 조절함으로써 Mg의 도핑 농도를 조절할 수 있다[15].

일반적인 HVPE 방법은 AlN 에피층 성장과 Mg를 도핑 하기 위하여 Al 소스 영역과 Mg 소스 영역을 따로 만들어야 하기 때문에 장비가 복잡하고, 에피층의 종류

에 따라 소스 영역을 여러 영역으로 만들어야 하는 단점이 있다. 본 논문에서 사용하는 혼합소스 HVPE 방법은 성장하고자 하는 재료를 흑연 보트에 혼합하여 사용하므로, 성장하는 물질의 재료 종류와 무관하게 간단한 구조의 장비로 공정이 가능하다. AlGaIn 등의 3원소 화합물이나 n형, p형 질화물 반도체 에피층 성장도 도펀트와 에피층 재료를 흑연 보트 내에 혼합하여 사용하기 때문에 간단하며, 재료들의 혼합 비율이나 온도 등을 조절하여 조성비나 도핑 농도 조절에 용이하다[16, 17].

한편 기관으로부터의 결함을 최소화 하고 고품질의 에피층을 성장하는 방법에는 ELO(epitaxial lateral overgrowth), pendeo-epitaxy, facet-controlled-ELO 등과 같은 성장법을 사용하거나 PSS(patterned sapphire substrate) 위에 에피층을 성장시켜 결정 결함 밀도의 감소를 유도할 수 있다. 특히 PSS 기관은 양질의 에피층을 얻을 수 있어 발광소자 분야에서는 높은 광 추출 효율, 높은 광 출력과 긴 수명을, 계면에서의 내부전반사를 감소시키는 효과로 고효율 LED 제조에 많이 응용되고 있다[18-21]. 전력반도체 소자용으로는 연구 단계에 있으며 PSS 위에 HVPE 방법을 이용하여 AlN 에피층을 성장시킨다면 결정질이 우수한 AlN 단결정을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 다양한 분야에서 응용 가능한 기관으로서 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 GaN-templated 사파이어 기관과 GaN-templated PSS 기관 위에 혼합소스 HVPE 방법으로 Mg-doped AlN 에피층을 선택 성장하였다. Mg-doped AlN 에피층을 성장하기 위해서 Al과 Mg를 하나의 공간에 혼합하여 사용하였고, 일정한 AlN 성장 재료에 Mg 금속의 혼합되는 Mg/Al wt% 비로 도핑 농도를 조절할 수 있게 하였다. Al과 Mg를 혼합한 소스를 사용한 HVPE 방법으로 AlN 성장과 Mg 도핑이 가능한지 확인하고, 첨가하는 Mg 금속의 질량을 조절하여 에피층의 Mg 조성 변화와 구조적인 특성의 변화를 조사하기 위하여 전계 방출 주사 전자 현미경(field emission scanning electron microscopy, FE-SEM), X선 분광 분석기(electron-energy dispersive spectroscopy, EDS)와 X선 광전자 분광기(X-ray photoelectron spectrometer, XPS) 스펙트럼 그리고 라만 분광법(Raman Spectroscopy) 등을 통하여 알아보았다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 Mg-doped AlN 에피층 성장을 위해 사용한 수평형 혼합소스 HVPE 장비의 모식도이다. 일반적인 HVPE 장비는 성장하고자 하는 금속 원소를 개별로 다른 영역에 분리되어 있으며 기체 형태의 금속-염화물(metal-chloride)을 만들기 위하여 HCl 기체가 금속 물질

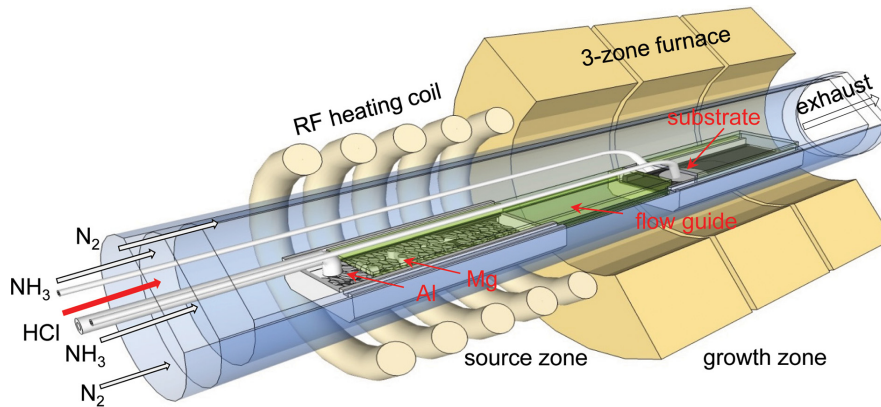


Fig. 1. Schematic diagram of a mixed-source HVPE for the growth of Mg-doped AlN epilayers.

