

## 高 indium 농도 InGaAs와 GaAs 박막간 계면에 관한 연구

김 삼 동

현대전자산업주식회사, 반도체 제1연구소

Studies of the Interface between the High Indium Content InGaAs QW and GaAs Layers

Sam-Dong Kim

Hyundai Electronics Industries, R&D Laboratory 1, San 136-1, Amiri, Bubal-Eub,

Ichon-Kun, Kyungki-Do, Korea

**초 록** 분자선 증착법(Molecular Beam Epitaxy)에 의하여 성장시킨 고농도 InGaAs layer에서 성장중지법이 계면 거칠기에 미치는 영향이 연구되었다. 계면을 평활화하기 위하여 단원자층의 GaAs 또는 AlAs를 InGaAs layer 양쪽 계면에 증착한뒤 뒤이어 성장중지를 실시하였다. Photoluminescence (PL) 측정에 의하면, 단원자 GaAs층 증착후 15초간 성장중지를 한 평활화법이 평활화하지 않은 경우나 단원자 AlAs 층 증착을 통한 평활화법보다 상당히 향상된 계면조건을 보여줬다. 고 분해능 단면 전자현미경법 (Cross-section high resolution transmission electron microscopy, XHRTEM)에 의해 관찰되었던바, 계면 평활화법에 의해 계면의 평활성, 연속성 및 결정결함 밀도등에서 현저한 향상이 얻어졌다.

**Abstract** The effect of growth interruption on the surface roughness of high indium content InGaAs layer growth by molecular beam epitaxy(MBE) is studied. In order to smooth the interface, either one monolayer of GaAs or one monolayer of AlAs are deposited, followed by growth interruption at both sides of the InGaAs layers. The photo-luminescence (PL) demonstrates a significantly improved interface quality for high indium content InGaAs quantum well (QW) when smoothed by one monolayer GaAs deposition, followed by 15 second growth interruption compared to those grown without smoothing or with AlAs monolayer deposition and interruption. The optimized smoothing is obtained for a growth interruption time between 15 and 30 seconds at a growth temperature of 490°C. Clear improvement of interface smoothness, continuity and structural defect density at the interface between high indium content QW and the GaAs barrier is observed by cross-sectional high resolution transmission electron microscopy (XHRTEM).

### 1. 서 론

GaAs/AlGaAs 박막구조는 그 band off-set의 제약으로 인해, quantum well layer의 경우 1.3 $\mu$ m 이상의 長과장 광변조(optical modulation)를 얻기 어렵고, heterojunction FET(Field effect transistor)의 경우 InAlAs/InGaAs 구조보다 낮은 sheet carrier 밀도를 갖게된다. 최근, quantum well의 깊이를 크게하기 위하여 well의 경우는 GaAs에서 InGaAs로, barrier의 경우는 AlGaAs에서 AlAs로 바꾸려고하

는 활발한 연구가 진행되고 있다. Energy band적인 입장에서 보면 이러한 경향은 당연하지만, 실제 우수한 InGaAs/AlAs박막의 재료적 성질을 저해하는 여러가지 요소들이 부각된다. 첫째, InGaAs와 AlAs의 두가지 재료들은 그 적절한 박막 성장온도의 차이가 있다. MBE의 경우 Indium은 550°C 이상에서 desorption을 일으키나, AlAs는 600°C 정도에서 우수한 성질의 박막으로 성장한다. 따라서 소자성질이 exciton이나 minority carrier life-time에 민감한 경우, InGaAs/AlAs 구조를 성

