論文 92-29A-3-8

AlGaAs/GaAs/AlGaAs 이중 이종접합 HEMT구조에서의 2차원 전자개스 농도의 양자역학적 계산

(Quantum Mechanical Calculation of Two-Dimensional Electron Gas Density in AlGaAs/GaAs/AlGaAs Double-Heterojunction HEMT Structures)

尹 慶 植*, 李 精 一**, 姜 光 南**

(Kyung Sik Yoon, Jung Il Lee, and Kwang Nham Kang)

要 約

본 논문에서는 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 이중 이종 접합 HEMT 구조에 대한 Schroedinger 방정식의 해를 구하기 위해 Numerov 기법을 적용하였다. 3개의 부밴드 준위와 파동함수, 2차원 전자 개스 농도, 전도대역을 Schroedinger 방정식과 Poisson 방정식과의 self-consistent 한 해를 얻을 때까지 반복계산을 수행하여 계산하였다. 아울러, 이중 이종접합 구조의 양자 우물에서의 2차원 전자개스 농도를 여러 게이트 인가전압에 대하여 계산하였다. 이중 이종접합구조의 전자 농도는 단일 이종접합에 비하여 약 90%이상 증가하나, transconductance는 증가하지 않는 것이 밝혀졌다. 그러므로, 이중 이종접합구조는 큰 전류 구동력이 필요하거나 전력용 HEMT 구조로 적합하리라 기대된다.

Abstract

In this paper, the Numerov method is applied to solve the Schroedinger equation for $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ double-heterojunction HEMT structures. The 3 subband energy levels, corresponding wave functions, 2-dimensional electron gas density, and conduction band edge profile are calculated from a self-consistent iterative solution of the Schroedinger equation and the Poisson equation. In addition, 2-dimensional electron gas densities in a quantum well of double heterostructure are calculated as a function of applied gate voltage. The density in the double-heterojunction quantum well is increased to about more than 90%, however, the transconductance of the double heterostructure HEMT is not improved compared to that of the single heterostructure HEMT. Thus, double-heterojunction structures are expected to be suitable to increase the current capability in a HEMT device or a power HEMT structure.

*正會員, 高麗大學校 情報工學科
(Dept. of Information Eng., Korea Univ.)
**正會員, 韓國科學技術研究院 光電子研究室
(Optical Electronics Lab., KIST)
接受日字 : 1991年 11月 6日

I. 서 론

Esaki와 Tsu[1]가 제안한 변조 도핑된 초격자(modulation doped superlattice)의 개념이 Dingle 등[2]에 의해 구현된 이후 Fujitsu에서 최초로 고속전자 이동도 트랜지스터(High Electron Mobility Transistor)[3]를

제작하여 이의 동작 특성을 보고하였다. 이후 이를 고속컴퓨터, 마이크로웨이브 통신, 위성통신 등에 활용하고자 변조도핑(modulation doping)에 관한 연구가 활발히 진행되어, 단일 이종접합구조의 HEMT 소자의 제작과 모델링에 매우 큰 진전이 있었다.

HEMT 소자의 특성을 결정하는 주요한 인자는 2차원 전자개스(2-DEG) 농도와 포화속도이다. 그리하여 2차원 전자개스 농도를 증가시킬 수 있는 방법으로 단일 이종접합구조(single heterojunction structure)를 이중 이종접합구조(double-heterojunction structure)의 소자로 바꾸거나, 전도대역 불연속(conduction band discontinuity)이 AlGaAs/GaAs 보다 큰 AlInAs/GaInAs 같은 합성 반도체를 소재로 사용할 수 있다. 그동안 여러 연구자들에 의해 소자의 성능을 향상시키고자 전도 채널의 전자개스 농도를 증가시킨 이중 이종접합구조의 HEMT가 제작되어 그들의 특성이 보고되었다.[4]

지금까지 단일 이종접합구조에서 2차원 전자개스 농도의 계산은 많은 연구자들에 의해 삼각우물 근사에 의한 해석적 방법[5]과 양자역학적 self-consistent 한 수치해석 방법[6,7]이 제시되었다. 그러나, 이중 이종접합 구조의 2차원 전자개스 농도를 해석적 방법으로 Fermi 준위의 함수로 기술하기가 단일 이종접합구조에 비하여 어려워 이에 관한 연구 결과는 많지 않다.

