

Growth of GaAs/AlGaAs structure for photoelectric cathode

Sung Geun Bae*, Injun Jeon* and Kyoung Hwa Kim*^{***†}

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

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

(Received November 2, 2017)

(Revised November 27, 2017)

(Accepted December 4, 2017)

Abstract In this paper, GaAs/AlGaAs multi-layer structure was grown by liquid phase epitaxy with graphite sliding boat, which can be used as a device structure of a photocathode image sensor. The multi-layer structure was grown on an n-type GaAs substrate in the sequence as follows: GaAs buffer layer, Zn-doped p-type AlGaAs layer as etching stop layer, Zn-doped p-type GaAs layer, and Zn-doped p-type AlGaAs layer. The Characteristics of GaAs/AlGaAs structures were analyzed by using scanning electron microscope (SEM), secondary ion mass spectrometer (SIMS) and hall measurement. The SEM images shows that the p-AlGaAs/p-GaAs/p-AlGaAs multi-layer structure was grown with a mirror-like surface on a whole (1.25 mm × 25 mm) substrate. The Al composition in the AlGaAs layer was approximately 80 %. Also, it was confirmed that the free carrier concentration in the p-GaAs layer can be adjusted to the range of $8 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ by hall measurement. In the result, it is expected that the p-AlGaAs/p-GaAs/p-AlGaAs multi-layer structure grown by the LPE can be used as a device structure of a photoelectric cathode image sensor.

Key words Photoelectric cathode, LPE, compound semiconductor, GaAs, AlGaAs

광전음극 소자용 GaAs/AlGaAs 구조의 LPE 성장

배승근*, 전인준*, 김경화*^{***†}

*한국해양대학교 전자소재공학과, 부산, 49112

**한국해양대학교 화합물반도체공정기술센터, 부산, 49112

(2017년 11월 2일 접수)

(2017년 11월 27일 심사완료)

(2017년 12월 4일 게재확정)

요약 본 논문에서는 광전 음극 이미지 센서로 사용될 수 있는 광소자용 재료로 III-V 족 화합물 반도체인 GaAs/AlGaAs 다층 구조를 LPE(Liquid Phase Epitaxy) 방법에 의해 성장하였다. n형 GaAs 기판 위에 수십 nm의 GaAs 완충층을 형성 한 후 Zn가 도핑된 p-AlGaAs 에칭 정지 층(etching stop layer)과 Zn가 도핑된 p-GaAs 층 그리고 Zn가 도핑된 p-AlGaAs 층을 성장하였다. 성장된 시료의 특성을 조사하기 위하여 주사전자현미경(SEM)과 이차이온질량분석기(SIMS) 그리고 홀(Hall) 측정 장치 등을 이용하여 GaAs/AlGaAs 다층 구조를 분석하였다. 그 결과 1.25 mm × 25 mm의 성장 기판에서 거울면(mirror surface)을 가지는 p-AlGaAs/p-GaAs/p-AlGaAs 다층 구조를 확인할 수 있었으며, Al 조성은 80 %로 측정 되었다. 또한 p-GaAs층의 캐리어 농도는 $8 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ 범위까지 조절할 수 있음을 확인하였다. 이 결과로부터 LPE 방법에 의해 성장된 p-AlGaAs/p-GaAs/AlGaAs 다층 구조는 광전 음극 이미지 센서의 소자로서 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

1. 서 론

최근 반도체를 이용한 광 음극 소자의 개발이 주목을 받고 있다. 일반적으로 반도체 표면에 빛이 입사되어 광 전효과에 의하여 전자를 방출하는 현상의 소자는 광전자

증배관과 같은 광 감지기에서 음극을 떠는 전극 부분의 소자이다. 아주 미세한 신호를 증폭시켜서 영상을 볼 수 있는 것으로 광 증폭기가 있으며, 특히 군사적 목적으로 많이 사용되고 있는 야간 투시경(night vision)에 주로 사용되고 있다. 열화상 카메라로 영상을 인식하는 열화상(thermal imaging) 장비, 광증폭관을 통해 빛을 감지 하는 영상 증폭(image intensification) 장비 그리고 근적외선(near-infrared-ray, NIR) 대역의 LED를 외부 조명

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

으로 사용하여 CCD 카메라로 영상을 인식하는 수동 조명(active illumination) 등이 모두 연관된 기술이라 할 수 있다[1-5]. 이러한 기술의 핵심소자로는 초고진공(약 10^{-10} Torr) 내에 부착되어 있는 광음극(photo-cathode) 소자로 입사한 빛에 의해 전자가 방출하는 역할을 한다. 1980년대부터 개발되기 시작하여 현재 사용되고 있는 기술로는 영상증폭관의 광전음극으로 GaAs 재료를 주로 사용하고 있다. 특히 III-V 화합물 반도체인 GaAs의 경우는 자외선에서 930 nm까지 넓은 반응 스펙트럼 범위를 가지고 있어 감응대역이 확장되었으며, 운영조도도 많이 개선이 되어 매우 중요한 재료로 연구되고 있다.

