≪연구논문≫ 한국진공학회지 제19권 5호, 2010년 9월, pp.365~370

분자선에피택시에 의해 성장한 GaAs/AlGaAs 양자우물의 성장 멈춤 효과

김민수 · 임재영*

인제대학교 나노시스템공학과, 김해 621-749

(2010년 7월 20일 받음, 2010년 9월 14일 수정, 2010년 9월 14일 확정)

분자선 에피택시 방법을 이용하여 GaAs 기판 위에 GaAs 및 AlGaAs 에피층을 성장하면서 성장 멈춤 효과를 연구하였다. 성장 멈춤 시간에 따른 에피층 성장 과정은 반사 고에너지 전자회절로 측정하였다. 성장 멈춤 시간은 0, 15, 30, 60초로 하였다. 그리고 성장 멈춤 시간을 달리하여 GaAs/$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 다양자우물을 성장한 후 양자우물의 특성을 조사하였다. 반사 고에너지 전자회절의 강도 진동은 성장 멈춤 시간에 영향을 받고 있었다. 그리고 양자우물의 광특성도 성장 멈춤 시간에 의존하고 있었다. 성장 멈춤 시간이 30초일 때 우물과 장벽층 사이에 급준한 계면을 가지는 에피층을 얻을 수 있었다.

주제어 : 성장 멈춤, GaAs/AlGaAs, 반사 고에너지 전자회절, 분자선에피택시, 포토루미네슨스

I. 서 론

정보 통신 기술의 발전에 따라 반도체 소자의 초 LSI화와 신기능, 초고속화가 요구되고 있으며, 이를 위하여 반도체 소자의 핵심인 반도체 박막을 원자층 수준으로 정밀하게 성장 및 제어하는 기술이 요구되고 있다. 특히 원자층 수준으로 정밀하게 제어된 양자우물 반도체 광전소자는 소자의 성능 개선뿐만 아니라 신기능 소자 개발에 커다란 기여를 하고 있다 [1]. 양자우물 소자의 성능은 박막의 결정성뿐만 아니라 양자우물 계면의 급준성에 커다란 영향을 받고 있다 [2-4]. 반도체 박막을 원자층 수준으로 제어하는 방법 중 가장 정밀한 장비가 분자선에피택시 장비이다 [5]. 분자선 에피택시 장비에 의해 단 원자층 정도의 두께를 조절할 수 있다. 그러나 분자선에피택시에 의해 성장된 박막은 원자 한 층이 완전히 성장되기 전에 새로운 원자층이 성장되기 때문에 계면에 원자층 수준의 불균일성이 발생하고 있다. 이러한 계면의 불균일성을 해결하는 방법이 성장 멈춤(growth interruption) 방법이다 [6-8].

분자선 에피택시 장비에는 반사 고에너지 전자회절(Reflection high-energy electron diffraction; RHEED) 분석 장비가 장착되어 있다 [9]. RHEED 분석 장비는 고에너지 전자선을 기판 표면에 1~2° 정도의 미세각도로 입사시키면 전자선이 기판 위에 성장되는 박막에서 반사회절을 일으키게 된다. 반사 회절된 빔을 반대편 형광스크린에 투영시키면 성장되는 박막의 역격자 패턴이 형광스크린에 나타나게 되고 이를 분석하면 성장되는 박막의 결정성, 원자층 수준의 두께 측정, 박막의 조성비 등을 *in-situ*로 측정할 수 있다. 반사 회절된 빔의 세기는 박막이 성장됨에 따라 주기성을 가지고 진동하는데 GaAs, AlGaAs의 경우 한 원자 층의 박막이 성장하면 한 번 진동한다. 이를 RHEED 강도 진동(RHEED intensity oscillation; RIO)이라 부른다. 따라서 진동수를 측정하면 성장되는 층의 두께를 알 수 있다. 박막 성장이 진행됨에 따라 진동의 주기는 변하지 않으나 진동의 세기는 계속 감소하게 된다. 그 이유는 성장이 진행됨에 따라 표면의 거칠기가 증가하게 되고 그에 따라 전자빔의 산란이 증가하기 때문이다 [9]. 따라서 회절된 빔의 세기를 제어하면 원자층 수준의 급준한 계면을 가지는 박막을 성장할 수 있다.

