

초고진공 분자선 에피성장 시스템의 제작과 에피성장된 ZnSe/GaAs(001)의 광학특성

김은도^{1,3*} · 손영호¹ · 엄기석² · 조성진³ · 황도원¹

¹(주)알파플러스 기술연구소, 포항 790-826

²위덕대학교 반도체전자공학부, 경주 780-713

³경성대학교 물리학과, 부산 608-736

(논문접수일 : 2006년 6월 12일)

본 연구에서는 초고진공 (UHV; ultra high vacuum) 분자선 에피성장 (MBE; molecular beam epitaxy) 시스템의 제작과 성능연구가 성공적으로 이루어졌다. 초고진공 용 분자선 에피성장 시스템을 국산화개발 및 제작하여, 장비에 관한 성능 테스트를 하게 되었다. 본 장비의 진공도가 2×10^{-10} Torr에 도달함을 확인하였고, 시편 가열모듈(substrate heating module)이 1,100 °C까지 가열됨을 확인할 수 있었으며, ZnSe/GaAs(001)의 증착특성을 SEM (scanning electron microscope), AFM (atomic force microscope), XRD (x-ray diffraction), PL (photoluminescence) 등으로 조사하였다.

주제어 : 초고진공, 분자선 에피성장, 분출 증발원 (effusion cell), 플라즈마 셀 (plasma cell), 셀렌화아연 (ZnSe)

I. 서 론

분자선 에피성장(MBE; molecular beam epitaxy)은 화합물 반도체의 단결정 박막성장법의 하나로서, 각각의 원소를 증발시켜 만든 분자선을 청정한 단결정 기관 위에 분무하여 기관과 동일한 배열을 갖는 물질로 성장시키는 방법이다. 증발원과 기관의 정밀한 온도제어를 통해 성장속도를 아주 낮게 제어할 수 있으며, 원자층 단위로 박막의 구조를 조절할 수 있다[1,2]. GaN, GaAs, AlGaAs, ZnO, ZnSe 등 II-VI족 및 III-V족 화합물 반도체박막 증착을 위한 초고진공(UHV; ultra high vacuum)용 시스템의 수요가 늘어나고 있으며, effusion cell을 이용한 박막형 제품들의 수요도 증가하고 있다. 최근에는 chemical vapor deposition (CVD)방법으로 양질의 박막을 성장한 연구결과들이 많이 보고되었다[3,4]. 이전까지는 수입에만 의존하던 분자선 에피성장 시스템의 핵심 부품에 해당하는 분출 증발원 (effusion cell)을 이용한 분자선 에피성장 시스템이 국산화되어 앞으로 상당한 수입대체 효과가 기대되며, 기타 여러

분야에서도 새로운 수요가 창출될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 (주)알파플러스에서 국산화 시킨 초고진공 분자선 에피성장 시스템을 이용하여, 청색 레이저 다이오드 및 발광 다이오드 등에 사용되는 ZnSe/GaAs(001)의 증착을 구현함으로써 성능을 입증하였다.

II. 장치개요

초고진공 분자선 에피성장 시스템은 증착공정을 수행하는 주챔버 (main chamber)와 시편을 삽입하기 위한 시편이송장치 (load-lock transfer)가 부착된 보조챔버 (load-lock chamber)로 이루어지고, 주챔버에는 초고진공분위기를 만드는 터보분자펌프 (turbo molecular pump) 및 건식펌프(dry pump), 시료표면의 격자구조를 관찰하기위한 RHEED (reflection high energy electron diffraction)와 직경 6인치 크기의 형광스크린, 1,100 °C까지 가열할 수 있는 시편 가열모듈 (substrate heating module), 진

