

비대칭 공명 터널링 다이오드의 전송 특성

Transport Properties of Resonant Tunneling Diode with Asymmetric Spacer Layers

조형욱, 이중창, 송종인*

홍익대학교 전자공학과, *광주과학기술원 정보통신공학과

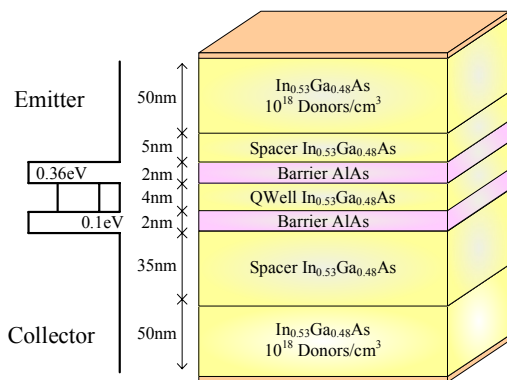
e-mail : wave@hongik.ac.kr

공명 터널링 다이오드(RTD : Resonant Tunneling Diode)는 양자 투과율이 양자 우물 각각에 있는 양자화된 전자의 에너지 준위들이 서로 일치할 때 전자의 흐름이 급격히 증가하게 되는 현상을 이용하여 빠른 수송 속도와 부정저항(NDR : Negative Differential Resistance) 특성을 가지고 있다. 이는 수백GHz에서부터 수THz (100GHz~10THz)까지의 초고주파를 발진할 수 있기 때문에, 광신호 변조에 필요한 마이크로파의 신호원으로 사용이 가능하고, Terabps급 전송 및 광소자와의 단일 기관 집적화를 통하여 초고속 집적 회로 구현 및 우편물 등의 비파괴 검사나 생체에서의 안전성으로 X선으로 바뀌는 의학 분야등 여러 분야에서 응용이 가능하다.⁽¹⁾

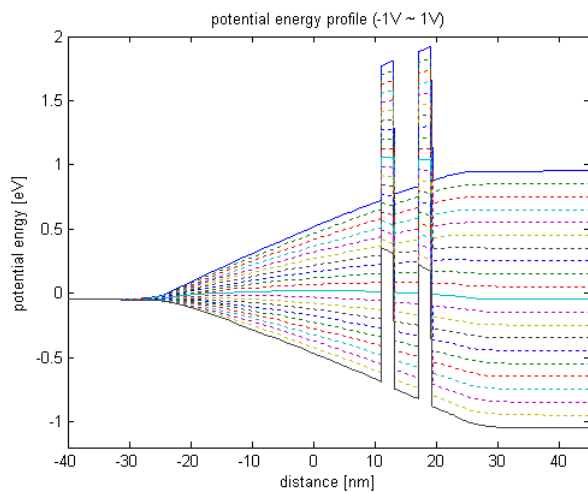
본 연구에서는 [그림 1]과 같이 InP 기판위에 도핑이 없는 영역(Spacer)을 35nm, 5nm로 비대칭적으로 갖는 구조를 갖는 공명 터널링 다이오드의 전압 인가에 따른 전류 특성을 수치 해석하기위해 Transfer Matrix Method(TMM)를 사용하여 전달 상수(Transmission coefficient)를 구하였다.⁽²⁾ 그리고 좀 더 정확하게 에너지 밴드의 구부러짐을 해석하기 위해서 자기무모순법(Self-consistent Method)을 사용하여 푸아송식(Poisson equation)을 해석하였다.⁽³⁾ 이렇게 구하여진 potential energy profile이 [그림 2]와 같다. 이것을 이용하여 wave number k_i 를 계산하여 Transfer Matrix Method를 이용하면,

$$\begin{bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} e^{jk_i d_i} & e^{-jk_i d_i} \\ \frac{m_{i+1}^* k_i}{m_i^* k_{i+1}} e^{jk_i d_i} & -\frac{m_{i+1}^* k_i}{m_i^* k_{i+1}} e^{-jk_i d_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{i+1,i} \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix}, \quad k_i = \sqrt{\frac{2m_i^*}{\hbar^2} (E - V_i)}$$

$$\begin{bmatrix} A_{N+1} \\ B_{N+1} \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{i=1}^N (\mathbf{T}_{i+1,i}) \right\} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$$