한편 기판 결정 위에 일정한 방향성의 단결정을 성장시키는 방법으로는 액상 에피택시(liquid phase epitaxy, LPE)[6-9], 유기금속화학증착법(metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)[10], 그리고 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy, MBE)[11] 등이 있다. 이중 LPE는 서로 다른 용점을 가진 반도체를 혼합하면 높은 용점을 가진 반도체의 용점 보다 낮은 용점의 용융액을 형성할 수 있어 이를 이용하여 결정을 성장하는 방법이다. 따라서 고온 결정성장에 의한 문제점 등을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

GaAs는 주기율표상의 III-V족의 화합물 반도체에 속하며 GaAs의 용점은 1238°C 이며 금속 Ga에 의하여 LPE 방법을 이용하게 되면 그 용융액을 800°C 이하의 용점에서 GaAs 결정을 성장할 수 있다. 일정한 온도에서 Ga + GaAs 용액을 형성한 후 이 용액의 용점(melting point)으로부터 서서히 냉각 시키면 단결정의 GaAs 층을 같은 종류의 GaAs 기판 위에서 얻을 수 있다. AlGaAs의 경우도 마찬가지로 Ga + GaAs + Al 용액을 일정한 온도에서 형성한 후 성장할 수 있다. 이때 Al의 농도를 조절하게 되면 AlGaAs의 에너지 밴드의 변화를 실현할 수 있어 광음극 소자의 매우 주요한 재료로 주목을 받고

있다.

본 논문에서는 GaAs/AlGaAs 다층 구조를 LPE 방법에 의해 성장하였다. GaAs 기판을 사용하였으며 AlGaAs 층과 p-GaAs 층 그리고 p-AlGaAs 층을 연속적으로 성장한 후 전계 방출형 주사 전자 현미경(field emission scanning electron microscopy, FE-SEM)을 통해 단면을 확인하였다. 이차이온질량분석기(secondary ion-mass spectrometry, SIMS)를 이용하여 성분 분석을 실시하였다. 홀(Hall) 계수와 캐리어(carrier)의 이동도(mobility)는 hall 측정 장치를 사용하였다. 그 결과 GaAs 기판 위에 성장한 p-AlGaAs/p-GaAs/p-AlGaAs 다층 구조를 확인할 수 있었으며 이는 광전음극 이미지 센서에 이용될 수 있는 가장 적합한 구조라고 판단된다[12].

2. 실험

Fig. 1은 본 논문에서 성장한 GaAs/AlGaAs 다층 구조의 단면 개략도이다. GaAs/AlGaAs 다층 구조는 총 4개의 층으로 구성되어 있으며, n형 GaAs 기판 위에 안

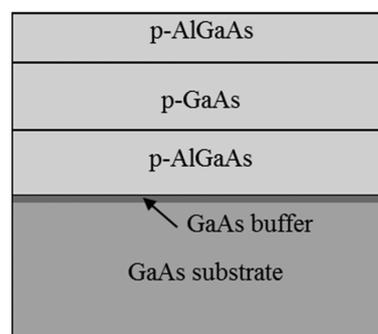


Fig. 1. Schematic diagram of the cross-sectional GaAs/AlGaAs multi-layer structure.

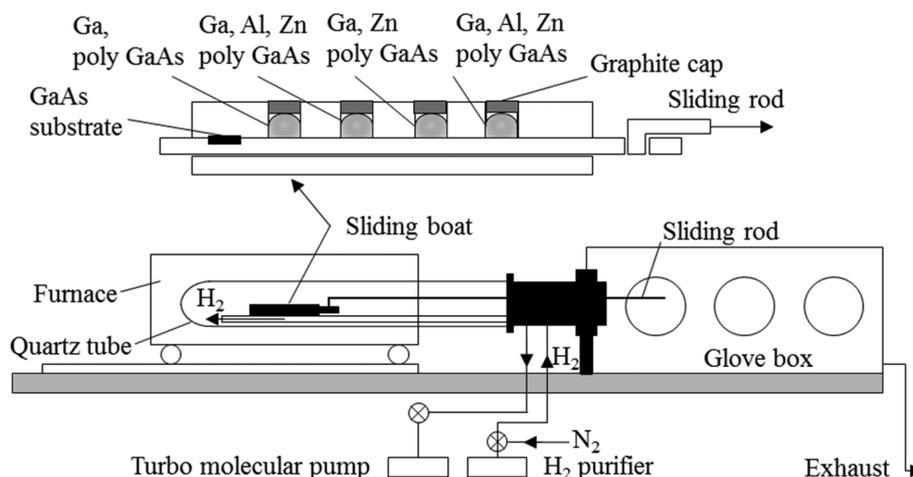


Fig. 2. Schematic diagram of the liquid phase epitaxy system.

