

論文95-32A-7-8

AlInAs/GaInAs계 공명터널링 다이오드의 부정저항 특성에 관한 수치 해석

(Numerical Analysis of NDR characteristics in resonant tunneling diodes with AlInAs/GaInAs structure)

金成振 *

(SeongJeen Kim)

요약

기존의 $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ 구조에 비해 개선된 부정저항 특성을 갖는 AlInAs/GaInAs 구조로 된 공명 터널링 다이오드(resonant tunneling diode:RTD)의 전기적 특성에 관하여 지금까지 이론적 해석이 거의 미흡한 실정이었다. 본 논문에서는 $Al_{0.48}In_{0.52}As/Ga_{0.47}In_{0.53}As$ 구조로 된 공명 터널링 다이오드의 정 전류-전압 특성에 관하여 self-consistent법을 이용하여 수치 해석하였다. 스페이서 층이 있는 단일 양자 우물 구조로 된 공명 터널링 다이오드를 가정하여 양자 우물폭, 장벽 두께, 스페이서 층의 두께 및 온도에 대한 피크 대 밸리 전류비(PVCR) 및 피크 전류 밀도(J_p)의 의존성을 평가하였다. 그 결과 양자우물 폭 및 장벽 두께의 변화에 대해 피크 대 밸리 전류비와 피크 전류 밀도는 대체로 반비례 관계를 보였으며, 실용화를 위한 임계조건인 10 이상의 PVCR와 1×10^5 A/cm² 이상의 J_p 를 동시에 달성하기에는 어렵다는 사실을 이론적으로 예측하였다.

Abstract

The theoretical analysis for AlInAs/GaInAs resonant tunneling diodes (RTDs), which have shown the improved negative differential resistance (NDR) characteristics, has scarcely been made in comparison with AlGaAs/GaAs RTDs. In this paper, the static current-voltage relation of $Al_{0.48}In_{0.52}As/Ga_{0.47}In_{0.53}As$ RTDs were numerically estimated by using a self-consistent method. Assuming a simplified RTD with single quantum well structure and spacer layers, the peak current density (J_p) and the peak-to-valley current ratio (PVCR) were analyzed as the function of the thickness of the well, the barrier and the spacer layer, and temperature. As the result, the peak current density and the peak-to-valley current ratio indicated a reciprocal relation roughly in respect to the thicknesses of the well and the barrier, and it was theoretically predicted that it be not attainable to provide a high peak current density (J_p) over 1×10^5 A/cm² as well as the large peak-to-valley current ratio (PVCR) over 10 that were the critical conditions for the practical use.

I. 서론

* 正會員, 慶南大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Kyungnam Univ.)

接受日字:1994年11月23日, 수정완료일:1995年6月26日

양자 우물 구조와 그 구조에서의 전도 특성에 관한 연구는 1970년대 초에 Tsu와 Esaki^[1-2]에 의해 제

안되었다. 그들은 유한한 주기를 갖는 초격자 구조에서의 전도 특성에 대한 이론적 분석과 함께 $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ 의 단일 양자 우물 구조와 초격자 구조로 된 다이오드를 제작하여 공명 터널링에 의한 부성 저항 특성을 실험적으로 입증하였다. 그후 MBE와 MOCVD등의 미세 박막 성장 기술의 급속한 발전으로 현재 양자 우물 구조를 응용한 소자에는 오실레이터, 초고속 소자, 논리소자, 고주파용 소자등의 전자 소자³¹와 반도체 레이저나 필터등의 광전자 소자에 그 응용이 활발히 연구되고 있다.

공명 터널링 소자에 관한 초기 연구는 $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ 으로 된 공명 터널링 다이오드에서 양자 우물 폭, 장벽 두께, 포텐셜 장벽 높이 및 스페이서 층 두께 등의 구조 파라미터를 변화시켜 부성 저항 특성을 개선시키는 방법에 관하여 많은 관심을 보여왔다^{4,51}. 그러나 실용성이 있는 부성 저항 특성은 피크 전류 밀도가 $1 \times 10^5 A/cm^2$ 이상이고 피크 대 밸리 전류비가 10 이상이 되도록 요구되나, $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ 구조에서는 이러한 조건을 달성할 수 없었다.