장할때 그 MBE 성장온도 선택에 제약이 크다<sup>1)</sup>. 이러한 문제점은 각 layer 성장시 성장 온도를 변화시켜줌으로써 해결할 수 있지만, superlattice나 multiple QW의 경우는 이 방법 역시 어렵게된다. 둘째, InGaAs layer내에 indium 농도가 커질 경우 barrier layer와의 격자 부정합이 커져서 박막 성장시 심각한 문제를 안게된다. 최근, 많은 전자 또는 광학 소자들이 GaAs 기판위에 우수한 재료적 성질로 성장된 InGaAs MBE 박막을 통하여 형성 발표되었다<sup>2, 3, 4, 5)</sup>. 그러나 이들 경우는 30% indium 이하의 InGaAs 박막이었다. 실제 이보다 고농도 indium의 InGaAs를 GaAs기판에 우수한 재료적 성질로 성장시킨다는 방법에는 많은 어려움이 있다. Indium 농도가 증가하면 결정결함을 발생시키는 박막의 임계두께가 작아져서, 대부분의 소자 응용시 layer들의 두께가 이 임계두께를 초과하게 된다. 이렇게되면, layer 사이의 계면에 전위나 미세적층결함등이 발생한다. Layer가 임계두께 이하라고 할지라도 온도와 밀접하게 연관되어 결정결함이 발생할 수 있다. 고농도 InGaAs 박막의 경우의 또다른 문제점은, GaAs 기판과의 큰 격자 부정합에 기인한 island 핵생성 및 3D (3-dimensional) 성장이다. 성장 초기에 이러한 많은 island이 생성되면서 매우 큰 격자 부정합 strain을 효과적으로 완화시킨다. 이렇게 형성된 3D 표면 양상은 성장중 계면에서 전위와 적층결함이 쉽게 발생시키는 여건을 제공한다.

실제 이러한 모든 MBE 성장 관련 문제는 서로 밀접한 관계가 있으며, 근본적으로 InGaAs layer와 기판과의 큰 격자 부정합에 기인한다. GaAs 기판위에 형성된 고농도 InGaAs layer에서의 threading 전위 밀도를 줄이고 QW 소자의 성능을 향상시키기 위해, 본 저자와 공동연구자들은 indium 조성에 grading을 준 InGaAs 완충layer를 연구한 바 있다<sup>6, 10)</sup>. 이러한 완충layer들이 소자내의 결함 밀도를 억제하는데에는 효과적이었지만 QW 계면의 거칠기는 여전히 문제로 남아있었다. 이 연구에서는 고농도 InGaAs layer와 barrier 사이의 계면 평활도를 향상시키기 위하여 사용된 성장중지법의 효과에 관하여 기술하기로 한다. 이러한 계면 평활도는 계면조건에

매우 민감한 소자의 경우 그 소자성능에 지대한 영향을 미치게 된다.

## 2. 실험 방법

이 연구에 사용된 모든 박막 시편은 GaAs (100)wafer 위에서 Varian Gen-II MBE system을 사용하여 성장시켰다. 박막의 구조는 다음과 같다. Fig. 1과 같이 4개의 30Å의  $In_xGa_{1-x}As$  QW들을 성장시키면서, indium 조성을 기판에서 위로의 방향으로 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 증가시키면서 바꾸었다. 이러한 QW 조성의 순서를 선택한 이유는 최고농도 InGaAs QW을 박막의 상부에 위치시켜서 그 QW 계면의 성질을 보기 위함이다. PL을 사용하여 측정할때, 만일 上部에 위치한 고농도 InGaAs QW의 계면에서 많은 결함이 존재한다면 그 下部에 있는 저농도 QW에서 발생한 PL 신호가 screen되는 현상이 일어날 것이다. QW의 두께인 30Å은 그 값이 계면의 거칠기를 관찰하기에는 충분한 Matthews-Blakeslee 임계두께보다 작게 선택되어졌다. 각 well간의 strain의 중첩 현상을 막기위하여, 300Å barrier들을 well 사이에 성장시켰다. 전 박막 구조 성장중 indium 성장속도는 0.1 $\mu$ m/hr의 작은 값으로 유지시켰다. 각 well의 indium 농도를 바꾸기 위하여 gallium의 성장속도를 최고 0.5 $\mu$ m/hr에서 0.1 $\mu$ m/hr로 변화시켰다. 이러한 gallium cell 온도변화를 위한 성장중지를 QW 계면에서 일어나지 않게하기 위하여, GaAs barrier layer의 1/2 두께 성장후에 실시하였다.

계면 平滑化는 QW의 양면에 단원자층의 GaAs나 AlAs를 증착후 15초간 성장중지를 하는 방법으로 실행하였다. 계면 平滑化를 위한 계면 부근의 자세한 성장 방법이 Fig. 1b에 보여져있다. 이러한 박막들은 Table 1과 같이 490°C, 530°C의 두가지 다른 온도에서 3가지 다른 계면 조건에서 6개의 sample들로 성장되어졌다.