위로 흐른다.

혼합소스 HVPE는 성장하는 물질의 금속 원료와 도핑 원료를 하나의 소스영역에 담아 혼합하여 사용한다. 혼합된 소스는 Mg과 Al의 일정한 비율로 혼합되며 HCl을 이용하여 금속-염화물을 형성한다. 5족 원소인 N은 NH_3 기체를 흘려 금속-염화물 기체와 반응시켜 AlN 에피층을 성장시킨다. 혼합소스 HVPE 구조는 소스영역과 성장영역으로 분리되어 있다. 흑연 보트에 담긴 금속 원료는 RF 방식으로 온도로 가열하며 소스 영역에 HCl을 일정하게 흘려주어 금속-염화물 기체를 성장영역으로 공급하였다. 성장영역은 3개의 히터 피니스로 구성되어 온도를 조절한다. AlN 에피층 성장과 Mg 도핑을 위해서 3족 재료인 Al 금속과 Mg 금속 혼합하여 사용하였다. 성장 영역으로 이동한 금속-염화물 기체는 5족 물질로 사용한 암모니아(NH_3) 기체와 반응하여 다양한 기판 위에 Mg-doped AlN 에피층이 성장된다. 암모니아 기체는 별도의 석영관을 통해 일정하게 성장 영역으로 공급해주며, 운반 기체와 분위기 기체는 질소를 사용하였다. 성장에 사용된 Mg 금속의 질량에 따른 에피층의 특성을 비교하기 위하여, Mg과 Al 금속의 wt% 비를 변화시켰다. 한편 소스의 혼합을 위하여 소량의 Ga를 사용하였으며 이때 Ga의 역할은 (1) Mg-doped AlN 에피층의 성장을 위한 소스의 원활한 혼합, (2) 혼합소스의 산화를 방지하여 HCl 가스와의 접촉을 쉽게 하며, 그리고 (3) 기판 위의 핵 성장을 위한 촉매역할을 하는 것으로 작용된다. 소스영역과 성장영역의 온도는 각각 800°C , 1150°C 로 일정하게 유지하였다. Mg/Al의 wt% 비를 각각 0/7, 0.5/7, 그리고 1.0/7로 변화시켰으며 HCl, 암모니아, 질소 기체는 각각 100 sccm, 1000 sccm, 5000 sccm으로 일정하게 공급하였다. GaN-templated 사파이어 기판과 GaN-templated PSS 기판 위의 성장은 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 의 정사각형 패턴이 0.5 mm 간격으로 나열된 포토마스크를 사용하였으며, SiO_2 박막을 선택성장(selective area growth, SAG) 마스크로 이용하여 SAG Mg-doped AlN

에피층을 성장하였다. 선택성장은 Mg/Al wt% 비를 2.5/7로 하였다. Ga의 양은 에피층의 특성에는 영향을 미치지 못하는 정도의 양으로 1 g을 첨가하였다.

3. 결과 및 토론

Fig. 2는 Mg/Al wt% 비가 각각 0/7, 0.5/7에 대해 2θ 값이 30° 에서 80° 범위에서 측정된 XRD $2\theta/\omega$ 결과이다. Rigaku사의 Smartlab 고분해능 X선 회절 장치(high resolution X-ray diffraction, HR-XRD)를 사용하여 분석하였다. Fig. 2(a)와 (b)에서 관측되는 $2\theta = 41.68^\circ$ 의 피크는 $\text{Al}_2\text{O}_3(0006)$ 면을 나타내고 있다. Mg/Al wt% 비가 0/7인 경우 35.97° 와 76.45° 에서 AlN(0002)와 Al(0004) 면에 해당하는 피크가 높게 관찰되었다. Mg 금속 첨가 없이 성장한 AlN 에피층은 사파이어 기판의 c축을 따라 육방 정계 c축 방향으로 단결정 AlN 에피층이 성장되었음을 알 수 있다. 이 결과를 이용하여 Mg 금속 첨가에 따른 결정 구조 변화를 비교할 수 있다. Mg/Al wt% 비가 0.5/7인 경우 36.04° 와 76.41° 에서 AlN(0002)와 Al(0004) 면에 해당하는 피크가 상대적으로 낮은 강도로 관찰되었으며, Main peak 변화를 보아 Mg 첨가에 의한 구조적 영향은 적은 것으로 판단되지만, 결정질에는 큰 영향을 보인 것을 관찰할 수 있었다. 각 기판의 회절 피크를 제외하고, 동일한 위치에서 AlN의 회절 피크가 관찰되었으며, 시료 모두 육방정계(wurtzite) 구조의 AlN이 c축 방향으로 성장되었다고 판단된다. 성장된 AlN 에피층이 높은 c축 배향성을 가지고 있으며, 혼합 Ga에 의한 GaN 등 다른 물질에 의한 결정상이 관찰되지 않았으므로 혼합 Ga에 의한 영향은 없는 것으로 판단된다. 반치폭(fullwidth at half maximum, FWHM) 값은 Mg/Al wt% 비가 0/7의 경우 468 arcsec 이고, Mg/Al wt% 비가 0.5/7인 경우는 790 arcsec 로서 매우 양호한 AlN 에피층이 성장된 것으로 판단된다.

