

# 分子線에피택설 方法으로 成長한 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$ P-HEMT構造內的 V 및 X字形 缺陷에 關한 研究

(A study on the V and X shape defects in  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$  P-HEMT structure grown by molecular beam epitaxy method)

李海權\*, 洪相基\*, 金相基\*, 盧東完\*, 李載珍\*, 片廣毅\*, 朴亨茂\*

(H.G.Lee, S.K.Hong, S.G. Kim, D.W.Roh, J.J.Lee, K.E.Pyun, and H.M.Park)

### 요약

본 논문에서는 분자선 에피택설 方法으로 InP 기판위에  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  pseudomorphic high electron mobility transistor(P-HEMT)구조를 성장하여, Hall effect측정에 의한 전기적 특성과 Photoluminescence(PL) 측정에 의한 광학특성을 조사하고, 투과전자현미경(TEM)으로 구조내의 V 및 X자형 결함을 관찰하여 결함의 형성요인을 기판인 InP물질과 성장물질인  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 물질의 열팽창계수 차이로 설명하였다.

### Abstract

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  pseudomorphic high electron mobility transistor(P-HEMT) structures were grown on semi-insulating InP substrates by Molecular Beam Epitaxy method. The Hall effect measurement was used to measure the electrical properties and the photoluminescence(PL) measurement for optical property. By the cross-sectional transmission electron microscopy(XTEM) investigation of the V and X shape defects including slip with angle of  $60^\circ$  and  $120^\circ$  to surface in the sample, the defects formation mechanism in the  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  epilayers on InP substrates could be explained with the different thermal expansion coefficients between  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  epilayers and InP substrate.

### I. 서론

일반적으로 분자선 에피택시(MBE : Molecular Beam Epitaxy)에 의한 에피성장시 에피층에 형성되는 결함은 에피의 성장조건, 성장기판의 표면상태 및, 격자상수차 그리고 이중구조 등에 의하여 형성될 수 있다.<sup>[1]</sup>  
<sup>2)</sup> 이러한 형성 요인에 따라 결함의 위치와 모양이

각각 다르게 나타난다.<sup>[3, 4]</sup>

InAlAs/InGaAs/InP P-HEMT 구조는 InAlAs 및 InGaAs의 기판이 개발되지 않은 관계로 InP기판 위에 이 물질의 격자상수와 일치하는  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  과  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 의 물질을 성장하여 이용하고 있다. 따라서 성장되는 InAlAs 및InGaAs물질의 격자상수는 In의 조성이 변하면 기판인 InP의 격자상수와 달라져 격자간에 strain이 발생된다. 이러한 strain은 물질의 전기적 특성을 변화시키므로 본 현상을 이용하여 초저잡음 및 초고속 특성을 갖는 HEMT소자를 제작하고 있다. 그러나 strain은 그 정도가 심할 때 구조내 결

\* 正會員, 韓國電子通信研究院 半導體研究團

(Semiconductor Division, Electronics and Telecommunications Research Institute)

接受日字:1996年11月26日, 수정완료일:1997年6月14日

함의 원인이 되며<sup>15, 6, 7, 8, 9)</sup> 전기적 특성에도 크게 영향을 미친다.

본 논문에서는 InP 기판위에  $In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$  P-HEMT 구조를 MBE로 성장할 때 에피층에 형성되는 V자 및 X자형 결함을 TEM으로 분석하였다.

## II. 실험 및 측정

본 실험에 사용된 기판은 반절연성의 InP(100) 기판으로 기판표면의 자연산화막 제거를 위하여 고진공 후 As분위기의 챔버안에서 기판의 온도를 530°C로 높여 열처리하였다. 이때 표면의 자연산화막 제거여부는 RHEED pattern으로 확인하였다.

