

수소화 처리에 의한 GaAs/AlGaAs 다중양자우물의 PL 연구

Photoluminescence study in GaAs/AlGaAs
multi-quantum well structure by hydrogen passivation

박세기, 이 천, 정 민*

인하대학교 전기·전자·컴퓨터공학부

*광운대학교 물리학과

Se-Ki Park, Cheon Lee, Min Jung

School of Electrical and Computer Engineering, Inha University

*Department of Physics, Kwangwoon University

Abstract

The effect of the surface state on the quantum efficiency of underlying GaAs/AlGaAs multi-quantum well(MQW) structures consisting of three GaAs quantum wells with different thickness, is studied by low temperature photoluminescence(PL). The structure was grown by molecular beam epitaxy(MBE) on (100) GaAs substrate. The thickness of three GaAs quantum wells was 3, 6 and 9 nm, respectively. The MQWs were placed apart from 50 nm AlGaAs edge-barriers including two inner-barriers with 15 nm in thickness. The samples used in this study were prepared with different growth temperatures. Particularly, the hydrogen passivation effect to the 9 nm quantum well located at near surface appeared much stronger than any others. Transition energy and optical gain related to the hydrogen passivation effects on the multi-quantum well structure was calculated by transfer matrix method.

Key words(중요용어) : Quantum efficiency(양자효율), Multi-quantum well(다중양자우물), MBE(분자선 에피택시법)
Hydrogen passivation(수소화처리),

1. 서 론

최근에 와서 차세대 집적 소자(integrated device)제작을 가능케 하는 nanometer-scale의 양자구조에 대한 관심이 높아지고 있다. III-V 화합물 반도체 재료는 원자단위의 층을 성장시키는 개선된 성장기술로 인해 미세구조를 가능케 하는 물질로 주목받고 있다. 즉 여러 가지

물질들은 uniformity가 뛰어난 nanostructure의 array를 만들기 위해 선택적 성장이나 self-organizing capabilities의 목적으로 사용되어지고 있다. 그러나 불행하게도 이런 물질들의 표면은 실리콘을 주재료로 사용하는 구조물보다 오히려 그 표면상태(surface state)를 조절하기가 매우 어

립다[1]. 일반적으로 표면상태가 높은 경우에는 Fermi level pinning 현상을 초래하게 된다[2]. 따라서 passivation process가 nanometer-scale의 양자구조를 제작하는데 매우 중요한 공정으로 부각되고 있다. 그 이유는 표면상태를 감소시킴으로써 전자소자의 전기적 특성이 좋아지기 때문이다. passivation의 주된 목적은 원하는 표면의 전기적 특성을 얻을 수 있으며, Fermi level unpinning, 표면재결합속도(surface recombination velocity)의 감소, 그와 동시에 지속적이고 효과적인 passivation process는 표면의 화학적인 변형을 막아주는 것이다[3-7].

본 연구에서 사용되어진 시료의 경우는 MBE로 성장시킨 시료로 성장온도가 일반적인 성장조건과 비교하여 낮은 온도임을 알 수 있다. 시료를 저온에서 성장시킨 이유는 선택적 성장시에 성장온도가 낮으면 선택도가 우수하기 때문이었으며, 수소화 처리(hydrogen passivation)를 그 밖에 여러 저온 성장시스템에 적용하기 위해서 였다.

2. 실험

시료로는 (100) GaAs 기판위에 분자선 에피택시법(molecular beam epitaxy)을 사용하여 GaAs/AlGaAs의 다중양자우물구조를 제작하였다. 성장용기(chamber)의 기본 진공도는 5×10^{-7} Torr를 유지하였다. III/V ratio는 20으로 하였으며, 성장률은 1 ML/sec 이었다. 시료의 성장온도는 각각 500, 550, 580 °C로 저온에서 성장하였다. 시료의 수소화 처리 조건은 H₂ 압력 500 mTorr, 플라즈마 출력밀도 0.1 W/cm² 로 고정하였으며, 플라즈마 노출시간은 10 - 30 분까지 변화를 주며 실험하였다. 또한 그때의 기판온도는 실온에서 300 °C까지 변화를 주었다. 수소화 처리 후에 PL 측정은 luminescence detector로 광증폭튜브(photomultiplier tube)를 사용하였으며, 여기광원(excitation source)으로는 514.5 nm의 아르곤 이온 레이저를 사용하였다. PL 측정시의 주위온도는 16 K로 유지하였다. 한편, 성장온도변화에 따른 MQW에 미치는 영향을 transfer matrix method를 이용하여 계산하였으며, 실험으로 얻어진 결과와 비교하였다. 그림 1은 MBE로 성장시킨 시료의 모식도이다.

