

Reverse Engineering을 이용한 $Al_xGa_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As$ P-HEMTs의 구조적 분석

Structural analysis of $Al_xGa_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As$ P-HEMTs by reverse engineering

김병현*, 황광철, 안형근*, 한득영

(Byung Heon Kim*, Kwang Cheul Hwang, Hyungkeun Ahn, Deuk Young Han)

Abstract

In this paper, DC and small signal characteristics with different physical parameters are expected for p-HEMTs (Pseudomorphic High Electron Mobility Transistors) with different temperatures ranging from 300K to 623K which are widely used for a low noise and/or ultra high frequency device. A device of $0.2 \times 200 \mu m^2$ dimension having very low noise has been chosen to extract the experimental data. Theoretical prediction has been obtained using a simulator(HELENA) which needs experimental input data extracted from reverse engineering process. From the results, relation between structural parameters and temperature dependency of electrical characteristics are qualitatively explained to use in the design of discrete and integrated circuits to guarantee the optimal operation of the system.

Key Words : reverse engineering, P-HEMTs (pseudomorphic HEMTs), small signal parameters

1. 서론

HEMTs(High electron mobility transistors)는 1960년에 발표된 앤더슨(Anderson) 모델에 기초를 둔 이종접합(heterojunction)을 사용한다.[1] 1980년 미무라(Mimura)[2]에 의해 HEMTs라고 명명된 이후 현재까지 계속해서 연구되어지고 있다. 초기에는 기존 소자들에 비해 월등히 좋은 특성을 보임에도 불구하고 공정상의 어려움으로 비용 문제에서 일반적인 소자로서 사용되지 못하였다. 그러나 현재 MBE (molecular beam epitaxy) 기술의 발달로 P-HEMTs (pseudomorphic HEMTs), MM-HEMTs (metamorphic HEMTs), LM-HEMTs (lattice matched HEMTs)등 여러 가지 구조로 개발되어지고 있다. 또한 그 응용분야도 광범위해졌다. 특히 저잡음 초고주파수 특성으로 이동 통신용 소자로 많이

개발되고 있으며, LSI 디지털 직접회로의 소자로도 사용되고 있다. 성능면에서는 InP 기판을 사용하는 LM-HEMTs가 뛰어나지만 고가의 InP를 사용하는 것보다는 기계적 강도도 좋고 보다 저가의 MMIC 공정에 적합한 GaAs 기판의 P-HEMTs가 선호되고 있다.[3] 또한 P-HEMTs와 LM-HEMTs의 중간 형태인 MM-HEMTs도 연구 중이다. 본 논문에서는 P-HEMTs의 온도 변화에 따른 DC 특성을 예측하기 위해서 시뮬레이션을 통한 물리적 파라미터 변화에 따른 DC 특성과 소신호 특성을 관찰하였다. 또한 Reverse Engineering 기법을 이용해 실제 소자에 대한 구조를 예측하였다. 실험을 통해 얻은 실제 소자의 측정값과 시뮬레이션 모델의 데이터를 비교하고, 구조별로 어떠한 특성을 가지는가에 대해 해석하여 온도 대비 최적의 모델을 제시할 것이다. 그러기 위해 우선적으로 기본적인 P-HEMTs의 구조와 에너지 밴드 모델을 살펴보고 온도 변화에 따른 각각의 파라미터들의 특성을 살펴본다. 또한 실제 소자의 측정값을 알아보고 시뮬레이션에서 필요한 각각의 구조적 변수들이 미치는 영향에 대해 알아보겠다.

* 건국대학교 전기공학과
(서울특별시 광진구 화양동 1번지 건국대학교,
Fax: 02-447-9186
E-mail : hkahn@kkucc.konkuk.ac.kr)

2. Pseudomorphic HEMTs의 구조 및 특성

2.1 Schematic cross section

기본적인 AlGaAs/GaAs HEMTs의 구조와 구별되는 점은 active layer로 InGaAs를 사용한다는 것이다. 그럼으로써 Single Heterojunction(SH)이나 Double Heterojunction(DH) 구조가 된다. SH의 경우 active layer 하단에 GaAs buffer 층을 바로 접합하고, DH의 경우 supply layer에 delta doping을 하기도 하고 active layer 하단에 도핑된 AlGaAs의 lower barrier를 삽입하기도 한다. 게이트 metal의 경우 g_m 을 증가시키기 위해 L_g 를 줄여야 하지만, 그에 따른 게이트 기생 저항도 커지므로 일반적으로 Schottky 접합 부분의 면적은 줄이고 metal의 위쪽 면적은 넓게 하는 mushroom gate로 제조한다.