3족 재료인 In, Al 및 Ga과 5족 재료인 As의 도가니에서 증발되는 분자선속비는 약 15정도로 했을 때  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ ,  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  의 성장률은 각각 1.4 mm/h이었다.

i-InGaAs cap layer 300 Å
i-InAlAs depletion layer 300 Å
<i>Si</i> -doping
i-InAlAs spacer layer 50 Å
i-InGaAs channel layer 150 Å
i-InGaAs prechannel layer 200 Å
i-InAlAs buffer layer 5000 Å
i-InAlAs/InGaAs superlattice buffer layer 30/30 Å X 4
i-InAlAs buffer layer 1000 Å
S.I. InP (100) substrate

그림 1. MBE방법에 의하여 성장된 InP based P-HEMT 구조

Fig. 1. InP based P-HEMT structure grown by MBE method.

성장된 구조는 그림 1, 그림 2의 a) 및 b)와 같이 InP 기판을 이용한 P-HEMT 구조이다. 그림 1에서 초격자 완충층은 에피층 성장시 기판으로 부터의 결함 및 불순물 등이 전도층으로 전달되는 것을 방지하기 위한 것이며, 그 위의  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  층도 완충층으로 성장된 것이다. 전도층은 InGaAs 물질에서 In의 조성이 53%와 58% 인 두층으로 나누어 성장하였다. In의 조성이 53%인 층은  $In_{0.52}Al_{0.48}As$ 와 격자상수를 일치시켜 결정질을 향상시키기 위함이고 격리층 부근의 In 조성이 58%인 층은 격자 불일치를 조성하여 높은

strain을 형성시켰다. 격리층 50 Å을 성장시킨후 Si 불순물을 planar doping 방법으로 첨가하였다. 그 위에 300 Å의  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  공핍층을 성장하고 뚜껑층으로 300 Å의  $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 를 성장하였다. 이러한 구조에 대하여 기판 온도 520°C와 540°C에서 두가지 시료를 성장하였으며 전도층에서는 두 시료 모두 In 조성이 58%인 격자 불일치 전도층이 있어 450°C로 온도를 낮추었다.

<i>n</i> <sup>-</sup> InGaAs cap layer 200 ÅÅ
<i>Ai</i> -InAlAs depletion layer 300 Å
<i>Si</i> -doping
i-InAlAs spacer layer 30 ÅÅ
i-InGaAs channel layer 100 Å
<i>A</i> i-InAlAs spacer layer 30 Å
<i>Si</i> -doping
i-InAlAs/InGaAs superlattice 20:20 Å X 25
i-InAlAs/InGaAs superlattice 50:50 Å X 20
i-InAlAs buffer layer 1000 Å
S.I. InP(100) substrate

(a)

<i>n</i> <sup>-</sup> InGaAs cap layer 200 ÅÅ
<i>Ai</i> -InAlAs depletion layer 300 Å
<i>Si</i> -doping
i-InAlAs spacer layer 10 ÅÅ <small>(GaAs 20 Å)</small>
i-InGaAs channel layer 100 Å <small>(GaAs 20 Å)</small>
<i>A</i> i-InAlAs spacer layer 10 Å
<i>Si</i> -doping
i-InAlAs/InGaAs superlattice 20:20 Å X 25
i-InAlAs/InGaAs superlattice 50:50 Å X 20
i-InAlAs buffer layer 1000 Å
S.I. InP(100) substrate

(b)

그림 2. 이중전도층을 가지는 InP based P-HEMT 구조 (a) 일반적인 구조, (b) GaAs층이 삽입된 구조

Fig. 2. InP based P-HEMT structure with double channel.

(a) conventional structure, (b) GaAs layer inserted structure between spacer and channel layer.

