

HVPE growth of Mg-doped AlN epilayers for high-performance power-semiconductor devices

Sung Geun Bae*, Injun Jeon*, Min Yang*, Sam Nyung Yi*, Hyung Soo Ahn*[†], Hunsoo Jeon*^{***},
Kyoung Hwa Kim*^{***} and Suck-Whan Kim*^{***}

*Department of Electronic Material Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

**Compound Semiconductor Fabrication Technology Center, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

***Department of Physics, Andong National University, Andong 36729, Korea

(Received September 6, 2017)

(Revised November 8, 2017)

(Accepted November 13, 2017)

Abstract AlN is a promising material for wide band gap and high-frequency electronics device due to its wide bandgap and high thermal conductivity. AlN has advantages as materials for power semiconductors with a larger breakdown field, and a smaller specific on-resistance at high voltage. The growth of a p-type AlN epilayer with high conductivity is important for a manufacturing an AlN-based applications. In this paper, Mg doped AlN epilayers were grown by a mixed-source HVPE. Al and Mg mixture were used as source materials for the growth of Mg-doped AlN epilayers. Mg concentration in the AlN was controlled by modulating the quantity of Mg source in the mixed-source. Surface morphology and crystalline structure of AlN epilayers with different Mg concentrations were characterized by FE-SEM and HR-XRD. XPS spectra of the Mg-doped AlN epilayers demonstrated that Mg was doped successfully into the AlN epilayer by the mixed-source HVPE.

Key words Mixed-source, HVPE, Mg doped AlN, Power semiconductor devices

고효율 파워 반도체 소자를 위한 Mg-doped AlN 에피층의 HVPE 성장

배승근*, 전인준*, 양민*, 이삼녕*, 안형수*[†], 전현수*^{***}, 김경화*^{***}, 김석환*^{***}

*한국해양대학교 전자소재공학과, 부산, 49112

**한국해양대학교 화합물반도체공정기술센터, 부산, 49112

***안동대학교 물리학과, 안동, 36729

(2017년 9월 6일 접수)

(2017년 11월 8일 심사완료)

(2017년 11월 13일 게재확정)

요약 AlN는 넓은 밴드 갭 및 높은 열전도율로 인해 넓은 밴드 갭 및 고주파 전자 소자로 유망한 재료이다. AlN은 전력 반도체의 재료로서 더 큰 항복전압과 고전압에서의 더 작은 특성저항의 장점을 가지고 있다. 높은 전도도를 갖는 p형 AlN 에피층의 성장은 AlN 기반 응용 제품 제조에 중요하다. 본 논문에서는 Mg이 도핑된 AlN 에피층을 혼합 소스 HVPE에 의해 성장하였다. Al 및 Mg 혼합 금속은 Mg-doped AlN 에피층의 성장을 위한 소스 물질로 사용하였다. AlN 내의 Mg 농도는 혼합 소스에서 Mg 첨가 질량의 양을 조절함으로써 제어되었다. 다양한 Mg 농도를 갖는 AlN 에피층의 표면 형태 및 결정 구조는 FE-SEM 및 HR-XRD에 의해 조사하였다. Mg-doped AlN 에피층의 XPS 스펙트럼으로 부터 혼합 소스 HVPE에 의해 Mg를 AlN 에피층에 도핑할 수 있음을 증명하였다.

1. 서론

최근에 세계적으로 에너지 절약이 중대한 이슈로 부각되고 있는 가운데 고효율의 파워 반도체 소자의 수요가

증가하고 있다. 또한 그동안 전자 소자의 핵심 소재로 사용되어 왔던 Si과 함께 새로운 물질로서 AlN, GaN, 그리고 SiC 등과 같은 넓은 에너지 밴드갭(WBG; wide band gap)을 가진 반도체 재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. 그 중에서 AlN는 GaN나 SiC에 비해 높은 스위칭 주파수 능력과 높은 항복전압을 가지며, 열전도율이 높아 초고전력의 전력 변환 장치의 핵심 재

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

료로 응용이 가능할 것으로 기대된다.

