

## 분자선 에피택시 성장법으로 성장한 AlAs/GaAs 에피택셜층의 특성

노동완\* · 김경옥 · 이해권

한국전자통신연구원

\*Eaton 반도체(주)

### Study on the Characteristics of the AlAs/GaAs Epitaxial Layers Grown by Molecular Beam Epitaxy

Dong-Wan Roh, Gyungock Kim and Hae-Gwon Lee

Electronics and Telecommunications Research Institute

\*Eaton Semiconductor Limited.

(1997년 8월 7일 받음, 1997년 10월 8일 최종수정본 받음.)

**초 록** 본 연구에서는 분자선 에피택시 방법으로 비대칭 AlAs/GaAs (001) 이중 장벽, 삼중장벽구조를 성장한 후 이를 이용하여 2단자 소자를 제작하여 전기적 특성을 분석하였다. 에피층은 쌍결정 X-ray 회절 분석과 단면투과 전자현미경을 이용하여 결정성 및 격자 정합성을 확인하였다. 전기적 성능을 보다 향상시키기 위해 n-GaAs에 대한 오믹 접촉등의 소자 제작 공정을 최적화하였다. 삼중장벽 구조를 이용하여 제작한 소자의 전기적 특성 연구 결과 두개의 주요 공진 터널링 전류 피크 사이에 X-valley에 의한 구조를 확인할 수 있었으며, 이중 장벽구조에 제2의 양자우물 구조를 첨가함으로써 낮은 전압위치에서 전류 피크가 향상하는 결과를 얻었다.

**Abstract** We report fabrication and characterization of asymmetric AlAs/GaAs (001) triple-barrier structures, grown by molecular beam epitaxy. The epitaxial structure was confirmed by double crystal X-ray diffraction(DXRD) and cross-sectional transmission electron microscopy(XTEM) analysis techniques. In order to show the better electrical performance, the optimum device fabrication process, especially ohmic contact to n-type GaAs was studied. The I-V measurements for the triple barrier heterostructure show the structures between two main resonant tunneling peak current voltages, and the enhanced resonant tunneling effect through the lined-up ground quantum well state by adding second quantum well to the double barrier heterostructure.

### 1. 서 론

GaAs계 화합물반도체 에피택셜층은 MOCVD(Metalorganic Chemical Vapor Deposition), MBE(Molecular Beam Epitaxy), CBE(Chemical Beam Epitaxy) 등의 재료성장방법이 발전함에 따라 전자 및 광자 소자로의 적용에 큰 흥미를 끌며 많은 연구가 진행되어 왔다. 안정성 높은 소자의 개발과 더불어 에피택셜층의 제조 및 공정의 개발은 높은 수준의 전자소자 기술의 발전을 이끌어 왔다고 할 수 있다. 이러한 첨단 전자 소자중 공진 터널링 양자우물 이중접합구조(resonant tunneling quantum well heterostructure)는 전자의 투과현상에 대한 물리 연구면에서 뿐만 아니라, 초고속 전자 및 광전자소자의 응용성 때문에 많은 연구자들에 의해 연구되어 오고 있다<sup>1,2)</sup>.

에너지 밴드 갭(energy band gap)이 서로 다른 이중반도체 접합에 의해 만들어지는 통상적인 공진 터널링 다이오드 소자, RTD(resonant tunneling diode)는 분자선 에피택셜 성장 이라든가 MOCVD의 방법으로 성장한 에피층 중 큰 에너지 밴드 갭을 갖는 층의 두 장벽사이에 형성된 적은 에너지 밴드 갭을 갖는 층의 양자우물을 전자가 빠른

속도로 이동하는 효과를 이용하는 소자이다. GaAs계의 경우 큰 에너지 밴드 갭을 갖는 장벽층으로 AlAs 또는 AlGaAs층을 이용하며 우물층으로는 GaAs층을 이용하여 인가된 전압에 의하여 도우프된 GaAs 층의 전자가 빠른 속도로 우물층을 통과하는 효과를 이용한다. AlGaAs 층은 GaAs 기판과의 Al 조성이 변함에 따라 격자불일치(lattice mismatch)가 거의 없기 때문에 일반적인 에피택셜 성장법에 따라 쉽게 성장할 수 있다. 그러나 장벽의 두께가 10Å 내외로 얇아지는 경우 계면의 급준성을 고려한 새로운 성장 기술이 요구되고 있다<sup>3,4)</sup>. 구속된 양자우물내의 에너지 준위를 통한 전자의 투과 거동등의 물리 현상의 이론적, 실험적 규명을 위해서는 안정된 에피층 재료의 성장 및 소자의 공정 조건의 확립이 필요하다. 이러한 일반적인 이중장벽 구조의 공명투과다이오드의 전기적 특성(PVR, peak current)등의 향상을 위해서, 또는 다양한 양자 상태의 조합을 통한 소자의 다양성을 증대시키기 위하여 삼중장벽을 갖는 이중접합구조의 이론적<sup>5-7)</sup>, 실험적 연구<sup>8-10)</sup>가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 특히 핫전자트랜지스터의 electron spectroscopy<sup>11)</sup> 등에 응용이 가능한 공명투과 이중접합 양자구조의 연구의 일환으로, 이중장벽 구조

