

GaAs MESFET의 채널전하에 의한 전기적 특성해석

원 창 섭, 홍 재 일
 동서울대학

Electrical Characteristics of GaAs MESFET's Considering Channel Charge

Chang-sub Won, jea-il Hong
 Dong-seoul College

Abstract - In this paper, we examined channel charge which occurs in electron accumulation after electron velocity saturation. Generally, short gate GaAs MESFET show, saturated electron velocity leading to current saturation. When electron velocity is saturated, depletion layer is still open channel and it plays a key role in deciding saturation current mode we proposed channel charge model in channel after electron velocity saturation.

1. 서 론

GaAs MESFET은 게이트의 구조가 금속과 반도체의 접합으로만 이루어져 있으므로, 다른 반도체 소자의 제작공정 보다 제작 공정이 단순하다. 그러므로 제작단가가 싸고, 수율이 높으며, 현재 반도체의 특성인 좀더 작은 규모의 게이트길이를 가지는 소자를 제작할 수 있다. 그러나, MS접합에 의한 공핍층을 사용하여 게이트 하부에 전계를 형성하므로, 누설전류가 상대적으로 크며, 항복전압이 작게 된다. 또한 증가형 소자이므로 회로를 제작할 때 게이트전압이 음의 전압을 인가하여야 함을 고려하여야 한다.

본 논문은 GaAs MESFET을 해석하기 위하여 초기의 Shokly 모델에 기반을 두고 속도포화가 일어난 후의 채널내에 전하가 존재한다는 것을 가정하고, GaAs MESFET의 전기적 특성을 해석하려고 한다. 본 논문에서도 속도 포화가 일어나기 전까지는 경사채널근사로 채널이 공핍층에 의하여 높이가 줄어들 것이라 사료된다. 그러나 속도포화가 일어나는 점에서 채널 영역은 소스영역으로부터 들어온 전자가 드레인영역에서 속도가 포화되므로 채널을 빠져나가지 못하고 드레인 영역에서 쌓이게 된다고 판단하고 있다. 그러므로 채널에 쌓인 전하가 게이트의 전위장벽에도 영향을 주고, 또한 전위장벽의 영향이 게이트 누설전류를 감소시키고, 전류전압특성을 변화시키는 것으로 사료하고 있다.

2. 채널전자의 축적과 채널전하

FET의 가정 중에서 가장 일반적인 것은 경사 채널 근사 이다. 이것은 다음과 같은 식으로 설명할 수 있다.

$$\frac{\partial V}{\partial y} \geq \frac{\partial V}{\partial x} \tag{2.1}$$

2.1 식에서 y방향은 채널의 수직 방향이고 x방향은 채널과 평행한 방향이다. 이 경사 채널 근사는 "길이에 대

한 인가된 전압의 변화 즉 전계가 채널길이에 대하여 수평방향보다 수직 방향성분이 크다"라는 것이다. y방향의 전계는 전자를 이동시키는 힘의 원천으로 이동도와 관계하여 전자의 속도를 증가시켜 전류를 크게 하는 역할을 하며, x방향의 전계는 전자의 이동을 방해하는 것으로, 공핍층의 두께를 조절하여 채널 영역의 전도율을 조절함으로써 전류를 제한하는 역할을 한다. 현재와 같이 게이트의 길이가 축소되기 이전의 JFET과 같은 경우, 채널의 두께 즉, y가 채널의 길이 x보다 그 길이가 상당히 길었으므로, y방향의 전압 변화율인 y방향 전계의 영향이 크게 되므로 일정 전압이상에서는 전류가 포화되는 특성을 갖는다. 그러므로 채널내의 물리적인 특성과 형태를 해석하기 위하여, 경사 채널 근사 가설을 적용하여 1차원적으로 해석함으로써 소자의 동작 특성을 이해할 수 있다.

그런데, 소자의 집적도가 증가시키기 위하여 또는 주파수 특성을 좋게 하기 위하여 게이트의 길이가 줄어들고, 일정 부분이상의 채널 높이를 가지는 소자에서 채널내의 전계가 높아지면, x방향의 전계가 높아져 공핍층이 닫히기 전에 전자의 속도 포화가 발생한다. 이러한 속도의 포화는 전류의 포화를 만들게 된다. 실제적인 실험에서도 공핍층이 채널을 덮는 전위인 핀치오프 전압이 발생하기 전에 전류의 포화가 발생하고, 이것은 채널내의 전자의 속도 포화에 기인한 것으로 생각된다.