그림 2는 기본적으로 그림 1과 같은 개념의 P-HEMT 구조이나 전도층의 양쪽에 doping을 시도하여 더 많은 이차원 전자농도를 얻기 위한 구조로 이중전도층 HEMT 구조이다. 그림 2의 a) 구조는 성장중 기판온도 변화의 영향을 관찰하기 위하여 두가지 방법으로 시료를 성장하였다. 처음 방법은 기판온도를 처

음부터 520°C로 고정 하여 성장이 완료될 때까지 일정하게 유지시켰으며 나중 방법은 완충층 성장후 온도를 450°C까지 낮추어 전도층을 성장한 후 다시 온도를 높여 시료를 성장하였다. 그림 2의 b) 구조는 초격자 완충층 성장후 큰 strain 효과를 이용하기 위하여 격자상수 차이가 약 4%인 GaAs층 20Å을 삽입하였다. 이때 기판의 온도는 520°C를 유지하였으나 전도층인 InGaAs과 strain효과를 얻기위한 GaAs층을 성장 시는 약 450°C로 낮추어 성장하였다.

성장한 P-HEMT구조의 전기적인 특성인 전자의 이동도 및 전자농도를 Hall effect장치를 이용하여 측정 하였으며, 구조내의 전도층에 의하여 형성되는 양자우물의 광학적 특성은PL실험을 통하여 조사하였고, DXRD(double crystal X-ray diffraction)측정으로부터 성장된 에피층의 결정질을 확인하였으며 구조내의 결함은 투과전자현미경을 이용하여 관찰하였다.

### III. 결과 및 고찰

일반적으로 격자상수 차이를 이용한 DXRD관찰에서 기판의 격자상수와 성장물질의 격자상수가 일치할 경우 DXRD곡선은 한개의 peak을 나타 내고 있다. 그러나 성장물질의 층이 여러가지로 다층화되고 변화될 경우 그 구조에 의하여 곡선에는 격자에 의한 peak이외에도 구조에 의한 peak가 나타나며 그 성장층의 결정성이 우수함에 따라 peak의 형태가 날카롭게 나타난다. 그림 3은 그림 1시료의 DXRD실험에서 얻어진 곡선이다. 그림 3의 a)는 성장온도가 540°C인 시료의 곡선이고 b)는 520°C에서 성장된 시료의 곡선이다. 이 두 곡선을 비교해 보면 성장온도가 520°C인 시료는 기판에 의한 peak과 성장구조에 의한 peak이 날카롭게 나타나는데 반해 성장온도가 540°C인 시료의 곡선은 구조에 의한 peak이 매우 둔하게 나타나고 있어 구조내에 결함이 존재함을 암시하고 있다.

이 시료들의 전기적 특성인 이동도와 농도의 관계에서도 성장온도가 520°C인 시료에서는 상온일 때  $5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 의 농도와  $9,100\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 이동도를 나타내고 있으나 540°C 에서 성장된 시료에서는 약  $4,300\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 낮은 이동도를 나타내는 것으로 보아 역시 구조내의 결함을 예상하게 하고 있다.

광학적 특성인 15K PL 측정 데이터에서도 성장온도가 520°C인 시료에서는 그림 4와 같이 약 0.87eV

에서 구조내의 2DEG층을 이루는 양자우물에 의한 peak과 약 1.48eV부근에 InAlAs에 의한 peak이 나타나고 있으나 540°C에서 성장된 시료에서는 peak이 나타나지 않아 구조내에 결함이 발생되어 양자우물이 형성되지 않았음을 예상할 수 있다.

이러한 구조내의 결함을 확인하기 위한 단면TEM 관찰 결과인 사진 1에서 보이는 것과 같은 결함이 성장온도가 520°C인 시료에서는 나타나지 않았으나 540°C인 시료에서 나타났다. 사진 1은 그림 1구조 시료의 단면 TEM사진이다. 결함들은 모양이 대부분 기판이나 표면과 수직 이거나 각각 60°와 120°의 각을 이루어 X형태나 V형태로 형성되어 있다.