* [전자우편] gyyeom@skku.edu

공도 측정용 이온게이지 (ion gauge), 두께 측정 장치 (thickness monitor), 분압 측정 장치 (vapor flux meter), 분출 증발원과 산화물이나 질화물 증착을 위한 플라즈마 셀 등으로 이루어져 있다. 주챔버에 장착된 터보분자펌프는 2단으로 구성되어 있는데, 첫 번째 터보분자펌프는 용량이 800 l/s (OSAKA)으로 주챔버에 장착되어 있고, 두 번째 터보분자펌프는 용량이 220 l/s(OSAKA)으로 첫 번째 터보분자펌프의 배기라인에 부착되어 있으며, 주챔버의 최종 진공도를 높이기 위해서, 2단 터보분자펌프로 구성하게 되었다. 두 번째 터보분자펌프는 보조챔버의 고진공분위기를 만드는데도 사용되었다. 최종 배기펌프로는 Oil free인 건식펌프를 사용하였고, 보조챔버의 저진공분위기를 만드는데도 사용되었다. 1 X 1 인치² 또는 직경 2인치 크기의 시편이 장착가능하고, 회전과 Z축 방향으로의 움직임도 가능하며, 시편의 증착을 조절하는 셔터 (shutter)도 장착되어 있다. 진공도 측정용 이온게이지 및 분압 측정 장치는 GP307 (Granville Philips)을 사용하였고, 두께 측정 장치는 STM-100(Sycon)을 사용하였다. 분출 증발원은 STE-1400S(ALPHA PLUS CO.), 플라즈마 셀은 AP-Plasma300(ALPHA PLUS CO.)을 사용하였다. 주챔버에는 액체질소를 흘려서 냉각시킬 수 있는 냉각 trap이 있어 기본 진공도는 5X10⁻¹¹ Torr까지 가능하다.

그림 1은 MBE-AP100 모델의 분자선 에피성장 시스템과 구동장치들의 사진이고, 그림 2와 그림 3은 분자선 에피성장 시스템을 정면과 상부에서 본 개요도이다.

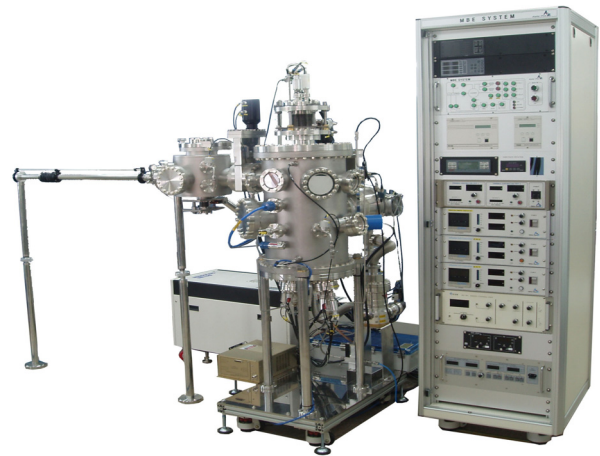


그림 1. MBE-AP100 모델의 분자선 에피성장 시스템과 구동장치 사진.

III. 실험장치의 특성 및 실험방법

초고진공 분자선 에피성장 시스템을 구성하고, 시스템의 ultimate pressure를 확인하기 위해서, 진공 배기를 진행하였다. 2단 터보분자펌프와 건식펌프로 진공배기를 한 뒤, 시스템의 baking용 할로겐램프 (halogen lamp)를 이용하여, 약 20시간 정도 baking을 하고, 48시간이 지난 후에 2X10⁻¹⁰ Torr의 진공도에 도달함을 확인할 수 있었고, 주챔버 내부에 장착된 냉각라인에 액체질소를 인입함으로써 5X10⁻¹¹ Torr의 진공도에 도달함을 확인할 수 있었으며, 그림 4에 나타내었다.

시편 가열모듈은 Tantalum wire로 이루어져 있으며, radiation heating방식을 이용하여 제작되어져

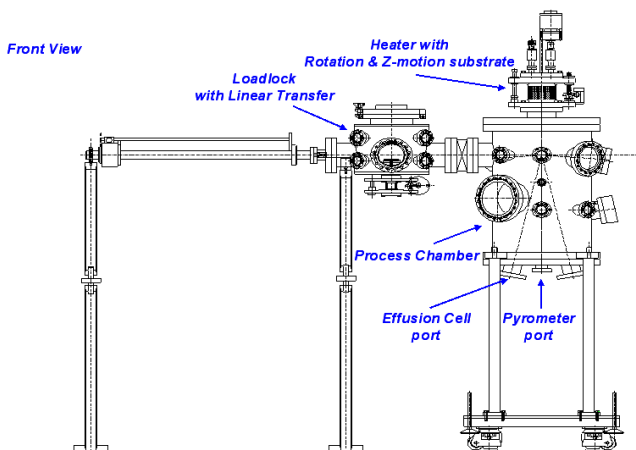


그림 2. 분자선 에피성장 시스템의 정면 개요도.