전자 속도 포화로 전류가 포화된 이후, 공핍층은 정지할 것으로 사료된다. 만일 공핍층이 정지하지 않고, 전자의 속도가 일정한 상태에서 전자가 통과하는 단면적인 줄어들게 된다면, 전류는 단면적인 줄어드만큼, 공핍층이 늘어난 만큼 줄어들 것이다. 그러나 전류는 줄어들지 않고, 반대로 늘어나고 있다.

그림 2.1은 x=L인 지점인 드레인 쪽에서의 에너지 다이어그램을 나타내고 있다. 드레인 전압이 0인 경우는 그림2.1.5에서 곡선 a와 같고, 그때의 공핍층길이는 W_0 이다. 드레인 전압을 증가시키면, 반도체 전도대역의 에너지 준위는 아래쪽으로 내려가게 된다. 속도 포화가 시작되는 전압 V_{sat} 에 도달한 전도대 에너지 준위 곡선이 b이다. 이때의 공핍층은 W_{sat} 이다. 드레인에 포화 전압 V_{sat} 을 넘어서는 전압 V_D 를 인가하면 곡선c와 같이 전도대 에너지 준위 곡선이 더 아래로 내려가고, 공핍층 또한 W_D 와 같이 넓어져야 하지만 실제로는 채널에 쌓인 전자에 의한 전압과 포화지점 이후의 저항성분에 의한 전압에 의하여 y 방향의 전계는 더 증가하지 못하고 채널 영역에 머물게 된다.

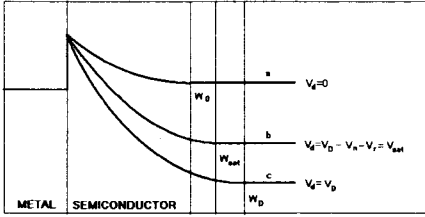


그림 2.1 드레인 영역에서의 에너지 다이어그램

그림 2.1에서 포화된 이후의 전압 V_D 는 다음과 같이 표현한다.

$$V_{sat} = V_D - V_n - V_r \quad 2.2$$

여기에서 V_n 는 채널내에 쌓인 전하에 의한 전압이다. 포화가 일어나는 점 에서부터 드레인쪽 게이트 끝 지점인 $x=L$ 인 지점까지의 전자에 의한 전위이다. 그리고, V_r 은 포화구간에서의 채널영역에서의 저항 성분에 의한 전압강하이다.

V_r 은 채널의 저항률과 채널의 높이에 의해 변화하게 된다. 채널의 두께가 커지면 V_r 은 커지게 된다. 그리고, 전자의 농도가 증가하게 되면, V_r 은 작아지게 된다. 그러므로 채널의 두께가 작아지는 영역 즉 게이트의 전압이 음의 방향으로 증가하게 되면, V_r 의 성분이 커지게 되어, V_n 의 성분이 작아지게 되고, 채널이 길이가 긴 형태의 효과를 가지게 된다.

채널의 전자의 농도와 이에 의한 전압은 공핍층과 저항성분과의 관계 등으로 부터 직접적으로 구할 수 없다. 그래서 본 논문에서는 포화 구간 내에서의 전자의 농도를 일차원적 증가로 가정할 것이다. 그리고, 그 특성들을 분석하여 근접한 농도를 구하려 한다.

우선 전자의 농도를 x 의 거리에 대한 일차원적인 함수라고 하자

$$n = Ax + c1 \quad 2.3$$

x 의 구간은 포화된 영역 이후로서

$$P < x < L \quad 2.4$$

구간에서 식을 적용할 수 있다. 그리고, P점에서는 불순물의 농도와 같으므로

$$c1 = N_D - AP \quad 2.5$$

그러므로 전자의 농도는

$$n = A(x - P) + N_D \quad 2.6$$

이다.

이제 기울기 A에 대하여 고려하여 보면, A는 결과 값

이 농도이어야 하므로, 농도/거리로 표현되어야 한다. 그리고, 전자의 농도에 의한 전압의 영향은 게이트 전압에 영향을 받는 것으로 설명하였다. 그러므로 게이트의 전압에 대하여 농도의 영향을 줄 수 있는 변수이어야 한다. 그래서 농도는 다음과 같은 관계를 가지고 있는 것으로 사료된다.

$$A \propto \frac{N_D}{W_{sat}} \quad 2.7$$

그러므로 상수 k를 가정하여,

$$A = k \frac{N_D}{W_{sat}} \quad 2.8$$

로 놓을 수 있다.