1986년도에 일본의 Fujitsu 연구소⁶¹에서는 InP 기판상에 거의 동일한 격자 상수를 갖는 AllnAs/GaInAs으로 이루어진 양자 우물 구조로 된 다이오드를 제작하여 절대 온도 77K에서 피크 대 밸리 전류비가 11.4, 피크 전류 밀도가 $5.5 \times 10^4 A/cm^2$ 의 양호한 부성 저항 특성 결과를 발표하였다. AllnAs/GaInAs 이중 접합 구조는 AlGaAs/GaAs 이중 접합 구조에 비해 제작공정이 어려운 단점이 있지만, 가벼운 전자 유효 질량으로 인하여 개선된 부성 저항 특성을 성취할 수 있어 현재 많은 연구⁷⁻⁹¹가 진행 중에 있다.

한편 공명 터널링 기구에 의한 전기적 특성 해석은 주로 기존의 AlGaAs/GaAs 계 공명 터널링 다이오드에 대해 이루어져 왔으며, 반면에 AllnAs/GaInAs 계 소자에 대한 이론적 해석은 거의 없는 실정이다. 본 논문에서는 AllnAs/GaInAs의 단일 양자 양자 우물 구조로 된 공명터널링 다이오드(RTD)의 부성 저항 특성을 수치 해석법으로 해결하여 소자의 전기적 특성을 분석하였다. 여기에서 부성 저항 특성은 양자 우물의 우물 폭, 장벽 두께, 스페이서 층의 두께 및 온도에 대한 피크 전류 밀도와 피크 대 밸리 전류비의 의존성을 수치 해석적으로 평가하였으며, 그 결과를 통해 최적의 부성 저항 특성이 나타나는 구조 파라미터의 조건을 구하였다.

II. 이론적 해석

양자 우물 구조의 전도대 포텐셜 분포는 터널링 전류에 커다란 영향을 주기 때문에 정확하게 구하는 것이 중요하다. 따라서 오믹 콘택층과 양자 우물 구조의 장벽 사이에 계면에서 캐리어의 축적 및 공핦 효과와 양자 우물내의 공간전하층의 형성을 고려한 전도대의 포텐셜 프로파일을 다음과 같은 가정하에서 self-consistent 법¹⁰⁻¹¹¹으로 구하였다.

- 가. 전자의 거동은 단지 전도대의 포텐셜 분포에 의해 영향을 받으며, 여기에 스캐터링 효과는 포함시키지 않는다. 그리고 캐리어는 단지 전자만을 생각한다.
- 나. E-k 사이의 관계는 실제적인 비포물선 관계를 가정하고¹²¹, 각 반도체에 대해 독립적인 유효질량을 사용하며, 계면에서 파동 함수의 경계 조건은 파동 함수와 확률 전류 밀도의 보존법칙을 이용한다.
- 다. 전자가 격계되는 양자 우물 구조의 포텐셜은 이중 접합에서 전도대 불연속 차이, 그리고 계면과 우물내의 국소 전하의 존재에 의한 정전계적 포텐셜에 의해 결정된다.
- 라. 장벽 바깥 영역에서 전자의 분포는 3차원 반도체의 상태 밀도를 가정하여, 일정한 페르미 준위와 열평형 상태의 페르미-디락 통계를 따른다고 가정한다.

공명 터널링 전류-전압 특성 곡선을 계산하기 위한 첫번째 단계는 터널링 전자가 격계되는 포텐셜의 공간적 분포를 결정하는 것이다. 이중 접합으로 인한 계면에서 전도대 불연속 에너지 차이와 국소 전하 분포에 의한 정전계적 포텐셜이 고려되어야 한다.