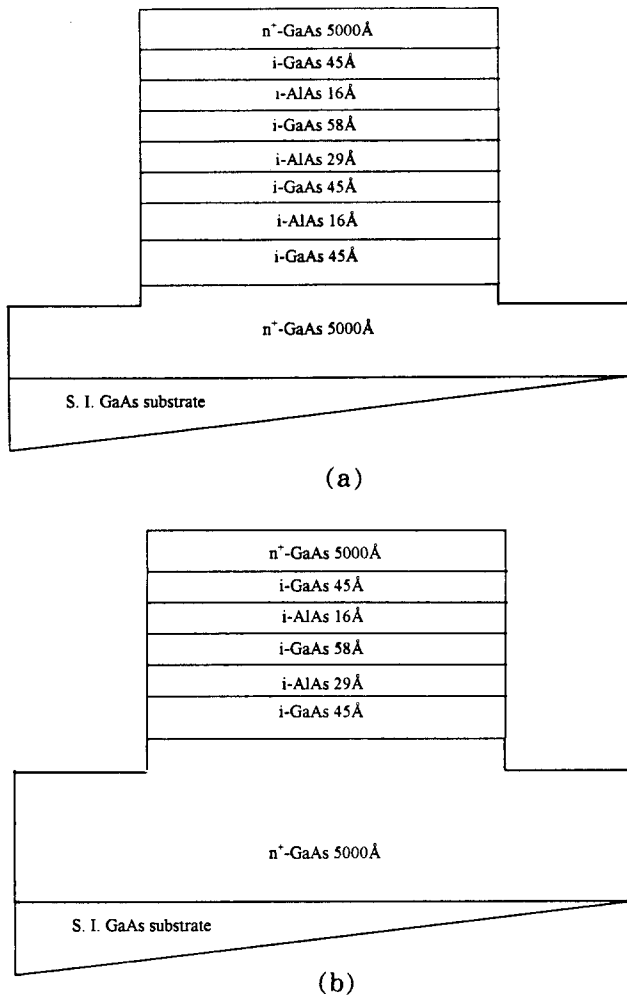


Fig. 1. (a) Schematic diagram of the designed triple barrier epi-structure, (b) Schematic diagram of the designed double barrier epi-structure

보다 peak current 등의 향상과 소자의 다양성을 증대시키기 위하여 삼중장벽을 갖는 이중접합 구조를 이중장벽 구조와 같은 조건으로 성장, 소자 제작 후 그 특성을 비교하였다. 전자의 투과거동의 물리현상 규명<sup>7~9)</sup>을 위해 설계된 AlAs/GaAs 비대칭 이중장벽 구조와 삼중장벽 구조의 분자선 에피택시 방법에 의한 에피 성장, 쌍결정 X-ray 회절 분석, 단면투과전자현미경 분석을 중심으로 한 구조적 특성 분석, 다이오드 형태의 2단자 소자 제작 공정, 제조된 소자를 이용한 전류-전압 특성에 대한 연구 결과를 기술하고자 한다.

2. 실험 방법

이중장벽 및 삼중장벽 에피택셜 층은 그림 1에 나타난 구조로, 분자선 에피택시법(MBE, RIBER MBE45)으로 성장하였다. 기판은 (100) 방향을 갖는 3" 반절연 GaAs 기판을 사용하였으며, thermal desorption 방법에 의해 기판을 600°C 까지 가열하여 산화막을 제거한 후 성장하였다. 성장 전 배경압력은  $2 \times 10^{-10}$  torr, 성장중의 압력은  $3 \times 10^{-7}$  torr, 성장온도는 580°C, V/III BEP(Beam Equivalent Pressure)는 15이었으며, 성장시 에피층의 두께 확인을 위

하여 in-situ RHEED oscillation을 이용하여 monitoring 하였다. 3" 기판의 조성 균일성(composition uniformity)을 위하여 15rpm의 속도로 기판을 회전시켰으며, 성장속도는 1 $\mu$ m/hr로 고정하였다. 삼중장벽 공진터널링 이중접합 구조의 전기적 특성을 이중장벽 구조와 비교하기 위하여 동일한 성장 조건으로 이중장벽을 갖는 에피구조를 성장하였다.