정된 GaAs/AlGaAs 다층 구조의 성장을 위하여 수십 nm의 GaAs buffer 층을 성장한 후 에칭 정지 층으로 사용될 Zn가 도핑된 p-AlGaAs 층과 Zn가 도핑된 p-GaAs 층 그리고 Zn가 도핑된 p-AlGaAs 층을 연속적으로 형성하였다.

Fig. 2는 본 논문에서 사용한 LPE 장비의 개략도를 나타내었다. 반응관은 석영관으로 이루어져 있으며, 3 zone furnace로 구성되어 있다. 반응관 내부에는 다층 층 성장이 가능한 흑연 슬라이딩 보트가 배치되어 있으며 내부로 정제된 수소가 공급된다. 슬라이딩 막대에 의해 흑연 슬라이딩 보트의 기관 부분이 일정한 시간에 따라 움직이게 되어 여러 개의 칸으로 나뉘어진 슬라이딩 보트를 지나면서 과 포화된 용액의 소스와 반응하여 다층 성장이 가능하도록 설계되어 있다. 전체 진공 시스템은 터보 펌프를 사용하여 반응관 내의 산소를 완전히 제거하여 순수한 수소 분위기에서 성장이 가능하다.

LPE 방법은 과 포화된 용액을 seed인 기관과 접촉시켜 결정을 형성한다. 따라서 평형상태의 용액을 과포화상태로 만들어 주기 위해서는 포화상태의 임의의 온도에서 냉각을 시켜 과포화 상태를 유지하여야만 seed인 기관이 melt-back 현상이 발생하지 않고 결정이 성장되게 된다. 온도를 냉각시키는 방법은 몇 가지 형태로 구분되며 대표적인 것으로 과냉각법(super-cooling method), 2상 냉각법(two phase-cooling method), 계단냉각법(step-cooling method) 그리고 평형냉각법(equilibrium-cooling method) 등이 있다[13]. 본 논문에서 사용한 과 냉각법은 용액을 내부에서 석출되지 않는 온도 ΔT 만큼 냉각시킨 후 기관과 용액을 접촉 시킨 후 같은 비율로 냉각을 시키는 방법이다.

흑연 슬라이딩 보트의 각각의 칸(well)에는 첫 번째 층인 GaAs 버퍼층의 성장을 위하여 Ga 17g과 poly GaAs 1g을 혼합하였으며, 두 번째 층인 p-AlGaAs 층의 성장을 위하여 Ga 17g, Al 100mg, Zn 135mg 그리고 poly GaAs 1g을 혼합하였다. 3번째 층인 p-GaAs 층의 경우는 캐리어 농도를 $\sim 10^{18}/\text{cm}^2$ 이상으로 만들기 위하여 Ga 17g, Zn 243mg과 poly GaAs 1g을 혼합하였으며, 4번째 층인 p-AlGaAs 층은 Ga 17g, Al 100mg, Zn 135mg 그리고 poly GaAs 1g을 혼합하였다. 모든 용액들은 775°C에서 포화상태가 되며 남은 poly GaAs는 흑연 슬라이딩보트의 작동에 의해 제거될 수 있도록 설계하였다. 포화 상태의 온도에서 과냉각온도를 $\Delta t = 3^\circ\text{C}$ 로 하였으며 기관과 접촉 후 냉각 온도 비(cooling rate)는 $0.3^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 설정하였다. 성장시간은 각각 10초, 1분, 1분 40초 그리고 2분 50초로 하였다. 반응관은 흑연 슬라이딩 보트에 모든 시료와 기관을 장치하여 고진공으로 만든 후 수소 분위기에서 성장을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 성장된 GaAs/AlGaAs 다층 구조의 표면과 단면 측정 결과이다. Fig. 3(a)는 배율 1000배의 광학 현미경 표면 이미지로 성장된 표면의 부드러운 물결무늬가 보이지만 매우 평탄한 면임을 알 수 있다.

Fig. 3(b)와 (c)는 FE-SEM으로 관찰한 표면과 단면 결과이다. Fig. 3(b)의 표면 사진으로부터 Fig. 3(a)의 광학 이미지와 마찬가지로 거의 결점이 없는 거울 면(mirror surface)이 성장되었음을 확인할 수 있다. Fig. 3(c)의 단면 결과로 GaAs/AlGaAs 다층 구조의 성장이 잘 된 것을 확인할 수 있다. GaAs 층의 경우 $1.1 \mu\text{m}/\text{min}$ 의 성장률을 보여주며 AlGaAs 경우 $0.38 \mu\text{m}/\text{min}$ 의 성장률을 보여주고 있다. GaAs 버퍼층의 경우 FE-SEM 상으로는 층이 구분되지 않는 이유로 기관이 장착되어 있는 슬라이딩 보트를 용액과 접촉하면서 정지하지 않고 바로 2번째 용액이 있는 칸(well)으로 이동하는 시간을 10초로 계산하였으며 매우 얇은 층이 성장되었을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 p-GaAs 단일 층의 Hall 측정 결과로, LPE 성장에서 Zn의 혼합 량에 따른 자유 캐리어 농도를 나타낸다. Hall 측정을 위한 p-GaAs 단일 층은 Semi-insulating(S.I.) GaAs 기관 위에 성장하여 4-단자 측정이 가능하도록 전극을 증착하였다. Zn의 혼합 양의 변화로부터 캐리어 농도는 $\sim 8 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 에서 $\sim 8 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ 범

