

# InGaAs/InP 공명 터널다이오드의 제작과 전기적 특성

## Fabrication and Electrical Properties of InGaAs/InP Resonant Tunneling Diode

유 병 수\*, 이 우 선\*  
Byung-Su Yoo, Woo-Sun Lee

### 요 약

본 논문에서는 전자파 디바이스의 고속화를 위해서 OMVPE를 이용하여 InGaAs/InP 공명 터널 다이오드를 제작하고 전기적특성을 연구 하였다. 공명 터널 다이오드의 전압-전류 특성, 장벽폭에 따른 P/V비와 RTD의 양자 우물 효과가 연구 되었는데 P/V비는 장벽폭이 증가함에 따라서 지수함수적인 감소를 보였다.

### Abstract

This paper reports the fabrication and electrical characteristics of GaInAs/InP grown Resonant Tunneling Diode(RTD) by Organo Metallic Vapor Phase Epitaxy(OMVPE) for the complete high speed electron wave device. We discusses the I-V characteristics, peak-valley ratio concern of barrier width and new quantum well effect in the small size Resonant Tunneling Diode. P/V ratio decreased exponentially by barrier width increase.

### 1. 서론

근래 반도체 산업은 반도체의 고속화로 눈부신 발전을 이룩하고 있고 더욱더 빠른 속도의 반도체 디바이스의 고속화가 요구되고 있다. 이를 실현하기 위해서는 과거의 재료 그 자신만의 본질적 성질의 규명 만으로는 불충분하므로 인공격자, 및 초격자 Hetero접합등 종래에는 없었던 신기능성 소자를 개발하여 활용하고 있다. 그 결과 양자효과에 의한 새로운 기능성이 출현하게 되었으며 초격자 구조에 의한 새로운 기능

성을 발현 시키는 한 방법으로 양자효과를 응용한 공명 터널 다이오드(RTD)가 있다.

공명 터널효과는 1974년 IBM의 Chang[1]등에 의해 처음으로 보고된 것으로서 전자가 터널링이 가능한 두 얇은 포텐셜 장벽층간의 박막이 100Å 이하가 되면 양자역학적 터널효과가 나타난다. 양자우물(Quantum Well:Q.W)층을 중앙에 두고 그 전후에 장벽층을 형성하는 구조를 더블 베리어(Double Barrier)구조 또는 공명 Tunnel구조라 하는데 중앙의 포텐셜층이 50Å 이하로 아주 얇으면 양자준위가 형성되어 입사전자 에너지와 양자우물의 에너지준위가 일치 할때 전자파의 간섭 효과에 의하여 Tunnel전류는 공명을 일으키고 전류가

\* : 조선대학교 공과대학 전기공학과  
接受日字 : 1992年 10月 7日

증가하여 전자의 투과율이 1 이 되며 두장벽을 감쇄없이 통과하게 된다. 여기에 작류 전압을 인가하면 어느 특정 전압에서 즉 페르미 준위와 양자우물 준위가 일치할때 공명적으로 전류는 증가하여 피크치로 된다. 그 이상 전압을 계속 증가하면 공명조건이 약해져 급격히 전류는 감소하여 더욱 전압을 증가하면 페르미준위가 상승하게 되고 그에 따라 전자의 확산이 증가하게 되어 전류는 다시 증가하게 된다. 따라서 공명 터널 현상의 전압-전류 특성곡선은 정 바이어스 인가시 현저한 부성저항특성을 나타내게 되며 부 바이어스를 인가할 때도 마찬가지로 부성저항특성이 나타나게 된다. 이와같은 RTD(resonant tunnel diode)는 전자의 파동성을 이용한 새로운 고속 디바이스의 일종으로서 MBE법에 의한 GaAs/AlGaAs 계와 GaInAs/InAlAs계가 주로 사용되어 왔다.[2]-[6] 근래 Organo Metallic Vapor Phase Epitaxy(OMVPE)법에 의한 RTD에 관한 연구 보고가 있으나 높은 P/V(peak to valley)비를 얻지 못한 실정이다.[7] 그러므로 본 논문에서는 InGaAs/InP계로서 RTD를 소형으로 설계하여 OMVPE법에 의해 제작하고 높은 P/V를 얻기 위해서 OMVPE에 대한 성장 조건과 장벽폭과의 관계를 중심으로 양자효과의 전기적인 특성을 연구하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 실험장치의 개략도는 그림 1 과 같고, RTD는 더블 베리어 구조이며 재료는 P/V간 에너지 차가 크고 유효 질량이 적은 GaInAs/InP를 택하였다. 결정 성장은 초박막 구조성장이 가능한 OMVPE법을 사용하였다. 소자구조는 그림 2와 같이 공명 터널구조이며 장벽층은 InP로 Well층과 전극층은 GaInAs이며 n'-InP기판위에 스페이서(spacer)층은 i-GaInAs 2.6 nm 장벽층 InP 22 nm이고 Well층은 i-GaInAs 8.7 nm, 스페이서 (spacer) 층 i-GaInAs 2.6 nm로 하였으며, 수직형 OMVPE를 사용하였다. 반응관 압력은 76 Torr 유속은 300