성장 후 에피층은 쌍결정 X-ray 회절분석(DXR, Double crystal X-ray diffraction), 단면투과전자현미경(XTEM, Cross-sectional transmission electron microscopy) 등을 이용하여 확인하였다. 소자의 제작은 Photolithography 방법을 이용하였는데,  $1.5 \times 4 \mu\text{m}^2 \sim 30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 의 메사 형성은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O 용액에 의한 습식식각법과 CAIBE(Chemically assisted ion beam etching)에 의한 건식식각법을 동시에 이용하였으며 식각후 에칭단면은 주사전자현미경으로 관찰하였다. 오믹 접촉용 금속은 AuGe/Ni/Au를 증착하여 사용하였으며 passivation용으로 SiN, 질화막을 증착한 후 hole을 opening한 후 Ti/Au pad 금속을 증착하여 제조하였다. 소자의 전기적 특성은 HP4145B parameter analyzer를 이용하여 측정하였으며, 온도의존성은 특별히 제작된 cryostat 안에서 액체 헬륨을 이용하여 1.5K에서 상온까지 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

에피층 분석

성장후 소자 제작을 하기전에 에피택셜층의 결정성, 이중접합구조 간의 격자 정합성, 설계된 두께로의 성장 여부, 원하는 불순물 도핑 농도의 측정등이 필요하다. 에피택셜층의 결정성 및 이중접합구조 간의 격자 정합성은 쌍결정 X선 회절 분석을 이용하여 확인하였으며, 각 에피택셜층의 두께 및 계면의 급준성등은 단면투과전자현미경을 이용하였다. 그림 2에 설계된 AlAs 이중장벽 과 삼중장벽 에피구조의 DXRD 측정 결과를 나타내었다. 전위등 결정결함의 존재등에 기인한 GaAs X-ray 회절 peak의 변화를 관찰할 수 없었으며, AlAs/GaAs 이중접합 에피층사이의 격자 비정합함을 나타내는 다른 회절 peak을 관찰 할 수 없었다. AlAs 장벽층의 X-ray 회절 peak는 장벽층의 두께가 수십Å으로 매우 얇아 회절 패턴상에 측정이 안되는 것으로 연구한 에피 구조의 모사(simulation) 결과로 알 수 있었다. 본 DXRD 측정 방법에 의하면, GaAs (004) Bragg 회절 피크의 FWHM은 18.6arcsec이었으며, 에피택셜층의 두께와 계면의 급준성등의 결정성을 더욱 확실히 조사하기 위해서 단면을 투과전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 그림 3의 단면투과전자현미경사진에서 보듯이 각각 45Å, 58Å의 GaAs 양자 우물 사이로 16Å, 29Å, 16Å의 AlAs장벽 구조가 경계면이 뚜렷하게 성장되었음을 알 수 있다. 이러한 측정 결과, 성장한 에피층이 결정 결함없는, 설계된 구조를 갖음을 확인할 수 있었다.