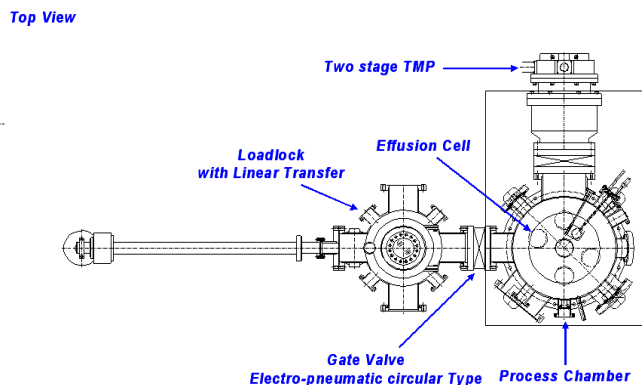


그림 3. 분자선 에피성장 시스템의 상부 개요도.

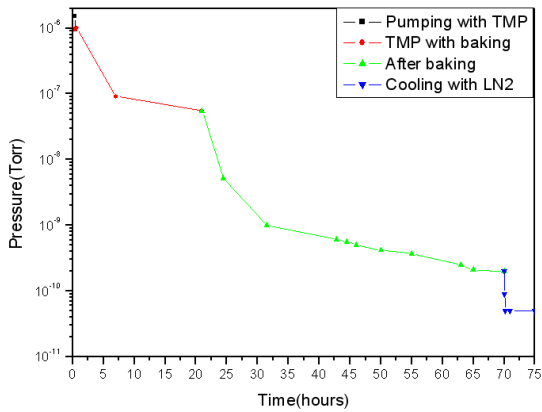


그림 4. 시간의 변화에 따른 진공도 변화.

있다. 시편 가열모듈에 전압과 전류를 인가하는 컨트롤러는 설정한 온도에 잘 도달하도록 PID (proportional integral derivative)제어가 가능한 것을 사용하였고, 온도를 읽어 들이는 열전대는 K-type을 사용하였다. 설정한 온도와 측정된 온도를 서로 비교

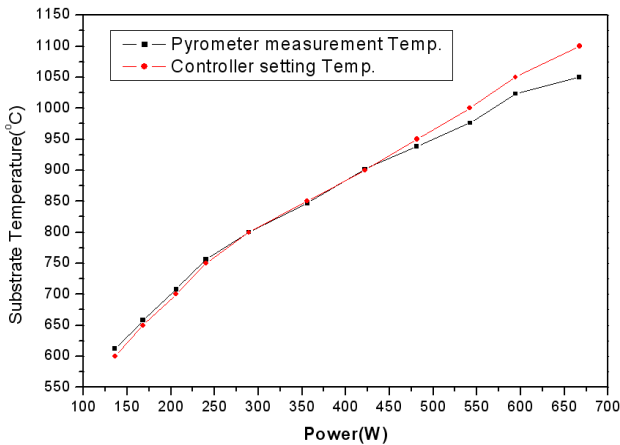


그림 5. 소비전력에 따른 기판온도의 변화.

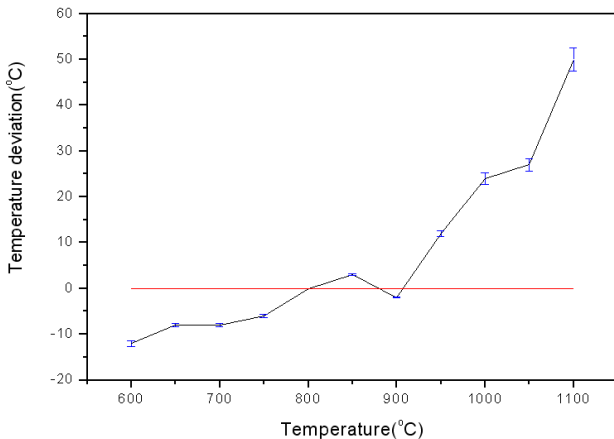


그림 6. 설정온도에 따른 기판온도분포.