성장중지시간에 따른 계면조건을 최적화를 위하여 단원자 GaAs 증착후 중지시간을 15, 30, 60, 90초로 변화시키면서 Fig. 1과 같은 박막을 490°C에서 성장시켰다.

Sample들은 QW의 계면 성질의 관찰을 위하여 77°K에서 PL로 측정되어졌다. 고분해능

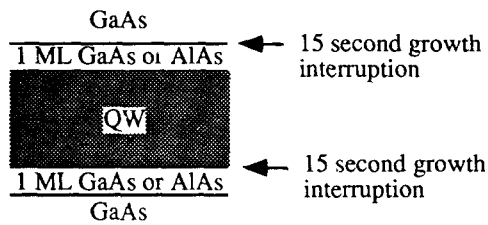
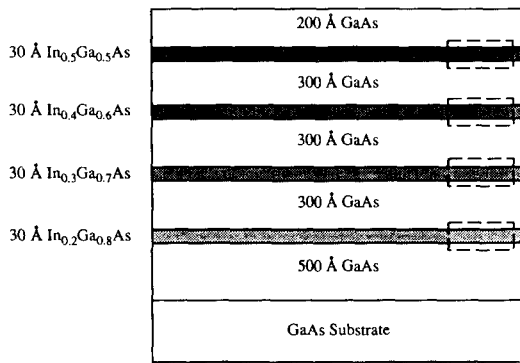


Fig. 1a. Schematic diagram of four quantum well structures grown by MBE to investigate interface smoothing for high indium content InGaAs layers. The sequence of QW interface smoothing (boxed areas) is detailed in figure 1b.

Fig. 1b. Schematic diagram of interface smoothing sequence.

Table 1. Six different growth conditions of QW samples

	490°C	530°C
No Smoothing	Sample 1A	Sample 1B
1 ML GaAs plus	Sample 2A	Sample 2B
1 ML AlAs plus	Sample 3A	Sample 3B

단면 투과 전자현미경법(Cross-sectional high resolution transmission electron microscopy, XHRTEM)을 사용하여 (Philips EM 430) 박막의 계면과 결함들이 관찰되어졌다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2a 및 2b는 490°C, 530°C에서 성장된 QW들의 PL spectrum들을 보여준다. 이 QW들은 위에서 기술한 바와 같이 세가지 다른 계면 조건 (성장중지 안한 경우, 단원자 GaAs 또는 AlAs 증착 후 15초 성장중지한

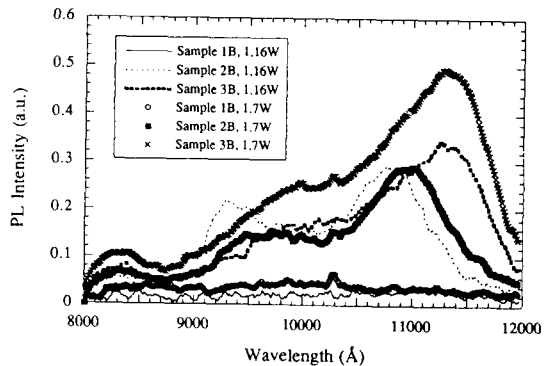
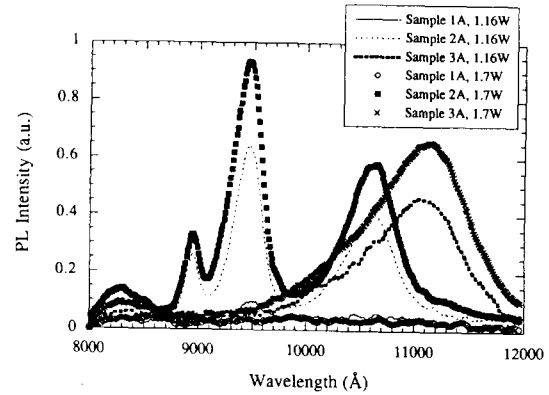


Fig. 2. 77K PL spectra for the quantum wells grown at (a) 490°C and (b) 530°C. At each growth temperature, the interfaces were prepared with three different growth conditions for smoothing the interfaces between InGaAs quantum wells and GaAs barriers. Two different PL excitation powers of 1.16 and 1.7 watts were used.