소자의 제작 특성

공진터널링 소자등의 양자효과 전자소자에서 에피층에서

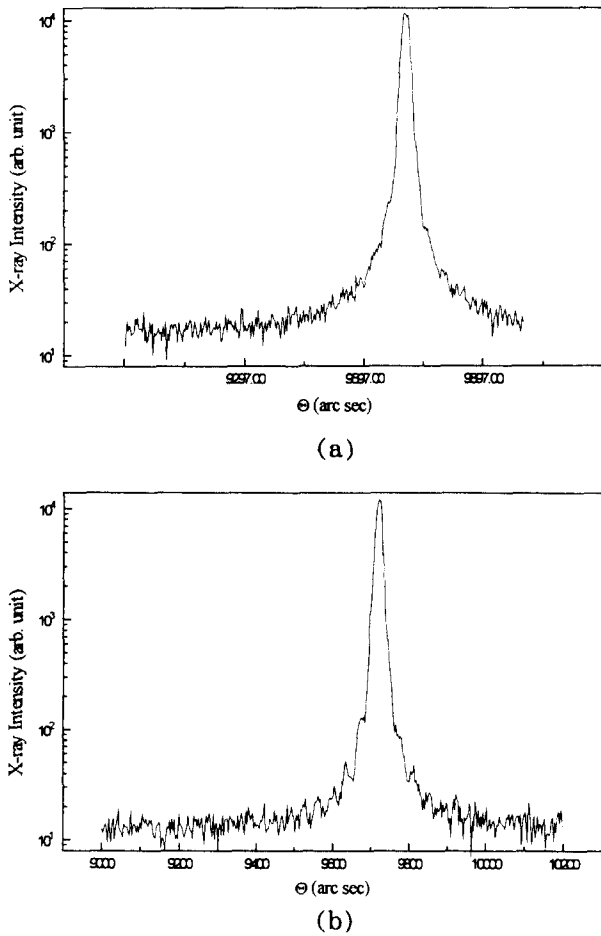


Fig. 2. Measured patterns of double-crystal X-ray diffraction for asymmetric AlAs/GaAs (a) double-barrier and (b) triple-barrier epi-layers

의 전자의 흐름을 원활하게 하기 위해서는 활성층에서의 신뢰성이 있고, 낮은 저항값을 갖는 오믹 접촉(ohmic contact)을 얻는 것이 필요하다. 이를 위하여 기존의 AuGe/Ni/Au 금속계를 이용하여 설계된 에피구조에 적합한 확산 거리(diffusion length)를 가지며 낮은 저항값을 갖는 오믹 접촉층의 증착조건 및 열처리 조건을 찾아야한다. 연구 결과의 금속계는 HET(Hot Electron Transistor)등과 같은 unipolar transistor의 오믹 접촉을 위한 shallow, non-piking, low resistance 오믹 접촉용으로 활용될 수 있을 것이다. AuGe/Ni/Au 금속층을 각각 1200 Å/500 Å/3000 Å, 1000 Å/250 Å/2000 Å, 1000 Å/125 Å/2000 Å, 500 Å/125 Å/2000 Å, 400 Å/100 Å/1600 Å의 두께로 증착한 후 저항값, 표면형상, AES(Auger Electron Spectroscopy)의 의해 측정된 확산 거리값을 표1에 요약하였다. 낮은 오믹 저항을 유지하면서 확산 거리를 더욱 줄이기 위한 노력으로 각 금속들의 상대적인 비는 유지하면서 일정량씩 절대량을 감소하여 증착한 결과 증착 금속의 총 두께를 변화시키므로써 확산 거리를 조절할 수 있다는 결과를 얻을 수 있었으며, 각 금속의 상대적인 비를 최적의 조건으로 유지하면 절대적인 양에 관계없이 낮은 접촉 저항을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. AuGe/Ni/Au 각 금속의 두께가