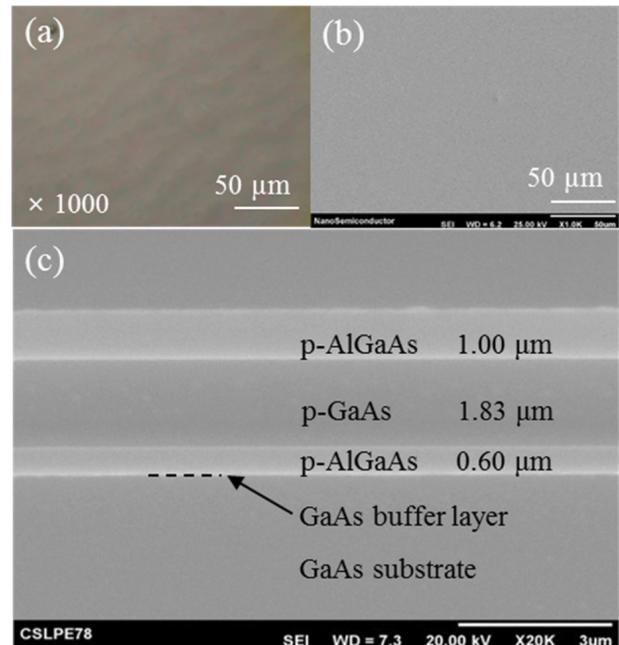


Fig. 3. Plan-view and cross-sectional images of and FE-SEM images of GaAs/AlGaAs multi-layer structure. (a) optical microscope image of surface, (b) FE-SEM image of surface and (c) cross-sectional FE-SEM image of GaAs/AlGaAs multi-layer structure.

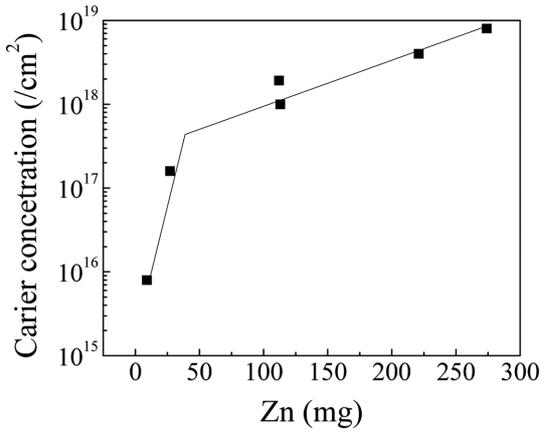


Fig. 4. The variation of the carrier concentration depending on Zn.

위까지 조절됨을 확인하였다.

Fig. 5는 Rigaku사의 SmartLab 고분해능 X선 회절 (high-resolution x-ray diffraction, HR-XRD) 장치를 사용한 AlGaAs/GaAs 다중 층의 XRD 2theta/omega 스캔 결과이다. Fig. 5(a)는 $2\theta = 20\sim 80^\circ$ 범위의 측정 결과이며, $2\theta = 31.62^\circ$, $2\theta = 66.07^\circ$ 부근에서 강한 두 개의 피크가 관찰된다. 두 피크는 입방정계 AlGaAs/GaAs 다중 층의 피크로서, $2\theta = 31.62^\circ$ 에서는 (200), $2\theta = 66.07^\circ$ 에서는 (400)면의 회절 피크에 해당한다. AlGaAs는 AlAs와 GaAs의 격자상수 사이에서 Al 조성에 따라 격자상수가 바뀌는데, (200), (400)면의 회절 피크를 Fig. 5(b)와 5(c)에 자세하게 나타내었다. 각각의 피크는 Al 조성에 따라 shift된 피크들이 중첩되어 있는데, Gaussian fitting을 통하여 피크를 분리하였다.