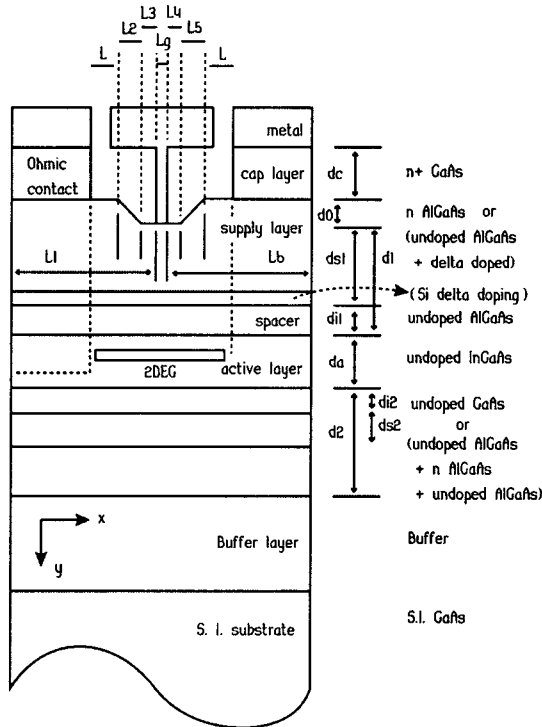


그림 1. AlGaAs/InGaAs P-HEMTs의 단면도.

2.2 에너지 밴드 겹 모델과 물질 파라미터

GaAs/Al_xGa_{1-x}As의 접합과 Al_xGa_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As의 접합에서 각각의 물질들의 파라미터를 살펴보면 표 1과 같이 정리된다.[4,5,6,7] 또한 이를 이용한 에너지 밴드 겹 모델은 그림 2에 나타내었다.

표 1. GaAs/AlGaAs/InGaAs 접합시 물질 파라미터.

	GaAs	Al _x Ga _{1-x} As(x≤0.45)	In _y Ga _{1-y} As
E_g^r	1.424	1.424+1.247x	1.424-1.53y-0.45y ²
$q\chi_e$	4.07	4.07-0.697x	4.07+0.0512x+0.9y-0.24y ²
m_n^*	0.067	0.067+0.083x	0.067-0.044y
a	5.6533	5.6533+0.0078x	5.6533+0.4051y
ϵ	13.18	13.18-3.12x	13.18+1.97y

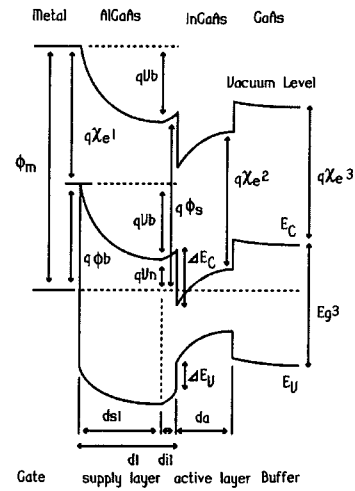


그림 2. P-HEMTs의 에너지밴드 다이어그램.

3. 2DEG 및 온도변화에 따른 변수들

3.1 2DEG의 농도 n_s 와 Fermi 준위 E_F

이종접합에 의해 형성된 양자우물에 2DEG (two dimensional electron gas)가 발생하며, 이러한 2DEG는 양자화된 에너지 준위를 가지면서 channel을 구성하게 된다. 그러므로 이에 대한 양자역학적 해석이 요구되며, 또한 2DEG의 전자밀도가 중요한 파라미터가 된다. 이러한 해석을 위해 Poisson 방정식과 Schrödinger 방정식을 연립해 수치 해석적 방법으로 풀어야 하지만, 시뮬레이션을 위해 여기서는 선형적인 근사화를 이용한다.[8]

$$n_s = \frac{\epsilon_1}{qd_1} (V_g - \Psi_b + \Delta E_C + V_p - E_F) \quad (1)$$

$$V_p = \frac{qN_d}{2\epsilon} (d_1 - d_{il})^2 \quad (2)$$

또한 온도변화에 따른 E_F 와 n_s 의 관계식은 수치 해석적 결과와 가장 잘 부합되는 다음 식을 사용한다.[9]

$$E_F = qa\sqrt{n_s} + b \quad [eV] \quad (3)$$

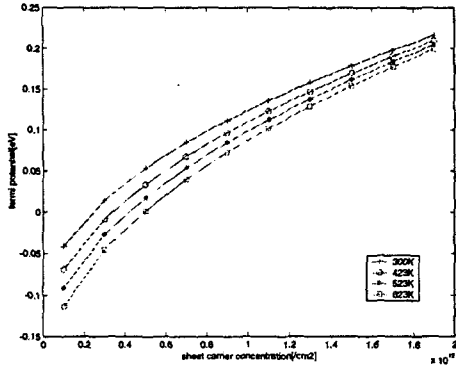


그림 3. 온도에 따른 n_s 와 E_F 의 관계.