그러나, 이종접합구조에서의 2차원 전자개스 농도는 소자의 설계 및 소자특성 해석에 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 변조 도핑된 이중 이종접합구조에서의 Schroedinger 방정식과 Poisson 방정식을 유한차분법으로 이산화하여, 이들의 self-consistent 한 해로부터 인가된 게이트전압의 함수로 2차원 전자개스 농도와 전도대역(conduction band), 부밴드 에너지 준위(subband energy level), 파동함수 등을 구하는 것을 연구 목적으로 한다.

Ⅱ. 계산이론

이종접합 계면(xy 평면)에 평행인 파동함수는 평면파라 가정하고, 계면에 수직인 방향 (z방향)의 envelope function은 effective mass 근사를 사용하면 다음과 같이 주어진다.

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*}\frac{d^2\Psi_n(z)}{dz^2}+V(z)\Psi_n(z)=E_n\Psi_n(z) \qquad (1)$$

여기서 m^*는 유효질량이고 $\Psi_n(z)$와 E_n는 n번째 부밴드(subband)의 파동함수와 에너지 준위를 나타낸다.

위치 에너지 V(z)는 다음과 같으며

$$V(z)=-q\phi_e(z)+V_b(z)+V_{xc}(z) \qquad (2)$$

$\phi_e(z)$는 다음의 Poisson 방정식(3)의 해로 주어지는 전위이며, $V_b(z)$는 이종접합 계면에서의 에너지 장벽의 계단함수이고, $V_{xc}(z)$는 local exchange correlation potential[8]이다.

여기서 전위 $\phi_e(z)$는 다음에 주어지는 Poisson 방정식의 해이다.

$$\frac{d^2\phi_e(z)}{dz^2}=\frac{q}{\varepsilon}[\sum N_n\Psi_n^2(z)-N_d^+(z)+N_a^-(z)-p(z)] \qquad (3)$$

그리고 여기서 N_n은 n번째 부밴드에서의 전자농도를 의미하며 다음과 같이 주어진다.

$$N_n=\frac{m^*k_BT}{\pi\hbar^2}ln\left[1+exp\left[\frac{E_f-E_n}{k_BT}\right]\right]. \qquad (4)$$

여기서 또한 N_d와 N_a는 각각 donor와 acceptor 농도이고, p는 홀 농도이며 E_f는 Fermi 준위이다. 나머지 기호들은 자주 사용되는 통상의 의미를 갖는다.

본 계산의 신뢰성을 확인하기 위하여 그림 1과 같은 단일 우물 이종접합 구조 (single-well heterojunction structure)에서 양자화된 부밴드 준위와 그에 대응하는 파동함수는 Numerov방법[9,10]으로 참고문헌 [6, 7, 11]에 따라 self-consistent한 수치 계산을 수행하였다. 즉 Schroedinger 방정식의 해로부터 부밴드 에너지 준위와 파동함수, 그리고 각각의 부밴드에서의 전자농도를 구한 후, 이 전자농도를 이용하여 Poisson의 해를 구하여 이로부터 새로운 전위를 구하여 self-consistent한 해를 얻을 때까지 반복 계산한다. 본 연구에서는 계산 소요시간을 고려하여 반복계산을 통하여 얻는 전위 오차가 0.5mV 이내로 수렴할 때까지 계산을 행하였으며, AlGaAs와 GaAs에 관련된 물성 parameter들은 참고문헌 [6]에 사용된 값들을 이용하였다. 이 경우에 이종접합 계면에 형성된 2차원 전자 개스의 게이트 전압 의존성을 계산하는데 2가지의 경계조건이 필요하다. 첫째, AlGaAs 층위에 형성된 게이트 전극측의 전도대역 끝은 Schottky 장벽전위 1eV와 게이트 인가 전압에 따른다. 둘째, 계면에서 멀리 떨어진 GaAs층에서 전도 대역 끝은 열평형 값을 갖는다. 그리고 단일 우물 구조에서는 Fermi 준위를 기준 준위(0eV)로 가정한다.

