

InP HEMT의 2DEG계산

황광철, 안형근, 한득영
건국대학교 전기공학과

2DEG Calculation in InP HEMT

K. C. HWang , H. K. Ahn , D. Y. Han
Konkuk Univ.

Abstract

양자우물 구조를 사용한 HEMT(High Electron Mobility Transistor)는 고속 스위칭 소자와 초고주파 통신용 소자 및 센서에 우수한 동작특성을 갖고 있다. 본 논문에서는 AlInAs/InP HEMT의 heterostructure를 파동방정식과 Poisson 방정식을 self-consistent 한 방법으로 해석하였다. 파동방정식으로 junction의 전자농도를 계산하고, Poisson 방정식을 해석하여 potential profile에 의한 전자 농도가 heterostructure에서 self-consistent가 되도록 연산하였다. 끝으로 AlInAs/InP 구조에서 positively ionized donor, valance band에서의 hole, conduction band의 free electron과 구조내의 2DEG를 AlGaAs/GaAs 및 AlGaAs/InGaAs/GaAs와 비교하였다.

Key Words : HEMT, AlInAs/InP, 2DEG, Heterostructure

1. 서 론

1.1 파동방정식의 해석

이중 접합 계면에 평행한 파동함수는 평면파라 가정하고, 계면에 수직인 방향(z)에 대한 시간에 대해 독립인 파동방정식은 아래와 같다.

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} \Psi(z) + V(z)\Psi(z) = E_i \Psi(z)$$

위 식에서 Ψ 는 파동함수 이며, m^* 는 전자의 유효 질량, $V(z)$ 는 전위 에너지 즉 가전도대를 뜻하고, E_i 는 부밴드 전자의 에너지, \hbar 는 reduced plank constant 이다.

이를 해석하는 방법으로는 Numeov 방법을 사용하였으며, 아래는 Numerov 방법으로 해석할 수 있는 적분 방정식의 일반형이다.

$$y^{(2)}(z) = Q(z)y(z) + R(z)$$

$y^{(2)}$ 는 y 의 2차 도함수를 의미하며, 다음은 위의 일반형의 테일러 급수로부터 정리한 Numerov방정식의 식이다.

$$y_{i+1} = \frac{1}{1 + \frac{\hbar^2}{12} Q_{i+1}} \left\{ 2 \left(\frac{1-5\hbar^2}{12} Q_i \right) y_i - \left(\frac{1+\hbar^2}{12} Q_{i-1} \right) y_{i-1} + \frac{\hbar^2}{12} (R_{i+1} + 10R_i + R_{i-1}) \right\} + O(\hbar^6)$$

여기서, \hbar 는 z 에서의 미소거리이며 O 는 오차 함수 이다.

파동방정식을 Numerov에 적용하게 되면,

$$Q(z) = \frac{2m^*(E - V(z))}{\hbar^2}$$

$$R(z) = 0$$

가 되며, Numerov 연산의 향상을 위해 식을 변형한 것은 다음과 같다.

$$Q'(x) = \frac{\hbar^2}{12} Q(z) = \frac{\hbar^2 m^* (E_{guess} - V(z))}{6 \hbar^2}$$

E_{guess} 는 최대 에너지와 최소 에너지 사이의 평균값으로 최대·최소치가 예측 설정과 반복 계산을 통해 범위를 좁혀가며 E_i 를 계산하게 된다.

1.2 전하의 분포

Poisson방정식의 해로부터 주어지는 전위에너지 Φ_e 는 다음과 같다.

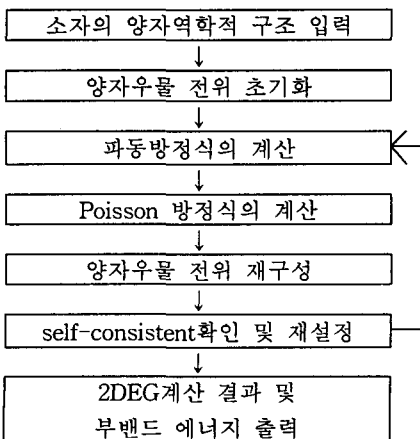
$$\frac{d^2 \Phi_e}{dz^2} = -\frac{q}{\epsilon} [\sum n_d^+(z) + n_v(z) - n_s(z) - n_c(z)] = 0$$

n_d^+ 는 양으로 이온화된 도우너의 농도, n_v 와 n_c 는 각각 홀과 전자의 분포, n_s 양자우물영역에서 형성되는 전자분포로 파동방정식의 해로부터 계산되어 진다. ϵ 는 물질에 따른 유전율이다.

2. 시뮬레이션

다음은 시뮬레이션에서 사용한 흐름도이다.

표 1. 시뮬레이션 흐름도.



게이트 전압을 가하지 않은 평형상태를 가정하고 시뮬레이션 하였으며, 양자우물이 삼각형(AlInAs/InP)일 경우와 4각형(AlInAs/InGaAs/InP)일 경우 2가지를 행하였다.

2.1 삼각형의 양자우물의 경우

삼각형의 양자우물을 가진 시뮬레이션1에 사용된 매개변수(parameter)의 값은 다음과 같다.

표 2. 시뮬레이션1에 사용된 매개변수의 값.