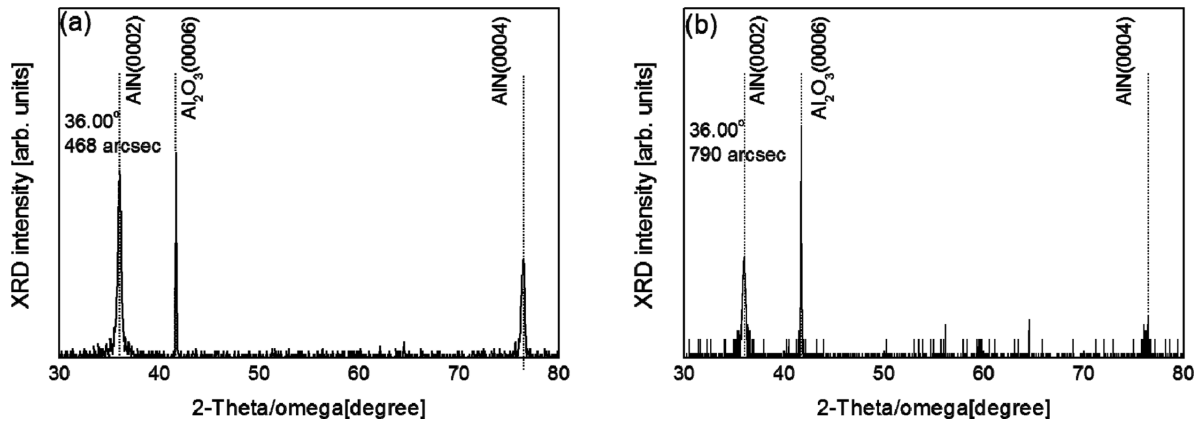


Fig. 2. XRD 2theta/omega spectra of the Mg-doped AlN epilayer grown by mixed-source HVPE. (a) undoped AlN epilayer (b) Mg/Al wt% = 0.5/7.

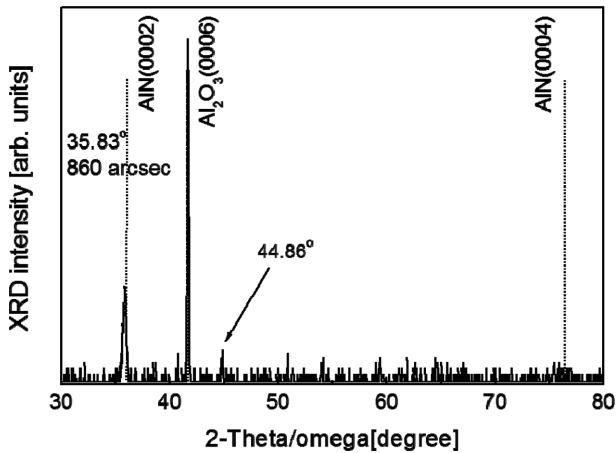


Fig. 3. XRD 2theta/omega spectrum of the Mg-doped AlN epilayer grown by mixed-source HVPE (Mg/Al wt%: 1.0/7).

Fig. 3은 Mg/Al wt% 비가 1.0/7에 대해 2θ 값이 30° 에서 80° 범위에서 측정된 XRD 2theta/omega 결과이다. 앞선 Fig. 2(a), (b)와 같이 $2\theta = 35.83^\circ$ 에서 AlN(0002) 면에 해당하는 피크가 관찰되었다. 그러나 AlN(0002) 면의 피크 세기가 감소하였고, AlN(0004) 면의 피크는 관찰되지 않았다. 마찬가지로 반치폭 값은 860 arcsec로서 Mg의 질량 증가에 따라 다소 반치폭이 증가하지만 양호한 Mg-doped AlN 에피층이 성장된 것으로 판단된다.

Fig. 3의 XRD 결과는 Mg 질량 증가에 따른 AlN(0002) 면의 피크 세기가 감소함을 보여준다. 또한 AlN(0004) 면의 피크는 관찰되지 않는다. 즉, Mg의 질량이 증가하면서 결정 구조가 변형되었을 가능성이 있으며, 이런 경우 대부분 Al과의 치환 혹은 N의 공공(vacancy)에 관련된 것으로 해석할 수 있다. 이 결과로 Mg 첨가량이 일정 수준 이상으로 증가하면 Mg에 의한 새로운 결정 구조가 형성되고, AlN 결정과 Mg에 의한 다른 결정 구조의 결정립계(grain boundary)가 형성되면서 에피층이 성

장되는 것으로 판단된다[22, 23].

