

온도변화에 따른 HEMT의 DC 특성 연구

Temperature dependency of dc Characteristics for HEMTs

김진욱, 황광철, 이동균, 안형근, 한득영

(Jin-Wook Kim*, Kwang-Chuel Hwang, Dong-Kyun Lee, Hyung-Kuen Ahn, Duek-Young Han)

Abstract

In this paper, an analytical model for I-V characteristics of a HEMTs is proposed. The developed model takes into account the temperature dependence of drain current. In high-speed ICs for optical communication systems and mobile communication systems, temperature variation affects performance; for example the gain, efficiency in analog circuits and the delay time, power consumption and noise margin in digital circuits. To design such a circuit taking into account the temperature dependence of the current-voltage characteristic is indispensable. This model based on the analytical relation between surface carrier density and Fermi potential including temperature dependent coefficients.

Key Words(중요용어) : temperature, dc, HEMT, surface carrier density, Fermi potential

1. 서론

1960년대에 Anderson[1]에 의해서 이종접합(heterojunction)의 경계면에 전자가 반전 또는 축적될 수 있다고 예측된 후, 1980년 Mimura et al.[2]이 AlGaAs/GaAs 구조를 연구하여 HEMT(high electron mobility transistor)라고 처음으로 발표하였다. 이후 이에 대한 연구가 다각적으로 진행되고 HEMT에 대한 연구에 관심이 모아지기 시작했다. 그러나 고속, 저전력, 초고주파소자로써의 가능성에도 불구하고 초기에는 공정의 어려움으로 인한 높은 비용의 문제로 일반적인 소자로서 사용되지 못하였다. 그러나 MBE(molecular beam epitaxy)기술을 이용한 공정 기술이 급속도로 향상되어 multichannel HEMT, p-HEMT, δ -doped HEMT등과 같은 여러 구조의 HEMT소자가 제안되었다.

디지털과 초고주파 집적회로의 CAD응용을 위한

간단하고 빠른 모델이 필요하다. 이러한 해석적 모델의 정확성은 HEMT에서 나타나는 물리적인 현상들을 얼마나 정확하게 고려하는가에 달려 있다. 특히 온도변화가 아날로그 회로에서 게인(gain)과 효율에 영향을 미치고, 디지털회로에서는 시간 지연과 전력손실등의 특성에 영향을 미치므로 회로를 설계할 때 온도변화에 대한 영향을 고려해야 한다[3].

따라서 온도 변화에 대한 전류-전압 특성을 잘 설명할 수 있는 정확한 해석적인 모델이 필요하다. 이를 위해서 HEMT의 전하조절모델과 2DEG(two dimensional electron gas)의 밀도와 Fermi 준위의 온도에 대한 관계를 이용해서 온도변화에 대한 전류-전압식을 유도하였다.

2. HEMT의 특성 및 구조

2.1 HEMT의 전자 전송 특성

보통의 MESFET에서는 도핑이 된 channel의 전하층을 조절하여 전류-전압특성을 구현하지만, HEMT에서는 bandgap이 큰 물질에 n-type 불순물을 주입하고 bandgap이 작은 물질에는 의도적으로 불순물을 주입하지 않은 channel층을 만든다. 이때

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

bandgap이 큰 물질 내의 자유 전자들은 bandgap이 작은 물질로 이동하게 되고, channel층에는 이온화된 불순물이 거의 없어 이온화된 불순물과 전자 사이의 Coulomb의 힘에 의한 상호작용이 감소되므로 격자 산란(scattering)을 줄일 수 있다. 그 결과 캐리어의 이동도(mobility)를 증가시키고 소자의 전달 전도도(transconductance)를 증가시킨다[3].