그러나, 본 연구에서는 그림2와 같은 AlGaAs/GaAs/AlGaAs로 형성되는 이중 이종접합구조(double heterojunction structure)의 양자 우물에 대하여, AlGaAs 층에 형성된 게이트 전극에 인가하는 전압에

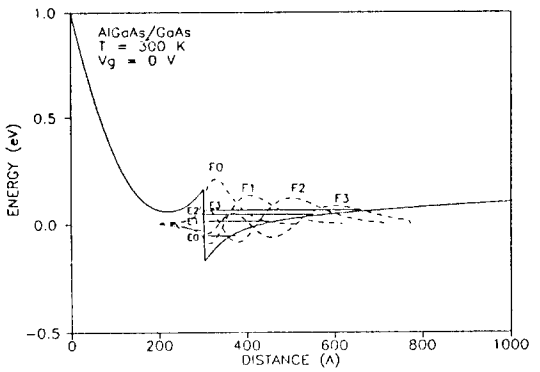

그림 1. $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ 단일 이종 접합구조의 에너지 대역도로 $3\times10^{18}cm^{-3}$로 도우핑된 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$층의 두께가 300Å이며 Al 게이트 전극이 형성되 있으며, 도우핑하지 GaAs층의 계면에 형성된 양자 우물의 부밴드 준위(E_0, E_1, E_2 E_3)와 이에 대응하는 파동함수(F_0, F_1, F_2, F_3)

Fig. 1. Conduction band edge vs distance from an Al gated $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ single heterojunction structure where the $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ layer is 300Å thick with a donor doping of $3\times10^{18}cm^{-3}$ and the GaAs layer is undoped. The four lowest subband levels (E_0, E_1, E_2, E_3) and the corresponding wave functions (F_0, F_1, F_2, F_3) are shown.

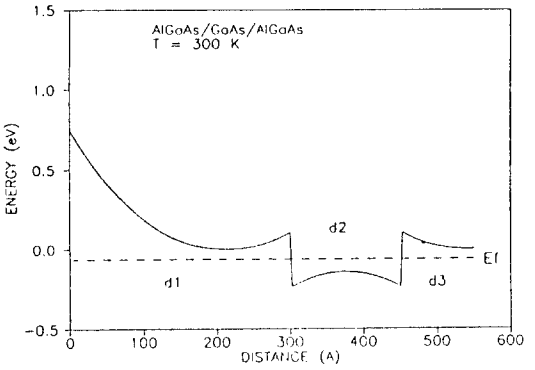

그림 2. $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 이중 이종 접합구조로 좌측의 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$층에는 Al 게이트 전극이 형성되었으며, $3\times10^{18}cm^{-3}$로 도우핑된 좌측의 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$층(d_1)의 두께는 300Å이고, 도우핑 하지않은 GaAs층(d_2)의 두께는 150Å이며, 우측의 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$층(d_3)도 $3\times10^{18}cm^{-3}$로 도우핑한 두께가 100Å인 우물

Fig. 2. Conduction band edge profile of a quatum well formed from an Al gated $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ double-heterojuction structure where the top $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ layer (d_1) is 300Å thick with a donor doping of $3\times10^{18}cm^{-3}$, the GaAs layer (d_2) is undoped and the bottom $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ layer (d_3) is 100 Å thick with a donor doping of $3\times10^{18}cm^{-3}$