전자 소자로서의 응용을 위해서는 특정한 농도의 불순물을 도핑하여 전기 전도성을 가지는 n형 혹은 p형 반도체의 제조가 필수적이다[4-7]. 그 중 p형 반도체 제조를 위한 도핑 물질로 B이나 C 등을 사용하는데, 최근 Er, Gd, Tb, Eu, 그리고 Ce 등의 다양한 물질을 AlN에 도핑하는 연구도 진행되고 있다[8, 9]. 일반적으로 GaN나 AlN 같은 3족-질화물 반도체의 p형 도핑 물질로 Mg을 주로 사용한다. Mg은 다른 도핑 물질에 비해 구하기 쉽고 저렴한 장점이 있다. Mg을 도핑하여 높은 전기전도성을 가진 AlN를 성장시키는 것이 중요하다. Mg은 AlN 내에서 전자받개(acceptor) 물질로의 활성화 에너지가 0.5 eV로 매우 높다. 그에 따라 높은 전기 전도성을 위해 Mg 도핑 농도를 증가시키면 결정 성장 단계에서 수소나 산소에 의한 높은 친화력 때문에 결정 결함이 다량 발생하여 고농도의 Mg 도핑된 AlN 에피층을 성장시키기에 어려움이 많다[10, 11]. AlN 성장과 Mg 도핑을 하는 대표적인 공정법으로 MOCVD 방법이 있는데, 양질의 Mg이 도핑된 AlN 에피층을 성장시킨 보고가 있다. 그러나 MOCVD 법으로 Mg 도핑을 하기 위해서는 고가의 Cp₂Mg(biscyclopentadienyl-magnesium) 가스를 사용하여야 하는데, 대면적화와 대량 생산을 위한 원료로는 적합하지 않다[12-14]. 한편, 가장 오래된 결정 성장 방법인 HVPE는 금속 원료 그대로를 사용하여 성장하는 방법으로, Mg 도핑과 AlN 성장을 위해서는 Mg 금속과, Al 금속을 사용하기 때문에 원료비 절감과 높은 생산성의 장점이 있다[15-19].

본 논문에서는 혼합소스 HVPE 방법을 이용하여 Al과 Mg 금속을 한 소스 영역에 담아 AlN 에피층 성장과 Mg 도핑을 동시에 진행하였다. 일반적인 HVPE 방법은 AlN 성장과 Mg 도핑을 하기 위하여 Al 소스 영역과 Mg 소스 영역을 따로 만들어야 하기 때문에 장비가 복잡해지고, 에피층의 종류에 따라 소스 영역을 여러 영역으로 만들어야 하는 단점이 있다. 반면 본 연구 그룹에

서 사용하는 혼합소스 HVPE 방법은 성장하고자 하는 원소를 흑연 보트에 혼합하여 사용하므로, 성장하는 물질의 원소들의 종류와 무관하게 간단한 구조의 장비로 공정이 가능하다. AlGaN 등의 3원소 화합물이나 n형, p형 질화물 반도체 에피층 성장도 도펀트와 에피층 원료를 흑연 보트 내에 혼합하여 사용하기 때문에 간단하며, 원료들의 혼합 비율이나 온도 등을 조절하여 조성비나 도핑 농도 조절에 용이하다[20, 21].

본 논문에서는 Mg이 도핑된 AlN 에피층을 성장하기 위해서 Al과 Mg을 하나의 공간에 혼합하여 사용하였고, 일정한 AlN 성장 원료에 Mg 금속의 혼합되는 질량을 조절하여 도핑 농도를 조절할 수 있게 하였다. Al과 Mg을 혼합한 소스를 사용한 HVPE 방법으로 AlN 성장과 Mg 도핑이 가능한지 확인하고, 첨가하는 Mg 금속의 질량을 조절하여 에피층의 Mg 조성 변화와 구조적인 특성의 변화를 여러가지 측정을 통하여 알아보았다.