Fig. 4는 GaN-templated 사파이어 기판 위에 선택 성장된 Mg-doped AlN 에피층의 표면과 단면 사진이다. TESCAN사의 MIRA3 전계방출형 주사전자현미경(field emission scanning electron microscope, FE-SEM)으로 측정하였다. Mg/Al의 wt% 비는 2.5/7을 이용하였다. Fig. 4(a)는 선택 성장된 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 의 정사각형 에피층을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)는 단면 FE-SEM 사진으로 Mg-doped AlN 층이 GaN-templated 사파이어 기판 위에 거친 표면을 가진 층이 성장되었음을 확인할 수 있다. 단면에서 알 수 있듯이 GaN-templated 층의 두께는 $2\ \mu\text{m}$ 이며, $0.65\ \mu\text{m}$ 정도의 AlN 층이 성장된 것으로 확인되었다. $0.13\ \mu\text{m/h}$ 의 매우 느린 성장율을 보여주고 있으며 이는 Mg이 혼합될 경우 AlN 에피층의 성장율이 매우 감소하는 경향과 일치하고 있다. Fig. 4(c)와 (d)는 2θ 값이 30° 에서 80° 범위에서 측정된 XRD 2theta/omega 결과와 2θ 값이 32° 에서 40° 범위에서 측정된 XRD 2theta/omega 결과이다. 35.99° 에서 AlN(0002) 면에 해당하는 피크가 매우 약하게 관찰되었다. 그러나 AlN(0004) 면의 피크는 나타나지 않았다. 또한 $2\theta = 35.91^\circ$ 부근과 $2\theta = 38.54^\circ$ 부근에서 피크가 발견되었다. 이는 Mg의 질량이 증가하면서 AlN(0002)면의 배향의 결정질이 악화되었음을 알 수 있다.

Fig. 5는 Mg/Al wt% 비가 2.5/7인 경우의 SAG Mg-doped AlN 에피층의 X선 광전자 분광기(X-ray photoelectron spectrometer, XPS) 스펙트럼을 나타내었다. AlN 에피층 표면에 산화나 불순물로 인한 측정 오차를 줄이기 위하여 $100\ \text{nm}$ 만큼의 에피층 표면을 스퍼터링 에칭하여 에피층의 내부를 측정하였다. Fig. 5는 0 eV부터 800 eV의 결합 에너지(binding energy, BE) 범위에서 측정된 XPS 스펙트럼이다. Mg 2p, Al 2p, Mg 2s, Al 2s 등의 궤도 광전자 스펙트럼을 자세하게 나타내었다. BE = 73.01 eV에서 AlN의 Al-N에 해당하는 광전자 결합 에너지와 일