이에 본 연구에서는 RHEED 강도 진동을 제어해서 급준한 계면을 가지는 박막 성장을 연구하였다. 그리고 이들 결과를 GaAs/AlGaAs 양자우물 성장에 적용하여 급준한 계면을 가지는 양자우물층을 제작하고 그 특성을 DCX (Double crystal x-ray diffraction)와 포토루미네슨스 등으로 조사하였다.

* [전자우편] jyleem@inje.ac.kr

Ⅱ. 실험방법

실험에 사용된 GaAs, AlGaAs 에피층은 반절연성 GaAs (100) 기판 위에 분자선에피택시 방법으로 성장하였다. 성장챔버에서 As 빔을 조사시키면서 열식각 방법으로 산화막을 제거시킨 후 그 위에 GaAs 완충층을 0.5 μm 두께로 성장 시킨 후 GaAs 및 AlGaAs 에피층을 성장하였다. 에피층 성장시 성장 온도는 580°C로 하였으며, Ga 빔에 대한 As 빔의 beam equivalent pressure (BEP)는 20으로 하였다. 에피층 성장 시 성장되는 에피층 표면은 RHEED로 관측하였으며, RHEED의 specular beam의 세기를 전기신호로 바꾸어서 specular beam의 강도진동을 조사하였다. 성장 멈춤 효과를 조사하기 위하여 GaAs/AlGaAs 양자우물 구조를 성장 멈춤시간을 달리하여 성장하였다. Fig. 1(a)는 GaAs(100) 기판 위에 GaAs 완충층을 0.5 μm 성장한 후 성장 멈춤 시간을 0, 15, 30, 60초로 달리하여 {GaAs(20원자층)/$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$(52원자층)}을 한 주기로 하여 20주기 성장한 구조이다. Fig. 1(b)는 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 장벽층의 두께를 52원자층으로 일정하게 하고 GaAs 우물층의 두께를 42원자층, 35원자층, 28원자층, 21원자층, 14원자층, 7원자층으로 변화시키면서 성장시켰다. Fig. 1(b) 시료의 경우에도 성장 멈춤 효과를 알아보기 위해 성장 멈춤 시간을 0, 30초로 달리하여 두 종류의 양자우물 구조를 성장하였다.

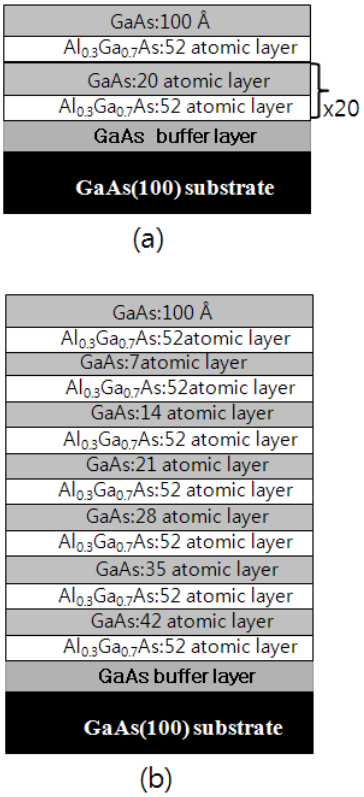

Figure 1. Sample structures of (a) {GaAs(20 atomic layers)/$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$(52 atomic layers)} symmetric quantum wells and (b) {GaAs(n atomic layers)/$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$(52 atomic layers)} asymmetric quantum wells.