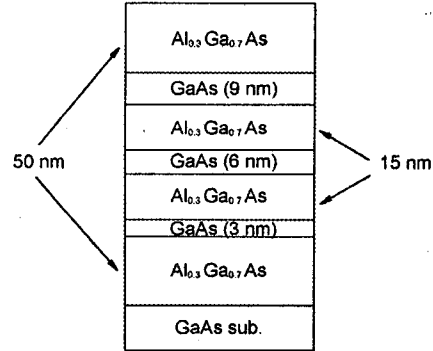


그림 1. MBE로 성장시킨 다중양자우물의 모식도.
Fig. 1. Schematic diagram of MQW grown by MBE.

3. 결과 및 토의

그림 2는 표면근처에 위치하고 있는 양자우물의 band diagram을 나타낸 것이다.

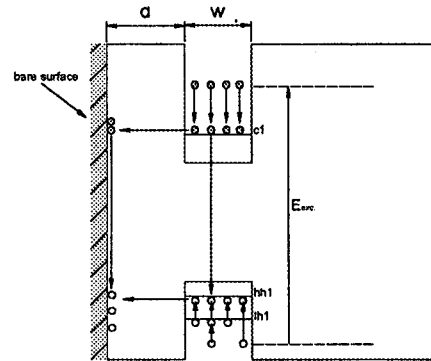


그림 2. 표면근처의 위치한 양자우물의 밴드 모식도.
Fig. 2. Band diagram of the near-surface quantum well[8].

그림에서처럼 양자우물안에 있는 전자와 정공들이 우물안에 confine되어 있지 않고, 표면쪽으로 tunneling되어서 표면근처에서 재결합을 하게 된다. 이것은 표면에 존재하

는 defect(dangling bond)들로 인해서 표면상태(surface state)가 존재하게 되고, 그로 인해서 표면 가까운 곳에 위치한 양자우물의 에너지 상태가 영향을 받게 되는 것이다. 이와 같은 재결합은 비방사재결합(nonradiative recombination)으로 양자우물의 PL intensity를 감소시키는 주된 원인이 된다[8].

그림 3은 580 °C에서 성장시킨 다중양자우물을 H₂ 500 mTorr, plasma power density 0.1 W/cm², 수소화 처리시 기판온도 200 °C의 조건에서 플라즈마 노출시간에 따른 수소화 처리 후의 PL intensity를 관찰한 것이다.

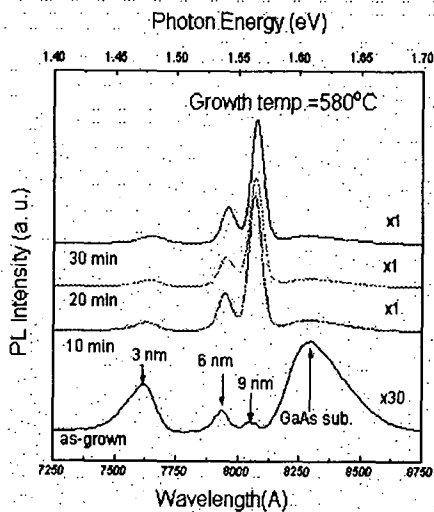


그림 3. 수소화 처리후의 다중양자우물의 PL intensity.

Fig. 3. PL intensity of hydrogen passivated MQW.

그림에서 보는 바와 같이 as-grown 시료는 일반적으로 표면 근처에 위치하고 있는 양자우물이 표면상태의 영향을 가장 많이 받게 되며, 기판쪽에 위치하고 있는 양자우물은 표면상태에 거의 영향을 안 받는 것으로 나타나 있다. 다시 말해서 표면쪽에 위치하고 있는 9 nm 양자우물의 PL intensity는 표면상태의 영향으로 인해서 그 크기가 매우 작은 반면에 기판쪽에 위치하고 있는 3 nm 양자우물은 PL intensity가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 수소화 처리 후에 PL intensity는 9 nm 양자우물이 가장 크게 나타나고 있으며, 다음으로 6 nm, 3 nm 순으로 그 크기가 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

즉, 표면상태에 가장 많은 영향을 받았던 표면쪽에 위치한 9 nm 양자우물이 수소화 처리로 인해서 표면에 존재하고 있던 defects들이 passive 되었기 때문에 PL intensity가 회복 되었음을 볼 수 있다. 그림 4는 그림 3의 as-grown 시료를 기준으로 하여 PL intensity를 일반화 한 것이다. PL intensity는 수소화 처리시간에 따라서 증가경향을 보이다 포화됨을 알 수 있다.