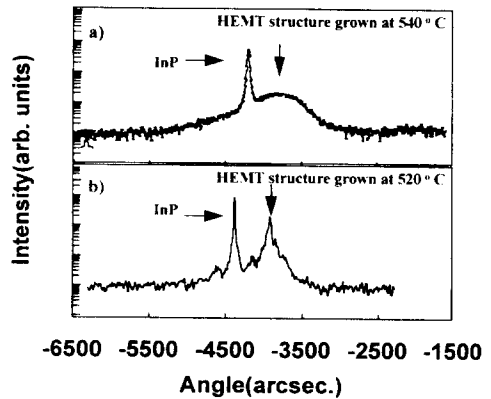


그림 3. InP based P-HEMT 구조의 DXRD 곡선 (a) 성장온도 : 540°C, (b) 성장온도 : 520°C  
Fig. 3. DXRD curves of InP based P-HEMT structure (a) grown at 540°C, (b) grown at 520°C.

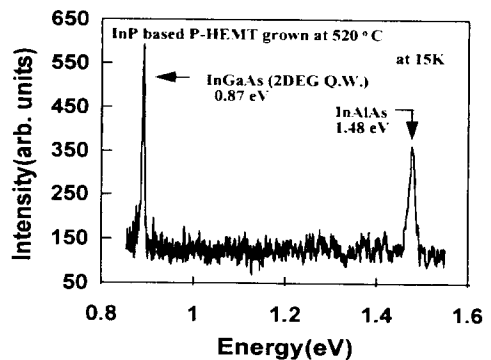


그림 4. 기판온도 520°C에서 성장된 InP 계 P-HEMT 시료의 15K PL 스펙트럼  
Fig. 4. 15K PL spectrum of InP based P-HEMT structure grown at 520°C.

사진 1에서 완충층에 존재하는 결함들이 전도층에는 존재하지 않으며 간혹 나타나고 있는 것으로 보아 완충층의 결함은 완충층 성장후 격자 불일치인 전도층을 성장하기 위하여 기판의 온도를 낮추는 과정에서 형성되었음을 쉽게 예상할 수 있다.

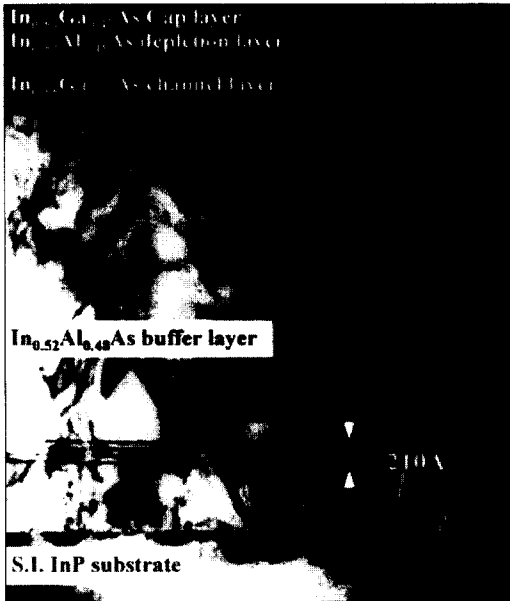


사진 1. MBE방법으로 540°C에서 성장된 InP 계 P-HEMT구조의 단면 전자현미경사진  
Photo. 1. XTEM image of InP based P-HEMT grown at 540°C by MBE method.

한편 그림 2의 a), b)구조의 시료에서 얻은 TEM 사진 2와 3은 이러한 예상을 잘 보강해주고 있다. 사진2는 그림 2, a)구조의 계면을 보여주는 것으로 구조 내에 결함이 없이 결정의 성장이 순조롭게 진행되었으나 그림 2의 b)구조인 사진 3에서는 구조내에 삽입된 20Å의 격자상수차가 매우 큰 GaAs층에 의하여 이미 성장되었던 초격자층마저도 파괴되었음을 볼 수 있다.

그러나 비록 격자상수 불일치에 의하여 초격자층이 파괴되었음에도 사진 1에서 나타나는 결함의 형태는 나타나지 않고 있다. 따라서 그림 1구조에서 형성되는 결함은 결정성장시에 형성된다기 보다는 성장후 다른 요인에 의하여 형성됨을 알 수 있다.