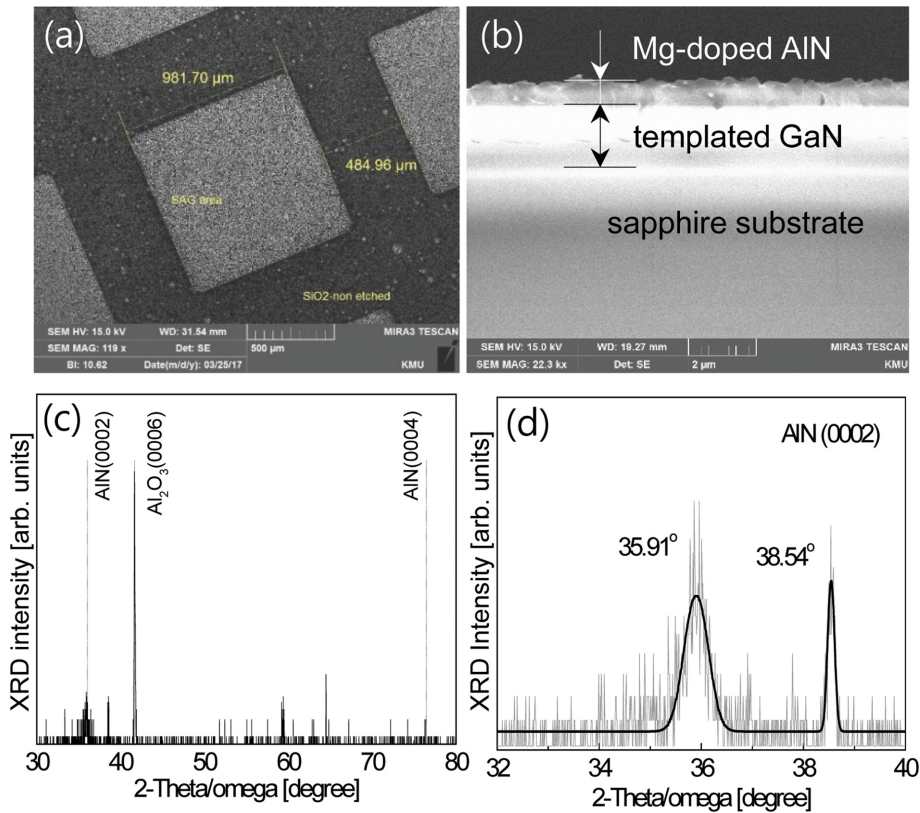


Fig. 4. FE-SEM images and XRD results obtained from selective area growth (SAG) Mg-doped AlN epilayer on undoped GaN-templated sapphire substrate (Mg/Al wt%: 2.5/7): (a) plane-view, (b) cross-sectional FE-SEM images, (c) XRD 2theta/omega spectrum, and (d) XRD result in log scale, plotted from 32 degree to 40 degree.

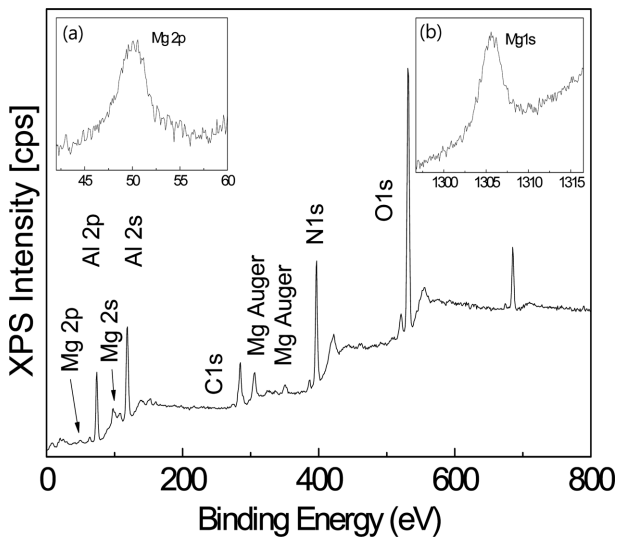


Fig. 5. XPS survey spectrum of Mg-doped AlN epilayer on undoped GaN-templated sapphire substrate grown by using Mg/Al wt%: 2.5/7. Inset: (a) XPS spectrum of Mg 2p core level and (b) Mg 1s core level.

치하고, Fig. 5 내부그림(a)에서 BE = 49.5 eV에서 검출된 광전자 스펙트럼은 Mg 2p에 해당하는 광전자 결합 에너지와 같으며, BE = 97.80 eV는 Mg 2s에 해당하는

광전자 결합 에너지와 일치한다. Fig. 5 내부그림 (b)에서 BE = 1305 eV에서 단일 피크가 관찰되는데, Mg 1s 궤도의 광전자 스펙트럼을 나타낸다. 따라서 Fig. 5에서 Mg 2p와 Mg 2s 그리고 Mg 1s 궤도의 광전자 스펙트럼이 관찰된 것으로 보아 혼합소스 HVPE 방법으로 AlN에 Mg이 도핑 되어있음을 증명할 수 있다[22].

Fig. 6은 GaN-templated PSS 기판 위에 선택 성장된 Mg-doped AlN 에피층의 표면과 단면 사진, XRD 2theta/omega, AlN(0002) rocking curve, 그리고 EDS 측정 결과이다. Fig. 6(a)에서 선택 성장된 1 mm x 1 mm의 정사각형 에피층을 확인할 수 있으며, 내부 FE-SEM 사진에서 SiO₂ 마스크와 에피층의 경계 표면 사진으로 SAG 에피층 표면이 매우 양호한 상태임을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 단면 FE-SEM 사진으로 PSS 기판 위에 4 μm 정도 GaN templated 층과 Fig. 4에서와 같이 0.9 μm 정도의 SAG Mg-doped AlN 에피층이 성장되었다. 성장율은 0.18 μm/h로 GaN-templated 사파이어 기판 위의 0.13 μm/h 보다 조금 빠른 성장율을 보여 주고 있으며 이는 같은 Mg/Al의 wt% 비는 2.5/7 비를 사용하였으나 PSS의 기판 위의 성장이 좋은 상태임을 보여준다.