2. 실험

Fig. 1은 AlN 에피층 성장과 Mg 도핑을 위해 사용한 수평형 혼합소스 HVPE 장비의 모식도이다. 일반적인 HVPE 장비는 성장하고자 하는 금속 원소를 개별로 다른 영역에 분리하여 성장에 사용하지만, 혼합소스 HVPE는 성장하는 물질의 금속 원료와 도핑 원료를 하나의 소스 영역에 담아 혼합하여 사용한다. 성장하는 금속 원료는 흑연 보트에 담고 RF 가열 방식으로 가열하여 원료의 온도를 조절하였다. 성장영역은 3개의 퍼니스로 구성되어 온도를 조절할 수 있다. AlN 에피층 성장과 Mg 도핑을 위해서 소스 영역에 3족 원료인 Al 금속과 소량의 Ga, 그리고 Mg 금속 혼합하여 흑연 보트에 담아 사용하였다. RF 방식으로 흑연 보트를 설정한 온도로 유지하며 소스 영역에 HCl을 일정하게 흘려주어 소스와 반응해 금속-염화물(metal-chloride) 기체를 성장영역으로 공

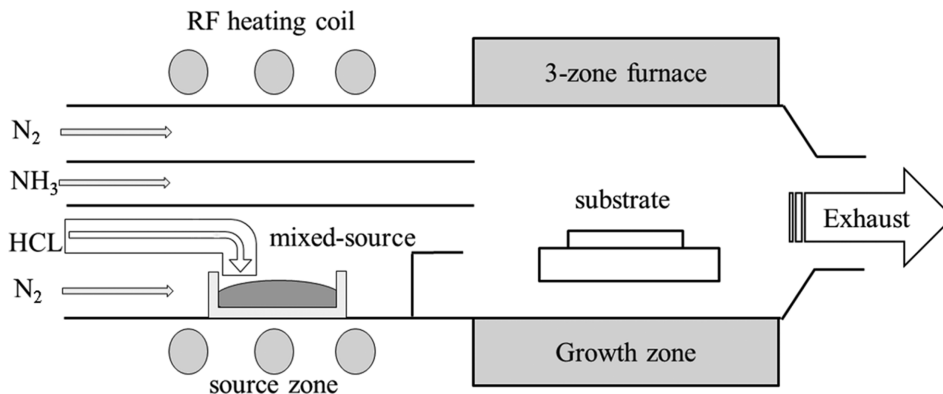


Fig. 1. Schematic diagram of a horizontal mixed-source HVPE for the growth of Mg doped AlN epilayers.

Table 1
Growth conditions of samples grown with varying Mg quantity

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
Source temperature			800°C		
Growth temperature			1150°C		
Group III source			Ga 1 g + Al 7 g		
Mg quantity	0 g	0.5 g	1.0 g	1.5 g	2.0 g
HCl [sccm]			100		
NH ₃ [sccm]			1000		
N ₂ [sccm]			5000		

급하였다. 성장 영역으로 이동한 금속-염화물 기체는 5족 물질로 사용한 암모니아(NH₃) 기체와 반응하여 c면 사파이어 기판 위에 Mg를 도핑한 AlN 에피층이 성장되도록 하였다. 암모니아 기체는 별도의 석영관을 통해 일정하게 성장 영역으로 공급해 주었고, 운반 기체와 분위기 기체는 질소를 사용하였다. 성장에 사용된 Mg 금속의 질량에 따른 에피층의 특성을 비교하기 위하여, Al과 Ga 금속량은 일정하게 유지하고, Mg 금속의 첨가량을 변화시켰다.

Table 1은 Mg 첨가량에 따른 에피층의 특성 변화를 알아보기 위한 성장 조건을 보여준다. 소스영역과 성장 영역의 온도는 각각 800°C, 1150°C로 일정하게 유지하였다. AlN 성장을 위한 3족 원소로 Ga 1 g과 Al 7 g을 혼합하였으며, 도핑 물질의 첨가량에 따른 특성 변화를 조사하기 위해 첨가하는 Mg 금속의 질량을 각각 0, 0.5, 1.0, 1.5, 그리고 2.0 g으로 변화시켰다. HCl, 암모니아, 질소 기체는 각각 100 sccm, 1000 sccm, 5000 sccm으로 일정하게 공급하였다.