경우)을 갖고있다. PL 측정시 두가지 다른 excitation power(1.16, 1.7 Watts)가 사용되어졌다. Berger 등에<sup>11)</sup> 의하면, 결정 결함이나 계면 결함에 의한 PL peak은 excitation power를 바꿀때 energy의 위치가 바뀌게 된다. 그러나 intrinsic recombination에 의한(예를 들면 exciton에 의한) 경우는 그 peak의 강도만 변하며 위치는 변하지 않는다. Fig. 2a에서 제일 특이할 점은 GaAs 단원자층 이후 성장중지시킨 평활법이 고농도 indium InGaAs QW 계면의 평활도에 뚜렷한 개선효과를 보인다는 것이다. 이러한 방법으로 성장된 모든 QW들의 경우, 그 우수한 계면조건때문에 4개의 분명한 QW peak들이 관찰되어진다. 뿐만 아니라, excitation power를 변화시킬 때 어떠한 peak의 위치변화도 보여지지 않는다. 이러한

PL 결과들은 GaAs 단원자층 이후 성장중지시킨 평활법에 의하여, 고농도 indium InGaAs QW 계면에서 평활하게 성장된 우수한 성질의 계면이 얻어졌음을 보여준다. 반면에 성장중지시키지 않은 경우에는 아무런 peak도 관찰되지 않았다. 이것은 Fig. 4b의 TEM 사진에서와 같이 고농도 indium InGaAs QW 계면이 매우 거칠며 많은 결정 결함을 갖고있기 때문이다. 저농도 indium InGaAs QW 계면은 더 작은 격자 부정합으로 인해 평활하며 소수의 결정 결함을 보여준다. 그러나, 평활화시키지 않은 sample의 경우, 이러한 우수한 계면을 갖는 저indium 농도 QW에서도 peak이 관찰되지 않았다. 이것은 이전에 언급된 바와 같이, 고농도 indium InGaAs QW 계면에 존재하는 많은 결함들이 non-radiative recombination center들로 작용하여, 저농도 indium InGaAs QW로부터의 PL signal을 screen한다고 보여진다. 실제 계면 평활을 시키지않은 동일한 QW 구조의 박막을 반대로 농도 순서로 490°C에서 증착하였을 때에는 (최저 농도의 InGaAs QW을 가장 上部에), 30% InGaAs QW에서 강한 peak이 관찰된다<sup>12)</sup>. 단원자 AlAs 후의 성장중지는 거의 계면 평활도에 영향을 미치지 않는다. 이 성장중지법은 단지 매우 완만하고 넓게 분포된 50% QW peak 만을 보여준다. 이 peak은 단원자 GaAs 후의 성장중지법에 비하여, 약 500 Å의 赤편차(red-shift)를 보인다. 이는 단원자 AlAs 후의 성장중지법 사용시 InGaAs와 AlAs 사이의 band energy off-set이 증가된 것에 기인한 것으로 보인다.

530°C에서 성장된 QW sample들은 490°C에서 성장된 sample보다 상대적으로 저하된 계면 성질을 보여준다. 더 고온에서는 성장박막의 표면에서 원자들의 확산이 빨라지므로 island식 핵생성에 의해 3D 성장이 가속화될 수 있다. Fig. 3a 및 3b의 TEM 결과에 의하면 고농도 indium QW 계면 성질의 저하가 island 핵생성과 3D 성장에 기인한 것임을 알 수 있다. Yao 등은<sup>6)</sup> 고농도의 indium InGaAs layer의 성장시 그 두께 증가에 따라, 막내의 부정합 strain 분포가 균일한 분포에서, 斷續적으로 분포된 strain으로 변화 하는 것을 관찰하였다. 또한 이러한 불연속적인 strain은