Ⅲ. 실험결과 및 논의

수 원자층 두께로 이루어진 극박막 다층구조에서 각층 사이의 불균일성(계면에서 원자층들이 섞이는 현상)은 다층구조 특성에 매우 커다란 영향을 미치게 된다. Fig. 2는 GaAs 박막을 성장시키면서 측정한 RHEED specular beam의 강도진동이다. 1개의 진동이 한 원자층에 대응하고 있으므로 총 20원자층이 성장되었음을 알 수 있다. 원자층의 성장이 진행됨에 따라서 진동이 감쇄하고 있음을 알 수 있다. 이는 성장이 진행됨에 따라 한 층이 완전히 성장되기 전에 또 다른 층이 성장되기 때문에 성장되는 박막 표면에 입사된 전자선의 산란이 증가하게 되므로 감쇄 진동을 하게 된다. 20원자층을 성장하고 성장을 멈출 때는 20원자층이 성장된 직후 성장을 멈추라는 신호를 보내면 20원자층 보다 더 두껍게 성장되게 되므로 20원자층이 성장되기 150 ms 전에 성장을 멈추라는 신호를 컴퓨터를 통해

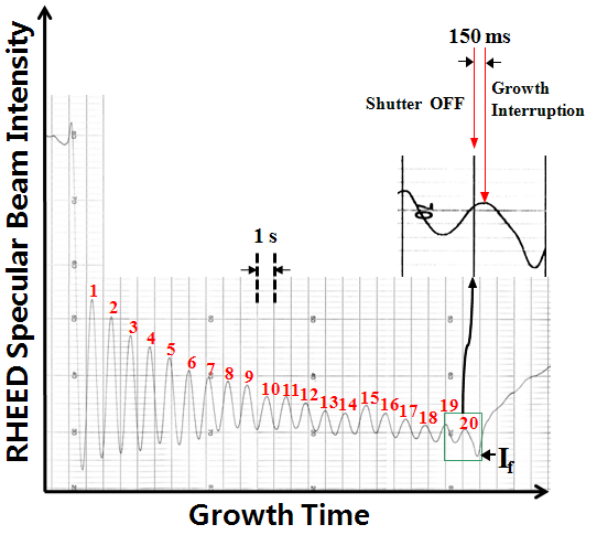

Figure 2. RHEED intensity oscillation during GaAs epilayer growth.

서 셔터에 전달하면 정확히 20원자층이 쌓이게 된다. 그 이유는 성장을 on/off하는 셔터가 신호를 받고 작동하는데 걸리는 시간이 150 ms정도 걸리기 때문이다. 이와 같이 전기 신호의 지연시간까지 고려하여야 정확히 원자층 수준으로 두께를 조절할 수 있다.

Fig. 2에서 보았듯이 박막 성장이 진행됨에 따라 표면의 roughness가 증가하게 되어 진동이 감소하고 있다. 이러한 원자층 수준의 roughness는 성장을 멈추면 표면이 원자층 수준으로 평탄해 진다. Fig. 3은 GaAs 박막을 20원자층 성장시킨 후 일정한 시간 동안 성장을 멈춘 후 AlGaAs 박막을 성장시키면서 측정한 RHEED 강도 진동이다. 이때 Al의 조성비는 0.3으로 하였다. 성장을 멈추는 시간이 30초 일 때까지는 성장 멈춤 시간이 길어질수록 AlGaAs 에피층의 RHEED 강도 진동의 세기는 현저히 증가함과 동시에 진동 횟수도 증가하고 있다. 그 이유는 회복시간이 증가할수 록 GaAs 표면의 원자 수준의 roughness가 감소하기 때문이다. 60초의 성장 멈춤의 경우는 30초의 성장 멈춤과 비교해서 진동세기 및 진동수가 약간 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 30초의 회복시간 만으로도 원자층 수준의 급준한 계면을 가지는 박막을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 멈춤시간이 너무 길어지면 성장되는 에피층에 불순물 등이 혼입할 수 있으므로 너무 긴 멈춤 시간은 오히려 에피층의 성능을 저해할 수 있다.