3. 실험 결과 및 논의

Fig. 2는 TESCAN사의 MIRA3 전계방출형 주사전자 현미경(field emission scanning electron microscope, FE-SEM)으로 관찰한 Mg 금속 첨가량에 따라 성장한 AlN 에피층의 표면과 단면 사진이다. Fig. 2의 (a)와 (f)는 Mg 도핑을 하지 않고 성장한 AlN 에피층의 표면과 단면 사진이다. 결정의 두께가 증가하면서 각각의 grain들이 서로 합쳐져 평탄한 2차원 AlN 에피층이 성장되었음을 확인할 수 있다. Fig. 2(b)와 (g)는 각각 Mg 금속을 0.5 g 첨가하여 성장시킨 sample 2의 표면과 단면 FE-SEM 사진이다. 앞서 관찰한 도핑 하지 않은 AlN 에피층의 표면 형상과 비교하면, 2차원 평탄면이 완벽하게 생성되지 못하고, 각각의 grain마다 다결정 형상이 공존하여 관찰된다. Mg 원소가 함께 성장되면서 결정질이 저하되는 것이 표면 형상으로 나타나는 것으로 판단된다. Fig. 2(c)와 (h), 그리고 (d)와 (i)는 각각 Mg 금속

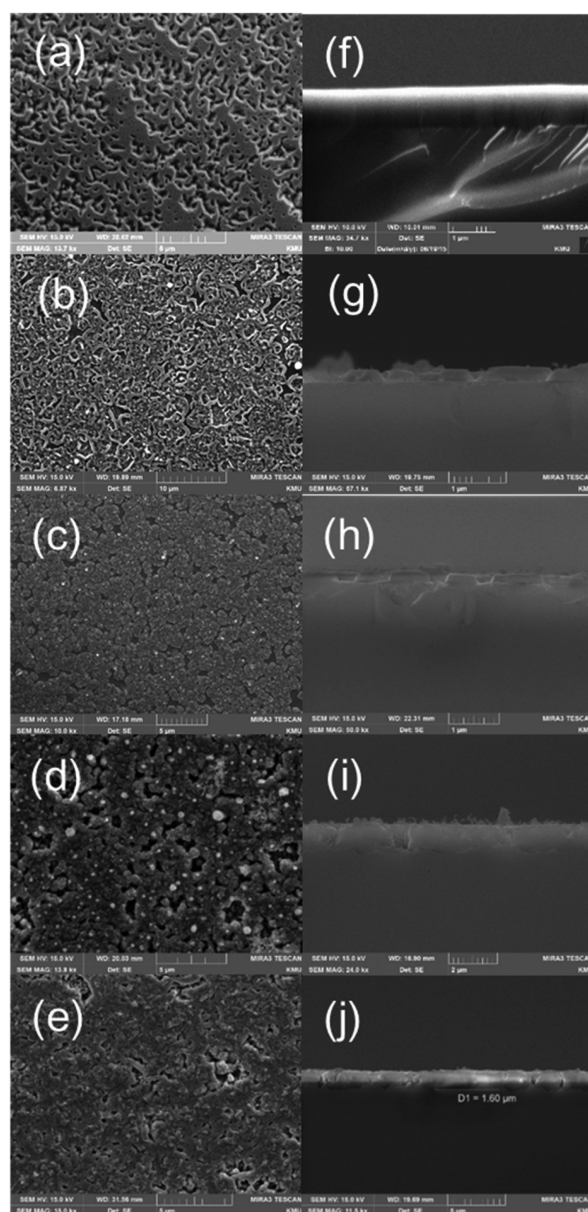


Fig. 2. Plane-view and cross-sectional FE-SEM images of undoped AlN epilayer, and Mg doped AlN epilayers grown with varying Mg quantity in the mixed-source. (a), and (f) were FE-SEM images of undoped AlN epilayer. Mg quantities used for the growth of Mg doped AlN epilayers were (b), (g) Mg = 0.5 g; (c), (h) Mg = 1.0 g; (d), (i) Mg = 1.5 g; and (e), (j) Mg = 2.0 g.

을 1.0 g, 그리고 1.5 g 첨가하여 성장시킨 sample 3과 4의 표면과 단면 FE-SEM 사진이다. 앞서 Mg 금속을 0.5 g 사용하였을 때보다 Mg 첨가량이 증가할수록 표면 거칠기가 더 증가하고, grain boundary를 형성하는 것으로 관찰된다. AlN 에피층 성장에 Mg이 끼치는 영향이 증가하여 Mg 원자가 도핑 농도를 넘어서 AlN-Mg 화합물 형태로 성장이 되었다고 판단된다. Fig. 2(e)와 (j)는 Mg 금속을 2.0 g 첨가하여 성장시킨 sample 5의 표면과 단면 FE-SEM 사진이다. 각각의 grain boundary를 형성했던 이전 결과와는 달리 grain들이 서로 합쳐져 평탄면이 형성되고 있다. 이것은 Mg 첨가 질량이 높아져 AlN 결정 성장과 Mg에 의한 결정 성장이 모두 높아져 Mg-AlN 화합물의 에피층 성장이 일어난다고 볼 수 있다.

