

<연구논문>

MBE에 의한 다양자 우물제작 및 특성연구 (공명투과 다이오드의 제작과 전기적 특성)

김순구 · 감태원 · 홍치유 · 정관수* · 주영도**

동국대학교 물리학과, *경희대학교 전자공학과, **삼미전자
(1991년 12월 20일 접수)

Growth and Characterization of the Multi Quantum Wells by MBE (The Growth and Electrical Properties of Resonant Tunneling Structures)

Soon Koo Kim, Tae Won Kang, Chi You Hong, Kwan Soo Chung* and Young Do Joo**

Department of Physics, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

**Department of Electronics Engineering, Kyunghee University 600-430, Korea*

***Sammi Technology and Industries Co.*

(Received December 20, 1991)

요 약—GaAs/AlAs 이중장벽 구조를 MBE(Molecular Beam Epitaxy)법으로 성장하여, mesa diode를 제작하고 전류전압 특성을 측정하였다. 계면은 평탄한 이중장벽 구조로 성장되었음이 확인되었으며, 실온에서 장벽의 두께가 변화함에 따라 PVC(R) (Peak to Valley Current Ratio)의 값은 크게 변하지 않았다. 이는 장벽의 두께가 증가함에 따라 nonresonant tunneling에 의한 valley current가 크게 증가함에 기인한다.

Abstract—The GaAs/AlAs double barrier structures was grown by MBE(Molecular Beam Epitaxy). Mesa diode was fabricated and I-V characteristics of the diode were measured by semiconductor parameter analyser at room temperature. TEM pictures show the double barrier structure with abrupt interface. PVC(R) (Peak to Valley Current Ratio) proves to be independent of barrier thickness. These results show that increase in barrier thickness leads to larger valley current by non-resonant tunneling.

1. 서 론

이중장벽 공명투과 구조는 Esaki와 Tsu가 제안[1]한 초격자 개념의 핵심적인 요소인 투과효과를 이용하는 구조로서 양자역학적 공명투과 현상에 의한 전자수송을 이용한다. 이 소자는 매우 작은 영역에서의 투과에 의한 전자수송을 이용하므로 고속 소자로 쓰일 수 있으며, 전자가 장벽을 투과할 때 어떤 특정한

에너지에서 양자 크기 효과로 인하여 장벽사이에 형성된 우물안에 존재하는 고유에너지와 공명하여 투과하는 현상이 생기므로 스위칭 소자로도 쓰일 수 있다. 아울러 이중장벽 구조가 일종의 전자파 공진기이므로 응답속도를 포함한 특성의 설계가 가능하고, 이중장벽 구조 특유의 에너지 선택성 등, 종래의 투과 다이오드와 다른 특성을 가지고 있어 새로운 기능의 소자화에 많은 관심이 모아지고 있다. 특히 이 중에서 GaAs/AlAs($\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) 이중접합 이중장벽 구조는 재현성 있는 성장이 가능하다는 이유 등으로 많은 연구[2-5]가 진행되어 왔다.

BSRI-91-221 '이 연구는 1991년도 문교부 기초과학육성연구비의 지원에 의한 것임.'

공명투과 다이오드는 보다 큰 PVC와 전류밀도를 갖는 것이 소자로의 응용에 유리하기 때문에, 이러한 문제를 해결하기 위한 시도로 장벽을 계단형 장벽[6]으로 하거나 또는 초격자로 구성[7,8]하기도 하며, III-V물질 중 밴드갭의 차이가 큰 물질간의 이중장벽 투과 구조[9,10]가 제안되기도 하였으나, pseudomorphic system의 안정성과 pseudomorphic resonant tunneling diode의 노화 등, 명확치 않은 해결되어야 할 많은 문제를 가지고 있다.

본 연구에서는 MBE법으로 GaAs/AlAs 이중장벽 구조의 공명투과 다이오드를 제작하여 실온에서의 전류전압 특성을 측정하였으며, 우물의 폭을 일정하게 하고 장벽의 두께를 변화시킨 측정시료의 전류전압 특성을 계산하여, 측정결과와 비교하였다.