일반적으로 포텐셜 분포는 전자의 분포 함수와 포아송 방정식을 함께 해결함으로써 구할 수 있다. 케소우드와 에노드 오믹 콘택 지역에서 전자의 분포는 고전역학적 전하 분포 함수를 가정하고, 반면에 양자 우물내에서 전하 밀도는 양자화에 의한 구속된 전하 분포에 따른 포텐셜 분포를 구한다. 수치 해석을 위한 이론적 전개 과정은 먼저 전자 분포의 공간적 차이에 의한 전도대 에너지 분포를 포아송 방정식

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = \frac{q}{\epsilon(z)} [n(z) - N_D(z)] \quad (1)$$

과 전자의 상태 밀도 함수, $g_n(E)$, 와 페르미-디랙 분포함수, $f_{FD}(E)$, 로 주어지는 전도대에서의 전자 분포함수 $n(E)$

$$n(E) = \int_{E_c}^{\infty} g_n(E) f_{FD}(E) dE \quad (2)$$

를 self-consistent 법과 Newton-Rhapson 반복법으로 해결한다. 그리고 airy함수를 이용하여 시분변계에서 슈레딩거 파동 방정식

$$\frac{d^2 \psi(z)}{dz^2} + \frac{2m_n^*}{\hbar^2} [E - qV(z)] \psi(z) = 0 \quad (3)$$

의 해로부터 투과율(T)을 구하여 식(4)을 이용하여 전류 밀도를 계산하는 과정을 취했다.

$$J = \frac{qm_n^* k_B T}{2\pi^2 \hbar^3} \int dE T^* T(E) \ln \left[\frac{1 + \exp\left[-\frac{E + E_F + qV_L}{k_B T}\right]}{1 + \exp\left[-\frac{E + E_F - qV_A}{k_B T}\right]} \right] \quad (4)$$

식(3)에서 $V(z)$ 는 전도대 포텐셜 분포, 식(4)에서 V_A 는 외부 인가전압, V_L 는 케소우드 접합 계면에서 축적된 전자에 의한 전압 강하 성분을 나타내고 있다. 그림1은 인가전압이 0.5 V일때 self-consistent 법으로 구한 단일 양자 우물 구조의 포텐셜 분포를 나타낸 것이며, 계산 과정에서 사용한 파라미터 값은 표1에 주어졌다.

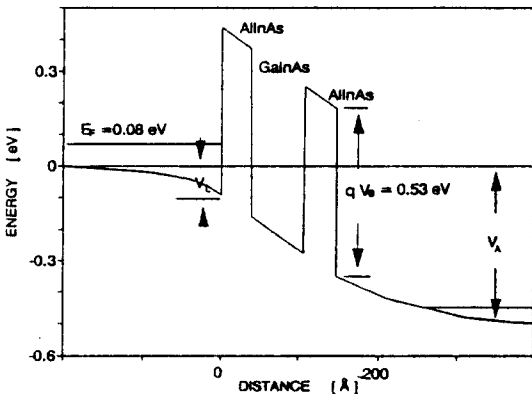


그림 1. Self-consistent법으로 구한 단일양자 우물 구조의 전도대 포텐셜 분포

Fig. 1. Conduction band profile of a single quantum well structure simulated by self-consistent method.

표 1. $Al_{0.48}In_{0.52}As/Ga_{0.47}In_{0.53}As$ 으로 된 RTD의 부성저항 특성을 계산하기 위해 사용한 파라메터

Table 1. Parameters used to calculate NDR characteristics of RTDs with $Al_{0.48}In_{0.52}As/Ga_{0.47}In_{0.53}As$ structure.