한 값을 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 설정한 온도는 컨트롤러와 열전대가 읽어 들이는 값이고, 측정된 온도는 pyrometer로 측정된 값이다. Pyrometer는 TR-630(MINOLTA)을 사용하였다. 900 °C까지는 설정한 온도와 측정된 온도의 편차가 거의 나지 않았으나, 950 °C에서 1100 °C까지는 온도편차가 50 °C 정도까지임을 확인 할 수 있었으며, 기판을 1000 °C 이상의 고온으로 유지시키기 위해서는 기판을 구성한 발열체와 반사판을 잘 구성하여, 열손실을 최소화 시켜야 할 것이다. 정확한 온도의 측정은 Pyrometer를 활용하여 온도 보정을 할 수 있었으며, 탈기체후의 1000 °C일 때 진공도는 7.5×10^{-9} Torr이었다.

그림 7은 모델 STE-1400S인 분출 증발원의 1400 °C의 온도에서 ± 0.1 °C 이내로 안정화되는 것을 확인할 수 있다.

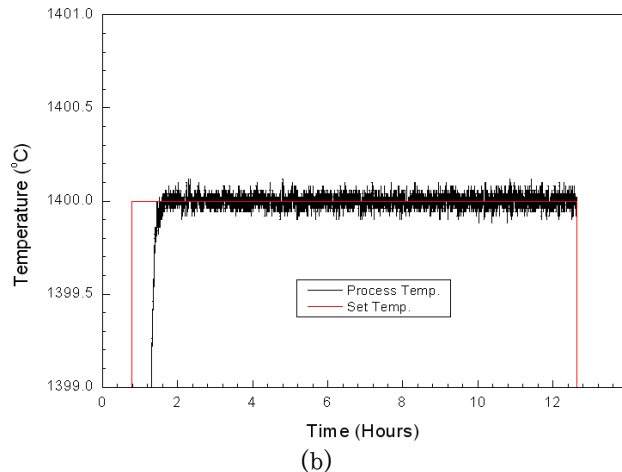
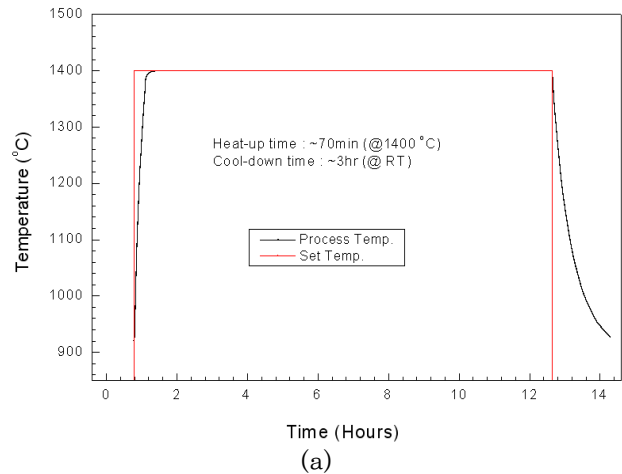


그림 7. 분출 증발원(STE-1400S)의 시간변화((a) 전체 온도범위, (b)1400 °C를 확대해서 본 그래프)에 따른 온도변화.

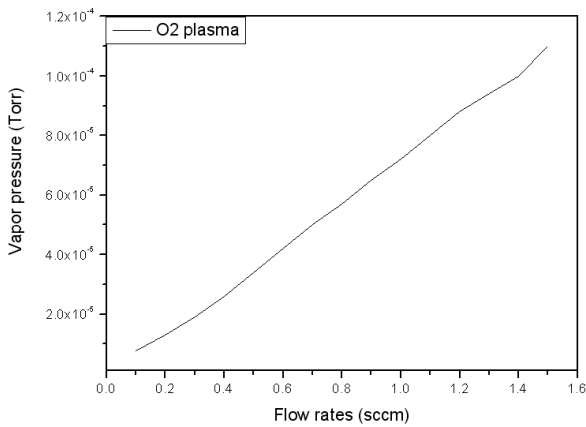


그림 8. O₂용 플라즈마 셀의 산소 주입양에 따른 O₂분압 변화 측정치.