2. 계산 및 실험

양자우물내의 에너지준위 및 이중장벽 구조의 전류전압 특성은 Transfer matrix법[11]으로 계산하였다. 이 때 계산을 위한 parameter로서, band offset은 $\Delta E_c/E_g=0.6$ 으로 하였고, GaAs층에서의 전자의 유효질량은 $0.067 m_0$ [12], AlAs층에서의 유효질량은 $0.15 m_0$ [13], 그리고 mass ratio $\gamma=2.239$ 로 하였으며, 실온에서 계산된 장벽의 높이는 956 meV였다. 한편 양쪽 contact층의 도우너 농도가 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 인 degenerate 영역에서의 Fermi level 에너지는 50 meV로 하였다.

GaAs/AlAs 이중장벽 구조는 Si이 도핑된 Sumitomo사의 (100) n^+ -GaAs 기판 위에 MBE법으로 성장하였다. 본 연구에서 성장한 이중장벽 공명투과 구조는 실온에서 PVC의 값을 가능한 한 크게 하기 위하여, GaAs/AlGaAs계에서는 장벽의 높이가 가장 높은 AlAs를 장벽으로 사용하였으며, 양쪽 spacer층 옆에 Si를 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ doping한 GaAs층을 끼워 넣어, 계단형의 장벽 구조를 만들어 주었다. 전극영역에서 활성영역으로 Si donor의 확산을 최소화 하기 위하여 undoped spacer 층을 두었고, 구조성장시 기판온도를 560°C 로 하였다. 우선 n^+ (Si : $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$)-buffer층을 쌓은 위에 공명투과 구조의 활성영역을 성장하였다. 모든 시료는 공히 활성영역으로는 n (Si : $3 \times 10^{17}/\text{cm}^3$)-GaAs를 500\AA 성장한 후, 이 중에서 A 시료는 $L_b=20\text{\AA}$ 의 undoped AlAs 장벽, 그리고 B, C 시료의

Table 1. Layer description of the double barrier tunneling diodes

Layer	Composition	Doping (cm^{-3})	Thickness (\AA)	Comments
1	GaAs	1×10^{18}		Substrate
2	GaAs	1×10^{18}	3,000	Buffer
3	GaAs	1×10^{18}	600	Contact
4	GaAs	3×10^{17}	500	Contact
5	GaAs	none	30	Spacer
6	AlAs	none	20, 40, 50	Barrier
7	GaAs	none	50	Well
8	AlAs	none	20, 40, 50	Barrier
9	GaAs	none	30	Spacer
10	GaAs	3×10^{17}	500	Contact
11	GaAs	1×10^{18}	2,000	Contact

경우 각각 $L_b=40\text{\AA}$ 및 $L_b=50\text{\AA}$ 인 undoped AlAs 장벽 사이에 undoped GaAs 양자우물($L_w=50\text{\AA}$)을 끼워넣고 장벽의 바깥 양쪽에는 undoped GaAs spacer층(30\AA)을 쌓은 뒤 다시 n (Si : $3 \times 10^{17}/\text{cm}^3$)-GaAs를 500\AA 성장하였다. 그 위에 2000\AA 의 n^+ (Si : $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) GaAs 전극 부착층을 쌓았다.

Table 1은 본 연구에서 성장한 이중장벽 공명투과 구조의 성장 순서이다. 다이오드 제작은 일반적인 photolithography technique을 사용하여 직경 $50\text{ }\mu\text{m}$ 의 AuGe/Ni/Au 원형전극을 약 3000\AA 증착한 뒤, 전극 이외의 부분을 buffer층까지 wet chemical etching하여 제거하였다. 이 때 증착전극 및 제거된 부분의 두께는 각각 α -step을 이용하여 확인하였다. 이렇게 제작한 RTD(Resonant Tunneling Diode)의 전류-전압 특성을 HP Semiconductor Parameter Analyzer를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 논의

성장시료의 계면의 평탄성과 성분비의 급준성 및 성장층의 두께를 단면 TEM의 측정으로 확인하였다. Fig.1은 AlAs 장벽의 두께가 20\AA 이고 GaAs 우물의 폭이 50\AA 인 A 시료의 TEM 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 평탄하며, 급준한 계면이 형성되었다.