[그림 1] RTD 구조



[그림 2] potential energy profile

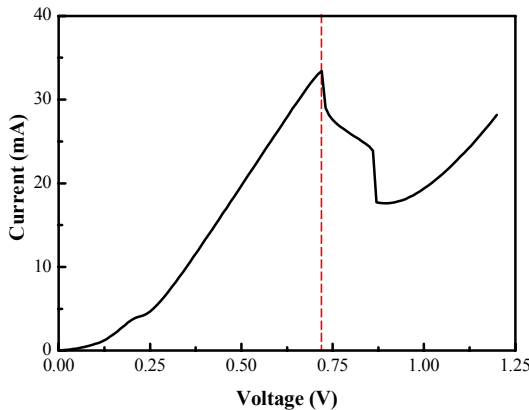
이렇게 정리할 수 있고, 이것을 이용하여 전달 상수를 전달 행렬을 다음과 같이 계산하여,

$$\Theta(E) = \frac{k_N}{k_1} [T^*(E) \cdot T(E)] = \frac{k_N}{k_1} |T(E)|^2, \quad T(E) = T_{11} - \frac{T_{12}T_{21}}{T_{22}}$$

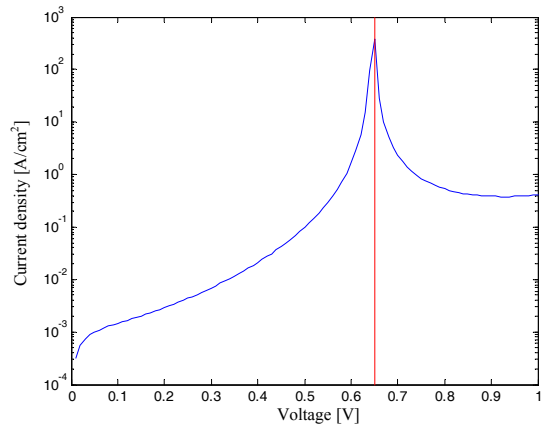
인가 전압에 따른 터널링 된 전류밀도를 계산하면 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$J(V_a) = \frac{qm^*kT}{2\pi^2\hbar^3} \int_{E_{C1}}^{\infty} \Theta(E) \ln \left(\frac{1 + e^{\frac{E_{F1} - E}{kT}}}{1 + e^{\frac{E_{FN} - E - qV_a}{kT}}} \right) dE$$

제작된 공명 터널링 다이오드(RTD)는 소자의 양자우물의 에너지 레벨을 측정하기 위해 소자의 크기가 커서 양자장벽(Barrier)인 AlAs층을 두껍게 하였다. 그리고 소자의 capacitance값을 줄이기 위해 space charge 층을 삽입하였다. 양자우물내의 에너지 레벨에 해당되는 전압값에 따라 전류-전압 특성 곡선에서 전류 값의 peak가 나타나게 된다. 양자장벽(Barrier)인 AlAs층의 두께는 peak 전류 값과 valley 전류 값에 영향을 미치는데 제작된 소자는 크기(~1500um²)가 커서 기저에너지 상태(0.1eV)에서는 부정저항(NDR)의 특성을 보이지 않았고 첫 번째 여기 상태 에너지 레벨(0.36eV)에서 부정저항(NDR) 특성을 나타냈다. 그리고 collector contact의 옴 저항을 줄이기 위해 Schottky contact 구조를 사용하였다. [그림 3]은 이렇게 제작된 RTD의 I-V 특성 곡선이다. 그리고 위의 수식들로 계산되어 수치 해석된 RTD의 I-V 특성 곡선은 [그림 4]와 같다. 제작된 RTD에서 Peak voltage가 0.7V 정도 보였으며, 수치 해석된 RTD의 피크가 나온 전압이 0.65V정도로 0.5V정도 오차가 나는 것을 확인할 수 있었다. 오차 수정을 위해 RTD 수치 해석시 InGaAs/AlAs의 격자 상수에 대한 Strain effect도 고려하였으나, TMM방식이 scattering을 고려하지 않았기에 오차가 난 것 같다.



[그림 3] 제작된 RTD의 I-V 특성 곡선



[그림 4] 수치 해석한 RTD의 I-V 특성 곡선

1. J.P.Sun, G.I.Haddad, P.Mazumder, "Resonant Tunneling Diodes : Models and Properties", *proc. IEEE*, vol.86, 641-663 (1998).
2. Hannu Komsa, Tero Huttunen, "Simulating effective barrier height in multi-quantum barrier structures using transfer matrix method", *Electron. lett.*, vol.31, no.2, 132-133 (2003).
3. K.H.Kim, J.C.Yi, "A study of the transport properties of the resonant tunneling diode using self-consistent quantum hydrodynamic model", *홍익대학교 논문집* (2004).
4. K.M.S.V.Bandara, D.D.Coon, "Derivation and correction of the Tsu-Esaki tunneling current formular", *J.Appl.Phys.*, vol.66, 693 (1989).