그림 8은 초고진공 분자선 에피성장 시스템내부에 설치된 플라즈마 셀로 산소의 주입양에 따른 분압변화의 측정치를 나타내었다. 이 플라즈마 셀은 ZnSe/GaAs(001)의 증착과는 무관하며, 산화물 또는 질화물의 시료를 증착할 때 주입되는 산소나 질소의 흡착을 원활하게 하기 위해서, 플라즈마 처리를 하는 용도로 사용된다. 산소의 주입량은 0.1 sccm단위로 변화하면서 1.5 sccm까지 측정하였다. 이때, 기본 진공도는 1×10^{-9} Torr이고, 플라즈마 셀의 파워는 RF 100 W로 인가하였으며, 분압 측정 장치는 시편의 중심에 고정하여 측정하였다.

그림 9와 그림 10은 초고진공 분자선 에피성장 시스템내부에 설치된 Zn용 분출 증발원과 Se용 분출 증발원의 시편위치에 따른 분압 측정치를 나타내었다.

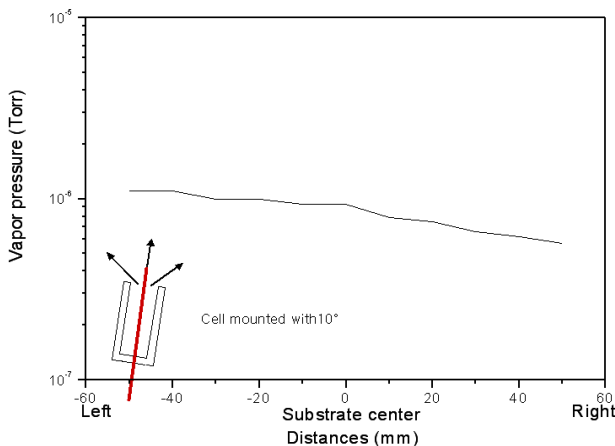


그림 9. Zn용 분출 증발원의 위치에 따른 Zn분압 측정치.

Zn용과 Se용 분출 증발원은 시편과 각각 직선거리 320 mm정도 떨어져 있고, 시편의 중심과의 각도 10°로 기울어져 있다. 이때 사용된 것은 분압 측정 장치이고, Zn용 분출 증발원의 온도는 325 °C, Se용 분출 증발원의 온도는 190 °C이며, 기본 진공도는 1×10^{-9} Torr이었다.

앞에서 언급한 구성장치들의 성능입증과 더불어 GaAs(001)기판 위에 ZnSe를 증착하였다. GaAs(001)기판 위에 ZnSe를 증착하기 위한 공정 조건은 다음과 같다. Zn용 분출 증발원 1개와 Se용 분출 증발원 1개를 이용하였다. 기초 진공도는 5×10^{-9} Torr, 기판의 온도는 280 °C, Zn용 분출 증발원의 온도는 325 °C, Se용 분출 증발원의 온도는 190 °C, 두께 측정 장치를 통한 ZnSe의 증착율은 1.5~2.0 Å/s이다 [5,6].

IV. 결과 및 논의

그림 11과 그림 12는 ZnSe/GaAs(001)박막의 표면과 단면의 특성을 SEM 과 AFM을 이용하여 보여주는 것으로, 전체 두께는 1.37 μm정도이고, 분자층 단위의 조밀하고 균일한 표면특성을 보이고 있으며, XRD에 의해 cubic 구조인 GaAs의 peak와 ZnSe peak이 일치하는 것으로 보이나, ZnSe이 다결정(poly crystal)으로 성장된 것으로 판단된다. GaAs(001)기판의 XRD peak 위치와 ZnSe/GaAs(001)박막의 XRD peak 위치가 일치함을 확인할 수 있었으