따라 변하는 부밴드 구조와 파동함수를 구하고 이로부터 우물내의 2차원 전자 개스 농도의 전압 의존성을 밝히고자 한다. 게이트 전극이 없는 AlGaAs/GaAs/AlGaAs 이중 이종접합구조의 경우는 양측 AlGaAs 층의 계면근처에 형성된 결핍영역의 전하량과 양자 우물속의 2차원 전자개스의 전하량과 전하중성(charge neutrality)을 이루는 조건으로 부터 쉽게 Fermi 준위를 계산할 수 있다. 이와 달리, AlGaAs 표층에 게이트 전극을 형성한 AlGaAs/GaAs/AlGaAs의 이종 접합 HEMT구조의 경우에는 전하 중성 조건을 사용할 수 없다. 그러므로 다음과 같은 조건[12]을 사용한다.

$$\left.\frac{d\phi_e(z)}{dz}\right|_{z=-\infty} = \frac{q}{\varepsilon}\int\left(\sum N_n \Psi_n^2(z) - N_d^+(z) + N_a^-(z) - p(z)\right)dz = \frac{Q}{\varepsilon} \qquad (5)$$

여기서 여분의 전하 Q는 게이트 금속과 반도체 Fermi 준위를 일치시키기 위해 이중 이종 접합구조 밖으로 흘러 나가거나 들어올 것이다.

Ⅲ. 계산결과 및 토의

본 계산결과는 제Ⅱ절의 식(5)를 식(3)의 경계 조건으로 사용하여 식(1)~(4)로 부터 파동함수 Ψ_n과 전위 ϕ_e이 수렴할 때까지 반복계산을 통하여 구하였다. 그림3은 본 계산에 사용된 프로그램의 흐름도이며, CPU 속도 20MHz의 PC-386상에서 수행되어 게이트 전압 V_g=0V일 때의 3개의 부밴드준위, 파동함수 2차원 전자개스농도, 전도대역 등을 구하는데 약 12분이 소요되었다.

그림1은 Al 게이트 전극을 갖는 도우핑 농도가 $3\times10^{18}cm^{-3}$인 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$층의 두께가 300Å이고, 도우핑하지 않은 충분히 두꺼운 GaAs층과 이종접합을 이루는 HEMT 구조로 계면에 형성된 양자 우물에서의 부밴드 구조(E_0, E_1, E_2, E_3)와 이에 대응하는 파동함수 (F_0, F_1, F_2, F_3)를 파선으로 도시하였으며 참고문헌 [6]과 매우 근사한 결과를 얻었다.

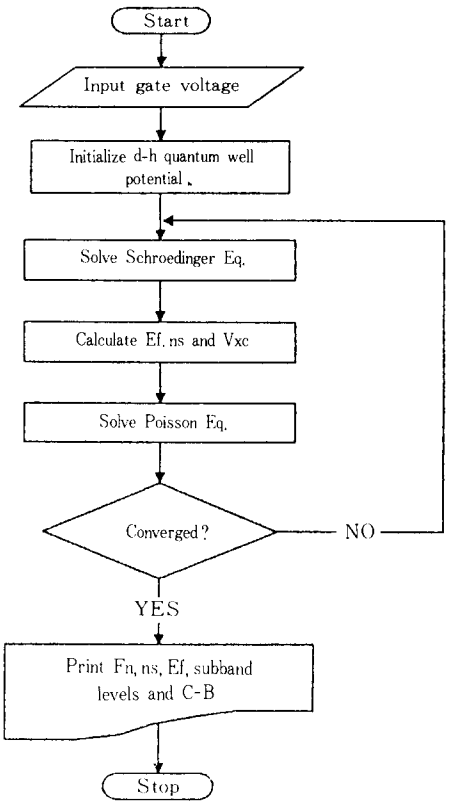

그림 3. 본 계산에 사용된 프로그램의 흐름도
Fig. 3. A flow chart of the program used in self-consistent calculation.