	$Al_{0.48}In_{0.52}As/Ga_{0.47}In_{0.53}As$
전도대 불연속 에너지	0.53 eV
AlInAs의 전자 유효질량	0.075 m_e
GaInAs의 전자 유효질량	0.04 m_e
AlInAs의 에너지갭	1.4eV
GaInAs의 에너지 갭	0.8 eV
온도	77K
오믹콘택층의 불순물 농도	$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

III. 결과 및 논의

Self-consistent 법으로 구한 전형적인 투과율 곡선과 전류-전압 특성 곡선을 그림2에 나타냈다. 절대 온도 77 K에서 우물 폭이 65.5 Å, 장벽 두께가 41 Å, 스페이서 층(SP)의 두께가 50 Å인 시료에 대해 얻은 결과이다. 피크 전류 밀도(J_p)가 $1.15 \times 10^5 [A/cm^2]$, 피크 대 밸리 전류비(PVCR)가 약 8정도였다. 그리고 그림상에는 피크 투과율(T_p)과 밸리 투과율(T_v)을 투과율 곡선상에서, 피크 전류 밀도(J_p), 밸리 전류 밀도(J_v), 피크 전압(V_p)과 밸리 전압(V_v)의 위치를 전류-전압 곡선에서 표시하였다. 전류 밀도는 식(4)에 주어진 것처럼 투과율(T(E)), 페르미 준위(E_F), 외부 인가 전압(V_A)에 크게 의존한다. 그리고 투과율 곡선은 우물 폭, 장벽 두께, 외부 인가 전압에 의존하는 함수이다. 일반적으로 피크 전류 밀도는 에너지의 함수인 투과율 곡선의 면적이 페르미 준위와 전도대 준위 사이의 에너지 대에서 최대가 될 때 발생하며, 반면에 최소가 될 때 밸리 전류가 나타난다.

절대 온도 77 K에서 부성 저항 특성의 우물 폭에 대한 의존성을 보기위해 장벽 두께와 스페이서 층(SP)의 두께를 각각 41 Å와 50 Å으로 고정된 상태에서 우물 폭을 53 Å에서 79 Å까지 변화시켜 구한 결과를 그림3에 나타냈다.

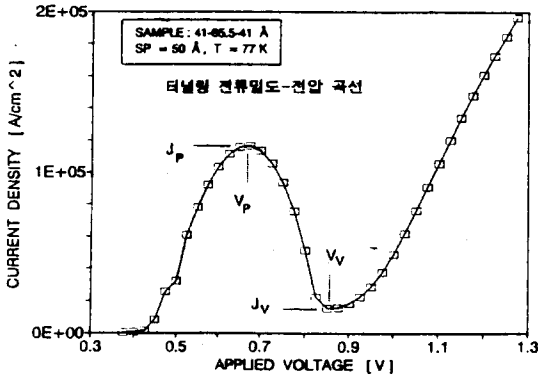
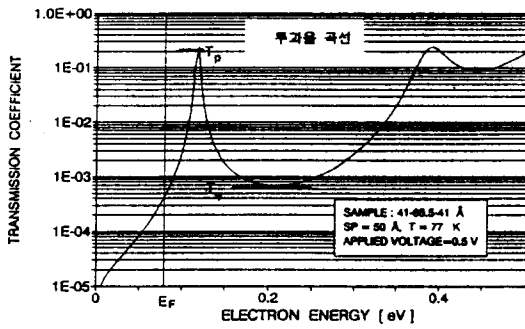


그림 2. 공명터널링 다이오드의 투과율 곡선과 터널링 전류밀도-전압 곡선
Fig. 2. Typical curves of transmission and tunneling current-voltage in resonant tunneling diodes.

이다. 그리고 밸리 전류(J_v)는 우물 폭이 증가할수록 전체적인 투과율의 감소와 밸리 투과율의 저하로 인하여 더욱 감소하게 된다. 이것은 그림4와 같이 피크 대 밸리 전류비(PVCR)를 증대시키지만 피크 전류 밀도를 임계치(10^5 A/cm^2) 이하로 떨어뜨린다. 그리고 피크 전압(V_p)과 밸리 전압(V_v)도 낮아지는 것은 우물 폭이 증가할수록 양자 우물내의 구속 에너지 준위가 저하하기 때문이다.