Fig. 6(c)는 2θ 값이 30°에서 80° 범위에서 측정된 XRD 2theta/omega 결과로 2θ = 34.50° 부근과 2θ = 35.99°

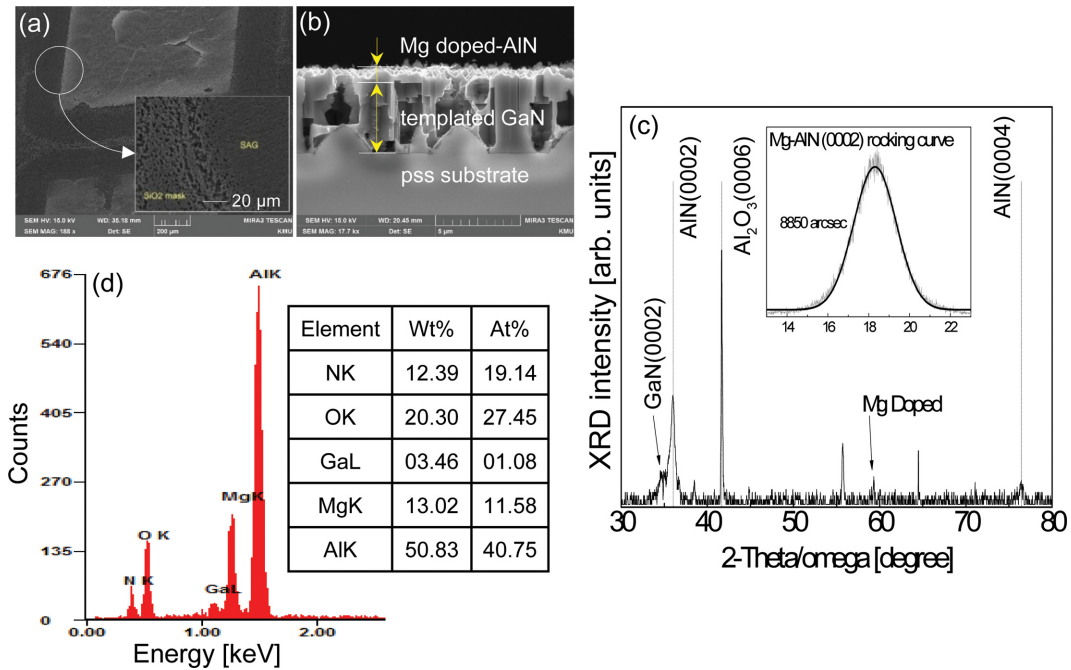


Fig. 6. FE-SEM images, XRD results and EDS spectrum of the SAG Mg-doped AlN epilayer on undoped GaN-templated PSS substrate grown by mixed-source HVPE (Mg/Al wt%: 2.5/7): (a) plane-view, Inset:magnified FE-SEM image of SAG AlN epilayer, (b) cross-sectional FE-SEM image on pss substrate, (c) XRD 2theta/omega spectrum, Inset:Result of AlN(0002) rocking curve, and (d) EDS spectrum.

부근에서 피크가 관찰되었다. $2\theta = 34.50^\circ$ 은 PSS 기판의 templated-GaN 에피층의 GaN(0002) 면을 나타내며, $2\theta = 35.99^\circ$ 피크는 AlN(0002) 면에 해당하는 피크로 해석된다. Fig. 6(c)의 내부 그림은 AlN(0002) rocking curve로서 8860 arcsec의 반치폭이 계산되었다. Fig. 6(d)는 SAG 에피층에 대한 에너지분산 X선 분광기(energy

dispersive spectrometer, EDS) 스펙트럼 결과를 나타내었다. 이 결과로부터 Mg의 스펙트럼이 관찰되었으며 AlN 성장을 위한 혼합 소스에 Mg 금속 첨가에 의해 Mg 도핑이 가능함을 보여준다.

Fig. 7은 성장된 에피층 두께에 대한 구조적 특성의 변화를 알아보기 위하여 Thermo Fisher Scientific사의 532 nm laser DXR 2 Smart Raman Spectrometer 장치를 이용하여 상온(300 K)에서 측정된 라만 스펙트럼 결과이다. 라만 산란은 AlN의 구조적인 특성을 분석하는데 매우 유용한 방법이다. 표준 시료인 사파이어 기판에서는 420 cm^{-1} , 579 cm^{-1} , 그리고 752 cm^{-1} 에서 라만 피크를 얻었다. 이를 기준으로 Fig. 2(a) undoped-AlN 에피층에서는 658 cm^{-1} 과 890 cm^{-1} 에서 $E_2(\text{high})$ 와 $A_1(\text{LO})$ 라만 피크를 얻었다. Mg/Al 질량의 비가 0.5/7인 경우는 653 cm^{-1} 과 890 cm^{-1} 에서 $E_2(\text{high})$ 와 $A_1(\text{LO})$ 라만 피크를 얻었으나 피크의 세기가 감소하였으며 Mg/Al wt% 비가 2.5/7인 경우는 650 cm^{-1} 의 피크는 있으나 890 cm^{-1} 에서의 피크는 관측되지 않았다. Mg의 소스 질량비가 증가함에 따라서 AlN 결정구조 임에도 Al과 N의 간의 라만 산란의 관측이 줄어든 이유는 앞선 측정결과들을 토대로 AlN 결정구조 자체의 결함에 의한 영향보다는 Al과 Mg의 치환과 N의 공공(vacancy) 영향이 더 크게 차지할 것으로 추측되며, XPS와 EDS의 성분 분석과 비교하면 AlN 결정구조에 Mg 치환을 통한 도핑이 되었음을 확인할 수 있었다.