2.2 AlGaAs/GaAs HEMTs

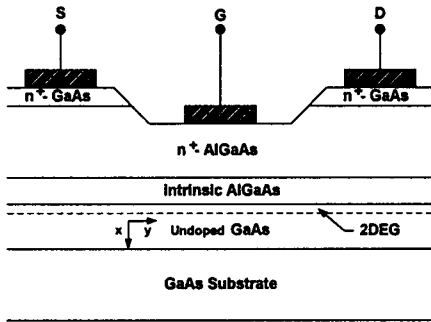


그림1. AlGaAs/GaAs HEMT 소자의 단면도

AlGaAs/GaAs HEMT(High electron mobility transistor)의 기본적인 구조는 넓은 금지대역(wide bandgap energy)을 갖는 도핑이 된 물질(AlGaAs)과 좁은 금지대역(narrow bandgap energy)을 갖고 도핑이 되지 않은 물질(GaAs)의 두 개의 layer로 구성된다. AlGaAs/GaAs 두 물질간의 전자친화도의 차이(difference in the electron affinity) 때문에 도핑된 AlGaAs layer의 전자들은 GaAs layer로 이동하게 되고, MOSFET의 반전층과 비슷한 2차원의 전도층(conducting layer)을 형성한다. 이중접합면에 형성된 전위우물의 폭은 매우 좁고 접합면에 수직인 방향으로 몇 개의 양자화된 에너지 레벨로 한정되어져서, 대부분의 경우 2차원의 전자 개스(Two-Dimensional Electron Gas)처럼 취급한다. 그림 3과 그림 4에 일반적인 HEMT의 단면도와 에너지밴드 다이어그램을 나타내었다. HEMT는 semi-insulating GaAs를 기판으로 사용하여 기판전류를 막을 수 있으며, 이 위로 이중접합을 구성하게 된다. 각 층의 두께와 도핑 농도는 소자특성과 2DEG의 특성을 결정하는 요소가 되는데 normally-on과 normally-off 소자는 바로 이러한 파라미터를 어떻게 결정하느냐에 따라 제조되어진다[4]. 게이트는 Schottky contact으로 구성되어 있으며, 낮은 저항값을 위해 소스와 드레인인 ohmic contact으로 구

성되어 있다.

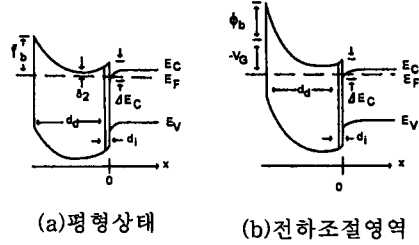


그림 2. AlGaAs/GaAs HEMT의 에너지밴드

HEMT의 각층의 전하, 특히 2DEG의 밀도는 그림 5와 같이 게이트전압에 따라 변화하게 되어 전기 효과 작용이 일어나게 된다.

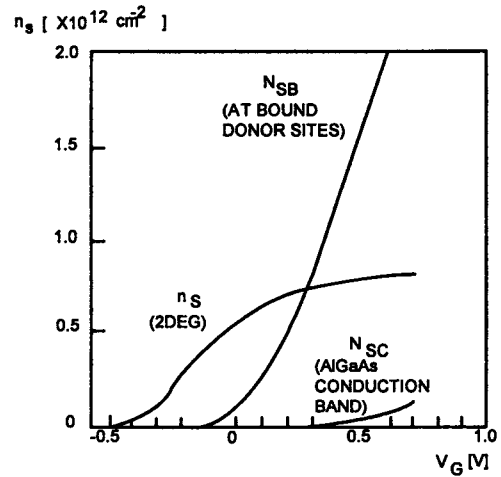


그림3. AlGaAs/GaAs HEMT의 전하조절

3. Two dimensional electron gas(2DEG)

HEMT에서는 이중접합에 의해 전도대역에 양자우물이 형성되며, 이러한 양자우물의 전위장벽 안에 전자들이 갇히게 되어 2DEG를 형성하게 된다. 이러한 2DEG는 양자화된 에너지 준위를 가지게 되고 HEMT의 channel을 형성하게 되어 이에 대한 양자역학적인 해석이 필요하게 된다. 이를 위한 가장 정확한 방법은 정전기적 전위를 구하기 위한 Poisson 방정식과 전자의 양자역학적인 분포를 알 수 있는 Schrödinger 방정식을 연립하여 해를 구하는 것이다.

유효 질량 근사화(effective mass approximation)를

바탕으로, 2차원 전자 개스(2DEG) 내의 전자의 분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(x, \mathbf{r}) = \psi(x)\exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) \quad (1)$$

여기서 \mathbf{r} 과 \mathbf{q} 는 각각 접합면에서의 위치벡터와 파동벡터를 나타내고, x 는 접합면에서 GaAs 쪽으로의 거리를 나타낸다. 파동함수(wave function) $\psi(x)$ 는 양자우물내의 양자화된 각각의 에너지밴드에 해당하는 파동함수 $\psi_i(x)$ 들의 합을 나타내며, 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\psi(x) = \sum \psi_i(x) \quad (2)$$

각각의 파동함수 $\psi_i(x)$ 는 Schrödinger 방정식을 만족시켜야 한다.