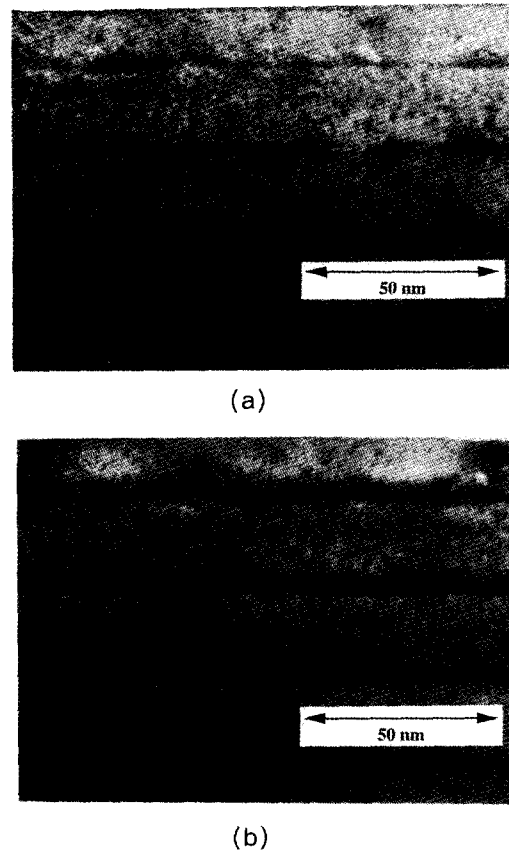


Fig. 3. Cross-sectional high resolution TEM images of four InGaAs quantum wells with 20, 30, 40, and 50% indium composition grown at 490°C. The quantum wells were grown (a) with GaAs plus interruption and (b) without interface smoothing.

layer가 더 두꺼워지거나, indium 농도가 더 커질 때 island식 핵생성이나 3D 성장으로 발전하게 된다. 본 실험에서도 이와 동일한 양상이 발견되어졌다. Fig. 4b에서와 같이 50% 및 40% InGaAs QW layer의 저면부는 상당히 평활한 반면, 상부는 상당히 거칠게 관찰된다. 50%의 경우는 layer의 불연속성까지도 보여지며, 적층결함 및 많은 결정결함들이 역시 관찰되어진다. 이러한 계면의 양상에 의하면, 고농도 InGaAs QW에서의 PL 특성 저하 원인이 island식 핵생성 및 3D 성장에 기인된 것임을 알 수 있다. 반면에 Fig. 4b에서와 같이 단원자층 GaAs 증착 후 성장중지시킨 계면 평활법은 3D 성장에 기인한 계면 거칠기를 완화시켜, 계면의 평활성과 결정결함 밀도에

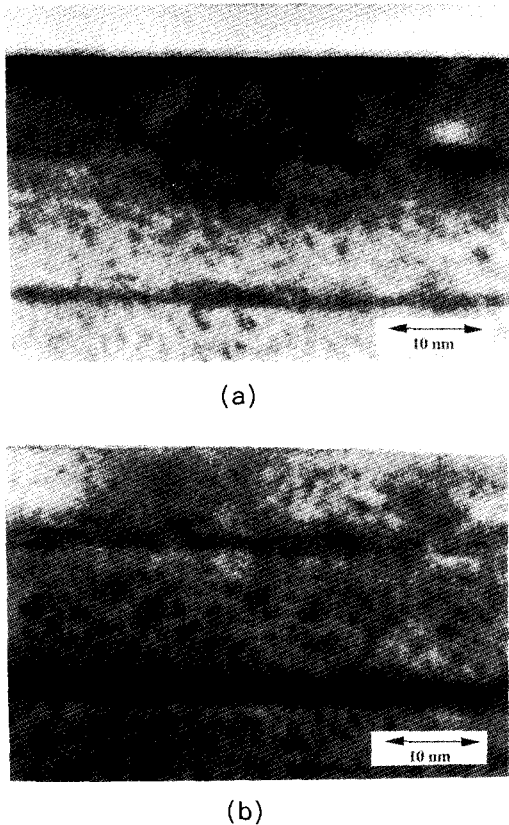


Fig. 4. Expanded high resolution TEM views of two high indium content QWs (50% and 40% from the top). The quantum wells were grown (a) with GaAs plus interruption and (b) without interface smoothing.

있어서 뚜렷한 개선 효과를 보이고 있다. 비록 50% QW은 평탄화 이후에도 다소 표면의 거친 양상과 결함들을 보여주지만, 평탄화하지 않은 50% QW보다 훨씬 개선된 계면 상태를 보여준다.