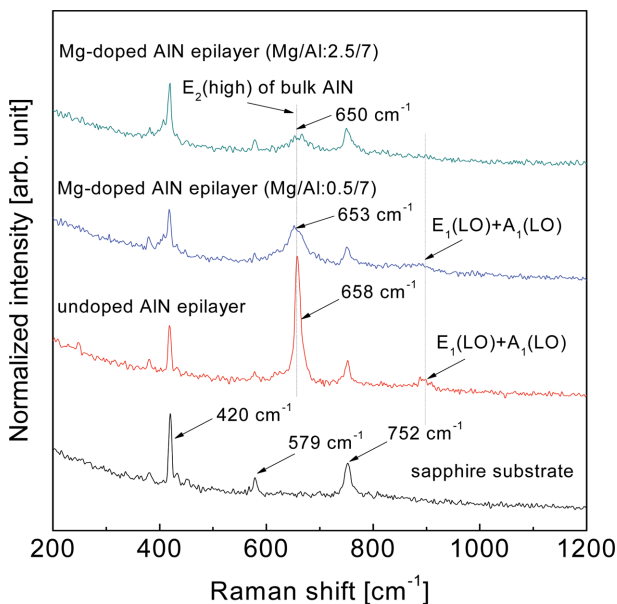


Fig. 7. Raman spectra as a function of shift value of Mg-doped AlN grown by changing Mg/Al wt% in the mixed-source.

이와 같이 본 논문에서는 Al의 Mg 치환은 XPS와 EDS의 성분 분석 및 XRD 분석을 통한 AlN 결정성과 라만 스펙트럼의 비교 분석에 의해 입증되어, 도핑 된 샘플에서 측정된 결합들의 존재가 비교 분석에 의해 Mg의 영향이 분명하므로 혼합 소스에 Mg 금속 첨가 방법으로 Mg doped AlN 에피층의 성장이 가능함을 기대한다.

4. 결 론

Mg를 이용하여 전력반도체 소자용 p형 AlN 에피층을 혼합 소스 수소화물 기상 에피택시에 의해 성장하였다. 일정한 AlN 성장 원료에 Mg/Al 금속의 질량 혼합비를 조절하여 도핑 농도를 조절할 수 있게 하였다. 소자응용을 위한 기초 기관으로서 역할을 하기 위하여 GaN-templated 사파이어 기관과 GaN-templated PSS 기관 위에 선택 성장하였다. 에피층의 표면은 Mg/Al 질량비가 증가할수록 결정질은 감소하였으나 GaN-templated PSS 기관에서는 양호한 상태의 표면을 얻을 수 있었다. Mg/Al wt% 비가 증가할수록 XRD 결과에서는 AlN과 관련이 없는 피크가 관측되었으며, 이는 Al이 치환된 형태의 피크들로 판단하였다. XPS 스펙트럼에서는 Mg 2p, Al 2p, Mg 2s, Al 2s 등의 궤도 광전자 스펙트럼이 관측되므로 혼합소스 HVPE 방법으로 AlN에 Mg이 도핑 되어있음을 증명할 수 있다. 또한 라만 스펙트럼 결과로부터 Mg이 도핑 될 경우 Mg 도핑 되지 않은 AlN 보다 더 많은 결합들이 존재하게 되고 XRD의 측정결과와 비교 분석을 통해 결합들의 형성이 Mg-Al과의 치환과 N의 공공(vacancy)에 관련될 수 있음을 판단할 수 있다. 이러한 결과는 성분 분석 결과를 통해 Mg의 영향이 분명한 것으로 결론지을 수 있으며, Mg 금속 첨가에 의한 혼합 소스 HVPE 방법으로 Mg-doped AlN 에피층의 성장이 가능하고, 또한 선택성장에 의해 Mg의 영향에 의한 결정구조 변형을 최소화할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2017R1D1A3B03035999).

References

- [1] Y.F. Wu, B.P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, P. Kozodoy, S.P. DenBaars and A.U.K. Mishra, "Very high

breakdown voltage and large transconductance realized on GaN heterojunction field effect transistors", *Appl. Phys. Lett.* 69 (1996) 1438.