실온에서 장벽의 두께변화에 따른 투과전류의 계산값은 Transfer matrix 방법으로부터 계산되었으며 Fig.2와 같다. 투과전류는 장벽의 두께가 감소함에

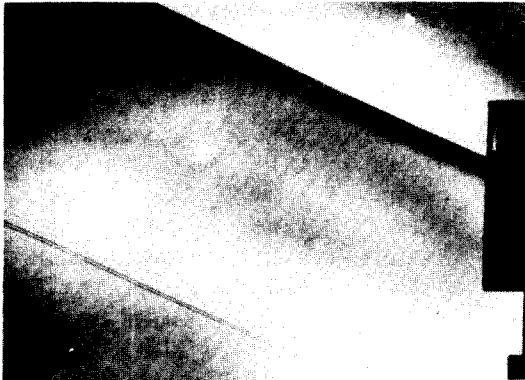


Fig. 1. Cross-sectional transmission electron micrograph of the double barrier resonant tunneling structure.

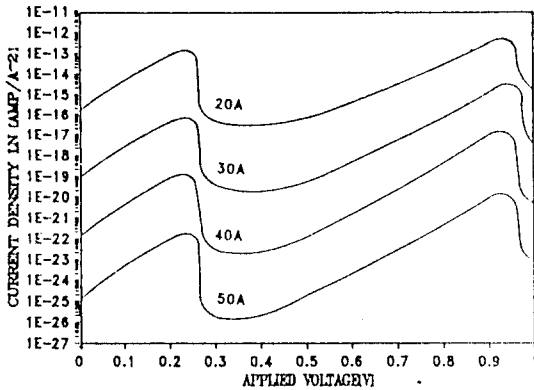


Fig. 2. Calculated resonant tunneling current in the double barrier resonant tunneling structure as a function of barrier thickness.

따라 증가한다. 이는 장벽의 두께가 감소함에 따라 투과확률이 증가함에 기인한다. 즉, 장벽의 두께가 감소함에 따라 전류밀도는 지수함수적으로 증가하며, PVCr은 감소한다. 이는 H. Sakaki 등[14]의 연구와 동일한 결과이다.

Fig. 3은 시료 A로 제작한 공명투과 다이오드 중 실온에서 PVCr의 값이 가장 큰 다이오드의 전류-전압특성이다. PVCr은 3.76이었고 그 때의 Peak 전류밀도는 $1.1 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 로서 양호한 공명투과 다이오드의 특성을 보이고 있다.

아울러 이중장벽 구조에서 장벽의 두께를 달리하여 제작한 시료 B 및 시료 C에 대한 P_v (Peak Voltage), P_c (Peak Current) 및 PVCr 값을 정리하면 Table

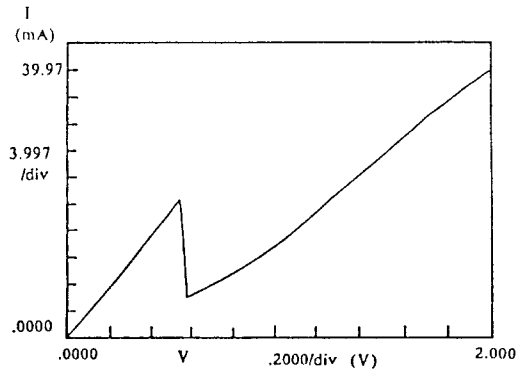


Fig. 3. Room temperature I-V characteristics of sample A ($L_w=50\text{\AA}$, $L_b=20\text{\AA}$).