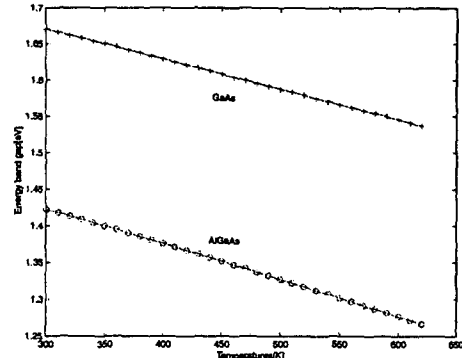


그림 5. 온도에 따른 물질별 에너지 밴드 갭.

여기서,

$$\begin{aligned} a &= 1.6128 \times 10^{-10} T + 1.9258 \times 10^{-7} \\ b &= -2.7476 \times 10^{-10} T - 3.5546 \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (4)$$

3.2 온도에 따른 주요 변수들

내부전위 (V_b)는 그림 2에서 유도 될 수 있으며 페르미 에너지 준위와 전도대역간의 차는 준위밀도와 의 관계에서 얻어진다. 준위밀도(N_c)는 온도에 따라 변하고[7] 내부전위의 도핑농도 및 온도에 대한 관계는 그림 4.에서 나타내었다.

$$N_c = 4.7 \times 10^{17} (T/300)^{1.5} (1 + 1.24x)^{1.5} \quad (5)$$

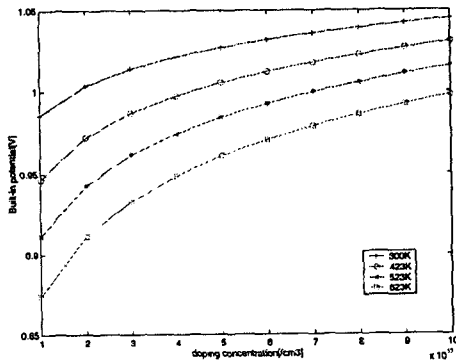


그림 4. 온도에 따른 V_b 와 N_d 의 관계.

또한 물질에 따른 에너지 밴드 갭(E_g^f)도 온도에 따라 변하게 된다.[10]

4. 실험

게이트 길이 0.2 μ m에 폭이 200 μ m인 초저잡음 P-HEMTs 소자를 가지고 측정을 하였다. 온도를 300K

에서 623K까지 올리면서 각각의 V_g 별(-0.4~0.6) I_d - V_d 특성과 $V_d=1.5V$ 일 때 transconductance (g_m)을 조사하였다.

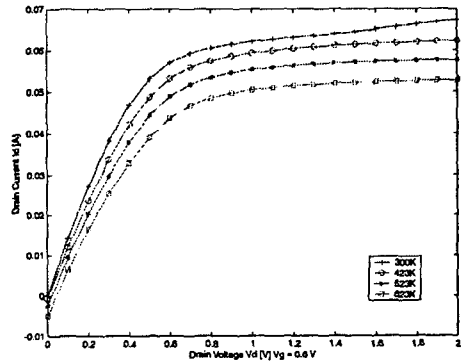


그림 6. $V_g=0.6V$ 일 때 온도에 따른 I_d - V_d 곡선.

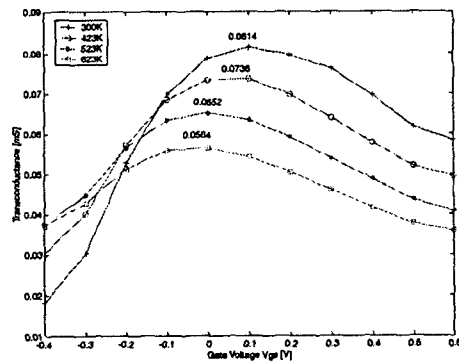


그림 7. 온도에 따른 g_m 곡선.

좀 더 정확한 구조적 물질 파라미터를 구하기 위해 SEM 촬영을 해 각 구간의 길이를 측정하였다. 이로

써 실제 소자가 multiple finger 구조를 가지고 있음을 알 수 있었다. 그러므로 parallel finger geometry 를 위한 기하학적 해석이 요구된다.