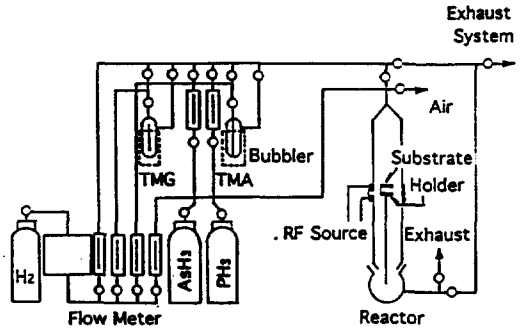


그림 1 실험장치의 개략도  
Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment.

n-GaInAs	260nm
$N_D = 2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	
i - GaInAs	2.6nm
i - InP	22nm
i - GaInAs	8.7nm
i - InP	22nm
i - GaInAs	2.6nm
n-GaInAs	260nm
$N_D = 2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	
n' - InP	Substrate

그림 2 RTD의 성장구조  
Fig. 2 Structure of grown RTD

cm/s로 하였다. 5족 gas로는 phosphine(PH<sub>3</sub>)와 Arsine (AsH<sub>3</sub>)을 3족 gas로는 Triethylindium In(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>와 Triethylgallium Ga(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>를 사용하였다. n형 dopant로는 Si으로 disilane (Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)을 사용하여 성장온도 640℃ 때 3족 유량에 대하여 0.05 %, 600℃ 때 0.12 %를 유입시켰다. GaInAs에서의 성장속도는 0.7- 2 μm/h PH<sub>3</sub> 분압은 0.2-1.7 Torr AsH<sub>3</sub> 분압은 0.2-0.8 Torr로 하였다. InP에서의 성장속도는 0.5-1.7 μm/h PH<sub>3</sub>분압은 0.5-1.7 Torr AsH<sub>3</sub> 분압은 0.2-0.8 Torr로 하였다. 성장후 n-GaInAs층상에 Metal Mask를 이용하여 dot pattern을 증착한 후 Br-메타놀(1500배)를 써서 mesa형으로 에칭하였으며 증착한후 그대로는 Schottky 장벽으로 인해 ohmic contact이 좋지 않으므로 배압 4 x 10<sup>6</sup>Torr 260℃의 수소가스로 90초간 annealing하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 전압-전류 특성

GaInAs/InP결정계의 전도대 band 불연속 값이 0.23 eV로 적기 때문에[8] RTD의 J-V특성은 액체 질소(77K)와 액체 헬륨(4.2K)중에서 HP4142B 반도체 파라메타 분석기로 전압-전류를 측정하였다. RTD에 액체 헬륨을 사용한 온도 4.2 K에서의 J-V특성을 그림 3에 나타내었다. P/V비는 순방향에서 6.6이었고 역방향에서 9.7이었으며 77K의 경우에는 4.8과 7.1이었다. 여기에서 전위의 기준은 기판으로 하였으며 바이어스의 정부에 대하여 J-V특성이 다른 원인은 부 바이어스때의 peak전압이 정바이어스때보다 높은 것으로 보아 Mesa층의 전기전도가 불량하기 때문인 것으로 생각되며 그림 4의 j-V특성의 부정저항 영역에 있어서 약간의 적은 제 2의 부정저항을 관찰 할 수 있는데 이 현상은 전압 변화에 의한 전도대의 전위 분포의 변화에 의하여 peak가 나타난 곳에서 별도의 터널 현상이 일어나기 때문인 것으로 추정된다. 또한 P/V 비의 성장 의존성[9][10]을 파악하기 위해 GaInAs의 성장온도 640°C 성장속도 1 μm/h에 있어서 5족 AsH<sub>3</sub>의 분압과 P/V비와의 관계를 그림 4에 나타내었다. P/V비는 5족 분압이 적어짐에 따라 적어지고 마지막 단계에는