성장중 RHEED pattern이 2x4구조를 유지 하고 있어 결함의 형성이 성장 후에 이루어 짐을 간접적으로 알 수 있다.

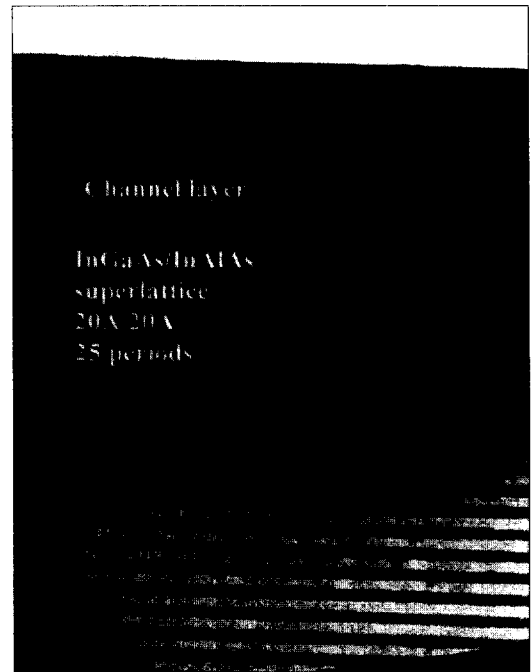


사진 2. 이중 전도층을 가지는 InP 계 P-HEMT 구조의 단면 전자현미경사진

Photo. 2. XTEM image of double channel InP based P-HEMT structure grown by MBE.

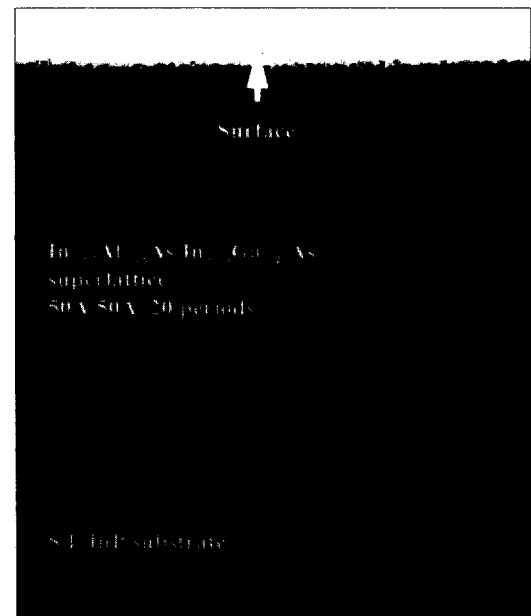
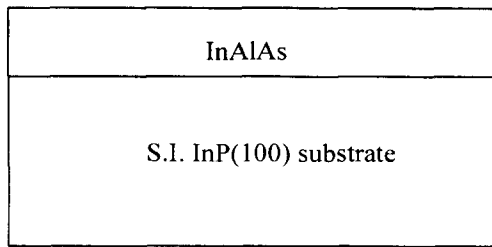


사진 3. GaAs층이 20Å 삽입된 이중 전도층의 InP 계 P-HEMT 구조의 단면 전자현미경 사진

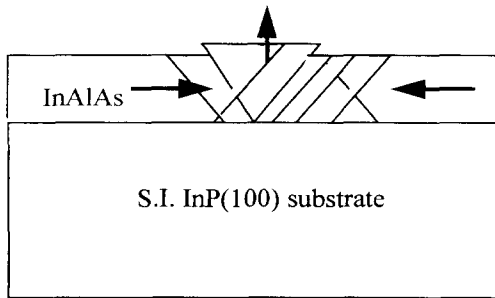
Photo. 3. XTEM image of InP based double channel P-HEMT with GaAs layer.

본 연구에서는 이러한 결함발생의 원인을 높은 성장 온도와 두 물질간의 열팽창계수로 분석 하였다.