Table 2. Structural and electrical characteristics of the double barrier resonant tunneling diodes

Sample	L_w	L_b	P_v	P_c	PVCR
A	50Å	20Å	0.58 V	$9.0 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$	1.43
B	50Å	40Å	0.61 V	$7.2 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$	1.45
C	50Å	50Å	0.61 V	$3.2 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$	1.50

2와 같다. Table 2에서 보는 바와 같이 P_v 는 장벽의 두께에 따라서는 모두 크게 다르지 않았다. 또한 A 시료의 PVCr의 값은 시료 B의 PVCr 값에 비해 크게 변화되지 않았으나, peak의 전류밀도는 시료 C에 비해 약 3배 증가하였다. 즉, 장벽의 높이가 같고, 우물의 폭이 같을 경우 장벽의 두께가 감소함에 따라 P_c 는 급격히 증가하였으나 PVCr은 큰 변화가 없음을 나타낸다. 이는 장벽의 두께가 감소함에 따라 J_p (Peak Current Density)도 증가하지만 J_v (Valley Current Density) 역시 더불어 증가한다는 것을 보여준다.

이상에서 설명한 바와 같이, 실험결과 peak voltage가 장벽의 두께에 따라 변화하지 않는 현상은 Transfer matrix 방법을 통해 계산된 에너지준위가 모든 시료에서 똑같이 131 meV와 461 meV이며, 이 결과로부터 계산된 peak voltage는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 각각 0.26 V와 0.92 V로서, 장벽의 두께변화에 따른 의존성을 보이지 않은 계산결과와 일치한다. 또한 장벽의 두께가 감소함에 따라 J_p 가 증가하는 현상은, 장벽의 두께가 감소함에 따라 투과확률이 증가함에 기인한다.

일반적인 경우에 있어서 J_v 가 증가하는 것은 좀더

높은 준위를 통한 투과라든가 장벽의 상층부에서 활성영역에 인가된 전기장의 도움을 받는 Fowler-Nordheim 투과[15], evanescent states를 통한 투과, 그리고 비탄성 투과 등[16]의 증가에 의한 결과로 설명된다. 그러나 본 연구에서는 모든 시료의 장벽 높이가 일정하고, 양자 우물내의 에너지준위간의 차이가 330 meV로서 매우 크며 모든 시료의 우물의 폭도 일정하다. 따라서 시료 A, B, C와 같은 구조들에 있어서는 장벽의 두께가 감소함에 따라 높은 준위를 통한 투과와 전기장의 도움을 받는 투과 등은 크게 증가하지 않을 것이다. 즉, 이와 같은 구조에서 장벽의 두께가 감소함에 따라 증가하는 valley current는 주로 장벽 두께의 감소에 따른 evanescent state를 통한 투과와 비탄성 투과 등의 증가에 영향을 받는다고 할 수 있다.

한편, 장벽의 두께변화에 따른 전류밀도의 변화 및 PVCR의 경향에 대한 실험결과는 계산에 의한 경향과 다른 특성을 보이고 있다. 계산에 의하면 장벽의 두께가 감소함에 따라 전류밀도는 지수함수적으로 증가하며, PVCR은 감소한다. 그러나 실험결과에 의하면 peak current는 장벽의 두께가 감소함에 따라 증가하지만 PVCR은 장벽 두께변화와 무관함을 보인다.

장벽의 두께변화에 따른 PVCR 및 peak에서의 전류밀도의 실험치와 계산에 의한 경향은 Fig. 4와 같다. 장벽의 두께가 감소함에 따라 evanescent state를 통한 투과가 증가한다. 따라서 장벽의 두께가 감소함에 따라 J_v 가 증가하는 것은 얇은 AlAs 장벽의 inhomogeneity에 기인[17]하는 evanescent states를 통한 투과가 증가하기 때문이다. 그러나 장벽의 두께변화와 무관한 PVCR을 나타내는 것은 장벽 두께의 증가에 따른 impurity scattering과 tunneling에 뒤따르는 impurity scattering 등에 의한 공명투과 전류의 감소와 함께 non-resonant tunneling의 증가에 의한 valley current의 증가 때문이다. P. Cheng 등의 연구결과에 의하면, 장벽인 AlAs층에 doping을 증가함에 따라 peak와 valley의 current 차가 적어짐이 관측되며, 이는 impurity scattering과 tunneling에 따른 impurity scattering에 의한 tunneling coherence의 깨짐에 기인하지만 $1.2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 의 doping barrier를 가진 시료의 경우 RTD의 특성에 사실상 큰 영향을 미치지 못한다는 사실도 보고[18] 되었다. 따라서 실온에서 장벽의 두께와 무관한 PVCR을 보이는