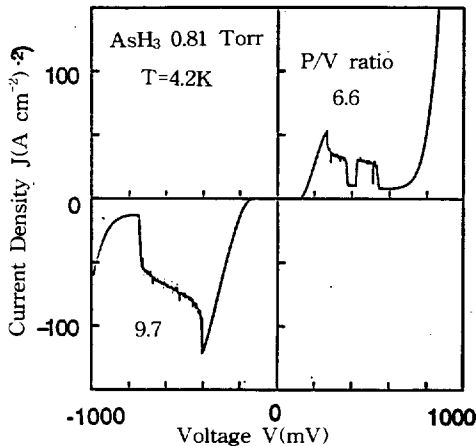


그림 3 4.2K에서 RTD의 전압-전류 특성 곡선  
Fig. 3 J-V Characteristic of RTD measured at 4.2K

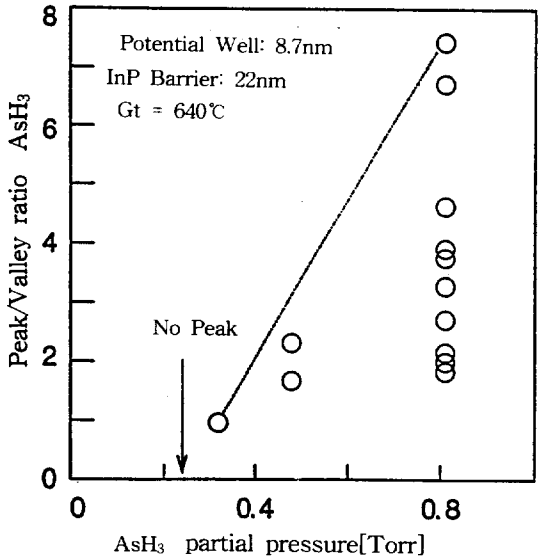


그림 4 77K에서 분압과 P/V비와의 관계  
Fig. 4 Relation of P/V ratio measured at 77K and partial pressure of AsH<sub>3</sub> at GaInAs growth.

peak가 나타나지 않게 되어서 P/V비는 5족의 공급량에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다.

3-2. P/V비와 장벽폭과의 관계

RTD의 에너지 밴드 모델은 일반적으로 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 본 모델에서 GaInAs의 양자우물층과 InP 장벽층의 두께는 9.7 nm와 22 nm이고 GaInAs전극부와 Well층의 스페이서 (spacer) 층은 Undoping 한 것으로서 전자의 유효질량은 GaInAs층에서 0.04 m<sub>0</sub>, InP층에서 0.08 m<sub>0</sub>이다. 여기에서 m<sub>0</sub>는 자유전자의 유효질량을 나타낸다. 더블 배리어의 투과율 T는 Loringian의 이상적인 투과율[7]로 peak는 1 이 되나 실질적인 공명준위 폭은 더 넓게 나타나서 투과율의 peak는 10<sup>-3</sup>-10<sup>-4</sup>로 떨어진다. 공명준위폭의 측정결과를 그림 6에 표시하였다. I-V특성으로부터 공명준위폭을 살펴보면 AsH<sub>3</sub>분압이 0.81로 성장시킨 RTD에 있어서의 2계미분파형은 더블 배리어의 투과율의 에너지에 크게 의존함을 나타내고 있다. 여기에서 2개의 peak가 관측되었으며 정 바이어스 인가시 부정특성곡선