- [2] N.H. Train, B.H. Le, S. Zhao and Z. Mi, "On the mechanism of highly efficient p-type conduction of Mg-doped ultra-widebandgap AlN nanostructures", *Appl. Phys. Lett.* 110 (2017) 032102.
- [3] 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.
- [4] G. Dowler, "n-i-p-i doping superlattices—metastable semiconductors with tunable properties", *J. Vac. Sci. Technol. B* 1 (1983) 278.
- [5] 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.
- [6] S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh and T. Mukai, "Hole compensation mechanism of p-type GaN films", *Jpn. J. Appl. Phys.* 31 (1992) 1258.
- [7] K.S. Jang, K.H. Kim, S.L. Hwang, H.S. Jeon, H.S. Ahn, M. Yang, W.J. Choi, S.W. Kim, Y. Honda, M. Yamaguchi, N. Sawaki, J. Yoo, S.M. Lee and M. Koike, "Characterization of AlGaIn, Te-doped GaN and Mg-doped GaN grown by hydride vapor phase epitaxy", *Phys. Stat. Sol. (c)* 4 (2007) 133.
- [8] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki, "p-Type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI)", *Jpn. J. Appl. Phys.* 28 (1989) 2112.
- [9] B.R. Bennett, T. Suemitsu, N. Waldron, A. Jesus and D. Alamo, "Growth of InP high electron mobility transistor structures with Te doping", *J. Crystal Growth* 278 (2005) 596.
- [10] S. Surender, S. Pradeep, R. Ramesh and K. Baskar, "Investigation on structural, optical and electrical properties of Cp₂Mg flow varied p-GaN grown by MOCVD", *AIP Conference Proceedings* 1731 (2016) 080083.
- [11] K. Tamamura, T. Ohhata, H. Kawai and C. Kojima, "Magnesium doping of (Al,Ga)As in metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.* 59 (1986) 3549.
- [12] Y. Taniyasu, J. F. Carlin, A. Castiglia, R. Butte and N. Grandjean, "Mg doping for p-type AlInN lattice-matched to GaN", *Appl. Phys. Lett.* 101 (2012) 082113.
- [13] Y. Peng, C. Xia, H. Zhang, T. Wang, S. Wei and Y. Jia, "Tunable electronic structures of p-type Mg doping in AlN nanosheet", *AIP Conference Proceedings* 116 (2014) 044306.
- [14] Y. Taniyasu, M. Kasu and T. Makimoto, "An aluminum nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres", *Nature* 325 (2006) 441.
- [15] 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.
- [16] 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 AlGa_N epi layer grown by HVPE", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 22 (2012) 11.
- [17] 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 AlGa_N epilayer grown by HVPE", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 25 (2015) 45.
- [18] K. Okumura, T. Nomura, H. Miyake, K. Hiramatsu and O. Eryuu, "HVPE growth of AlN on trenchpatterned 6H-SiC substrates", *Phys. Status Solidi C* 8 (2011) 467.
- [19] G.S. Lee, C. Lee, H. Jeon, C. Lee, S.G. Bae, H.S. Ahn, M. Yang, S.N. Yi, Y.M. Yu, J.H. Lee, Y. Honda, N. Sawaki and S.-W. Kim, "Growth of AlN layer on patterned sapphire substrate by hydride vapor phase epitaxy", *Jpn. J. Appl. Phys.* 55 (2016) 05FC02.
- [20] M. Balaji, R. Ramesh, P. Arivazhagan, M. Jayasakthi, R. Loganathan, K. Prabakaran, S. Suresh, S. Lourdu-doss and K. Baskar, "Influence of initial growth stages on AlN epilayers grown by metal organic chemical vapor deposition", *J. Cryst. Growth* 414 (2015) 69.
- [21] J. A. Freitas, J. C. Culbertson, N. A. Mahadik, T. Sochacki, M. Bockowski and M. Iwinska, "Growth of High Crystalline Quality HVPE-GaN Crystals with Controlled Electrical Properties", *Cryst. Growth Des.* 15 (2015) 4837.
- [22] X. L. Sun, J. Xiong, W. H. Zhang, L. Liu, and H. S. Gu, "Investigation of blue luminescence in Mg doped AlN films", *J. Alloys Compd.* 621 (2015) 314.
- [23] S. G. Bae, I. Jeon, M. Yang, S. N. Yi, H. S. Ahn, H. Jeon, K. H. Kim and S.-W. Kim, "HVPE growth of Mg-doped AlN epilayers for high-performance power-semiconductor", *J. Korean Cryst. Growth and Cryst. Technol.* 27 (2017) 1.