5. 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션 모델을 위한 주요 파라미터를 표 2에 나타내었다. 온도변화에 따른 도핑 농도별 V_b , n_s 는 이미 살펴보고 L_g가 작을 경우 contact 저항(R_c)를 무시할 수 없으므로 다음 식으로 R_c를 얻는다.[11]

$$R_c = 2 \left[\frac{Rr}{K(R+r)} \left(\left(\frac{r}{R} + \frac{R}{r} \right) \coth KL + \frac{2}{\sinh KL} \right) + \frac{LRr}{R+r} \right] + \frac{\rho(L_2+L_3+L_4+L_5+L_g)}{Zd_{s1}} \quad (6)$$

$$r = \frac{\rho^+}{d_c \times Z} \quad R = \frac{\rho}{d_{s1} \times Z} \quad (7)$$

$$G = \frac{Z}{\rho(d_0+d_{s1})} \quad K = \sqrt{G(R+r)}$$

표 2. 시뮬레이션에 사용한 파라미터.

GaAs/Al _{0.2} Ga _{0.8} As/In _{0.2} Ga _{0.8} As	
schottky barrier	1.034 [eV]
Al mole fraction x	0.2
In mole fraction y	0.2
1st layer μ_n	1000
1st layer v_{sat}	7 e6
2nd layer μ_n	6000
2nd layer v_{sat}	11 e6
contact resistance	0.0177 [Ω mm]
n_{s0}	1.0417 e12 [$/cm^2$]
L _g (gate length)	0.2 [μ m]
Z (width)	200 [μ m]
d ₁	260 [\AA]
N _d	2.5 e18 [$/cm^3$]

N_d의 증가는 g_m의 최대치에는 별 영향을 미치지 못하고 대신 최대치가 발생하는 V_g 값을 줄일 수 있다. 또한 도핑된 supply layer의 두께가 증가하면 g_m의 최대치는 감소하고 최대치가 발생할 V_g값도 감소한다. spacer layer의 두께인 d₁가 증가하면 g_m의 최대치는 감소하나 최대치가 발생하는 V_g값은 별 차이 없이 약간씩만 감소하게 된다. 마지막으로 AlGaAs에서 Al의 mole fraction이 감소하면 g_m의 최대치는 현격히 감소하다.

참고 문헌

[1] R. L. Anderson, "Germanium gallium arsenide

heterojunctions", IBM J. Res. and Develop., Vol. 4, pp. 283-287, 1960.

- [2] T. Mimura *et al.*, "A new field effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As heterojunctions", Japan. J. Appl. Phys., vol. 19, pp.L225-L227, May. 1980.
- [3] S. Bollaert, *et al.*, "The indium content in metamorphic In_xAl_{1-x}As/In_xGa_{1-x}As HEMTs on GaAs substrate : a new structure parameter", Solid-State Electronics 44, pp. 1021-1027, 2000
- [4] S. Adachi, "GaAs, AlAs, and Al_xGa_{1-x}As : Material parameters for use in research and device applications", *J. Appl. phys.* 58, pp. R1-R29, Aug. 1. 1985.
- [5] S. Adachi, "Material parameters of In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} and related binaries", *J. Appl. phys.* 53, pp. 8775-8792, Dec. 1982.
- [6] S. Adachi, "Physical Properties of III-V Semiconductor Compounds : InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP", Wiley, New York, Appendix, 1992.
- [7] P. C. Chao *et al.*, "DC and Microwave Characteristics of Sub-0.1- μ m Gate-Length Planar-Doped Pseudomorphic HEMT's", *IEEE. Trans. Electron Devices.* 36, pp. 461-473, March, 1989.
- [8] S. Kola, "An Analytical Expression for Fermi Level Versus Sheet Carrier Concentration for HEMT Modeling", *IEEE, Electron Device Lett.*, Vol. 4, pp.136-138, March., 1988.
- [9] H. Ahn *et al.*, "A DC and Small signal model for High Electron Mobility Transistors", *IEEE Tenth biennial UG/M Symposium*, pp. 151-155, May. 1993.
- [10] M. Willander *et al.*, "High Temperature Electronics", Chapman & Hall, pp. 206-211.
- [11] J. Nitin *et al.*, "Modeling and design of GaAs MESFET control devices for Broad-band applications", *IEEE. Trans. Microwave Theory Tech.* vol 38. pp. 109-117, 1990.