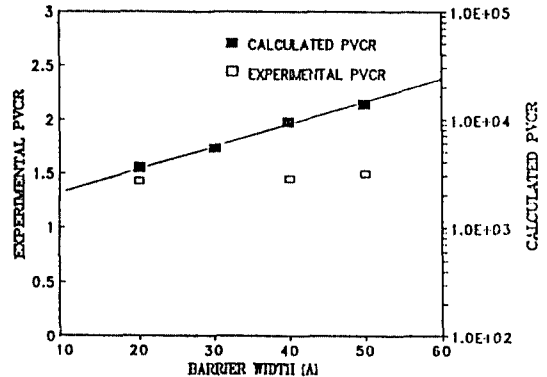


Fig. 4. Measured and calculated peak to valley current ratio in the double barrier resonant tunneling structure as a function of barrier thickness.

것은 장벽이 두꺼워짐에 따라 Fowler-Nordheim 투과, evanescent state를 통한 투과 등이 억제됨에 의한 valley current의 감소효과 보다 공명투과 전류의 감소와 다른 과정에 의한 non-resonant tunneling의 증가에 의한 valley current 증가가 우세하기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

GaAs/AlAs 이중장벽 구조를 MBE법으로 성장하였으며, 성장된 구조로 제작된 공명투과 다이오드는 실온에서 부성저항 특성을 보였으며, PVCR은 장벽 두께의 변화에 따라 크게 변하지 않았고, 이는 장벽의 두께 증가에 따른 공명투과 전류의 감소와 더불어 non-resonant tunneling에 의한 전류인 valley current 성분의 증가가 우세함을 나타낸다. 제작된 다이오드 중 최고의 PVCR은 3.76이었고 그 때의 peak 전류 밀도는 $1.1 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 였다.

참고문헌

1. R. Tsu and L. Esaki, *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 562 (1973).
2. T.C.L.G. Sollner, W.D. Goodhue, P.E. Tannenwald, C.D. Parker and D.D. Peak, *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 588 (1983).
3. E. Wolak, B.G. Park, K.L. Lear and J.S. Harris, Jr., *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1871 (1989).
4. F. Chevoir and B. Vinter, *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1859

- (1989).
5. H.M. Yoo, S.M. Goodnick and J.R. Authur, *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 84 (1990).
 6. P. Cheng and J.S. Harris, Jr., *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 1676 (1989).
 7. M.A. Reed, J.W. Lee and H.L. Tsai, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 158 (1986).
 8. M.J. Paulus, C.A. Bozada, C.I. Huang, S.C. Dudley, K.R. Evans, C.E. Stutz, R.L. Jones and M.E. Cheney, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 207 (1988).
 9. L.F. Luo, R. Beresford and W.I. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 2320 (1988).
 10. E.T. Yu and T.C. McGill, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 60 (1988).
 11. M.O. Vassell, J. Lee and H.F. Lockwood, *J. Appl. Phys.*, **54**, 5206 (1983).
 12. B. Ricco and M.Ya. Azbel, *Phys. Rev.*, **B29**, 1970 (1984).
 13. M. Tsuchiya and H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1503 (1987).
 14. H. Sakaki, T. Matsusue and M. Tsuchiya, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-25**, 2498 (1989).
 15. G. Burns, *Solid State Physics* (Academi Press, Orland, 195) p. 706.
 16. L.F. Luo, R. Beresford, W.I. Wang and E.E. Mendez, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 2133 (1989).
 17. M. Tsuchiya, *Ph. D. Thesis*, Tokyo University (1987).
 18. P. Cheng and J.S. Harris, Jr., *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 572 (1989).