

## 단채널 델타도핑 HEMT의 전압-전류 특성에 대한 2차원적 해석

이정호\* · 채규수\*\* · 김민년\*\*

### A Study on the I-V characteristics of a delta doped short-channel HEMT

Jung-Ho Lee\*, Kyu-Su Chae and\*\* Min-Nyun Kim\*\*

**요약** 본 논문은 HEMT 소자의 전류-전압특성을 해석적으로 모델링한 것으로 n-AlGaAs층의 전자농도를 고려하여 Gauss 법칙과 비선형 전하제어모형을 이용하여 2DEG의 전자농도를 구하였고, 채널을 부분적으로 2차원적으로 해석하여 포화전압을 도출하였고, 계산된 결과는 n-AlGaAs의 전자농도를 고려하지 않은 결과와 비교하였을 때 비교적 정확한 전류-전압특성을 보이고 있다.

**Abstract** In this thesis, an analytical model for I-V characteristics of an n-AlGaAs/GaAs Delta doped HEMT is proposed. 2-dimensional electron gas density, and conduction band edge profile are calculated from a self-consistent iterative solution of the Poisson equation. Parameters, e.g., the saturation velocity, 2-dimensional electron gas concentration, thickness of the doped and undoped layer(AlGaAs, GaAs, spacer etc.) are in good agreement with the independent calculations.

**Key Words** : HEMT(high electron mobility transistor), Quantum-well

## 1. 서론

HEMT(high electron mobility transistor)는 캐리어 역할을 하는 전자가스층의 밀도가 약  $10^{12}/\text{cm}^2$  정도로 고밀도이고, 이온화된 도너와 격리되어 있어 전자의 쿨롱 산란이 감소하여 전자이동도가 매우 높은 초고속 반도체 소자로 활용이 적합하다. 이러한 초고속 소자는 밀리미터파(millimeter-wave) 및 마이크로파(micro-wave) 집적회로에 매우 적합한 소자로 채택되어 사용되고 있다. HEMT소자가 지닌 다양한 응용분야와 우수성에 대한 전망을 보다 현실화하기 위해서는 무엇보다 소자의 물리적 현상에 대한 깊은 지식과 정확한 이해가 필요하다. HEMT소자의 동작을 판단하고 이해하는데 사용되는 모의실험(simulation) 방법은 낮은 비용과 보다 정확한 모델링(modeling)의 빠른 판단이 가능하기 때문에 소자 응용에 있어서 매우 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. 이러한 해석적 모델의 정확성은 HEMT소자에서 나타나는 물리적 현상들의 정확한 고찰이 필요하게 되고 여러 가지 전자에 대한 역할을 포함하는 DC 특성에 대

한 구체화된 모델링이 요구된다. 본 논문에서는 이러한 모델링에 적합한 델타도핑된 n-AlGaAs/GaAs HEMT에서의 AlGaAs 영역내 전위분포를 2차원적으로 도출하는 모델링 과정을 주 목표로 하였다. 본 논문의 구성은 우선 표동전류에 의한 전위분포를 설정하고 구간별 전위분포를 설정한 다음 기본이론들을 활용하여 AlGaAs층의 전자농도를 고려한 완전이온화(complete ionization) 된 1차원 포아송(Poisson) 방정식으로 전위 분포 식을 유도한 후 GCA(gradual channel approximation)으로 무시되었던 항을 넣고 수식화하여 2-DEG(2-dimensional electron gas)의 전자밀도를 구하고 전자의 포화속도를 고려한 2차원 Poisson 방정식의 해를 구해 드레인 전류를 구하였다[1, 2]. 결론에서는 이러한 이론들로 구성되어 유도된 수식을 시뮬레이션하고 연구결과를 나타내고 앞으로의 연구과제와 발전 방향을 제시하고 결론을 내렸다.

### 1.1 표동전류에 의한 드레인 전류

일반적으로 전계효과소자(Field effect device)에서 표동전류에 의한 드레인 전류는 수송자 속도(carrier velocity)와 면전하밀도(sheet carrier concentration)로

\*홍익대학교 전자공학과

\*\*천안대학교 정보통신학부

나타내며 다음과 같은 식으로 표현한다.

$$I_D = qZn_s(y)v(y) \quad (1)$$

여기서  $q$ 는 전자 전하량이고  $Z$ 는 게이트 폭이며  $n_s(y)$ 는 면전하밀도(sheet carrier concentration), 또한  $v(y)$ 는 전자속도(carrier velocity)다.