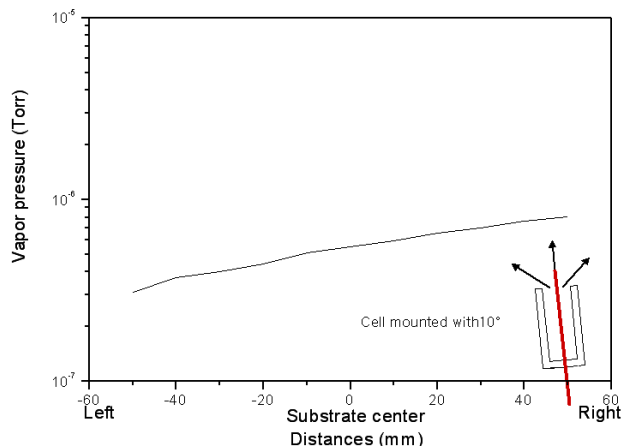
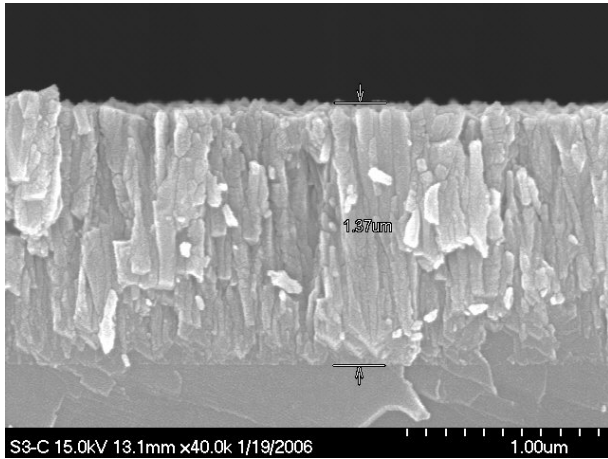
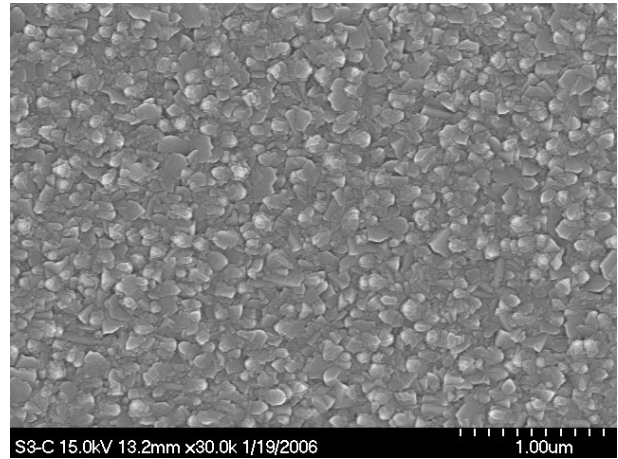


그림 10. Se용 분출 증발원의 위치에 따른 Se분압 측정치.



(a) ZnSe/GaAs(001) 단면사진,



(b) ZnSe 표면사진.

그림 11. SEM을 이용한 ZnSe/GaAs(001)박막의 특성 분석.

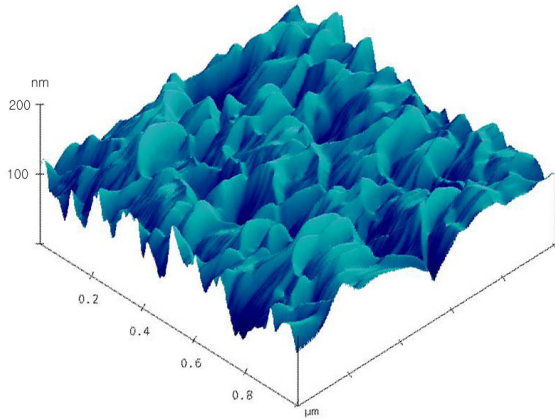


그림 12. AFM을 이용한 ZnSe/GaAs(001)박막의 표면특성 분석. RMS는 16.965 nm

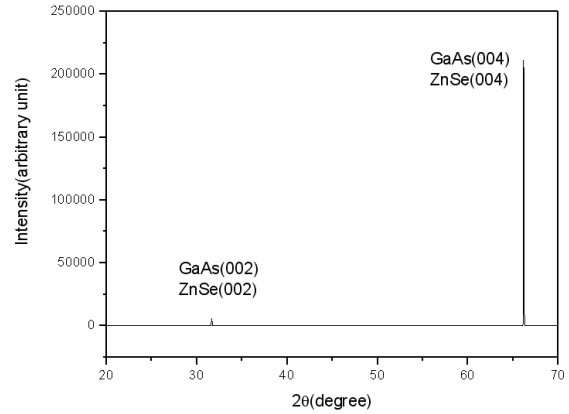


그림 13. XRD를 이용한 ZnSe/GaAs(001)박막의 성분 분석.

며, 그림 13에서는 XRD를 이용한 ZnSe/GaAs(001) 박막의 성분분석 결과를 보여준다.