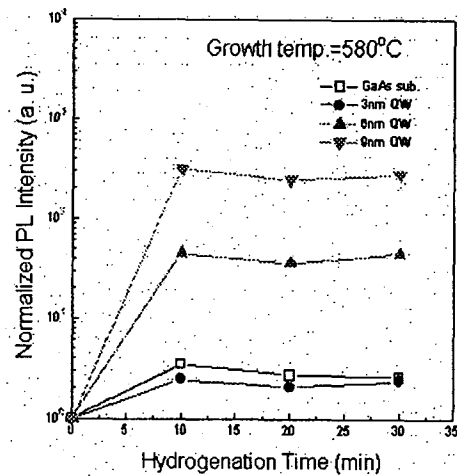


그림 4. 수소화 처리시간에 따른 일반화된 다중양자우물의 PL intensity.

Fig. 4. Normalized PL intensity of hydrogen passivated MQW.

그림 5는 550 °C에서 성장시킨 다중양자우물을 H₂ 500 mTorr, plasma power density 0.1 W/cm², 수소화 처리시 기판온도 200 °C의 조건에서 플라즈마 노출시간에 따른 수소화 처리 후의 PL intensity를 관찰한 것이다. 그림 5에서 특이할만한 사항은 그림 3과 비교하여 양자우물의 PL peak이 약 90 Å이 blue shift 되었다는 것이다. 이것은 580 °C에서 성장시킨 시료와 비교해 볼 때 550 °C에서 성장시킨 시료의 양자우물구조의 질(quality)이 나쁠 수 있는 것이다. 다시 말해서 PL peak이 blue shift 되었다는 것은 양자우물의 에너지 상태가 높아졌다는 것이고, 에너지 상태가 높으면 단파장의 빛을 방사하게 된다. 즉 양자우물구조에서 에너지 상태를 상승시키는 주된 요인

중에 하나로 양자우물의 구조적인 변화를 들 수 있는데, 이상적인 형태(square form)의 energy diagram을 가지는 양자우물구조에서 side well이 뚫개지는 구조로 변화되었다고 말할 수 있다.

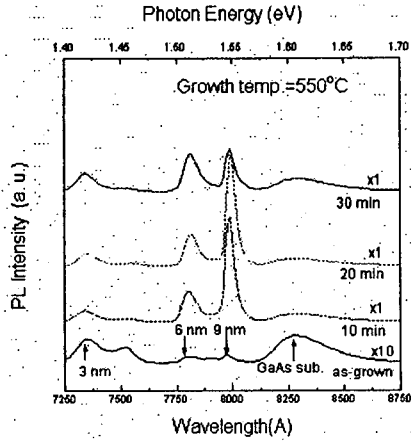


그림 5. 수소화 처리후의 다중양자우물의 PL intensity.
Fig. 5. PL intensity of hydrogen passivated MQW.

그림 6은 그림 5의 as-grown 시료를 기준으로 하여 PL intensity를 일반화 한 것으로 그림 4의 580 °C에서 성장시킨 시료와 비슷한 결과를 보이고 있다. 그러나 플라즈마 노출시간이 30분일 때에 그림에서 보는바와 같이 일반화된 PL intensity가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 두 가지로 해석할 수 있다. 첫 번째는 플라즈마에 노출시키는 시간이 길어서 플라즈마에 의한 손상 (damage)으로 인한 것과 passive 되었던 defect들이 다시 활성화(activation)를 띠게 되어 PL intensity가 감소되는 것이다. 두 번째는 550 °C에서 성장시킨 시료가 580 °C에서 성장시킨 시료보다 깊은 준위의 clad 층에 많은 defect를 보유하고 있기 때문에 defect들을 충분히 passive 하지 못했거나, 20분 이상 수소화 처리를 하게되면 오히려 dehydrogen process가 일어나기 때문이라고 생각된다. 표 1은 transfer matrix method를 이용하여 580 °C에서 성장시킨 시료의 PL peak의 변화를 계산한 것이다. 계산시의 GaAs의 band gap은 PL 측정시의 온도인 T=16 K 일 때