그림2는 좌측의 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$층에 Al 게이트 전극이 형성된 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$의 이중 이종접합구조로 형성되는 HEMT로, 여기서 $3\times10^{18}cm^{-3}$로 도우핑된 좌측의 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$층(d_1)의 두께는 300Å이고, 도우핑 하지않는 GaAs층(d_2)의 두께는 150Å이며, 우측의 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$층(d_3) 또한 $3\times10^{18}cm^{-3}$로 도우핑 하였으며 이의 두께는 100Å이다.

그림4의 (a)-(d)는 게이트에 인가된 전압이 각각 0.18683V, −0.309959V, −0.55795V, −1.30667V일때의 3개의 부밴드 준위 (E_0, E_1, E_2)와 이에 대응하는 파동함수 (F_0, F_1, F_2)를 파선으로 나타내었으며 이 파동함수들은 양자우물 전위장벽이 무한대가 아니므로 AlGaAs 층으로 침투된 것을 보여준다. 그림 4(a)에서 양자 우물은 거의 좌우 대칭이며 파동함수들이 우물의 중앙에 대하여 대칭임을 알 수 있다. 그리고 인가되는 게이트 전압이 부측으로 증가하면 양자우물의 비대칭성은 커지는 것을 볼 수 있으며, 또한 첫

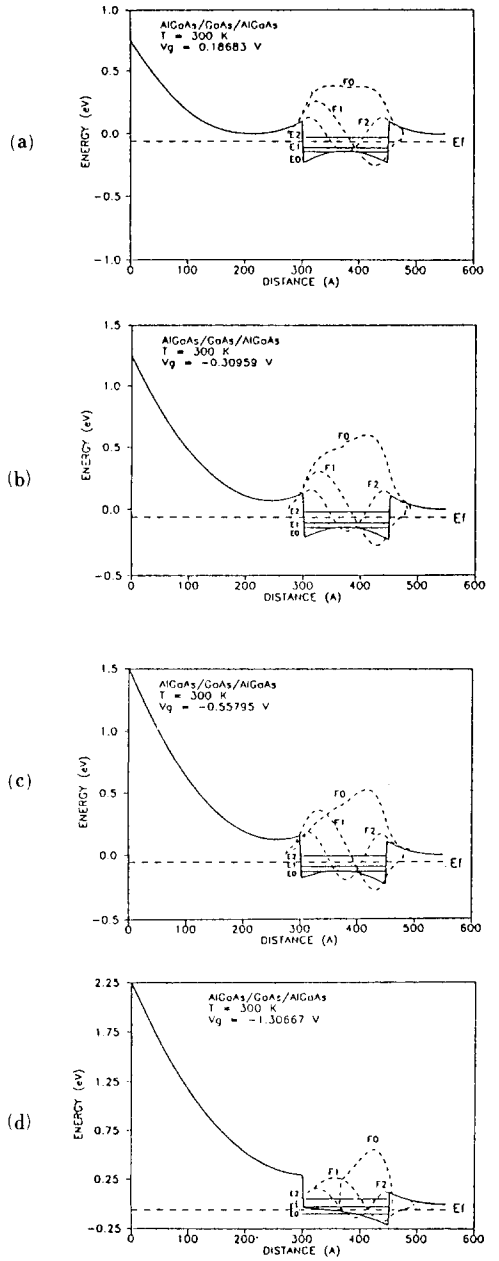

그림 4. 그림2의 이중 이종접합 구조의 게이트에 인가된 전압이 (a) 0.18683V (b)−0.309959V (c) −0.55795V (d) −1.30667V일 때의 전도대역과 3개의 부밴드 준위 (E_0, E_1, E_2)와 이에 대응하는 파동함수 (F_0, F_1, F_2)
Fig. 4. Conduction band edge profile, 3 lowest subband levels (E_0, E_1, E_2) and corresponding wave functions (F_0, F_1, F_2) for the double-heterojunction structure of fig. 2:(a) V_g= 0.18683V, (b) V_g= −0.309959V, (c) V_g= −0.55795V and (d) V_g= −1.30667V.