## 2. 본 론

### 2.1 전자속도

전하제어 방정식(charge control equation)은 게이트에서 채널에 전위를 가할 때 채널을 따라 움직이는 어떠한 점  $x$ 에서의 채널 내 2차원 전자가스 농도를 쉽게 알 수 있다. 간단히 식 (2)와 같이 표현된다.

$$qn_s(x) = C_0[V_{GS} - V_{TH} - V(x)] \quad (2)$$

여기서  $C_0$ 는 게이트와 채널사이의 커패시턴스이고  $V_{GS}$ 는 게이트와 소오스 사이의 전압이고  $V_{TH}$ 는 문턱전압(threshold voltage)이다.  $C_0$ 는 식 (3)과 같다.

$$C_0 = \frac{\epsilon_2}{d_i + d_d + \Delta d} \quad (3)$$

또한 본 논문에서는 GaAs에서 전자의 속도  $\mu_n(y)$ 를 해석적 모델에 적용시키기 위해 식 (4)와 같이 제안하여 사용한다. GaAs에서의 전자속도는 전계의 증가에 따라 오버슈트후 포화속도 값을 수렴하는 매우 복잡한 형태로 나타나기 때문에 시뮬레이션 모델에 적용시키는 것은 거의 불가능하다.

$$\mu_n(y) \approx \begin{cases} \frac{\mu_0}{1 + \frac{F}{F_C}}, & F < F_C \\ \frac{v_{sat}}{F}, & F \geq F_C \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $F_C = \frac{2v_{sat}}{\mu_0}$  로서 포화속도일때의 전계를 나타낸다.

#### 2.2.1 구간별 전위분포 설정

2차원전자가스(2-DEG)를 더욱 활성화시키고 양자우물(Quantum well)의 깊이를 더욱 깊게 하기 위해 본 논문에서는 델타도핑( $\delta$ -doping)을 한 HEMT소자를 제안한다. 그림 1은 델타 도핑된 HEMT소자의 단면도와 밴드 다이어그램을 나타내었다.  $x$ 방향으로  $-d_d \leq x \leq -d_i$  구간은 n-AlGaAs영역이고  $-d_i < x \leq 0$  구간은 스페이스(Spacer),  $x > 0$  구간은 i-GaAs영역과 준-

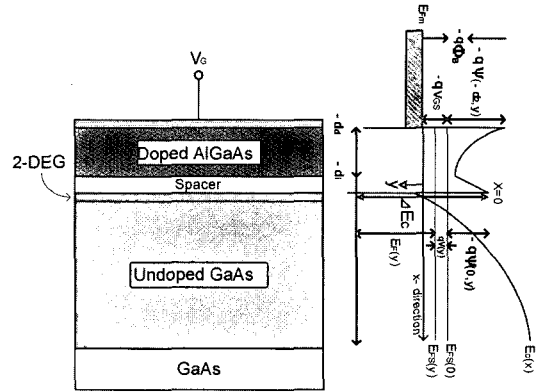


그림 1. HEMT소자의 단면도와 에너지 밴드 다이어그램.

전 GaAs 기판의 영역이다. 또한  $E_{Fm}$ 과  $E_{FS}(0)$ 는 게이트 금속의 페르미 준위와  $qV_{GS}$ 전압에 의한  $y=0$ 에서의 반도체 페르미준위이다.

AlGaAs와 GaAs의 이종접합에 의한 전도대역의 불연속값은  $\Delta E_c$ 로 나타내었다.  $\phi_B$ 는 게이트의 금속과 AlGaAs 경계면의 전위장벽을 나타내었다. 우선  $-d_d \leq x < 0$ 에서 2차원 전위분포를 구하기 위해 포아송 방정식(poisson equation)을 고려한다면 식 (5)와 같이 표현이 가능하다.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \approx -\frac{q}{\epsilon_2} \{p(x, y) - n(x, y) + N_D^+(x)\} \quad (5)$$

식 (5)가 공핍근사(depletion approximation) 적용을 가정하고 완전 이온화(complete ionization), 즉  $N_D(x) = N_D^+(x)$ 로 가정하여 반도체가 상온정도(300°K)에서 동작한다면

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \approx -\frac{qN_D(x)}{\epsilon_2} \quad (6)$$

와 같이 된다. GCA(gradual channel approximation) 즉  $\left| \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right| \gg \left| \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right|$ 을 적용하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \approx -\frac{qN_D(x)}{\epsilon_2} \quad (7)$$

본 논문에서 이온 농도 즉  $N_D(x)$ 를 구간별로 식 (8)과 같이 나타내었다.