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dx^2} \psi_i(x) + [E_i - V(x)]\psi_i(x) = 0 \quad (3)$$

위 식에서 \hbar 는 reduced Plank 상수 ($\hbar = \frac{h}{2\pi}$), m^* 는 GaAs의 전도대에서의 전자의 유효질량, E_i 는 양자우물 내의 i 번째 에너지 밴드의 최소 에너지, 그리고 $V(x)$ 는 전위에너지를 의미한다. 이중접합면에 형성된 양자우물의 장벽을 무한 에너지 장벽이라고 가정하면, 양자우물의 경계조건은 다음과 같다.

$$\psi(0) = 0, \quad \psi(\infty) = 0 \quad (4)$$

전위에너지 $V(x)$ 는 다음과 같은 Poisson 방정식의 해를 만족시켜야 한다.

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{q\rho(x)}{\epsilon_1} \quad (5)$$

Poisson 방정식의 공간-전하 밀도(space-charge density), $\rho(x)$,는 이중접합계면의 2DEG의 농도와 GaAs층의 background 도핑농도로 구할 수 있다.

$$\rho(x) = q(N_{D1} - N_{A1}) - q \sum_{i=0}^{\infty} n_i \psi_i^2(x) \quad (6)$$

$$n_i = DkT \ln(1 + \exp[(E_F - E_i)/kT]) \quad (7)$$

여기서 ϵ_1 은 GaAs물질의 유전율, q 는 전자의 전하량, k 는 Boltzmann's 상수, T 는 절대온도, E_F 는 양자우물내의 Fermi level을 나타내고, D 는 2차원 시스템의 준위밀도(density of states)를 의미한다.

4. HEMT의 전압-전류 특성

4.1 페르미 레벨(E_F)과 표면전자농도(n_s)

식(7)과 E_i 의 관계식을 결합하면 표면 전자의 농도(sheet concentration)와 페르미 레벨의 관계를 그

림4와 같이 나타낼 수 있다[6].

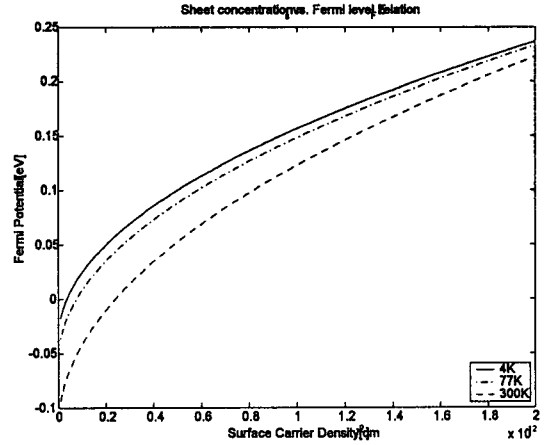


그림 4. 온도에 따른 n_s 와 E_F 의 관계

온도에 따른 변수를 사용하여 E_F 와 n_s 의 해석적인 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$E_F = qa\sqrt{n_s} + b \quad (8)$$

$$a = 1.6128 \times 10^{-10} T + 1.9258 \times 10^{-7}$$

$$b = -2.7476 \times 10^{-10} T - 3.5546 \times 10^{-2}$$

가장 많이 사용되는 3가지 온도에 대한 계수 a, b 를 표1.에 나타내었다.

표 1. n_s 와 E_F 관계식의 계수 a, b

| | 300K | 77K | 4K |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $a[V \cdot cm]$ | 2.42×10^{-7} | 2.06×10^{-7} | 1.95×10^{-7} |
| $b[eV]$ | -0.118 | -0.057 | -0.037 |

4.2 표면전자농도(n_s)와 게이트전압

그림2.(b)처럼 넓은 에너지 밴드갭을 갖는 물질쪽에 Schottky 접합을 통해 게이트 접합을 만들고, 게이트 전압을 통해 표면전자의 농도를 조절할 수 있다. Schottky 접합과 이중접합 사이의 전하조절영역은 모두 이온화되고 공핍근사식을 적용할 수 있다고 가정하면,

$$n_s = \frac{\epsilon_2}{qd} [V_g - \phi_m - E_F + V_{\rho 2} + \Delta E_c] \quad (9)$$