번째 파동함수의 최대값이 우측의 이종접합 계면으로 근접함으로 좌측의 이종접합계면의 E_0 준위의 2차원 전자개스가 결핍되는 것을 알 수 있다.

그림5는 양자우물에서 가장 낮은 전도대역의 끝을 기준으로 하여 양자 우물에서의 3개의 부밴드 준위와 Fermi 준위를 게이트에 인가한 전압의 함수로 나타내었다. 게이트 전압이 positive 쪽으로 증가하면 Fermi 준위가 두번째 준위 위로 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림6은 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$의 단일 이종 접합 구조와 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$의 이중 이종접합구조의 양자 우물내의 2차원 전자개스농도를 인가된 게이트 전압의 함수로 도시하여 비교하였으며, 양자우물내의 전자농도가 양의 인가전압으로 포화되는 것을 보여준다. 단일 이종접합계면에 형성된 전자개스농도는 Yoshida[6]가 계산한 결과와 잘 일치하며, 또한 이중 이종접합의 양자우물내의 전자개스농도는 참고문헌 [13]에 언급된 바와 같이 2차원 전자 개스의 농도가 인가전압의 증가로 포화되기 전에 기울기가 다른 2부분으로 구분되는 것을 보여준다. 이것은 이중 이종접합으로 형성된 우물을 두개의 단일 이종접합으로 형성된 우물의 중첩으로 간주하고 각 우물의 전자농도는 게이트 전극과 이종접합 계면으로 형성되는 평행판 커패시터 용량에 의존하는 것으로 설명할 수 있다. 그리고 이중 이종접합 구조에서 전자

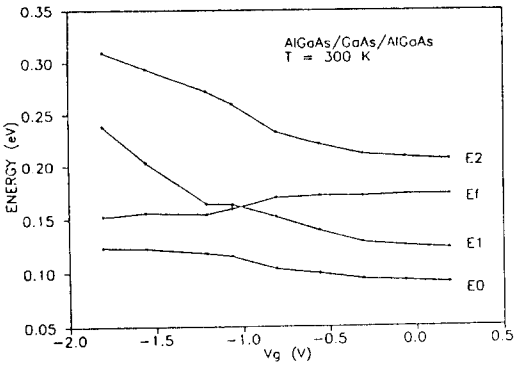

그림 5. $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 이중 이종접합에서 3개의 부밴드 준위(E_0, E_1, E_2 및 Fermi 준위(E_f) 대 게이트 전압

Fig. 5. The three lowest subband levels (E_0, E_1, E_2) and Fermi level (E_f) as a function of gate voltage in an Al gated $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ double-heterojunction structure.

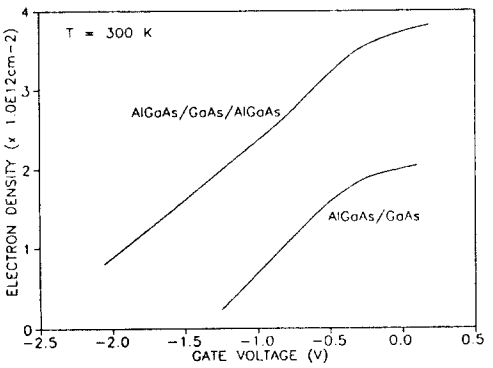

그림 6. $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$단일 이종접합구조와 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 이중 이종접합구조의 양자 우물내의 2차원 전자개스 농도 대 게이트 전압

Fig. 6. Two-dimensional electron gas densities as a function of gate voltage for $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ and $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ heterojunction quantum well structures.