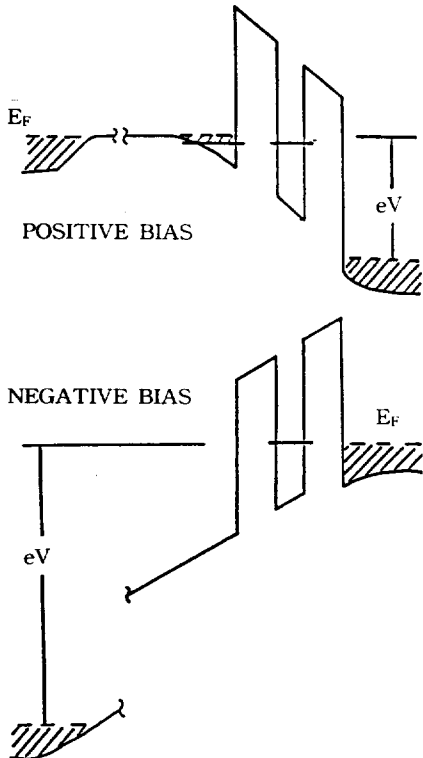


그림 5 RTD의 해석적인 모델  
Fig. 5 Diagram of RTD analytical model.

상의 제 1준위와 제 2준위에 해당되는 것으로서 여기에서 얻어진 전치전폭 (FWHM: Full Width at Half Maximum)은 25 mV와 68 mV로 되어서 공명준위폭은 각각 13 mV와 68 mV로 되어서 공명준위폭은 각각 13 mV와 34 mV이다. 따라서 P/V비와 공명준위폭과의 관계는 P/V비가 적은 디바이스에서는 공명준위폭이 넓게 됨을 알 수 있었다. 따라서 장벽폭이 넓게 되면 터널 과정에 의해 흐르는 전류는 크게 되므로 피크메모보다 Valley 전류 밀도가 크게 되고 장벽폭이 두꺼우면 공명 터널 현상은 일어나기 어려우나 Valley 전류는 열여기된 전자 장벽을 넘는 과정에 따라 다르기 때문에 피크전류가 더 감소해가므로 장벽폭에 대한 P/V비는 투과율에 의해 예상되는바와 같이 장벽폭의 증가와 더불어 지수함수적으로 감소하게 되는 것이다.

3-3. 양자상(Quantum Box)효과

터널현상은 장벽층이 50Å 이하로 하면 어떠한 특이한 공명터널 효과가 나타날 것이므로 RTD를 소형으로 만들기 위해 지금까지와 같은 RTD구조로 성장된 n-GaInAs층상에 Resist를 5000 rpm로 spin-coating 한 후 Metal Mask를 이용 40 x 30 μm의 dot pattern을 만들어 배압 3 x 10<sup>-6</sup>Torr에서 증착한 후 아세톤으로 벗겨내고 Br-Methanol (BrCH<sub>3</sub>OH) 1500배로 Etching하여 Mesa형으로 만든 다음 polyimide(절연체)로 spin-coating하여 O<sub>2</sub> plasma(출력 100 W 1시간 정도)로 재(ash)화 하여 처리한 후 전극을 그위에 전면 증착하고 ohmic contact을 좋게하기 위해 수소가스로 260°C에서 90초간 annealing을 행한후 현미경하에서 소자를 분리하여 Holder에 삽입하여 액체 질소(77K)와 액체 헬륨(4.2K)에서 그 특성을 측정해본 결과 첫번째 sample(30x40 μm)에서는 P/V비가 순방향시 4.1, 역방향시 8.1(4.2K)이 최고였으며 또한 P/V비가 1.2 정도의 적은 제 2 부성저항이 관측되었다. 이것의 피크전류는 순방향전류 0.5-1 mA, 역방향전류 1-3 mA으로서 히스테리시스 특성의 발생을 확인하였으며 서로 비대칭적

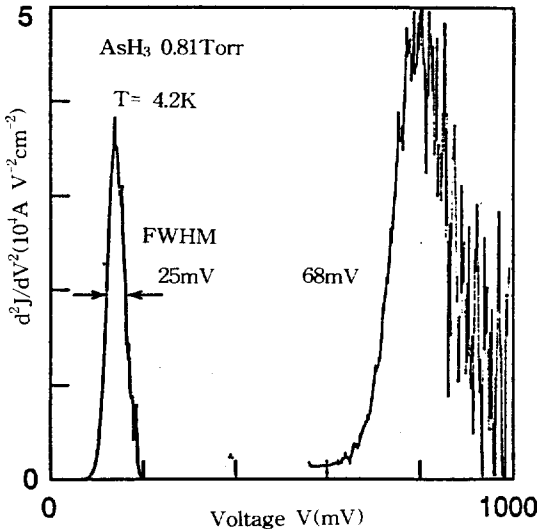


그림 6 0.81 Torr, 4.2K에서 RTD의 2계 미분 전압-전류 특성  
Fig. 6 The second derivative of J-V characteristic of RTD measured at 4.2K grown at AsH<sub>3</sub> partial pressure of 0.81 Torr.