$$N_D(x) = \begin{cases} N_D + N_\delta \delta(x + d_i) & -d_0 < x \leq -d_i^- \\ 0 & -d_i^+ < x \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

이때  $d_0 = d_d + d_i$ 이다. 해를 구하기 위해서는 각 구간별로 전위 분포와 포아송 방정식 그리고 구간별로 경

계조조건을 적용시켜야 한다. 경계조건은

$$\begin{cases} \Psi(-d_0, y) = V_G - \phi_B = V_{GS}' \\ \frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{x=d_i} = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \Big|_{x=d_i'} \\ \Psi(-d_i^-, y) = \Psi(-d_i^+, y) \end{cases} \quad (9)$$

우선 n-AlGaAs 영역인  $-d_0 \leq x \leq -d_i$ 에서의 전위분포는 다음과 같이 둔다.

구간 :  $-d_0 \leq x \leq -d_i$ 에서는

$$\begin{aligned} \Psi(x, y) = & V_{GS}' - \frac{qN_D}{2\epsilon_2}(x+d_0)^2 - F_{sp}(y)(x+d_0) \\ & + \frac{qN_\delta}{\epsilon_2}(x+d_0) + \frac{qN_D d_d}{\epsilon_2}(x+d_0) \end{aligned} \quad (10)$$

구간 :  $-d_i \leq x < 0$ 에서는

$$\begin{aligned} \Psi(x, y) = & V_{GS}' - F_{sp}(y)(x+d_0) + \frac{qN_D}{2\epsilon_2}(d_d)^2 \\ & + \frac{qN_\delta}{\epsilon_2}d_d \end{aligned} \quad (11)$$

i-AlGaAs 영역에서의 전계는

$$F_{sp}(y) = \frac{1}{d_d} \left\{ V_{GS}' + \frac{qN_D}{2\epsilon_2}(d_d)^2 + \frac{qN_\delta}{\epsilon_2}d_d - V'(y) \right\} \quad (12)$$

가 되고 와 로 나타내면

$$F_{sp}(y) = \frac{1}{d_d} \left\{ V_{GS}' + V_p + \frac{qN_\delta}{\epsilon_2}d_d - V'(y) \right\} \quad (13)$$

여기서  $V'(y)$ 는  $\Psi(0, y)$ 에서의 전계,  $q$ 는 전자 전하량의 절대값이며,  $N_D$ 는 AlGaAs의 도핑농도이며  $\epsilon_2, \epsilon_1$ 은 각각 AlGaAs와 GaAs의 유전율이다. 또한  $F_{sp}(y)$ 는 i-AlGaAs 영역의 시작 위치인  $x=-d$ 에서의 전계분포를 나타낸 것이다. 구간별로 나뉜 전위분포는 단채널이 되어 GCA로 무시되었던  $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2}$  항을 고려하여야 한다. 따라서 식 (7)을 단채널 해석에 맞게 GCA를 고려해서 수식을 전개하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = & \quad (14) \\ \begin{cases} -\frac{d^2 F_{sp}(y)}{dy^2}(x+d_0) = \left(1 + \frac{x}{d_0}\right) \frac{d^2}{dy^2} \\ \frac{d^2 V}{dy^2} + \frac{x}{d_0} \frac{d^2 V}{dy^2} = \left(1 + \frac{x}{d_0}\right) \frac{d^2 V}{dy^2} \end{cases} \end{aligned}$$

따라서 식 (7)은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \left(1 + \frac{x}{d_0}\right) \frac{d^2 V}{dy^2} = \begin{cases} -\frac{qN_D}{\epsilon_2} \\ 0 \end{cases} \quad (15)$$

경계조건은 1차원 포아송 방정식의 해를 구할 때와 같은 경계조건을 사용한다. 따라서 구간별 전위분포는 식 (16), (17)과 같이 표현된다.

구간 :  $-d_0 \leq x \leq -d_i$ 에서는

$$\begin{aligned} \Psi(x, y) = & V_{GS}' - \frac{qN_D}{2\epsilon_2}(x+d_0)^2 + \frac{(x+d_0)^3}{6d_0} \frac{d^2 V}{dy^2} + \\ & \left\{ \frac{qN_D}{\epsilon_2}d_d + \frac{qN_\delta}{\epsilon_2} + \frac{d_0 d^2 V}{2 dy^2} - F_{sp}(y) \right\} (x+d_0) \end{aligned}$$