개스를 완전히 결핍시키기 위하여 단일 이종 접합구조보다 더 큰 negative 게이트 전압을 인가하여야 한다. 이것은 이중 이종접합 구조의 HEMT에 큰 게이트 전압을 인가할 수 있다는 것을 의미하는 것으로, 이같은 이중 채널구조의 HEMT는 대신호 증폭에 적합하므로 즉 전력용 HEMT 소자로도 적합하리라 기대된다.

이 결과들로 부터, 이들 구조를 갖는 HEMT소자를 제작하였을 때 다음 식을 사용하여 게이트 폭으로 정규화 된 transconductance를 계산할 수 있다.

$$g_m = q\left(\frac{dn_s}{dV_g}\right) v_{sat} \qquad (6)$$

여기서 v_{sat}는 전자의 포화 속도이다.

그림7은 식(6)에서 전자의 포화속도로 1×10^7cm/sec를 사용한 결과로 transconductance를 게이트 인가 전압의 함수로 도시하였으며, 게이트 전압이 0으로 접근하면 transconductance가 감소하는 것을 보여준다. 이것은 위에서 언급한 바와 같이 2차원 전자개스 농도가 게이트 전압의 증가로 포화 상태에 도달하기 때문이라고 할 수 있다. 단일 이종접합 구조의 경우 $V_g=-0.894$V에서 최대의 g_m이 307.95 mS/mm이고, 이중 이종접합구조의 경우 $V_g=0.65$V에서 최대의 g_m은 307.92mS/mm로 예상과는 달리 transconductance는 이중 이종접합 HEMT 구조에서

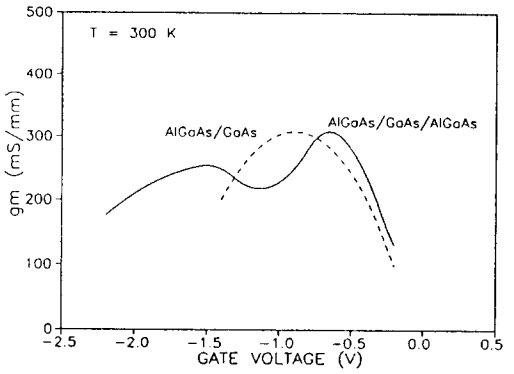

그림 7. 단일 이종접합구조(파선)와 이중 이종접합 구조(실선)의 양자 우물에서 전자의 포화속도로 1×10^7/cm/sec를 사용하여 계산한 게이트 폭으로 정규화 된 transconductance대 게이트 인가 전압

Fig. 7. Normalized transconductance to a gate width vs gate voltage for single heterojunction (dashed curve) and double-heterojunction (solid curve) quantum wells using the saturation velocity of 1×10^7cm/sec.

향상되지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 그림6 에서 이중 접합 구조에서의 2차원 전자 개스의 게이트 전압 의존성이 단일 이중 접합 구조에서의 2차원 전자 개스의 전압 의존성과 매우 유사한 사실에 근거한다. 단일 이종 접합구조의 g_m 곡선은 종 모양이나, 이중 이종접합구조의 g_m 곡선은 두 봉우리가 있는 모양으로 이것은 전자개스 농도의 전압의존성이 다른 2 부분이 있기 때문이다.