먼저 (200)면의 회절은 피크 중심이 31.60° 과 31.65° 인 두 개의 피크로 분리되었다. 31.65° 에서 관찰되는 피

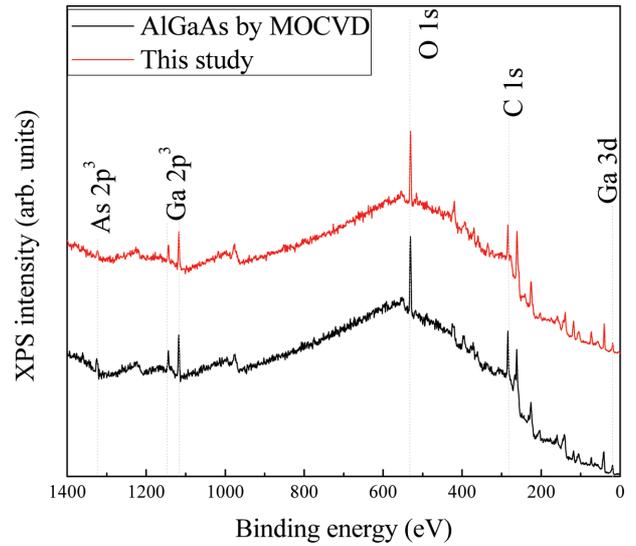


Fig. 6. XPS results of p-AlGaAs layer grown by LPE (red) and AlGaAs layer grown by MOCVD (black) for the comparison.

크는 JCPDS database에 따라 GaAs (200)의 회절 피크와 일치한다. Shift된 회절 피크로 계산한 격자 상수와 AlGaAs의 Vegard 법칙을 사용하면 31.60° 에서 발생하는 피크로 계산된 Al 조성은 70~75% 정도이다. 같은 방법으로 Fig. 5(c)에서 관찰된 (400)면의 회절 피크를 Gaussian fitting하였다. 이론상으로 (400) 면의 AlGaAs와 GaAs의 회절 피크는 매우 근접하나, 본 논문에서 2개의 피크로 분리되어 관찰되는 것은 높은 농도의 Zn 도핑에 의한 영향으로 판단된다.

Fig. 6은 Zn을 도핑한 AlGaAs 층의 화학적인 결합 에너지로 화합물의 화학적 상태를 알아보기 위하여 측정된 X선 광전자 분광(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 스펙트럼을 나타내었다. LPE로 성장된 p-AlGaAs

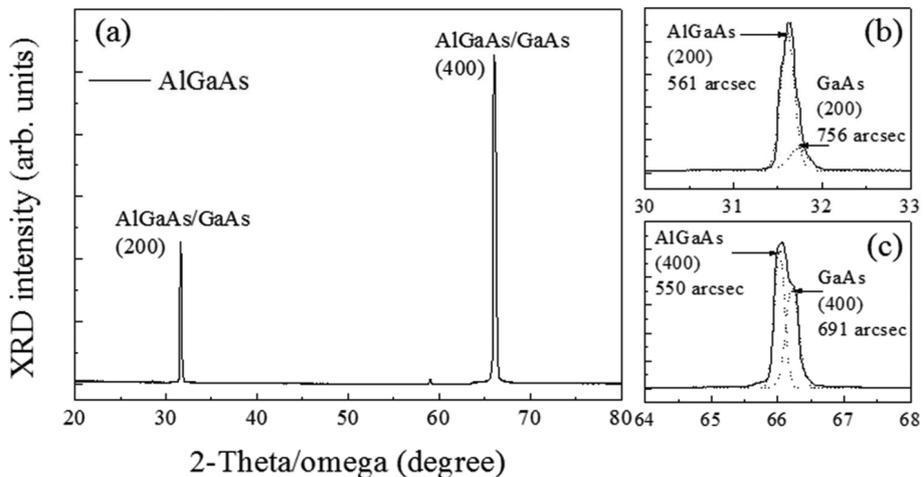


Fig. 5. XRD 2theta/omega scan results of GaAs/AlGaAs multi-layer structure. The ranges of 2-theta; (a) $20\sim 80^\circ$, (b) $30\sim 33^\circ$, and (c) $64\sim 68^\circ$.