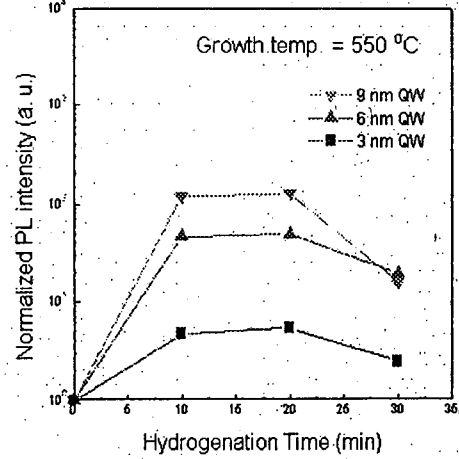


그림 6. 수소화 처리시간에 따른 일반화된 다중양자우물의 PL intensity.
Fig. 6. Normalized PL intensity of hydrogen passivated MQW.

의 값을 사용하였다.

표 1. Transfer matrix method로 계산한 peak position의 값과 수소화 처리전, 후(200°C, 10분)의 실험값

		9 nm	6 nm	3 nm	GaAs sub.
Photon Energy(eV)	계산값	1.542	1.579	1.684	1.494
	실험값 (as-grown)	1.540	1.562	1.629	1.494
	실험값 (수소화)	1.537	1.560	1.625	1.495
Peak Position(Å)	계산값	8042.9	7851.8	7359.5	8300
	실험값	8050	7940	7610	8300
	실험값 (수소화)	8070	7950	7630	8290

표 1에서 계산상 얻어낸 값과 수소화 처리전, 후의 PL peak position의 값과는 거의 변화가 없었다. 즉, 수소화 처리로 인한 양자우물의 구조적인 변화는 거의 없었으며, 3개의 다중양자우물은 각각 독립되어 서로 에너지 결합을 일으키지 않음을 알 수 있었다.

4. 결 론

저온에서 성장시킨 다중양자우물구조는 표면에 존재하는 defect(dangling bond)으로 인해서 표면상태가 존재하게 되며, 표면 근처에 위치하고 있는 양자우물구조는 표면상태에 영향을 받는다. 수소화 처리를 통해서 표면상태를 감소시킬 수 있었으며 양자효율을 회복시킬 수 있었다. 장벽두께를 150 Å을 갖는 3중의 양자우물구조는 서로간에 에너지의 결합은 없었으며, transfer matrix method를 통해서 계산한 값과 실험결과를 비교할 수 있었다. 표면상태를 최소화 시켜서 양자효율을 증가시키는 최적의 수소화 조건은 기판온도 250 °C, 플라즈마 노출시간 10분, H₂ 압력 500 mTorr, 플라즈마 출력밀도 0.1 W/cm² 이었다. 이와 같은 수소화 처리는 저온공정을 필요로 하는 여러 시스템에 적용하여 광학적인 특성을 증대시키는데 응용될 것으로 기대된다.

*References

1. S. Kodama, S. Koyanagi, T. Hashizume, and H. Hasegawa : J. Vac. Sci. Technol. B 13(4), 1974 (1995)
2. H. Hasegawa and H. Ohno : J. Vac. Sci. Technol. B 4, 1130 (1986)
3. F.S. Turco, C.J. Sandorff, M.S. Hedge, and M.C. Tamargo : J. Vac. Sci. Technol. B 8, 856 (1990)
4. N.A. Ives, G.W. Stupian, and M.S. Leung : Appl. Phys. Lett. 50, 256 (1987)
5. M. Oshima, T. Scimeca, Y. Watanabe, H. Oigawa, and Y. Nannichi : Jpn. J. Appl. Phys. 32 518 (1993)
6. E. Yablonovitch, C.J. Sandorff, R. Bhat, and T. Gmitter : Appl. Phys. Lett. 51, 439 (1987)
7. C.I.H. Ashby, K.R. Zavadil, A.J. Howard, and B.E. Hammons : Appl. Phys. Lett. 64 2388 (1994)
8. Y.L. Chang, I-H. Tan, Y.H. Zang, D. Bimberg, J. Merz and E. Hu : J. Appl. Phys. 74, 5144 (1993)