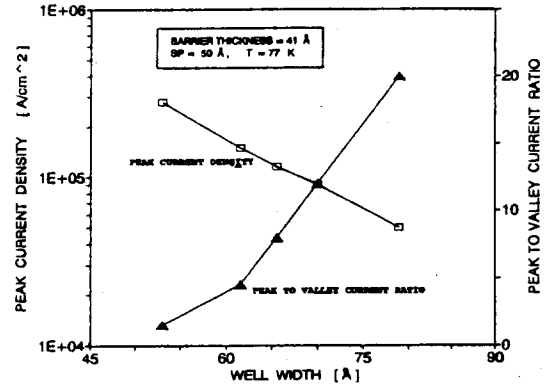


그림 4. 장벽두께가 41 Å일 때, J_p 와 PVCR의 우물 폭 의존성
Fig. 4. Dependence of well width on J_p and PVCR at barrier thickness 41 Å.

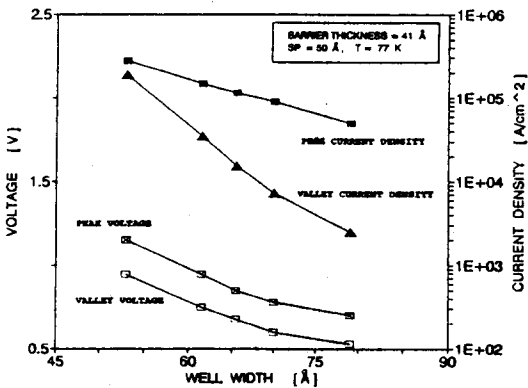


그림 3. 장벽두께가 41 Å일 때, J_p , J_v , V_p 와 V_v 의 우물폭의존성
Fig. 3. Dependence of well width on J_p , J_v , V_p and V_v at barrier thickness 41 Å.

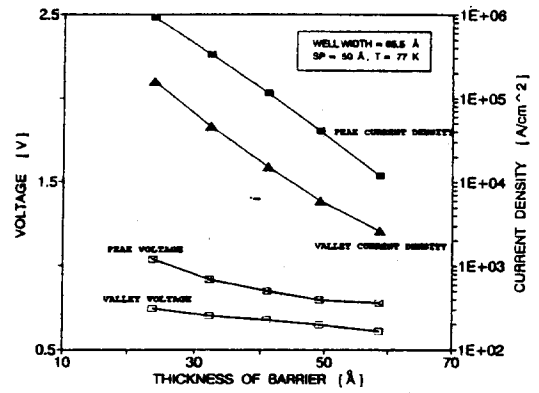


그림 5. 우물폭이 65.5 Å일 때, J_p , J_v , V_p 와 V_v 의 장벽두께 의존성
Fig. 5. Dependence of barrier thickness on J_p , J_v , V_p and V_v at well width 65.5 Å.

우물 폭이 증가할수록 피크 전류 밀도(J_p)가 감소하는 이유는 양자 우물내의 공명 에너지 폭의 감소로 인하여 고 투과율을 보이는 에너지 대가 축소되기 때문

장벽 두께의 변화는 터널링 확률과 직접적인 관계가 있다. 장벽 두께가 증가할수록 투과율(T)은 급격히 감소하여 그림5에서처럼 온도 77 K에서 우물 폭을 65.5

A으로 고정한 상태에서 두께를 23.5 Å에서 58.5 Å 까지 변화시켰을 때, 피크 전류 밀도는 크게 감소하였다. 밸리 전류 밀도는 장벽 두께의 변화에 따른 투과율 곡선의 변화로 피크 전류 밀도의 감소 양상과 다소 차이가 있었으며, 피크 전압과 밸리 전압도 완만하게 감소하였다. 이 경우 그림6에 나타낸 것처럼 장벽 두께가 41Å에서 최대 피크 대 밸리 전류비를 보였다.