Fig. 3은 sample 1~5에 대해 2θ 값이 30°에서 80° 범위에서 측정한 XRD 2theta/omega 스캔 결과이다. 측정 장비는 고분해능 X선 회절 장치(high resolution X-ray diffraction, HR-XRD)로서 Rigaku사의 Smartlab을 사용하였다. Fig. 3(a)~(e)에서 모두 2θ = 41.68°에서 강한 Al₂O₃ (0006)면의 피크를 볼 수 있다. 먼저 Fig. 3(a)는 Mg 금속 첨가 없이 성장한 AlN 에피층의 XRD 2theta/omega 스캔 결과로써 2θ = 36.04° 부근에서 AlN (0002)면, 2θ = 76.45° 부근에서 AlN (0004)면에 피크가 검출되었다. 사파이어 기판의 c축을 따라 육방 정계 c축 방향으로 단결정 AlN 에피층이 성장되었고, 이후 (b)~(e)의 결과를 통하여 Mg 금속 첨가에 따른 결정 구조 변화를 분석할 수 있다. Fig. 3(b)는 Mg 금속을 0.5 g 첨

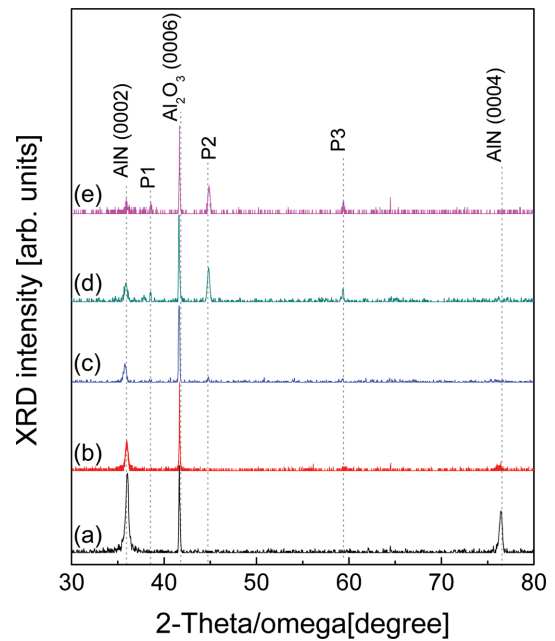
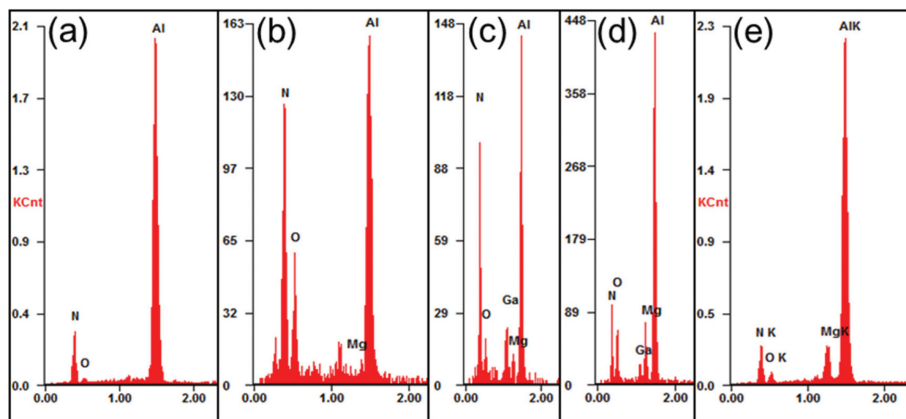


Fig. 3. XRD 2theta/omega scan results with varying Mg quantity in the mixed-source; (a) undoped AlN epilayer; (b) Mg doped AlN epilayers with Mg quantity of 0.5 g; (c) 1.0 g; (d) 1.5 g; (e) 2.0 g, respectively.