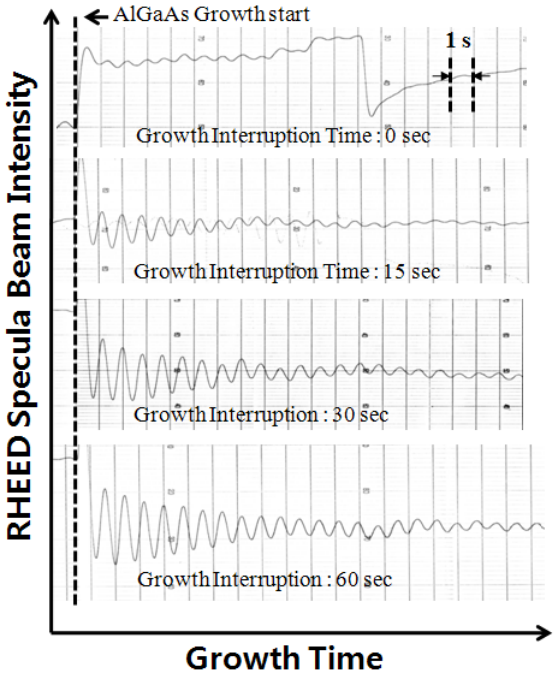

Figure 3. RHEED intensity oscillation of AlGaAs layers as a function of growth interruption time.

Fig. 4는 GaAs 20원자층/$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 52원자층을 각 층간의 성장 멈춤 시간을 0, 15, 30, 60초로 달리하여 20주기 성장시킨 Fig. 1(a)시료에 대한 DCX측정 결과이다. 여기서 GaAs는 우물층(well)이고, $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$이다. 장벽층(barrier)이다. 앞에서의 결과와 마찬가지로 회복시간을 30초 주면서 성장한 시료에서 초격자에 의한 위성피크들이 가장 선명하게 나타나고 있다 [10]. 이들 위성 피크에 대한 시뮬레이션을 수행하면 각 층의 두께를 구할 수가 있다. 성장 멈춤 시간을 달리하여 성장한 각각의 시료에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 구한 두께를 Fig. 5에 나타내었다. {GaAs 20원자층/$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 52원자층} 한 주기의 두께를

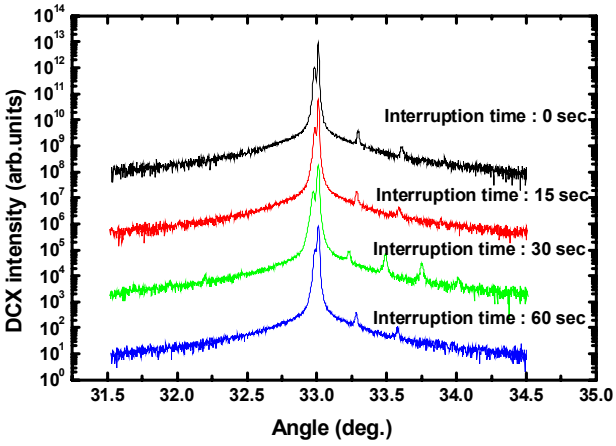

Figure 4. DCX rocking curves of GaAs/AlGaAs quantum wells as a function of growth interruption time.

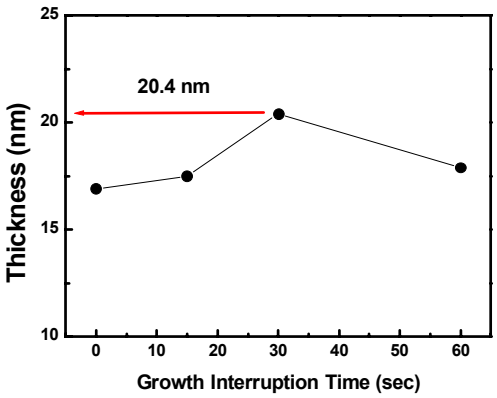

Figure 5. Thickness of a period quantum wells obtained from DCX simulation for {GaAs(20 atomic layers)/$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$(52 atomic layers)} symmetric quantum wells.