구간 :  $-d_i \leq x \leq 0$ 에서는

$$\begin{aligned} \Psi(x, y) = & \left\{ \frac{d_0 d^2 V}{2 dy^2} - F_{sp}(y) + \frac{qN_\delta}{\epsilon_2} \right\} (x+d_0) \\ & + \frac{(x+d_0)^3}{6d_0} \frac{d^2 V}{dy^2} + V'(y) - \frac{d_0^2 d^2 V}{6 dy^2} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (16), (17)에서 경계조건을 만족하는  $V'(y)$ 는 아래식과 같다.

$$V'(y) = V_{GS}' + \frac{qN_D}{2\epsilon_2}(d_d)^2 + \frac{d_0^2 d^2 V}{6 dy^2} \quad (18)$$

스페이스 영역의 전위분포를 구하면

$$\begin{aligned} \Psi_i(y) = & \Psi_i(-d_i, y) \\ = & V_{GS}' + \frac{qN_D}{2\epsilon_2}(d_d)^2 \\ & + \left\{ \frac{d_0 d_d}{2} - \frac{(d_d)^3}{6d_d} \right\} \frac{d^2 V}{dy^2} \\ & + \frac{qN_\delta}{\epsilon_2}d_d - F_{sp}(y)d_d \end{aligned} \quad (19)$$

양자우물에서의 전하 밀도  $n_s(y)$ 은

$$\begin{aligned} n_{sp}(y) = & \frac{\epsilon_2}{q d_0} \{ V_{GS}' + V_p + V_\delta - \Psi_0(y) \\ & + \left( \frac{2d_0^3 - 3d_0 d_i^2 + d_i^3}{6d_0} \right) \frac{d^2 V}{dy^2} \} \end{aligned} \quad (20)$$

이로 HEMT의 에너지 밴드 구조로부터  $\Psi_0(y)$ 를 구할 수 있다.

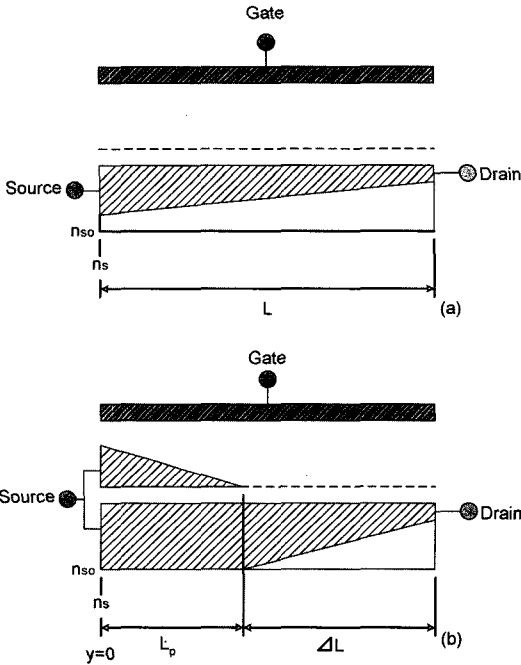


그림 2. 채널길이에 따른 전하분포 변화.

$$\Psi_0(y) = V(y) + \frac{1}{q}[E_F(y) - \Delta E_c] \quad (21)$$

이를 정리하면

$$F_{sp}(y) =$$

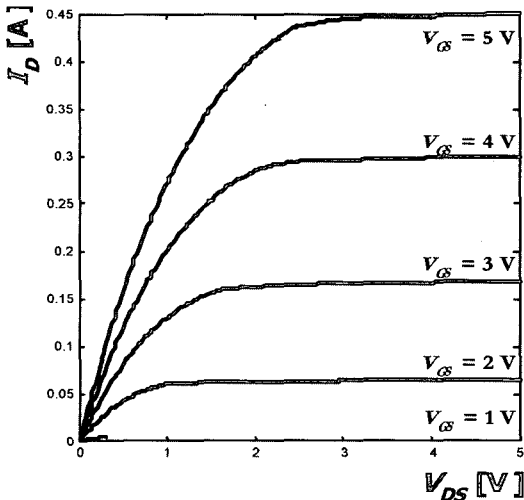


그림 3. 장채널에서의 게이트 전압에 따른 드레인 전류-드레인 전압 특성.