이었다. 또다시 성장한 두번째의 sample에서는 P/V비가 순방향시 5.2, 역방향시 7.7이었으며 피크전류는 순방향시 3.4 mA, 역방향시 11.9 mA이었다. 그외 소자는 P/V비 1.7, peak전류 1.1 mA정도(77K)가 많았으며 히스테리시스 현상의 특성이 나타났다.

#### 4. 결론

이상과 같이 본 연구에서는 GaInAs/InP 계의 RTD를 OMVPE에 의하여 제작하여 전기적인 특성에 대하여 실험한 결과, OMVPE법은 다양한 원소 가스를 쉽게 혼합 할 수 있고, 큰 면적의 기판에 균일한 결정 성장을 시킬 수 있으며, 원소 가스의 제어를 원활히 조절할 수 있었고, 대량생산이 가능 하므로 MBE법 보다 우수한 특성이 있을 것임을 알 수 있었으며, P/V비의 성장조건에 의한 의존성인 P/V비는 5족(AsH<sub>3</sub>)가스 공급량에 크게 의존하였다. 장벽폭에 대한 P/V비는 장벽폭의 증가와 더불어 지수함수적으로 감소 하였고, GaInAs/InP의 RTD를 소형화하여 새로운 양자효과를 개대하였으나 본 연구의 첫번째 sample에서는 P/V비가 순방향에서 4.1, 역방향에서 8.1이었고 두번째로 성장한 sample에서는 순방향에서 5.2, 역방향에서 7.7이 되어 순방향과 역방향 전류 사이에 히스테리시스 현상을 확인할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) H. Kamei and H. Hayashi, "OMVPE growth of GaInAs/InP and GaInAs/GaInAsP quantum wells", J. of Crystal Growth, 107(1991), pp. 587-572
- 2) Cl. Huang, M.J. Paulus C.A. Bozada S.C. Dudley, K.R. Evans, C.E. Stutz, R.L. Jones, and M.E. Cheney, "AlGaAs/GaAs double barrier diodes with high peak to valley current ratio", Appl. Phys. lett, 51. (1987) pp.121-123
- 3) T. Inata, S. Muto, Y. Nakata, S. Sasa, T. Fujii, S. Hiyamizu "A pseudomorphic In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub> As/AlAs resonant tunneling barrier with a peak to valley current ratio of 14 at room temperature", Jpn. J. Appl. 26,(1987) pp. L1332-L1334
- 4) M. Jonson and A. Grincwajg, "Effect of inelastic scattering on resonant and sequential tunneling in double barrier heterostructures", Applied Physics Letters, 51(1987), pp. 1729-1731
- 5) A.W. Higgs. L.L. Taylor, N. Apsley. S.J. Hutchinson, "Resonant tunneling Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub> As/InP double barrier structures grown by AP-MOCVD", Electron Lett, 24.(1988) pp. 322-323
- 6) T.H. HVuong, B.C. Tsui and W.T. Tsong, B.C. Tsui and W.T. Tsong, "Dependence of the conduction in In<sub>0.53</sub> Ga<sub>0.47</sub>As-InP double barrier tunneling structures on the Mesa-etching process", Appl. phys. Lett, 50(1987),pp. 1004-1006.
- 7) T. Sekiguchi, Y. Miyamoto, and K. Furuya, "GaInAs/InP resonant tunneling diode by OMVPE", IEICE Trans Vol. ED-92, No.10(1992), pp.45-76.
- 8) Y.Miyamoto, K.Ueska, S.Yamaura, K. Huruya, "GaInAs/InP hot electron transistors grown by OMVPE", Research Review on optical Communication(A)1990, pp.103-108.
- 9) P.CSpurolens, M.R. Taylor, M.Jyates, "The influence of growth conditions on the planarity of MOVPE grown GaInAs(A) interfaces", J.Cryst. Growth, 107.(1991). pp.215-220.
- 10) M.Tsuchiya, H.Sakaki, "Tunneling spectroscopy of resonant transmission coefficient in double barrier structure", Jpn. J.Appl.phys. 30 (1991) pp. 1164-1166.