가하여 성장한 AlN 에피층의 XRD 2theta/omega 스캔 결과로써, 앞선 결과와 마찬가지로 2θ = 36.04°와 76.45°에서 AlN (0002)면, (0004)면의 피크가 관찰된다. sample 2의 경우 두 피크의 세기가 도핑 하지 않은 sample 1보다 감소하는데, Mg에 의한 결정 구조의 변화는 없지만 구조



(f)

Quantity of Mg (g)	0.5	1.0	1.5	2.0
Mg wt%	0.1~0.51	2.5~4.45	6.2~6.7	6.9~8.6

Fig. 4. EDS spectra of Mg doped AlN epilayers for varying Mg quantity in the mixed-source; (a) undoped AlN epilayer; (b) Mg doped AlN epilayers with Mg quantity of 0.5 g; (c) 1.0 g; (d) 1.5 g, and (e) 2.0 g, respectively. (f) weight percent (wt%) of Mg in the AlN epilayers with varying Mg quantity in the mixed-source.

적으로 영향을 받는 것으로 보인다. Fig. 3(c)는 Mg 금속을 1.0 g 첨가하여 성장한 sample 3의 XRD 2theta/omega 스캔 결과로써, Mg 질량 증가에 따른 AlN (0002)면의 피크 세기가 감소하였고, AlN (0004)면의 피크는 관찰되지 않는다. 또한 $2\theta = 44.92^\circ$ 부근에서 낮은 세기의 피크 P2가 관찰되는데, JCPDS XRD 데이터 시트를 참고하여 AlN에 해당하는 결정 구조의 피크는 존재하지 않는다. 즉, Mg의 질량이 증가하면서 주요한 다른 물질의 결정 구조가 성장된 것으로 보인다. Fig. 3(d)와 (e)는 Mg 금속을 1.5 g과 2.0 g 첨가하여 성장한 sample 4의 XRD 2theta/omega 스캔 결과로써, $2\theta = 36.04^\circ$ 의 AlN (0002)면의 회절 피크는 감소되고, $2\theta = 38.57^\circ$, 44.92° , 59.40° 에서 각각 P1, P2 그리고 P3 피크가 증가되고 있다. JCPDS XRD 데이터를 참고하면 P1, P2, P3의 피크는 AlN 결정과 관련 없는 다른 물질의 결정 구조로 보인다. 이 결과로 Mg 첨가량이 일정 수준 이상으로 증가하면 Mg에 의한 새로운 결정 구조가 형성되고, AlN 결정과 Mg에 의한 다른 결정 구조의 grain boundary를 이루며 에피층이 성장되는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 sample 1~5의 성장된 에피층에 대한 에너지 분산 X선 분광기(energy dispersive spectrometer, EDS) 스펙트럼과 Mg 첨가량에 따른 AlN 에피층 내에 Mg 원소의 질량 비율(wt%)을 보여준다. 모든 시료에서 Al, N, O 원소의 스펙트럼이 관찰되었으며, O의 검출은 사파이어 기판에 의한 것이거나 성장 중에 발생하는 산화 반응에 의한 것으로 예상된다. Fig. 4(a)는 Mg를 도핑하지 않은 AlN 에피층의 EDS 측정 결과로써 강한 Al, N 원소의 스펙트럼만 관찰되고, Mg 원소는 검출되지 않았다. Fig. 4(b)~(e)는 Mg 질량을 각각 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 g 첨가하여 성장한 에피층의 EDS 스펙트럼으로써, 모든 시료에서 Mg의 스펙트럼이 관찰되었다. AlN 성장을 위한 혼합 소스에 Mg 금속 첨가만으로도 Mg 도핑이 가능함을 보여준다. Fig. 4(f)는 Mg 금속을 첨가한 모든 에피층 내에 Mg 원소의 wt%를 보여준다. 첨가한 Mg 질량에 따라 에피층의 Mg wt%도 증가하였는데, 이는 정량적인 분석은 아니지만 Mg 첨가량의 증가에 따라 wt%가 선형적으로 증가함을 보여준다. 따라서 혼합 소스의 Mg 질량을 조절하여 에피층의 Mg 농도를 조절할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5에 정량 분석을 위하여 Mg 질량을 1.0 g 첨가하여 성장시킨 sample 3의 X선 광전자 분광기(X-ray photoelectron spectrometer, XPS) 스펙트럼을 나타내었다. AlN 에피층 표면에 산화나 불순물로 인한 측정 오차를 줄이기 위하여 100 nm만큼의 에피층 표면을 스퍼터링에칭하여 에피층의 내부를 측정하였다. Fig. 5(a)는 0 eV부터 1300 eV의 결합 에너지(binding energy, BE) 범위에서 측정된 sample 3의 XPS 스펙트럼이다. 스펙트