그러나 이중 이종접합 구조에서 2차원 전자개스의 농도가 게이트 인가 전압이 0V일 때 단일 이종접합 구조에서 보다 약 90% 이상 증가하는 사실로 전류 구동력이 증가되므로 고속소자로 또는 전력용 HEMT 소자로 적합한 것을 알 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 단일 이종 접합구조에서 자주 사용하는 Numerov방법을 이중 이종접합 구조의 양자 우물에 적용하여 3개의 부밴드 에너지 준위와 파동함수, 2차원 전자개스 농도와 전도대역의 self-consistent한 해를 얻었다. 또한, 이중 이종접합 구조에서의 양자우물 내의 전자농도를 여러 게이트 인가 전압에 대하여 계산하였다. 이로부터 얻은 전자농도 대 게이트 전압으로 부터 transconductance을 계산한 결과는 이중 이종접합 HEMT의 transconductance가 단일 이종접합 HEMT의 transconductance에 비하여 증가하지 않았다. 그러나, 2차원 전자개스 농도는 단일 이종접합구조에 비하여 약 90% 이상 증가하므로 이중 이종접합구조의 HEMT 소자는 고속 및 전력용에 적합하다고 기대된다. 또한 본 모델은 AlInAs/GaInAs/AlInAs와 같은 합성반도체의 이중 접합구조에서나 다른 구조에서도 간단히 프로그램의 일부를 수정하여 사용 가능하다. 따라서 본 연구에서 개발된 프로그램은 HEMT 성능을 향상시키기 위해 HEMT 소자 구조의 최적화에 사용될 수 있다.

參 考 文 獻

[1] L. Esaki and R. Tsu, "Superlattice and negative conductivity in semiconductors," *IBM Res.*, Internal Rep. RC 2418, Mar. 1969.

[2] R. Dingle, H.L. Stoermer, A.C. Goaasrd and W. Wiegmann, "Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 33, pp. 665-667, Oct. 1978.

[3] T. Mimur, S. Hiyamizu, T. Fujii and Nanbu, "A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-AlGaAs heterojunction," *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 19, pp. L225-L227, May 1980.

[4] N.H. Sheng, C.P. Lee, R.T. Chen and D.L. Miller, ""GaAs/AlGaAs double heterostructure high electron mobility transistors," *IEEE IEDM*, pp. 352-355, 1984.

[5] D. Delagebeaudeuf and N.T. Linh, "Metal(n) AlGaAs-GaAs two-dimensional electron gas FET," *IEEE Trans. Elect. Devices*, ED-29, pp. 955-960, June 1982.

[6] J. Yoshida, "Classical versus quantum mechanical calculation of the electron distribution at the n-AlGaAs/GaAs heterointerface," *IEEE Trans. Elect.* Devices, ED-33, pp. 154-156, Jan. 1986.

[7] B. Vinter, "Subbands and charge control in a two-dimensional electron gas field-effect transistor," Appl. Phys. Lett. 44, pp. 307-309, Feb. 1984.

[8] L. Hedin and B.I. Lundqvist, "Explicit local exchange correlation potentials," *J. Phys.* C vol. 4, p. 2064, 1971.

[9] J.M. Blatt, "Practical points concerning the

solution of the Schroedinger equation," *J. Comp. Phys.* 1, pp. 382-396, 1967.
[10] P.C. Chow, "Computer solutions to the Schroedinger equation," *Am. J. Phys.* vol. 40, pp. 730-734, May 1972.
[11] F. Stern and S. Das Sarma, "Electron energy levels in GaAs-GaAlAs heterojunctions," *Phys. Rev.* B vol. 30, pp. 840-848, July 1984.
[12] G. Ji, T. Henderson, C.K. Peng, D. Huang and H. Morokoc, "Analysis of energy states in modulation doped multiquantum well heterostructures," Solid-State Electronics vol. 33, pp. 247-258, Feb. 1990.
[13] K. Inoue, H. Sakaki, J. Yoshino, and T. Hotta, "Self-consistent calculation of electronic states in AlGaAs/GaAs/AlGaAs selectively doped double-heterojunction systems under electric fields," *J. Appl. Phys.* vol. 58, pp. 4277-4281, Dec. 1985.

著 者 紹 介

尹 慶 植 (正會員) 第28卷 B編 第8號 參照
현재 고려대학교 정보공학과 부교수

●

李 精 一 (正會員) 第28卷 A編 第2號 參照
현재 한국과학기술연구원 광전자 연구실 책임연구원

姜 光 南 (正會員) 第28卷 A編 第2號 參照
현재 한국과학기술연구원 광전자 연구실장