3. 채널전하에 의한 전위

채널의 전기적 성질을 알기 위해, 식 2.6에서 축을 변경하여 속도 포화가 일어나는 포화점을 원점으로 이동하여 식을 다시 정리하면

$$n = Ax + N_d \quad 3.1$$

전자의 밀도가 n 이하고 전하밀도를 ρ_n 이라 하면

$$\rho_n = -q\Delta n = (n - N_D) \quad 3.2$$

음의 부호는 전자에 의한 전하이므로 사용하였고, 전위를 구하기 위하여 Poisson 방정식을 적용하면,

$$\frac{d^2 V_n}{dx^2} = -\frac{\rho_n}{\epsilon} = \frac{q\Delta n}{\epsilon} = \frac{qAx}{\epsilon} \quad 3.3$$

이것을 한번 적분하면,

$$\frac{dV_n}{dx} = \frac{qA}{2\epsilon} x^2 + C_1 \quad 3.4$$

$x=0$ 에서의 전계는 0이므로 계수 $C_1 = 0$ 이므로

$$\frac{dV_n}{dx} = \frac{qA}{2\epsilon} x^2 \quad 3.5$$

이것을 한번 더 적분하면

$$V_n = \frac{qA}{6\epsilon} x^3 + C_2 \quad 3.6$$

$x = 0$ 에서의 전위는 0이므로, 채널 내에 쌓인 전자에 의한 전위는 다음과 같다.

$$V_n = \frac{qA}{6\epsilon} x^3 \quad 3.7$$

속도 포화가 일어나고 이 포화점을 기준으로 하여 캐리어의 농도를 다음과 같이 가정하자.

$$n = Ax + N_D \quad 3.8$$

전자의 밀도가 n 이라하고 전하밀도를 ρ_n 이라 하면

$$\rho_n = -q\Delta n = -(n - N_D) \quad 3.9$$

음의 부호는 전자에 의한 전하이므로 사용하였고, 전위를 구하기 위하여 Poisson 방정식을 적용하면,

$$\frac{d^2 V_n}{dx^2} = -\frac{\rho_n}{\epsilon} = \frac{q\Delta n}{\epsilon} = \frac{qAx}{\epsilon} \quad 3.10$$

이것을 한번 적분하면,

$$\frac{dV_n}{dx} = \frac{qA}{2\epsilon} x^2 + C_1 \quad 3.11$$

y=0에서의 전위는 0이므로 계수 $C_1 = 0$ 이므로

$$\frac{dV_n}{dx} = \frac{qA}{2\epsilon} x^2 \quad 3.12$$

이것을 한번 더 적분하면

$$V_n = \frac{qA}{6\epsilon} x^3 + C_2 \quad 3.13$$

x = 0에서의 전위는 0이므로, 채널내에 쌓인 전자에 의한 전위는 다음과 같다.

$$V_n = \frac{qA}{6\epsilon} x^3 \quad 3.14$$

4. 모의실험 및 결과

모의 실험의 기준 소자는 다음의 표1과 같은 소자의 물성특성을 가지는 것을 사용하였다.

표.4.1 소자 C의 물질 상수와 크기

상수명	약어	값
핀치오프전압	V_{po}	1.85 [V]
불순물 농도	N_D	1.31×10^{16}
게이트 길이	L_g	0.5 [μm]
게이트폭	W_g	50 [μm]
빌트인 전압	V_{bi}	0.85 [V]
저전계이동도	μ	3000 [Cm ² / V s]
포화속도	v_{sat}	4.9×10^7 [Cm]
채널길이	a	1435Å

모의 실험은 위의 소자변수를 사용하여, 수학적 모델을 MATLAB을 이용하여 계산하고 출력하였다.

그림 4.1은 드레인 전압에 대한 포화 길이를 나타내고 있다. 드레인 게이트 전압이 작을 때 포화길이가 큰 것을 볼수 있다.