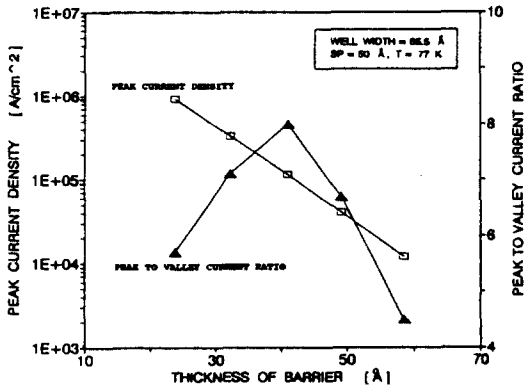


그림 6. 우물폭이 65.5Å일 때, J_p 와 PVCr의 장벽 두께 의존성
Fig. 6. Dependence of barrier thickness on J_p and PVCr at well width 65.5Å.

않은 스페이서 층은 전도대 포텐셜 프로파일, 즉 계면 상에서 축적층과 공핍층의 폭을 변화시켜, 두께가 증가할수록 피크 전류 밀도를 감소시킨다. 그러나 41-65.5-41 Å의 단일 양자 우물 구조의 시료에서 스페이서 층의 두께를 30에서 70 Å까지 변화시켰을 때, 전도대 포텐셜 분포의 상대적 미소 변화는 우물내의 양자화 상태에 지배되는 전체적인 부성저항 특성에 미치는 영향은 작다는 것을 그림7과 8에서 알 수 있다. 그리고 피크 전압과 밸리 전압이 완만하게 증가하는 이유는 스페이서 층의 두께가 증가할수록 외부 인가 전압중에서 스페이서 층의 전압 강하가 커지고 상대적으로 단일 양자 우물구조에 가해지는 전압이 적어지기 때문이다.

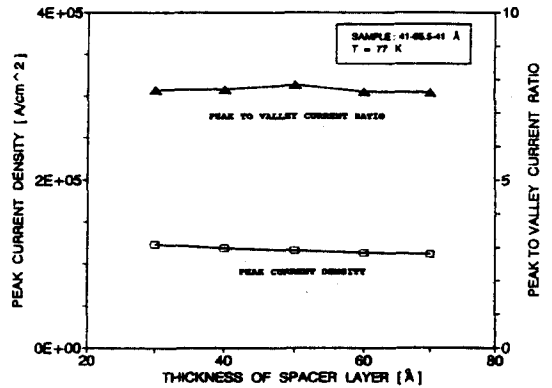


그림 8. 시료 41-65.5-41Å에서 J_p 와 PVCr의 스페이서층 두께 의존성
Fig. 8. Dependence of spacer layer thickness on J_p and PVCr at sample 41-65.5-41Å.

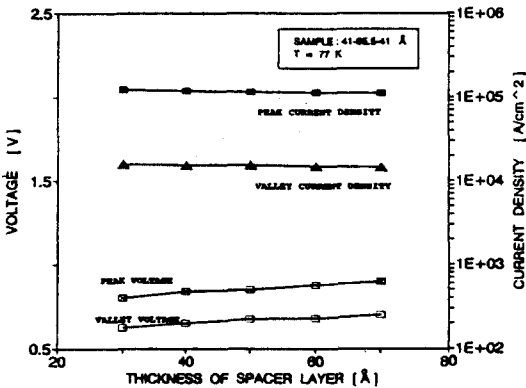


그림 7. 시료 41-65.5-41Å에서 J_p , J_v , V_p 와 V_v 에 관한 스페이서층 두께 의존성
Fig. 7. Dependence of spacer layer thickness on J_p , J_v , V_p and V_v at sample 41-65.5-41Å.