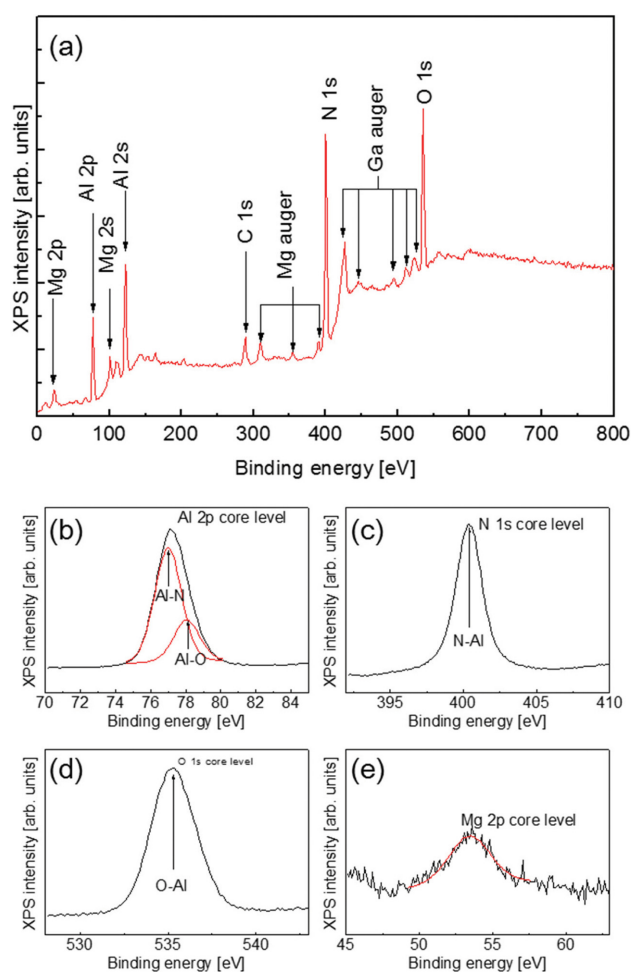


Fig. 5. (a) XPS survey spectrum of Mg doped AlN epilayers grown by using Mg quantity of 1.0 g (sample 3). (b) XPS spectrum of Al 2p core level; (c) N 1s core level; (d) O 1s core level; and (e) Mg 2p core level.

럼에서는 크게 Mg, Al, Ga, C, N, O의 광전자(photoelectron)와, Mg, Ga 오제 전자(auger electron)에 대한 피크가 관찰된다. 이 중 C 1s 계도의 결합 에너지를 표준 값으로 하여 모든 피크를 정렬하여 분석하였다. Fig. 5(b)~(e)에서는 각각 Al 2p, N 1s, O 1s, Mg 2p 계도의 광전자 스펙트럼을 자세하게 나타내었다[22-24]. Fig. 5(b)는 Al 2p 계도의 스펙트럼과 가우스 분포 결과로, 피크 중심이 각각 73.1 eV, 74.1 eV인 피크가 중첩되어 있다. 두 피크는 각각 BE = 73.01 eV에서 AlN의 Al-N, BE = 74.07 eV에서 사파이어 기판에 의한 Al-O에 해당하는 광전자 결합 에너지와 일치함을 확인하였다. Fig. 5(c)는 N 1s 계도의 광전자 스펙트럼으로써 BE = 396.4 eV에서 단일 피크만이 관찰되는데, AlN 에피층에 의한 N의 광전자 결합 에너지와 일치한다. Fig. 5(d)는 O 1s 계도의 광전자 스펙트럼으로써 BE = 531.0 eV에서 단일 피크만이 관찰되는데, 사파이어 기판에 의한 O의 광전자 결합 에너지와 일치한다. 앞선 결과들로 사파이어 기