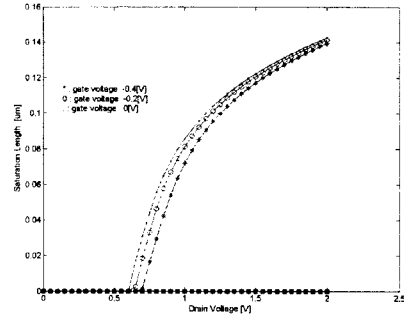


그림 4.1 드레인 전압에 대한 포화길이

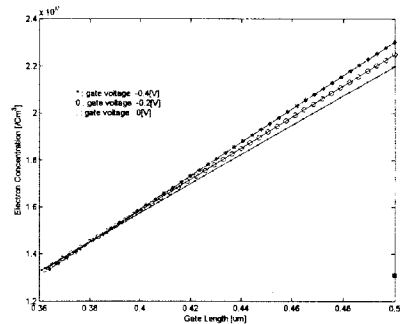


그림 4.2 거리에 대한 전자의 농도변화

그림 3.2는 거리에 대한 전자의 농도를 나타내고 있다. 게이트의 길이가 0.5[μm]이다. 포화되기 전의 전자 농도는 불순물의 농도인 1.3×10^{17} 과 같다. 그런데 포화된 이후의 전장의 농도는 직선적으로 증가하여, 드레인쪽 게이트의 끝지점에서는 약 2.3×10^{17} 정도로 증가하였다.

그림 3.3은 거리에 대한 축적된 전자에 의한 전압의 강하를 나타내고 있다. 채널 전하에 의하여 전압강하가 발생하고 이것은 채널 끝지점에서 약 0.45[V]정도의 감소를 한다.

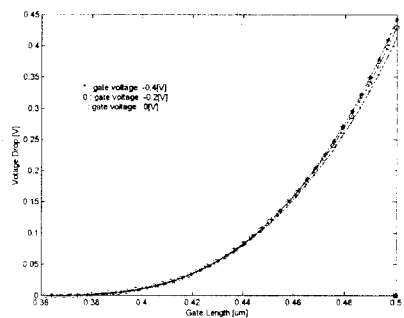


그림 4.3 거리에 대한 전압강하

4. 결 론

본 논문은 nano급의 게이트 길이에서 전하의 축적으로 인하여 발생하는 채널전하를 설명하고 있다. 수십 나노의 게이트 길이를 가지는 소자를 생산할 수 있는 현재의 기술은 게이트의 길이와 채널의 깊이가 같거나 심지어는 더 작아지는 소자를 생산하게 되었다. 이 경우 전압에 의하여 주어진 전계는 x방향의 성분이 y방향의 성분보다 많아지게 된다. GaAs MESFET소자에서는 채널 내의 선형영역 부분과 포화영역 부분의 두 부분으로 나누었을 때 포화영역 부분에서 캐리어의 축적으로 인하여 과잉 캐리어의 발생할 것이다. 과잉 캐리어에 의한 전하의 영향은 게이트의 길이가 길 경우 채널의 전체 두께에 비하여 활성영역의 채널의 두께 작으므로 전하가 존재하는 면적이 작아서 큰 영향을 줄 수 없었으나, 나노급의 게이트를 가지는 소자의 경우 속도 포화에 의하여 활성채널 영역이 크고, 이곳에 형성된 과잉 캐리어에 의한 전하는 그 영향이 크게 될것이다. 본 논문은 과잉 캐리어에 의한 채널 전하의 영향을 다음과 같은 과정으로 해석하여 그 결과를 표시하였다. 게이트의 축소로 인한 효과로 경사 채널 근사에 기반을 두고 동작하던 소자가 경사 채널 가정을 벗어나는 곳에서의 동작특성에 대하여 고려하여, 채널내의 전자의 축적 정도를 유추하여 모델을 제시하였고, 그 모델을 이용하여, 채널에 형성되는 전위, 전자, 전자의 농도를 추출하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Won C. S., Ahn H. K., Han D. Y., El Nokali, "DC Characteristic of MESFET's at High Temperatures", Solid-State Electronics, Vol. 43. , pp. 537-542, 1999.
- [2] A.B. Grebene, "General theory for pinched operation of the junction-gate fet", Solid-State Electron., Vol. 12, 1969, pp.573-589
- [3] M. Shur, "GaAs Devices and Circuits", Plenum Press, 1987.
- [4] S. P. Chin, C. Y. Wu, "A new I-V model for short gate-length MESFET's", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 40, pp. 712-720, Apr. 1993.
- [5] S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2nd ed., John Wiley & Sons, 1981