GaAs의 격자상수를 5.6533 Å, AlAs의 격자상수를 5.660 Å으로 하여 Vegard 법칙을 사용하여 구하면 20.4 nm가 나온다. 30초 멈춤 시간을 가지고 성장한 시료의 DCX 결과가 20.4 nm로 RHEED 강도진동을 이용하여 구한 값과 정확히 일치하고 있다. 그러나 멈춤 시간을 주지 않은 시료의 경우에는 두께가 17.7 nm로 이론적인 값과 약 13%의 오차를 가지고 있다. 30초 성장 멈춤 시간까지는 성장 멈춤 시간이 증가할수록 두께 오차는 줄어들고 있으나 60초 성장 멈춤의 경우는 오히려 두께 오차가 더 커지고 있다.

Fig. 6은 Fig. 1(b)에서 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$의 두께를 52원자층으로 일정하게 하고 GaAs의 두께를 달리하여 성장한 양자우물 시료에 대해 12 K에서 측정한 포토루미네슨스 결과이다. 실선은 초격자 성장시 30초의 성장 멈춤 시간을 준 시료에 대한 것이고, 점선은 성장 멈춤 시간을 주지 않고 성장한 시료에 대한 것이다. 30초 성장 멈춤을 한 시료에서 나오는 발광 피크가 성장 멈춤을 하지 않은 시료에서 나오는 발광 피크보다 세기도 크고 대칭적임을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 포토루미네슨스 측정으로부터 얻어진 피크로부터 GaAs 우물 두께에 따른 여기상태의 에너지를 나타낸 것이다. 점선으로 표시한 것은 이론적으로 계산한 값을 나타낸 것이다. GaAs의 두께가 두꺼워질 수록 이론적인 값과 잘 일치하고 있다. 그러나 GaAs의 두께가 얇아지면 이론적인 값과 잘 일치하지 않고 있다. 이는 두께가 얇아질수록 계면에서의 원자층 수준의 불균일성이 우물의 파동함수에 커다란 영향을 미치기 때문이다.

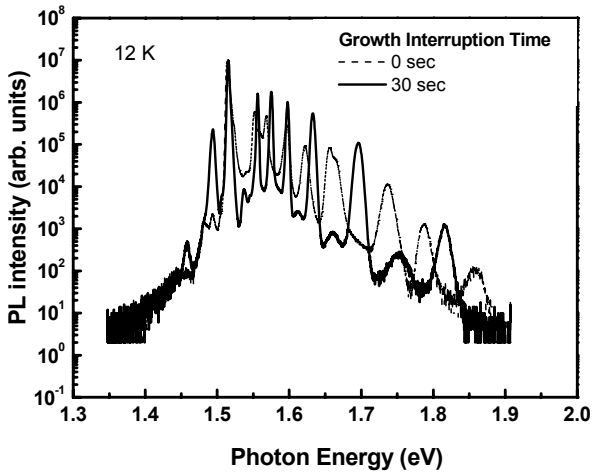

Figure 6. Photoluminescence of GaAs/AlGaAs quantum wells.

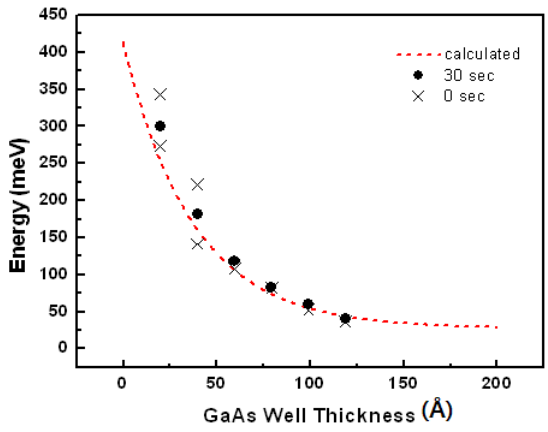

Figure 7. Energy states of GaAs/AlGaAs quantum wells as a function of GaAs well thickness.