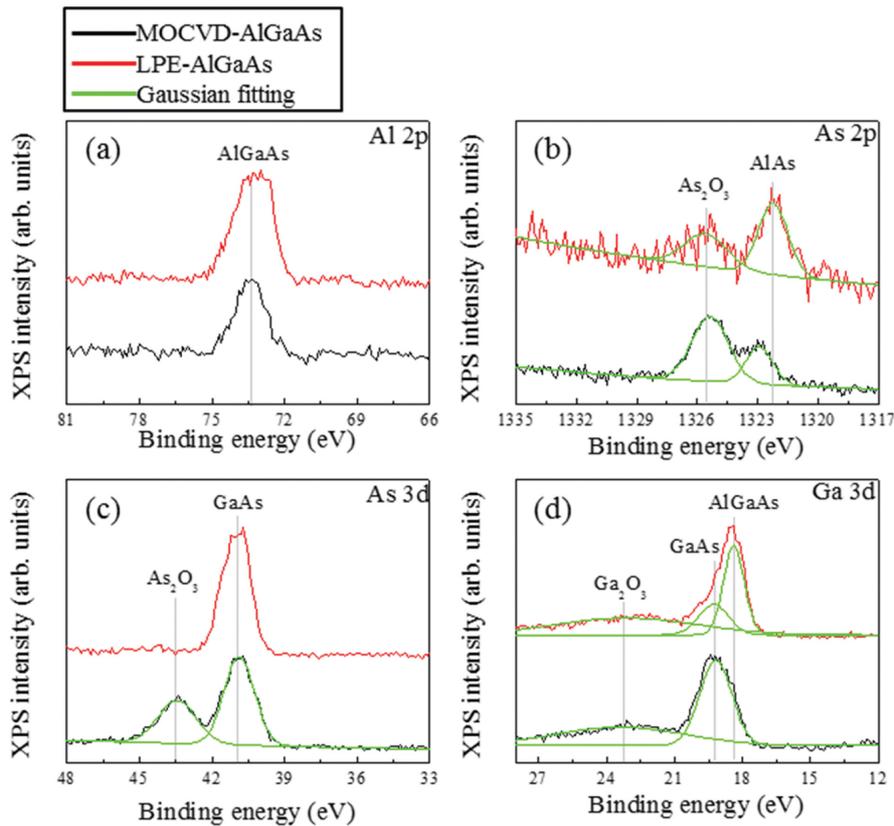


Fig. 7. XPS spectra of (a) Al 2p core level, (b) As 2p, (c) As 3d, and (d) Ga 3d of p-AlGaAs layer grown by LPE (red line) and AlGaAs layer grown by MOCVD (black line), respectively.

의 특성 비교를 위하여 MOCVD로 성장한 AlGaAs 층의 XPS 측정 결과를 표준 시료로 사용하였다.

결합에너지(binding energy) 0~1400 eV의 범위에서 측정된 XPS 스펙트럼에서는 전체적으로 As 2p, Ga 2p, O 1s, C 1s, Ga 3d에 관련된 피크들이 관찰된다. 대부분의 피크들이 동일한 위치에서 발생하는 것을 보아, LPE로 성장한 AlGaAs 층의 화학적인 결합 상태가 양호하다는 것을 확인할 수 있다. 도핑한 Zn에 관한 피크는 본 결과에서는 확인되지 않은 것으로 보아 화학적인 조성에 영향을 끼치지 않는 불순물 도핑 범위의 원자 비율을 가지고 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 측정된 원시데이터를 바탕으로 세부적으로 각 원소들의 피크를 나타내었다. 각 피크의 분석은 NIST XPS database와 J.A. Taylor, D.J. Carrad 등이 보고한 연구결과를 참고하였다[16-18]. Fig. 7(a)는 Al 2p core level에서 발생하는 광전자 스펙트럼을 비교한 것이다. AlGaAs의 2p core level의 에너지는 Al 조성에 무관하게 73.6 eV 부근에서 발견되고, 두 스펙트럼 모두 73.6 eV에서 피크가 관찰되기 때문에, LPE로 성장한 AlGaAs 층의 화학적 특성이 상당히 양호하다고 평가할 수 있다[16].

Fig. 7(b)는 As 2p core level에서 발생하는 광전자 스펙트럼으로, 두 시료 모두 두 개의 피크가 중첩되어

관찰된다. 두 시료에서 모두 같은 위치에서 관찰되는 1325.5 eV에서 발생하는 피크는 산화에 의한 As_2O_3 의 As 2p binding energy와 일치한다. MOCVD로 성장한 시료의 경우 As_2O_3 의 피크 세기가 높은 것은 AlGaAs 성장 중에 발생하는 산화가 원인인 것으로 생각된다[17]. LPE로 성장한 시료의 경우 As_2O_3 의 피크에 비해 1322 eV 부근에서 AlGaAs의 As 2p binding energy 피크가 높게 검출된 것으로 보아 산화에 대한 영향이 적으며, bulk 특성에 가까운 AlGaAs가 성장된 것으로 판단된다. Fig. 7(c)는 As 3d core level에서 발생하는 광전자 스펙트럼을 비교한 것이다. MOCVD로 성장한 시료의 XPS 스펙트럼에는 43.45 eV에서 산소와의 결합에 의해 성장된 As_2O_3 의 피크가 관찰되고, 40.8 eV에서 AlGaAs의 As 3d 피크가 관찰된다[18]. As_2O_3 의 피크 세기가 높은 것으로 보아 잔류 산소에 의한 것이 아닌 성장 중에 발생한 시료의 산화가 원인인 것으로 판단된다. LPE 시료의 경우 40.8 eV에서 GaAs의 As 3d 피크를 제외하고는 산화에 대한 피크가 발견되지 않는 것으로 보아 양질의 AlGaAs가 성장된 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(d)는 Ga 3d core level에서 발생하는 광전자 스펙트럼을 비교한 것이다. MOCVD로 성장한 시료의 XPS 스펙트럼에는 23 eV 부근에서 잔류 산소에 의해서 생성된 Ga_2O_3