끝으로 온도 의존성을 보면, 온도가 증가할수록 피크 대 밸리 전류비는 감소하였다. 이것은 온도가 증가할수록 투과율 곡선의 기울기는 완만해지고 밸리 투과율이 상당히 증가하기 때문이며, 그 결과 그림9에서처럼 피크 전류 밀도는 온도에 관계없이 거의 일정하였으나 밸리 전류 밀도가 단조 증가하여 피크 대 밸리 전류비는 그림10과 같이 감소하였다.

스페이서 층은 도핑되지 않은 양자 우물 구조와 고농도 도핑된 오믹 콘택층 사이에 불순물의 확산을 막기 위한 별도의 도핑하지 않은 층이다. 이러한 도핑되지

이상의 결과로부터 제한적 범위지만 절대온도 77 K에서 최적의 부성 저항 특성은 양자 우물 폭이 65.5 Å, 장벽 두께가 41 Å, 스페이서층의 두께가 50 Å에서 얻을 수 있으며, 이 때 피크 전류가 1.1×10^5 [A/cm²], 피크 대 밸리 전류비가 8 정도였다. 실험치¹⁶⁾와 다소 차이가 있으나 그 원인은 양자 우물 구조내에서 보다

는 오믹 콘택층의 불순물 농도의 차이에 기인한 것으로 생각되며, 본 논문에서는 오믹 콘택 영역의 불순물 농도를 전형적인 $n = 1.0 \times 10^{18} \text{ [cm}^{-3}]$ 으로 계산하였다.

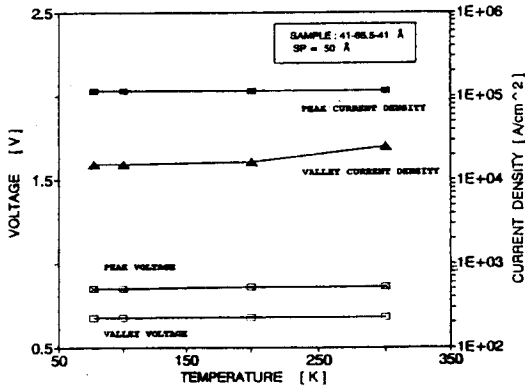


그림 9. 시료 41-65.5-41Å에서 J_p , J_v , V_p 와 V_v 의 온도 의존성

Fig. 9. Dependence of spacer layer thickness on J_p , J_v , V_p and V_v at sample 41-65.5-41Å.

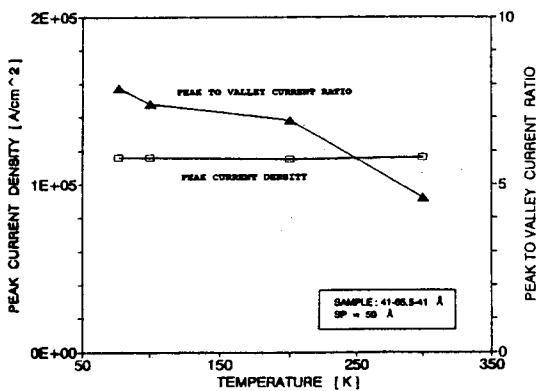


그림 10. 시료 41-65.5-41Å에서 J_p 와 PVCr의 온도 의존성

Fig. 10. Temperature dependence of J_p and PVCr at sample 41-65.5-41Å.

IV. 결 론

실용화를 위한 공명 터널링 다이오드(resonant tunneling diode:RTD)의 부성 저항 특성은 적어도 10 이상의 피크 대 밸리 전류비(PVCR)와 $1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 이상의 피크 전류 밀도(J_p)가 요구된다. 이 논문에서는