IV. 결 론

GaAs, AlGaAs 에피층을 성장하면서 성장 특성을 RHEED 강도 진동을 이용하여 조사하였다. 우물층인 GaAs 에피층을 성장한 후 30초 동안 성장을 멈춘 후 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 장벽층을 성장하였을 때 가장 급준한 계면을 가지는 GaAs/AlGaAs 에피층을 얻을 수 있었다. GaAs 20원자층/$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 52원자층을 각 층간의 성장 멈춤 시간을 0, 15, 30, 60초로 달리하여 20주기 성장시킨 다양자우물 구조에서 30초 성장 멈춤을 가진 시료가 DCX 결과와 가장 잘 일치하고 있었다. 60초의 성장 멈춤을 준 시료는 오히려 일치하지 않았다. $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 장벽층의 두께를 52원자층으로 일정하게 하고 GaAs 우물층의 두께를 42원자층, 35원자층, 28원자층, 21원자층, 14원자층, 7원자층으로 변화시키면서 성장시킨 다양자우물의 경우 30초 성장 멈춤 시간을 준 시료의 포토루미네슨스 스펙트럼의 발광 에너지가 이론적인 값과 잘 일치하고 있었다. 이종 물질을 접합한 양자우물 구조에서 양자우물의 성능 향상을 위해서는 우물층과 장벽층 사이에 성장 멈춤을 주어야 함을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] Z. L. Yuan, Z. Y. Xu, B. Z. Zheng, C. P. Luo, J. Z. Xu, W. Ge, P. H. Zhang, and X. P. Yang, J. Appl. Phys. **79**, 1073 (1996).

[2] T. Kitada, S. Shimomura, and S. Hiyamizu, J. Crystal Growth **172**, 301-302 (2007).
[3] J. R. Dong, J. H. Teng, S. J. Chua, B. C. Foo, Y. J. Wang, and R. Yin, J. Crystal Growth **289**, 59 (2006).
[4] H. H. Tan, P. Lever, and C. Jagadish, J. Crystal Growth **274**, 85 (2006).
[5] S. M. Kim, J. Y. Leem, C. R. Lee, S. K. Noh, Y. S. Kwon, Y. H. Ryu, J. S. Son, and J. E. Kim, J. Kor. Vac. Soc. **8**, 445-449 (1999).
[6] J. R. Botha and A. W. R. Leitch, J. Crystal Growth **169**, 629 (1996).
[7] T. Matsuura, T. Miyamoto, M. Ohta, Y. Matsui, T. Furuhata, and F. Koyama, J. Crystal Growth **278**, 51 (2005).
[8] 이희종, 류미이, 김진수, 한국진공학회지 **18**, 474 (2009).
[9] J. Y. Leem, C. Ro Lee, S. K. Noh, and J. S. Son, J. Cryst. Growth **197**, 84-88 (1999).
[10] 김준오, 신현욱, 최정우, 이상준, 김창수, 노삼규, 한국진공학회지 **18**, 245 (2009).

≪Research Paper≫ Journal of the Korean Vacuum Society Vol.19 No.5, September 2010, pp.365-370

Growth Interruption Effects of GaAs/AlGaAs Quantum Wells Grown by Molecular Beam Epitaxy

Min Su Kim and Jae-Young Leem*

Department of Nano Systems Engineering, Inje University, Gimhae 621-749

(Received July 20, 2010, Revised September 14, 2010, Accepted September 14, 2010)

The growth interruption effects on growth mode of the GaAs and AlGaAs epitaxial layers grown on GaAs substrate by molecular beam epitaxy were investigated. Growth process of the epitaxial layers as a function of the growth interruption time was observed by reflection high energy electron diffraction (RHEED). The growth interruption time was 0, 15, 30, 60 s. The GaAs/$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ multi quantum wells (MQWs) with different growth interruption time were grown and its properties were investigated. RHEED intensity oscillation and optical property of the MQWs were dependent on the growth interruption time. When the growth interruption time was 30 s, interface between the well and barrier layers became sharper.

Keywords : Growth interruption, GaAs/AlGaAs, Reflection high energy electron diffraction, Molecular beam Epitaxy, Photoluminescence

* [E-mail] jyleem@inje.ac.kr