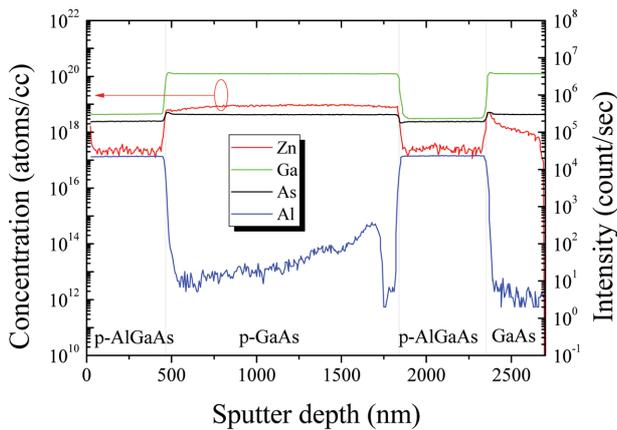


Fig. 8. SIMS depth profile of GaAs/AlGaAs multi-layers.

의 피크와 19.3 eV에서 GaAs의 피크가 중첩되어 관찰된다. 반면 LPE로 성장한 시료에서는 잔류 산소에 의한 Ga_2O_3 와 GaAs의 피크가 관찰되고, 18.4 eV에서 높은 피크가 함께 관찰된다. AlGaAs의 Al 조성에 따른 Al 2p core level의 에너지의 변화는 매우 작으나, Ga 3d 피크는 Al 조성에 따라 shift 되는데, 본 논문에서는 높은 Al 조성을 가진 AlGaAs가 성장되었기 때문에 Ga 3d core level 에너지의 피크가 shift되어 관찰되는 것으로 판단된다. 또한 이것으로 Al 조성이 높은 양질의 AlGaAs가 성장되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 성장된 GaAs/AlGaAs 다층층의 SIMS의 결과이다. 분석장비는 CAMECA IMS-6f Magnetic Sector SIMS 장치를 사용하였다. Cs^+ gun을 사용하였으며, 일차이온 빔의 에너지는 5 keV이다. 성장된 에피 표면에 1차 이온을 조사하여 방출되는 이온화되어 있는 2차 이온을 질량 분석하는 방법으로 에피 중에 함유되어 있는 미량의 불순물을 고감도 측정할 수 있다. 표면으로부터 Zn, Ga, As 그리고 Al의 깊이에 따른 농도를 알 수 있다. 표면으로부터 Al과 Zn의 분포가 보이며 GaAs의 층에서는 Zn의 성분이 깊이에 따라 안정되게 분포되어 있음을 알 수 있다. 또한 Al 성분 또한 매우 안정적으로 분포하고 있음을 확인할 수 있다. Zn의 캐리어 농도는 Fig. 4에서와 같이 $\sim 8 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 에서 $\sim 8 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ 범위까지 조절됨을 확인할 수 있다. 기판과 접촉하는 AlGaAs 층은 안정된 Al 분포를 보여주고 있으며, $\text{NH}_3 : \text{H}_2\text{O}_2$ (1 : 10) 용액을 최종 선택하여 GaAs/AlGaAs 다층 구조를 에칭한 결과 에칭 정지 층으로서의 역할이 충분함을 확인 하였다.

4. 결 론

과 냉각법에 의한 LPE 방법으로 광전 음극 이미지 센

서로 사용될 수 있는 광소자용 GaAs/AlGaAs 다층 구조를 성장하였다. 포화 상태의 온도에서 과냉각온도를 $\Delta t = 3^\circ\text{C}$ 로 하였으며 기판과 접촉 후 냉각 온도 비(cooling rate)는 $0.3^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 설정하여 GaAs buffer/p-AlGaAs/p-GaAs/p-AlGaAs 층을 연속적으로 성장하였다. $1.25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 의 성장 기판에서 거울면(mirror surface)을 가지며, 매우 안정된 경계면을 가지는 다층 구조를 SEM 결과 확인할 수 있었다. Semi-insulator GaAs 기판 위에 성장된 Zn의 혼합 양에 따라 성장된 시료로의 Hall 측정으로부터 캐리어 농도가 $8 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 에서 $8 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ 범위까지 조절됨을 확인하였다. XPS 결과로부터 Al, Ga, As의 원소를 확인하였으며, MOCVD로 성장한 AlGaAs와 비교하여 상당히 양호한 화학적 특성을 가진 AlGaAs가 성장되었음을 확인할 수 있었다. 또한 SIMS 결과로부터 Al과 Zn의 분포가 깊이에 따라 안정되게 분포되어 있음을 알 수 있었고, Zn의 캐리어 농도 또한 Hall 측정 결과와 일치함을 확인하였다. 이 결과들로부터 LPE 방법에 의해 성장된 p-AlGaAs/p-GaAs/AlGaAs 다층 구조는 광전 음극 이미지 센서의 소자로서 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 수송기기 특화조명 핵심기술개발 전문인력양성사업(과제번호: N0001363, 조선·해양플랜트·해양환경 LED융합조명 핵심기술개발 전문인력양성)으로 지원된 연구임. 주 저자는 (주)DMS(OET)와 (주)CSsol에 감사를 표합니다.