결함은 그림 5와 같이 열팽창계수가 큰( $4.56 \times 10^{-6}/K$  at RT) InP위에 상대적으로 열팽창계수가 작은 ( $4.4 \times 10^{-6}/K$  at RT) InAlAs의 물질이 높은 온도에서 두 물질 격자상수의 최소 공배수 길이에 서로 다른 갯수의 분자들을 보유 한다. 성장이 끝나고 온도가 낮아짐에 따라 수축되는 과정에서 상대적으로 두께가 얇고 열팽창계수가 작은  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  물질이 수축차에 의하여 횡압을 받는다. 이때 성장된 얇은 에피층이 위로 융기되며 이 과정에서 slip형태의 결함이 형성된다.



(a)



(b)

그림 5. InP 기판 위에 성장된  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  에피층의 결함형성 과정

(a) InP기판위의 일반적인 InAlAs에피층 (b) 성장후 냉각시 열수축에 의한 횡압으로 에피층의 결함형성

Fig. 5. Defects formation in InAlAs epi layer grown on InP substrate.

(a) InAlAs layer on InP substrate. (b) defects formation by horizontal force during cooling after growth.

사진 4는 InGaAs 전도층 부근의 투과전자현미경 사진으로 이와 같은 과정으로 형성된 결함을 잘 보여 주고 있다. 여기에서 V형태를 이루고 있는 부분이 융기된 부분으로 다른 부분에 비하여 표면이 화살표 방

향으로 볼록하게 나타나고 있다. 이와 같은 과정을 통해 형성된 결함은 그림 2 a) 구조성장에서 성장온도를 변화시킨 시료의 TEM 사진 (사진 5)의 초격자 구조에서 확실히 보여주고 있다. 특히 성장온도를  $520^{\circ}C$ 에서  $450^{\circ}C$ 로 낮춘후 다시 높혀 주었기 때문에 V형태의 오른쪽에 융기되어 밀려 올라간 상태에서 다시 팽창되어 틈이 형성되어 있다.

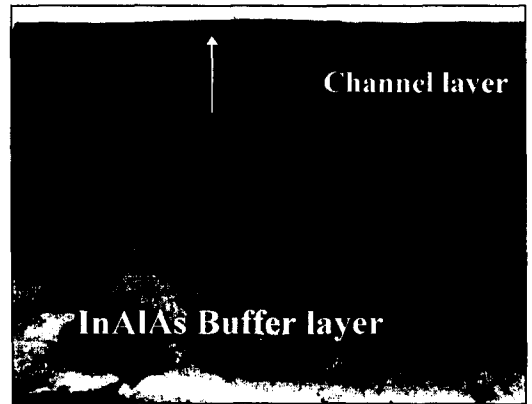


사진 4. 횡압에 의하여 결함내부가 융기된 V 및 X 형태를 나타낸 InP계 P-HEMT 구조의 단면 전자현미경사진

Photo. 4. XTEM image of internal slip upper V and X shap defects by horizontal force in InP based P-HEMT structure.

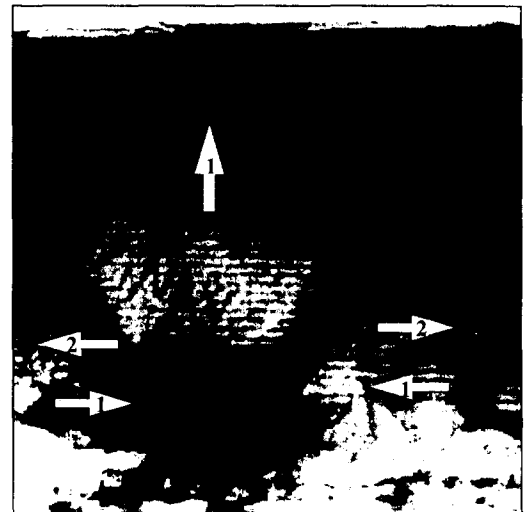


사진 5. 성장중 기판의 온도에 의하여 초격자 완충층에 형성된 V형태결함의 전자현미경사진.<화살표 내의 숫자는 결함형성 순서를 나타냄>

Photo. 5. XTEM image of V shape defect formed in super lattice buffer layer by growth temperature variation. The numbers mean the order of defect formation.