여기서 ϵ_2 는 AlGaAs의 유전율, d 는 AlGaAs의 두께, ΔE_c 는 전도대의 불연속차, ϕ_m 은 Schottky barrier의 높이, $V_{\rho 2}$ 는 핀치오프전압을 각각 나타낸다. 온도변화에 대한 n_s 와 E_F 의 관계인 식(8)을 식

(9)에 대입하고 정리하면, 채널내에서의 전압에 대한 전자의 농도의 관계식을 구할 수 있다.

$$n_s(y) = \left(\frac{\epsilon_2 a}{2d} \right)^2 + Y - \frac{\epsilon_2}{qd} V(y) - \frac{\epsilon_2 a}{d} \sqrt{Y - \frac{\epsilon_2}{qd} V(y)} \quad (10)$$

여기서

$$Y = \left(\frac{\epsilon_2 a}{2d} \right)^2 + \frac{\epsilon_2}{qd} [V_g - \Phi_m + V_{ds} + \Delta E_c - b]$$

4.3 속도와 전계

속도-전계 관계식은 전계에 대해 일정하게 속도가 증가하는 영역 ($E < E_c$)과 전자가 포화된 이후 일정한 속도를 유지하는 포화영역 ($E > E_c$)으로 나누었다[7].

$$v = \mu_0 \frac{E}{1 + \frac{E}{E_c}}, \quad E < E_c \quad (11)$$

$$= v_{sat}, \quad E > E_c$$

여기서, μ_0 는 낮은 전계의 이동도, E_c 는 임계전계, v_{sat} 은 전자의 포화속도를 각각 나타낸다.

4.4 드레인 전류

앞에서 구한 식(10)과 식(11)을 이용해서 선형영역에서 채널에 형성된 전자의 드리프트 전류성분은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I = W q n_s(y) \mu_0 \frac{E}{1 + \frac{E}{E_c}} \quad (12)$$

$$Z = \int_0^{V_0} n_s(y) dV(y) \text{라고 하면}$$

$$I = \frac{1}{L + \frac{V_D}{E_c}} \mu_0 q W Z \quad (13)$$

채널의 전압이 V_{dsat} 보다 커지면 전자의 속도는 포화되어 일정해지고 소자는 포화영역에서 작동한다. 포화영역에서의 드레인 전류는 다음과 같다.

$$I_d = I_{dsat} \frac{L_g + da}{L_g - L_d + da} \quad (14)$$

$$\text{여기서, } da = \frac{V_{sat} - V(0)}{E_c}$$

5. 결론

온도변화를 포함하고 있는 페르미 레벨 (E_F)과 전

하 농도 (n_s)의 관계식을 바탕으로 전하조절 모델을 사용하여 온도 변화에 대한 HEMT의 전류-전압특성을 고찰할 수 있는 전류식을 유도하였다.

참고 문헌

- [1] R. L. Anderson, "Germanium-gallium-arsenide heterojunctions", IBM J. Res. and Develop., Vol. 4, pp. 283-287, 1960.
- [2] T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, and K. Nanbu, "A new field effect transistor with selectively doped GaAs/n-AlxGal-xAs heterojunctions", Japan. J. Appl. Phys., vol. 19, pp. L225-L227, May. 1980.
- [3] N. Matsuno, H. Yano, H. Hida, and T. Maeda, "An accurate HJFET current-voltage model including temperature dependence for a circuit simulator", Solid state Electronics, vol. 43, pp. 977-984, 1999.
- [4] H. Morkoc, S. G. Bandy, R. Sankaran, G. A. Antypas, and R. L. Bell, "A study of High-Speed Normally Off and Normally On AlGaAs Heterojunction Gate GaAs FET's(HJFET)", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 25, No. 6, 1978.
- [5] G. Ji, T. Henerson, C. K. Peng, D. Huang, H. Morkoc, "Analysis of Energy States in Modulation Doped Multiquantum Well Heterostructures", Solid-State Electronics, Vol. 33, No. 2, pp.247-258, 1990.
- [6] H. Ahn, M. El. Nokali, "A DC and Small signal model for high electron mobility transistor", Proceedings of the Tenth Biennial UGIM Symposium, pp.151-155, 1993.
- [7] H. Rohdin, and P. Roblin, "A MODFET dc Model with Improved Pinchoff and Saturation Characteristics", IEEE Trans. Electron Devices. Vol. 33, No. 5, 1986.