References

- [1] Y. Xu, B. Chang, L. Chen, X. Chen and Y. Qian, "Comparison of GaAs photocathode grown by MOCVD and MBE: a first-principle and experimental research", *J. Mater. Sci. - Mater. Electron.* 28 (2017) 7429.
- [2] Y.J. Zhang, J. Zhao, J.J. Zou, J. Niu, X.L. Chen and B.K. Chang, "The high quantum efficiency of exponential-doping AlGaAs/GaAs photocathodes grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Chinese Phys. Lett.* 30 (2013) 044205.
- [3] Y.J. Zhang, J. Zhao, J.J. Zou, J. Niu and B.K. Chang, "Negative electron affinity AlGaAs/GaAs photocathodes with exponential-doping structure", *Adv. Mater. Res.* 631 (2012) 160.
- [4] X.P.V. Maldague, "Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing", John Wiley & Sons, New York (2001) 684.
- [5] X.P.V. Maldague, "Introduction to NDT by active infrared thermography", *Materials Evaluation* 18 (2002) 2.

- [6] S.I. Long, J.M. Ballantyne and L.F. Eastman, "An analysis of GaAs LPE growth methods by a diffusion limited growth model", *J. Cryst. Growth* 32 (1976) 95.
- [7] R.L. Moon and S.I. Long, "Dependence of GaAs LPE layer thickness on growth temperature", *J. Cryst. Growth* 32 (1976) 68.
- [8] J.B. Shim, D.H. Yoon and M. Yoshizawa, "Improved single crystal growth methods for oxide materials by MBE, LPE and μ -PD techniques", *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology* 5 (1995) 378.
- [9] J.B. Shim, W.N. Jeon and D.H. Yoon, "Growth and structural properties of ZnO co-doped Er:LiNbO₃ thin films by liquid phase epitaxy method", *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology* 12 (2002) 27.
- [10] S.W. Lee, H.Y. Cho, E.K. Kim, S.K. Min and J.H. Park, "Growth and characterization of GaAs and AlGaAs with MBE growth temperature", *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology* 4 (1994) 11.
- [11] S.J. Jeong and S.J. Kim, "Numerical study of the influence of inlet shape design of a horizontal MOCVD reactor on the characteristics of epitaxial layer growth", *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology* 13 (2003) 247.
- [12] D. Xiaojun, G. Xiaowan, Z. Jijun, Z. Yijun, P. Xincun, D. Wenjuan, C. Zhaoping, Z. Wenjun and C. Benkang, "Photoemission characteristics of graded band-gap AlGaAs/GaAs wire photocathode", *Opt. Comm.* 367 (2016) 149.
- [13] J.J. Hsieh, "Thickness and surface morphology of GaAs LPE layers grown by super-cooling, step-cooling, equilibrium-cooling, and two-phase solution techniques", *J. Cryst. Growth* 27 (1974) 49.
- [14] D.C. Fu, M.S. Jusoh, A.F. Mat and B.Y. Majlis, "XRD characterization of the MBE grown Si:GaAs, GaAs, AlGaAs, and InGaAs epilayer", *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, Proceedings, ICSE 2002* (2002) 514.
- [15] A. Roshko, K. Bertness, J. Armstrong, R. Marinenko, M. Salit, L. Robins, A. Paul and R. Matyi, "X-ray diffraction, photoluminescence and composition standards of compound semiconductors", *Phys. Status Solidi C* 3 (2003) 992.
- [16] J.A. Taylor, "An XPS study of the oxidation of AlAs thin films grown by MBE", *J. Vac. Sci. Technol.* 20 (1982) 751.
- [17] D.J. Carrad, A.M. Burke, P.J. Reece, R.W. Lyttleton, D.E.J. Waddington, A. Rai, D. Reuter, A.D. Wieck and A.P. Micolich, "The effect of (NH₄)₂S_x passivation on the (311)AlGaAs surface and its use in AlGaAs/GaAs heterostructure devices", *J. Phys.-Condens. Mat.* 25 (2013) 335304.
- [18] X. Guan, J. Becdeliever, A. Benali, C. Botella, G. Grenet, P. Regreny, N. Chauvin, N.P. Blanchard, X. Jaurand, G. Saint-Girons, R. Bachelet, M. Gendry and J. Penuelas, "GaAs nanowires with oxidation-proof arsenic capping for the growth of epitaxial shell", *Nanoscale* 8 (2016) 15637.