GaAs 단원자층 증착후 성장중지시킬 때 계면 평활도의 최적화를 PL법에 의하여 관찰하였다. Fig. 5에 성장중지 시간에 따른 30% PL peak(1.16W에서 측정)의 강도를 나타내었다. 본 실험에 의하면 이 QW peak의 강도가 표면 평활도에 가장 민감하였다. 이 그림에서 보이는 바와 같이, 가장 강한 PL 신호는 15초와 30초 사이에서 얻어졌다. 90초의 성장중지 후에는 PL 신호의 감소가 상당한 양으로 관찰되었다. 이러한 결과가 제시하는 바는, 30초이후의 더 긴 성장중지가 오히려

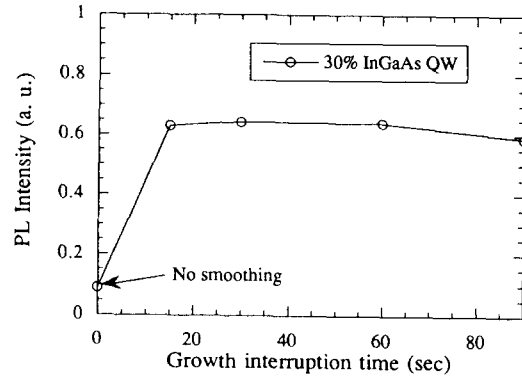


Fig. 5. PL peak intensity of 30% InGaAs QW versus growth interruption time. The PL excitation power is 1.16 watts.

표면에서의 불순물 오염에 의하여 계면 성질에 악영향을 미친다는 것이다.

#### 4. 결 론

고농도 InGaAs QW의 양측 계면에 단원자층의 GaAs 증착후 성장 중지시킴으로써 QW 계면의 재료적 성질 및 계면 평활도가 상당히 개선되었다. PL법의 결과에 의하면, 이러한 계면 성질의 개선양상은 15~30초의 성장 중지 기간 정도에서 거의 완만해지며, 90초 이후에는 다소 악화되어진다. 계면 평활화를 시키지 않은 고농도 InGaAs QW 계면에서는 layer의 불연속성, 계면 거칠기, 결정결함등이 관찰되어졌으며 이러한 계면조건은 성장초기의 island 핵생성에 기인한 것으로 보여진다. 이러한 계면 성질은 GaAs 단원자층 증착후 성장중지시키는 계면평활법에 의하여, 보다 평활하고 연속성을 갖는 계면으로 변화하였다.

#### References

1. A. Fischer-Colbrie, J. N. Miller, S. S. Laderman, S. J. Rosner, and R. Hull: J. Vac. Sci. Technol. B 6 (1988) 620
2. P. Win, Y. Druelle, P. Legry, S. Lepilliet, A. Cappy, Y. Cordier, and J. Favre: Electr. Lett. 29 (1993) 169
3. H. Ito, and J. S. Harris: Electr. Lett. 28 (1992) 655
4. L. E. Eng, A. Sa'ar, T.R. Chen, I. Grave, N.

- Kuze, and A. Yariv : Appl. Phys. Lett. 58 (1991) 2752
5. B. Pezeshki, S. M. lord, and J. S. Harris : Appl. Phys. Lett. 59 (1991) 888
  6. J. Y. Yao, T. G. Anderson, and G. L. Duniop : Appl. Phys. Lett. 53 (1988) 1420
  7. M. J. Ekenstedt, S. M. Wang, and T.G. Anderson : Appl. Phys. Lett. 58 (1991) 854
  8. S. Z. Chang, T. C. Chang, and S. C. Lee : J. Appl. Phys. 73 (1993) 4916
  9. S. M. Lord, B. Pezeshiki, S. D. Kim, and J. S. Harris : J. Crystal Growth 127 (1993) 759
  10. S. D. Kim, H. Lee, and J. S. Harris, Jr. : J. Crystal Growth 141 (1994) 37
  11. P. R. Berger, K. Chang, P. K. Bhattacharya, and J. Singh : J. Vac. Sci. Technol. B 5, 1162 (1987)
  12. S. M. Lord : Ph. D. Dissertation, Stanford University (1993)