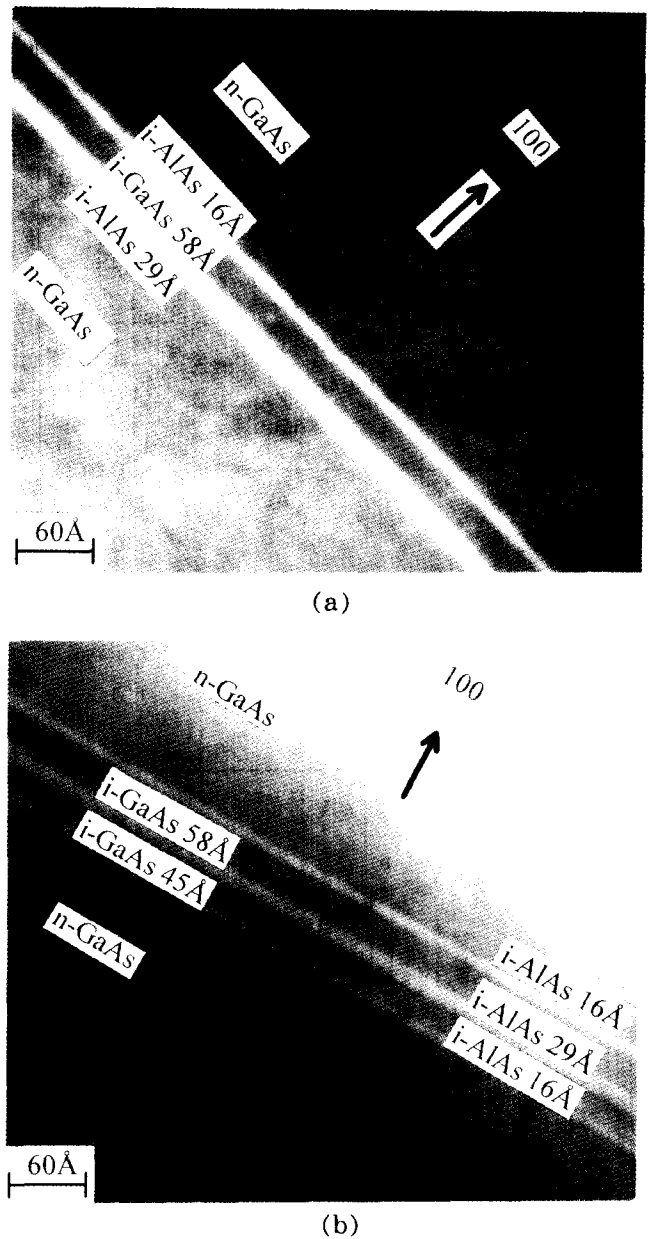


Fig. 3. (a) Cross-sectional transmission electron micrograph of asymmetric AlAs/GaAs double-barrier spi-layers, (b) Cross-sectional transmission electron micrograph of asymmetric AlAs/GaAs triple-barrier spi-layers

400 Å/100 Å/1600 Å 일때 balling up 등의 퇴화 현상없이 RTA(Rapid thermal annealing)후 약  $5 \times 10^{-7} \Omega/\text{cm}^2$ 의 값을 가지며 확산 거리는 800 Å인 오믹 접촉을 얻을 수 있었다.

#### 삼중장벽구조의 전류 피크 해석

그림 4는 메사의 크기가  $2 \times 5 \mu\text{m}^2$ 인 소자를 이용하여 상온(295K)에서 측정된 삼중 장벽 구조에서의 I-V 특성 곡선이다. 소자에 인가한 외부 전압에 따라 공진 터널링 현상이 나타날 때의 AlAs/GaAs의 에너지 밴드가 휘어진 상태를 같이 보여 주고 있다. 첫번째와 두번째의 양자 우물의 속박된 기저 에너지 준위가 서로 정렬이 되어서 전자가 공진 터널링을 할 수 있었으며 급격한  $dI/dV$ 의 변화를 보이

Table 1. Characteristics of AuGe/Ni/Au ohmic contact to GaAs/AlAs epilayers. The deposited metal were annealed at 360°C for 30 sec using rapid thermal annealing method. The diffusion length was measured by Auger electron microscopy and the resistivity was calculated by using transmission line method.

No	Thickness(Å)	Surface Morphology	Diffusion length(Å)	Specific contact resistivity( $\Omega/\text{cm}^2$ )
1	1200/500/3000	good	>1500	$8 \times 10^{-7}$
2	1000/250/2000	good	>1100	$7 \times 10^{-7}$
3	1000/125/2000	Bad after RTA treated	-	Non-ohmic
4	500/125/2000	good	>1000	$7 \times 10^{-7}$
5	400/100/1600	good	<800	$5 \times 10^{-7}$