매개변수 명	설명	값
Al _{0.48} In _{0.52} As length	doped layer 2x10 ¹⁸ [ea/cm ³]	240 [Å]
	undoped spacer layer	30 [Å]
InP length	undoped	700 [Å]
ϵ_s	Al _{0.48} In _{0.52} As	11.35
	InP	12.5
전도대역의 차 T	Al _{0.48} In _{0.52} As / InP temperature	0.15 [eV] 300 [K]

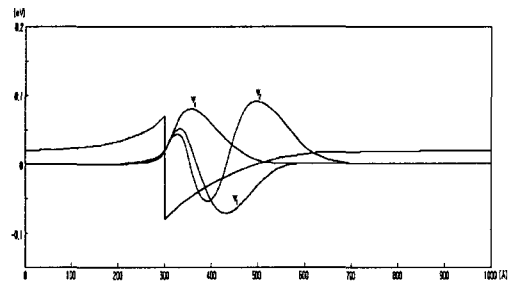


그림 1. 삼각형 우물 구조에서의 시뮬레이션 결과.

단일 이중 접합구조에서의 전도대 E_c 와

$$\Psi_0, \Psi_1, \Psi_2.$$

2.2 사각형의 양자우물의 경우

시뮬레이션2에서는 시뮬레이션1의 형태에서 AlInAs와 InP 사이에 InGaAs를 삽입하여 사각형의 양자우물을 갖는 형태로 만들 경우에 사용된 매개변수의 값은 다음과 같다.

표 3. 시뮬레이션2에 사용된 매개변수의 값.

매개변수 명	설명	값
Al _{0.48} In _{0.52} As length	doped layer 3x10 ¹⁸ [ea/cm ³]	220 [Å]
	undoped spacer layer	30 [Å]
In _{0.53} Ga _{0.47} As length	undoped	200 [Å]
InP length	undoped	150 [Å]
ε _s	Al _{0.48} In _{0.52} As	11.35
	In _{0.53} Ga _{0.47} As	13.68
	InP	12.5
전도대역의 차	Al _{0.48} In _{0.52} As / In _{0.53} Ga _{0.47} As	0.75 [eV]
	In _{0.53} Ga _{0.47} As / InP	0.6 [eV]
T	temperature	300 [K]

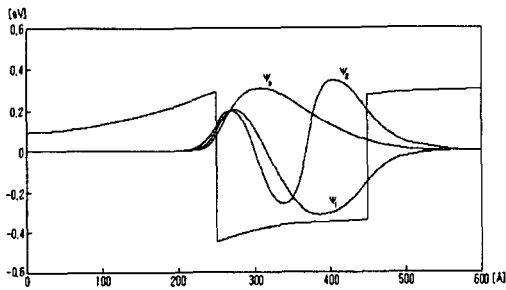


그림 2. 사각형 우물 구조에서의 시뮬레이션 결과. 이중 이중 접합구조에서의 전도대 E_c 와 Ψ_0, Ψ_1, Ψ_2 .

3. 결론

참고 문헌[6]의 AlGaAs/GaAs 보다 시뮬레이션1의 AlInAs/InP의 경우 2DEG가 4.3×10^{11} [ea/cm²]으로 부족하게 나타나고 있다. 이는 AlGaAs/GaAs의 전도대역의 차가 0.21로 약70% 정도 더 높기 때문이다.

시뮬레이션2의 2DEG는 3.2×10^{12} [ea/cm²]로, InGaAs의 전도대가 이것을 감싸고 있는 AlInAs 및 InP보다 약 0.6정도의 높은 전위차를 갖고 있어서 양자무물의 크기가 깊으며, 따라서 형성되는 2DEG의 양이 AlGaAs/InGaAs/GaAs보다

많음을 알 수 있다.

InP/InGaAs 혹은 AlGaAs/InGaAs의 형태로 삼각형의 양자우물을 갖는 소자의를 고려해본다면, 심한 전위차로 인하여 우물을 형성하는 InGaAs의 길이를 넓혀주어야 하므로, 제작 비용에 있어 문제가 발생할 것이다.

참고 문헌

- [1] Frank Stern, Sankar Das Sarma, "Electron energy levels in GaAs-Ga_{1-x}As_xAs heterojunction", Phys. Rev. B Vol30 No2 pp84-848, Jul. 1984
- [2] M.B.Pati, U.Ravaioli, "Calculation of Electron Density in Planer-Doped High Electron Mobility Transistors", Solid-State Electroics Vol33 No7 pp953-962, 1990
- [3] J.B.Boos, "InAlAs/InGaAs/InP Junction HEMTs", IEEE Elect. Let. Vol26 No15 pp1172-1173 Jul. 1990
- [4] H. Ahn, M.El-Nokali, "An Analytical Model for High Electron Mobility Transistors", IEEE Trans. Elect. Devices, Vol41 No6 pp874-878 June 1994
- [5] S.C.Wang, J.S.Liu, "High Performance Fully Selective Double Recess InAlAs/InGaAs/InP HEMT's" IEEE Elec. Dev. Lett. Vol21 No7 July 2000
- [6] K.C.Hwang, H.K.Ahn, D.Y.Han, "A Fast Numerical Algorithm for Heterojunction Structures", International Journal of Electronics, Volume 88, pp. 1151 - 1159, Nov. 2001