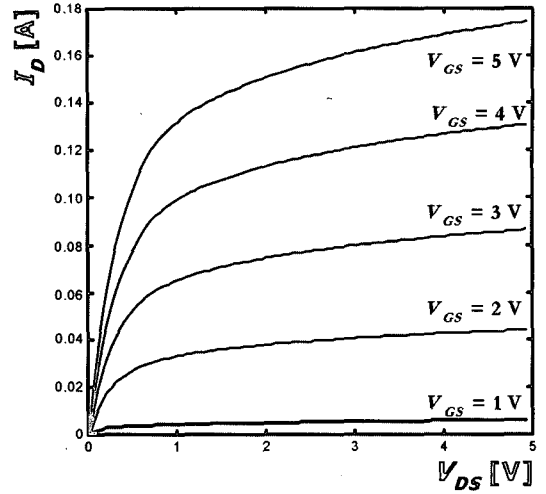


그림 4. 단채널에서의 게이트 전압에 따른 드레인 전류-드레인 전압 특성.

$$\frac{1}{d_0} \left[ V_{GS}' + V_p + V_{\delta} - V(y) - \frac{1}{q}[E_F(y) - \Delta E_c] + \left( \frac{2d_0^3 - 3d_0d_i^2 + d_i^3}{6d_0} \right) \frac{d^2V}{dy^2} \right] \quad (22)$$

와 같다. 포화영역을 고려한 드레인 전류는

$$I_D = Zq\mu_n(y)n_s(y) \frac{dV}{dy} \quad (23)$$

와 같이 표현된다.

채널내의 전자속도는 어느 위치에 이르러서는 포화된다. 드레인 바이어스를 더욱 높이면 드레인에서 소오스로의 전계가 증가하여 유효채널의 길이가 줄어든다. 따라서 선형영역과 포화영역으로 나누어 영역별로 전류 연속성을 생각해야 한다. 그림 2는 이러한 채널길이에 따른 전하분포의 변화를 나타내었다.

### 3. 결과 및 토론

집적화를 위해서는 소자의 게이트 길이를 짧게 만들어야 한다. 게이트 길이를 짧게 만들 경우 전류가 흐르는 채널을 더 이상 1차원적 해석으로 이해하기 곤란해진다. 채널의 길이가 상대적으로 짧아지기 때문에 이를 해석하기 위해서는 2차원 포아송 방정식으로부터 드레인 전류와 드레인 소오스 사이의 전압 변화를 관찰해야 한다. 본 논문에서는 DC 특성도출을 위해 먼저 채널을 단채널과 장채널로 나누어 비교해 보았다[3]. HEMT 소자의 전기적인 특성에 대한 연구는 R. L. Anderson이 제시한 바 있고 수치 해석적 풀이의 어려움 때문에

1차원 해석을 하였다[5]. 장채널과 단채널 해석에 있어 상대적으로 장채널의 경우에는 채널을 단방향으로 보는 것에 대해 타당하지만 채널이 상대적으로 짧은 단채널 HEMT 소자의 해석에서는 단방향으로 수송자의 흐름을 근사화 하는 것은 다소 무리가 있다. 정확한 소자의 모델링을 위해서라도 수치적 해석은 필요하며 소자의 모델링을 정형화 시켜야 한다.

본 논문에 사용된 단채널은  $0.3 \mu\text{m}$ 로 장채널의  $1/10$ 로 설정하였다. 모의실험 결과 채널길이가 짧을수록 출력 컨덕턴스가 증가하는 현상을 확인 할 수 있었고 장채널과 단채널에서 게이트 전압에 따른 드레인 전류의 변화가 다른 소자에 비해 적음을 알 수 있었다. 또한 기존의 HEMT 소자보다 포화영역이 다소 빨리 진행되어 짐을 확인 할 수 있었다[3, 4].

### 참고문헌

- [1] T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, & K. Nanbu, "A new field-effect transistor with selectivity doped GaAs/n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterojunction", Japan J. Appl. Phys., Vol. 19, no. 5, pp. 225-227, 1980.
- [2] R. L. Anderson, "Experiments on Ge-GaAs heterojunctions", Solid State Electron., Vol. 5, pp. 341-351, 1962.
- [3] H. Mitra, B. B. Pal, S. Singh & R. U. Khan, "Optical Effect in InAlAs/InGaAs/InP. MODEFT", IEEE. Trans. Electron Device , Vol. 45, pp. 68-77, 1998..
- [4] D. Xu, H. HeiB, S.Kraus, M. Sexl & G. Bohm, G. Trankle, G. Weimann, & G. Abstreiter, "High-Performance Double - Modulation - Doped InAlAs/InGaAs/InAs HFET's", IEEE. Trans. Electron Device , Vol. 7, pp. 323-326, 1997.
- [5] S. K. Islam, F. C. Jain, G. Zhao & E. Heller "Design and analysis of InGaN-GaN Modulation doped field-effect transistors(MODEFTs)", Inter. Journal of infrared & millimeter waves, Vol. 19, no. 12, pp. 1633 - 1647, 1998.