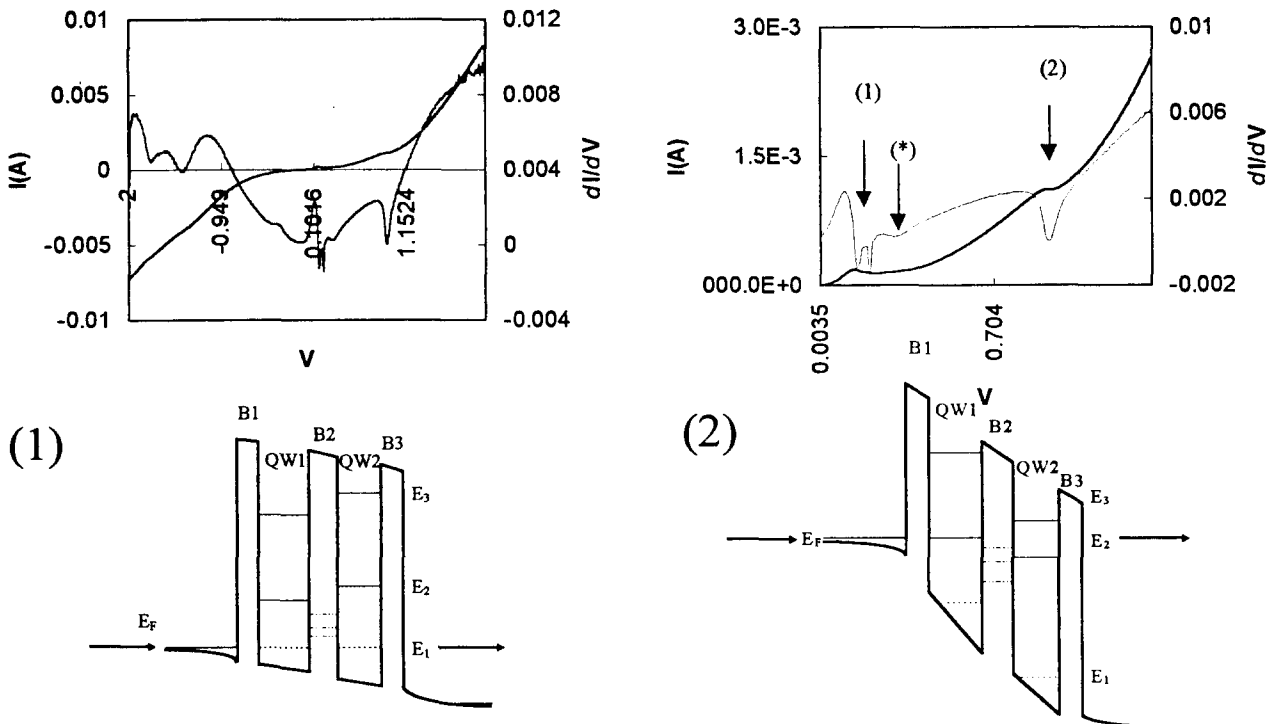


Fig. 4. The measured  $I(dI/dV)$ - $V$  characteristics for  $2 \times 5 \mu\text{m}^2$  mesa at room temperature. (1), (2), and (\*) indicate the electron tunneling through ground quantum well state, first excited quantum well state, and due to the X-valley effect

는 것으로 알 수 있다. 그리고 역방향 영역에서는 공진 터널링 현상을 관측할 수 없었는데 이는 설계된 구조가 비대칭 구조로 외부 전압이 순방향으로 인가되었을 때 밴드 구조의 휘어짐에 의해 첫번째 양자 우물의 속박된 기저 에너지 준위끼리 서로 정렬에 의한 것과 인가 전압이 점점 증가하여 첫번째 양자 우물의 첫번째 여기 에너지 준위를 통한 공진 터널링 현상을 관측할 수 있었으나 역방향에서는 외부 전압이 인가되어 밴드의 휘어짐에도 불구하고 양자 우물의 서로 다른 쪽에 의해 전자가 입사되는 쪽의 속박된 에너지 준위가 높아 각각의 양자우물 안의 속박된 에너지 준위끼리 서로 어긋나서 공진 터널링 현상을 관측할 수 없었다.

Al(Ga)As 장벽을 통한 전자의 투과 현상에 대한 최근 연구 결과에 따르면, AlAs 장벽을 통한 전자의 투과 거동은 매우 복잡한 양상을 나타내고 있다<sup>1, 2, 7)</sup>. 기저 에너지 준위와 첫번째 여기 에너지 준위를 통한 공진터널링 효과와

더불어 장벽의 X-속박된 에너지 준위를 통한 전자의 투과 현상을 연구하기 위하여 삼중장벽 구조에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 그림 4의  $dI/dV$ - $V$  곡선에서 인가된 외부 전압이 약 0.3V 근처에 화살표가 가리키는 곳에는 약간의 dip구조가 있는 것을 볼 수 있는데 이는 에너지 밴드 그림에서 보듯이 양자 우물 안의 속박된 에너지를 통한 전자의 이동 현상이 아님을 알 수 있다. 이 구조는 전자 입사층의 페르미 에너지 준위에서 입사된 전자가 첫번째 AlAs 장벽을 투과하여 중간 장벽 즉, AlAs의 양자 우물 안에 X-속박된 에너지 준위를 통한 전자의 이동 현상에서 기인하는 것이다. 그림 4의  $I$ - $V$  특성 곡선을 분석해보면, 본 구조는 중간 장벽층의 X 속박 준위들의 전자 투과에 미치는 영향의 분석이 용이함을 보여주었다. 즉, 첫째 양자우물층의 기저준위와 제일여기준위를 통과하는 터널링 피크들 사이에 중간 장벽층의 X-valley의 속박준위를 통하는 전자의  $\Gamma$ -X