IV. 결론

InP 기판을 이용한 격리층의 두께 50Å인 P-HEMT구조에서 기판온도 540°C와 520°C중 520°C 일 때 상온에서  $5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 의 2DEG농도와  $9,100 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ 의 이동도를 얻었으며 15K PL 측정에서 0.87eV 부근의 2DEG층인 양자우물에 의한 peak을 얻을 수 있었다. 그러나 기판온도가 540°C인 경우는 DXRD 측정 곡선으로 구조 내에 이상이 있음을 알 수 있었으며 TEM 사진관찰에 의하여 구조내 V자형 또는 X자형의 결함이 형성되었음을 알았다.

이러한 결함 발생은 TEM 사진을 관찰 해본 결과 에피택셜층의 이중접합에 의한 물질의 열팽창계수의 차이에 기인한 것으로 여겨졌다.

참 고 문 헌

[1] S. Jujita, Y. Nakaoka, T. Uemura, M. Tabuchi, S. Noda, Y. Takeda, and A. Sasaki, J. Cryst. Growth 95, 224(1989).

[2] S. Z. Chang, T. C. Chang, and S. C. Lee, J. Appl. Phys. 73, 4916(1993).  
 [3] Petroff, Inst. Phys. Conf. Ser. no 23, 73 (1975).  
 [4] K. L. Kavanagh, M. A. Capano, L. W. Hobbs, J. C. Barbour, P. M. J. Maree, W. Schaff, T. W. Mayer, D. Pettit, J. M. Woodall, J. A. Stroschio, and R. M. Feenstra, J. Appl. Phys. 64(10), 15 November, 4843(1988).  
 [5] J. W. Matthews and A. E. Blakeslee, J. Cryst. Growth 27, 118(1974).  
 [6] R. People and J. c. Bean, Appl. Phys. Lett. 47, 322(1985).  
 [7] Chin-An Chang and A. Segmuller, J. Vac. Sci. Tech. 16, 285(1979).  
 [8] C. M. Serrano and Chin-An Chang, Appl. Phys. Lett. 39(10), 15 November 808(1981).  
 [9] Kevin H. Chang, Ronald Gibala, David J. Srolovitz, Pallab K. Bhattacharya and John F. Mautfield, J. Appl. Phys., vol 67, no. 9, 1 May(1990).

저 자 소 개



李海權(正會員)

1956년 1월 4일생. 1986년 2월 동국대학교 이과대학 물리학과 졸업. 1988년 8월 동국대학교 일반대학원 물리학과 졸업(이학석사). 1995년 8월 동국대학교 일반대학원 물리학과 졸업(이학박사). 현재 한국전자통신연구원 반도체연구단 선임연구원. 주업무 및 관심분야는 MBE growth(III-V), 소자제작 등임.

金相基(正會員) 第 33卷 A編 第 12號 參照

李載珍(正會員) 第 31卷 第 7號 參照

현재 한국전자통신연구소 반도체연구단 책임연구원

朴亨茂(正會員) 第 33卷 A編 第 12號 參照

현재 한국전자통신연구소 반도체연구단 책임연구원



盧東完(正會員)

1966년 2월 23일생. 1988년 2월 서울대학교 공과대학 금속공학과 졸업(공학사). 1990년 2월 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학석사). 1992년 8월 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전자통신연구원 기초기술연구부 선임연구원. 주관심분야는 화합물반도체 성장 및 소자 제작 등임.

洪相基(正會員)

1995년 RPI공대 재료공학과 박사. 1996년 한국전자통신연구원 반도체 연구단 post-Doc. 1997년 현재 현대전자 산업주식회사 메모리연구소 선임연구원

片廣毅(正會員) 第 34卷 D編 第 3號 參照