그림 14에서는 350 nm의 femtosecond-laser를 이용하여 9 K, 30 K, 70 K, 110 K에서 측정한 PL(Photoluminescence) 특성을 보여준다. 온도에 따른 적색편이(red-shift)가 나타남을 확인할 수 있었고, 437 nm 근처에서 발광하는 것으로 보아 분명한 ZnSe의 PL peak임을 확인할 수 있다.

V. 결론

성장한 ZnSe/GaAs(001)박막은 분자선 에피성장의 특성이 단결정 (single crystal)으로 성장 시키지는 못한 것으로 판단되며, 추후 다양한 에피성장 조건의 변화로 단결정성장 및 좋은 막질을 만들 수 있을 것

으로 예상된다.

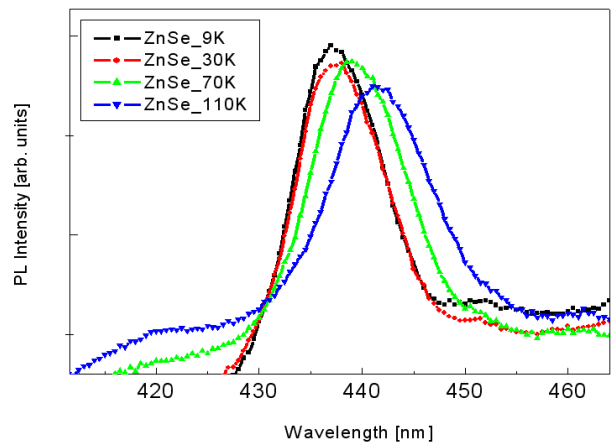


그림 14. 극초단 레이저펄스를 이용한 ZnSe/GaAs(001)박막의 PL특성.

본 논문에서는 국산화 시킨 초고진공 분자선 에피성장 시스템을 이용한 ZnSe/GaAs(001)박막의 증착이 성공적으로 이루어졌음을 확인 할 수 있었으며, 국내 초고진공 연구개발과 관련된 시스템들을 국산화함으로써, 검증되고 사용하기에 용이하게 제작 및 국내에 공급하여, 외산장비의 수입대체효과가 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 배석희, 인상렬, 정광화, 이영백, 신용현, 진공공학, (한국경제신문, 2000), pp.681-695.
- [2] 정석민, 이진원, 박종윤 공저, 진공과학입문, (청문각, 2001), pp.412-420.
- [3] S. Fujiwara, H. Morishita, T. Kotani, K. Matsumoto and T. Shirakawa, J. Cryst. Growth **186**, 60 (1998).
- [4] T. Yamaguchi, K. Ando, K. Koizumi, H. Inozue, H. Ishikura, T. Abe and H. Kasada, J. Appl. Phys. **37**, 1453 (1998).
- [5] M. J. Kim, H. S. Lee, J. Y. Lee, T. W. Kim, K. H. Yoo and M. D. Kim, J. Mat. Sci. **39**, 323 (2004).
- [6] J. S. Song, J. H. Chang, S. K. Hong, M. W. Cho, H. Makino, T. Hanada and T. Yao, J. Cryst. Growth **242**, 95 (2002).

Construction of an Ultra High Vacuum Molecular Beam Epitaxy System and Optical Property of ZnSe/GaAs(001) Epitaxial films

Eundo Kim^{1,3*}, Young-Ho Son¹, Gi-Seog Eom², Seong Jin Cho³, Do Weon Hwang¹

¹*R & D Center, ALPHA PLUS Co., Ltd., Pohang 790-826*

²*Semiconductor & Electronics Engineering Division, Uiduk University, Gyeongju 780-713*

³*Department of Physics, Kyungsung University, Busan 608-736*

(Received July 12, 2006)

The construction and the performance test of an ultra high vacuum (UHV) molecular beam epitaxy (MBE) system has been completed successfully. We have done domestic development and tried performance test for ultra high vacuum molecular beam epitaxy system. This system has reached pressure 2×10^{-10} Torr and the substrate has reached temperature 1,100 °C. We have investigated into the characteristic of ZnSe/GaAs(001) by using scanning electron microscope (SEM), atomic force microscope (AFM), x-ray diffraction (XRD) and photoluminescence (PL).

Keywords : Ultra high vacuum (UHV), Molecular beam epitaxy (MBE), Effusion cell, plasma cell, ZnSe

* [E-mail] edkim@alpha-plus.co.kr