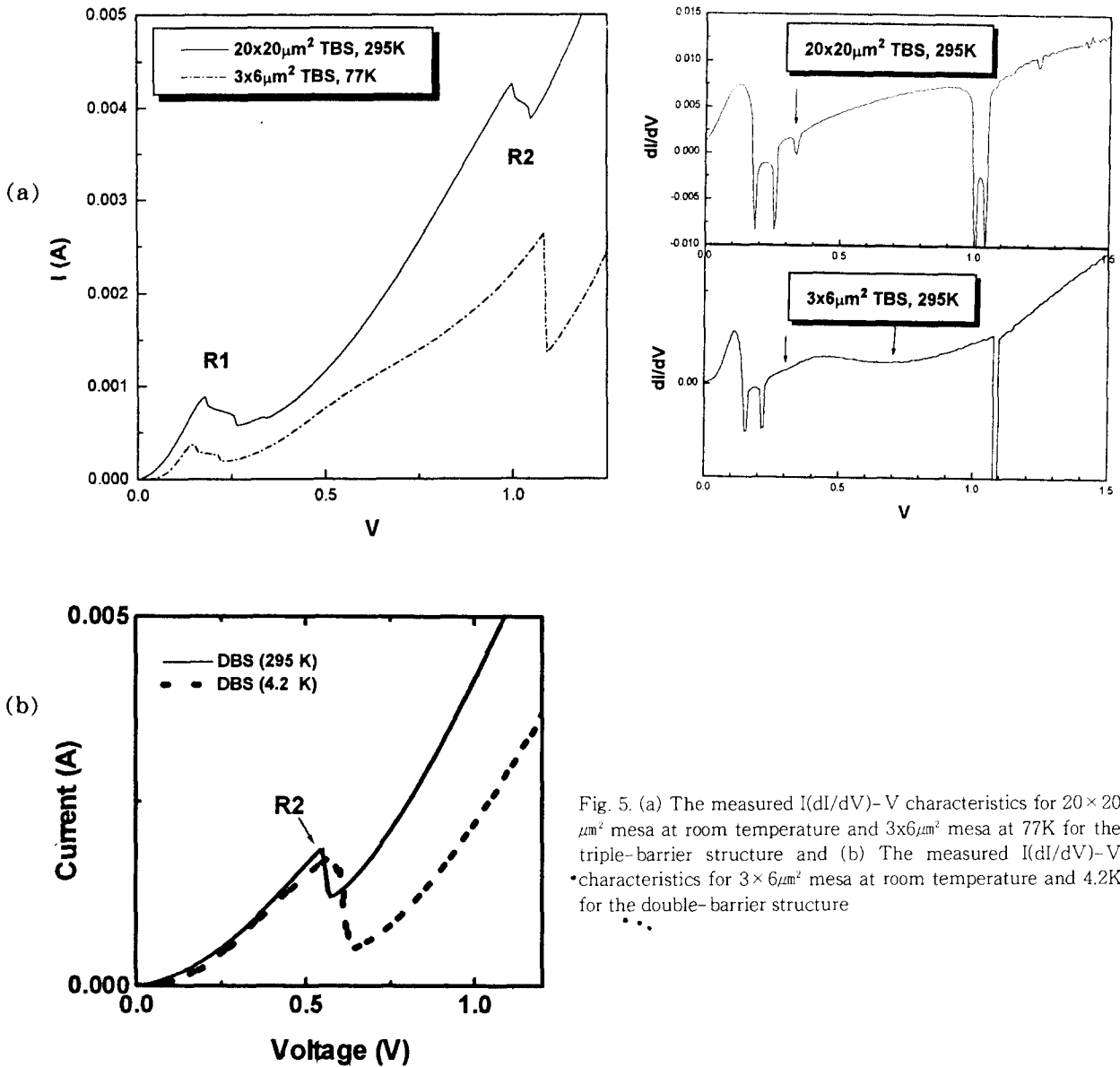


Fig. 5. (a) The measured  $I(dI/dV)$ - $V$  characteristics for  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  mesa at room temperature and  $3 \times 6 \mu\text{m}^2$  mesa at 77K for the triple-barrier structure and (b) The measured  $I(dI/dV)$ - $V$  characteristics for  $3 \times 6 \mu\text{m}^2$  mesa at room temperature and 4.2K for the double-barrier structure

터널링에서 기인되는 structure들이 작은 소자들이나 상온에서도 잘 관찰되며, 또한 저온에서  $\Gamma$ -X mixed state에서 기인되는 structure가 관찰되어 분석되었다.