관 위에 AlN 에피층의 성장을 확인할 수 있다. Fig. 5(e)는 피크 중심이 BE = 49.5 eV에서 검출된 광전자 스펙트럼을 나타내었다. X. Sun 등[22]과 J. Xiong 등[23]의 결과에 따르면 50.0 eV에서 Mg이 도핑된 AlN 박막의 XPS 측정에서 Mg 2p 궤도의 광전자 스펙트럼이 관찰되었는데, Fig. 5(e)에서 49.5 eV에서 Mg 2p 궤도의 광전자 스펙트럼이 관찰된 것으로 보아 혼합소스 HVPE 방법으로 AlN에 Mg이 도핑되었음을 증명할 수 있다. 0.5 eV만큼의 오차는 공정 중에 발생하는 산화나 Al이나 N과의 결합에 의하여 피크 이동이 일어난 것으로 판단된다. 측정된 XPS 스펙트럼 그래프의 면적을 통하여 각 원소의 at%를 계산해 볼 수 있는데, Al-N 스펙트럼의 Al과 N-Al 스펙트럼의 N은 각각 1:1의 원자 비율로 계산되고, 성장을 위해 소스 영역에 첨가된 Ga 원자 비율은 1 at% 미만이었다. Al-O의 Al의 원자 비율과 O=Al의 O 원자 비율은 약 2:3으로, Al₂O₃에 의한 스펙트럼으로 확인되었다. Ohmic 접합과 높은 저항으로 인해 Hall 측정은 못하였으나 MOCVD로 Mg을 도핑한 AlN의 XPS 결과와 비교하여 Al, Mg을 혼합하여 사용한 혼합 소스 HVPE 방법으로 AlN 에피층 내에 Mg 도핑을 할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 사파이어 기판 위에 혼합 소스 HVPE 방법을 이용하여 Mg이 도핑된 AlN 에피층을 성장하였다. AlN 에피층의 Mg 농도는 혼합 소스에 첨가하는 Mg 금속의 질량으로 조절하였고, EDS 측정으로 성장된 에피층의 Mg 원자 비율이 Mg 금속의 질량에 비례하여 변화되는 것을 확인하였다. 첨가되는 Mg 금속의 질량이 증가하여 도핑되는 Mg 양이 증가됨에 따라 AlN 에피층의 표면 상태의 저하가 발생되었고, 높은 농도의 도핑을 위하여 일정 질량 이상의 많은 Mg 금속을 첨가하면 AlN 결정 외에 Mg과 관련된 다른 물질로 결정 구조의 변화가 일어남을 XRD 측정을 통해 확인 되었다. XPS 측정 결과에서 Mg 원소의 광전자 스펙트럼이 관찰되어, 혼합 소스 HVPE 방법으로 AlN 에피층의 Mg 도핑을 확인되었다. 성장된 에피층의 결정 구조가 영향을 받지 않는 영역에서 Mg 도핑 농도를 최적화 된다면 우수한 p형 AlN 에피층을 성장하기 용이할 것으로 기대된다.

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. Dohler, "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 and J.A. Del Alamo, "Growth of InP high electron mobility transistor structures with Te doping", *J. Crystal Growth* 278 (2005) 596.
- [10] 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.
- [11] Y. Taniyasu, M. Kasu and T. Makimoto, "An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres", *Nature* 325 (2006) 441.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [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] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] K.H. Kim, J.Y. Yi, H.J. Lee, M. Yang, H.S. Ahn, S.N. Yi, J.H. Chang, H.S. Kim, S.C. Lee and S.W. Kim, “Hydride vapor phase epitaxy for the growth of AlGaN crystal”, *Sae Mulli* 48 (2004) 546.
- [20] 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 and Cryst. Technol.* 22 (2012) 11.
- [21] 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 and Cryst. Technol.* 25 (2015) 45.
- [22] X. Sun, J. Xiong, W. Zhang, L. Liu and H. Gu, “Investigation of blue luminescence in Mg doped AlN films”, *J. Alloys Compd.* 621 (2015) 314.
- [23] J. Xiong, P. Guo, F. Guo, X. Sun and H. Gu, “Room temperature ferromagnetism in Mg-doped AlN semiconductor films”, *Mater. Lett.* 117 (2014) 276.
- [24] L. Rosenberger, R. Baird, E. McCullen, G. Auner and G. Shreve, “XPS analysis of aluminum nitride films deposited by plasma source molecular beam epitaxy”, *Surf. Interfaces* 40 (2008) 1254.