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}$ 계의 공명 터널링 다이오드에 비해 우수한 부성저항 특성을 갖지만 이론적 해석이 거의 정립되지 않은 $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As/Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 구조로 된 공명 터널링 다이오드의 부성 저항 특성에 관하여 self-consistent법을 이용하여 수치 해석적으로 평가하였다. 스페이서 층을 가진 단일 양자 우물 구조로 된 공명 터널링 다이오드를 가정하여 양자 우물폭, 장벽 두께, 스페이서 층의 두께 및 온도에 대한 부성저항 특성의 변화를 고찰하였다. 그 결과 제한적이지만 양자 우물 폭과 장벽 두께의 변화에 대해 피크 대 밸리 전류비와 피크 전류 밀도는 서로 반비례 관계를 보였으며, 스페이서 층의 두께 변화에 대한 효과는 상대적으로 약했으며, 온도가 증가할수록 피크 전류 밀도의 변화는 거의 없었으나, 밸리 전류의 증가로 피크 대 밸리 전류비는 급격히 감소하였다. 그리고 결론적으로 실용화를 위한 임계조건인 10 이상의 PVCr와 $1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 이상의 J_p 를 동시에 달성하기에는 어렵다는 사실을 이론적으로 예측하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. Tsu and L. Esaki, "Tunneling in a finite superlattice", Appl. Phys. Lett., vol. 22, pp. 562-564 (1973).
- [2] L. Esaki and L. L. Chang, "New transport phenomenon in a semiconductor 'Superlattice' ", Phys. Rev. Lett., vol. 33, pp. 495-498 (1974).
- [3] W. C. B. Peatman, et al., "Novel resonant tunneling transistor with high transconductance at room temperature", IEEE-ED Lett., vol. 15, pp. 236-238 (1994).
- [4] M. Tsuchiya, H. Sakaki, and J. Yoshino, "Room temperature observation of differential negative resistance in an AlAs/GaAs/AlAs resonant tunneling diodes", Jpn J. Appl. Phys., vol. 24, pp. L466-L488 (1985).
- [5] M. Tsuchiya and H. Sakaki, "Dependence of resonant tunneling current on Al mole fractions in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}$ / $\text{GaAs/Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ double barrier structures", Appl. Phys. Lett., vol. 50, pp.

- 1503-1505 (1987).
- [6] T. Inata, et al., "Excellent negative differential resistance of InAlAs/InGaAs resonant tunneling barrier structures grown by MBE", Jpn J. Appl. Phys., vol. 25, pp. L983-L985 (1986).
- [7] Y. Sugiyama, et al., "Current-voltage characteristics of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ resonant tunneling barrier structures grown by molecular beam epitaxy", Appl. Phys. Lett., vol. 52, pp. 314-316 (1988).
- [8] I. Mehdi, J. R. East, and G. I. Haddad, "Characterization of resonant tunneling diodes for microwave and millimeter-wave detection", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 39, pp. 1786-1880 (1991).
- [9] H. H. Tsai, et al., "P-N double quantum well resonant interband tunneling diode with peak-to-valley current ratio of 144 at room temperature", IEEE-ED Lett., vol.15, pp. 357-359 (1994).
- [10] R. K. Mains, J. P. Sun, and G. I. Haddad, "Observation of intrinsic bistability in resonant tunneling diode modeling", Appl. Phys. Lett., vol. 55, pp. 371-373 (1989).
- [11] 김성진의 2명, "스페이서층 두께변화에 따른 공명 터널링 다이오드에서 전류-전압 특성의 자기 무모순법에 의한 해석", 전자공학회 논문지, 제 31-A권 3호, pp. 46 - 51 (1994)
- [12] D. Mukherji and B.R. Nag, "Band structure of semiconductor superlattices", Phys. Rev. B, vol.12, pp 4338-4345 (1975).

 저자 소개



金成振(正會員)

1961년 1월 16일생. 1983년 2월 고려대 전기공학과 졸업. 1985년 2월 동 대학원 졸업(석사). 1988 - 90년 Michigan대 전기공학과 박사과정 수학. 1993년 8월 고려대학교 대학원

전기공학과 졸업(공학). 1993 - 94년 고려대 전기공학과 강사. 94년부터 경남대 전자공학과 전임강사. 주관심 분야: 양자 소자 모델링.