#### 이중장벽 구조와의 비교

그림 5에 상온과 4.2K에서의 이중 장벽 구조 및 상온과 77K에서의 삼중 장벽 구조의  $I$ - $V$  및  $dI/dV$ - $V$  특성을 보여주고 있다. 이중 장벽 구조의 경우 0.6V 근처에서 양자 우물에 속박된 첫번째 여기 에너지 준위를 통한 공진 터널링 전류가 흐르는 것을 볼 수 있다. 삼중 장벽의 경우 메사의 위에서 버퍼층으로의 순방향 전압을 인가할 때 두 개의 양자우물구조의 기저 에너지 준위의 정렬에 의한 2D(Dimensional)-2D 전자 투과에 의한 전류 peak이 0.15V에서 관찰되고 있다. 1.5의 PVR(peak to valley ratio)을 가지는 이러한 전류피크는 같은 방법으로 제작된 AlAs/GaAs 이중장벽구조에서는 관찰되지 않는 것으로 보아 삼중장벽 이중접합구조의 새로운 장벽

에 의한 공진 터널링의 향상으로 사료된다. 또한 첫번째 여기 에너지 준위에 의한 전류 피크가 0.96V에서 관찰되고 있다. 제작된 삼중장벽구조의 각 구속된 양자 상태에 따른 전자의 터널링 현상에 대한 이론적 계산 결과<sup>7,8)</sup>와 잘 일치하고 있다. 본 실험 결과에 의하면 이중장벽 양자우물 구조에 제3의 양자우물 구조를 첨가함으로써 낮은 전압에서 향상된 특성을 갖는 기저 에너지 준위에 의한 전류피크를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 정렬된 양자우물 기저 에너지 준위에 의한 효과로 해석할 수 있으며, 낮은 전압 위치에서 전류의 증가가 필요한 공진 터널링 소자에 적용될 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

전자의 투과거동의 물리현상 규명을 위해 설계된 AlAs/GaAs 비대칭 이중장벽 구조와 삼중장벽 구조를 분자선 에피택시 방법으로 성장하였다. 성장된 에피층은

쌍결정 X-ray 회절분석, 단면투과전자현미경 분석을 통하여 확인하였으며, 다이오드 형태의 2단자 소자를 Photolithography 방법을 이용하여 제작하였다. 삼중장벽 구조는 상온에서 이중장벽 구조에 비하여 낮은 전압 위치에서 향상된 PVR 특성을 나타내었으며, 온도에 따라 전류피크의 PVR이 증가하는 결과를 보였으며, 전자의 투과거동에 미치는 중간 장벽의 X-valley의 영향을 관찰할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. E. Mendez, et al., Appl. Phys. Lett, 50, 1263 (1987), Appl. Phys. Lett, 53, 977 (1988).
2. M. Petrov, S. Parihar and S. Lyon, The Bull. Amer. Phys. Soc., 41(1), 418 (1996).
3. 노동완, 이해권, 이재진, 한국진공학회지, 4(2), 177 (1995).
4. D.-W. Roh, H. G. Lee, and J. J. Lee, J. of Crystal Growth, 167, 468 (1996).
5. G. Kim, Y. Choi, P. Park, H. Chu, E. Lee and G. Arnold, Phys. Rev. B, 50, 7582 (1994).
6. G. Kim, H. Suh and E. Lee, Phys. Rev. B, 52, 2632 (1995).
7. G. Kim, D. Roh, S. Paek, and E. H. Lee, J. of Applied Physics, 82(7) 3368 (1997).
8. G. Kim, D. Roh, and S. Paek, J. of Korean Physical Society, 31(1), 206 (1997).
9. G. Kim, D. Roh, and S. Paek, J. of Applied Physics, 81(10), 7070 (1997).
10. D.A. Collins, D. H. Chow, D.Z. Y. Ting, E.T. Yu, J. R.S derstr m and T.C. McGill, Superlattices and Microstructures, 8(4), 455 (1990).
11. F. Capasso ; Physics of Quantum Electron Devices, pp.271, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, (1990)