

# MODFET의 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Layer내의 특성 모델

## (A Model for Characteristics in the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Layer of MODFET's)

朴 光 旻\*, 吳 玗 京\*, 金 弘 培\*\*, 郭 桂 達\*

(Kwang Mean Park, Yun Kyung Oh, Hong Bae Kim and Kae Dal Kwack)

### 要 約

본 논문에서는 MODFET의  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer내의 특성 모델을 제시한다. Fermi-Dirac 통계를 적용하여  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer내의 conduction band의 특성을 해석하였으며, 수치 계산법(false-position method)으로 계산한 conduction band energy를 사용하여 전계의 분포, 이온화된 donor의 농도, 그리고 two-dimensional electron gas density의 gate 전압에 따른 변화를 각각 계산하였다. 또한 MOD(Modulation-Doped) 구조 내의 기생적인 MESFET 동작을 위한 채널의 형성 과정을 해석하였으며,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer내의 특성을 해석적으로 modeling 하였다. 이론적 결과들은 MOD구조 내의 일반적인 특성들을 잘 나타내고 있다.

### Abstract

In this paper, a model for characteristics in the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  As layer of MODFET's is presented. The characteristics of conduction band in the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer is analyzed with the Fermi-Dirac statistics. And using the conduction band energy which is calculated with the numerical calculation method (False-Position method), the variations of the electric-field distribution, the ionized donor concentration, and the two-dimensional electron gas density with gate voltage are calculated, respectively. The channel formation process for the parasitic MESFET operation in the MOD structure is also analyzed, and the characteristics in the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer is analytically modeled. The theoretical results describe well the general characteristics in the MOD structure.

### I. 서 론

MOD구조 내의 여러 특성들을 파악하기 위해서는 먼저,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer내의 conduction band energy를 정확히 구해 내어야 한다. Conduction band energy는 gate 전압, doping 농도, 그리고  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer

내의 깊이의 함수로써 나타나며, 이를 통해 이 layer내의 이온화된 donor의 농도와 전계의 분포 등을 직접 구할 수 있다. 또한 conduction band energy는 MODFET 동작의 가장 중요한 parameter인 TEG (two-dimensional electron gas) density를 계산하는데 있어서 key parameter로써 작용한다.<sup>1,2)</sup>

종래의 해석적 모델들은 주입된 불순물이 완전히 이온화 되었다는 가정 하에 Boltzmann 통계를 적용하여 conduction band energy를 계산해 내었으나, 실제로 highly doped된 경우에는 conduction band energy와 Fermi-level 간의 energy 차가 그리 크지 않으며, 따

\*正會員, 漢陽大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Hanyang Univ.)

\*\*正會員, 淸州大學校 半導體工學科  
(Dept. of Semi. Eng., Chongju Univ.)

接受日字: 1986年 9月 25日

라시 주입된 불순물은 완전히 이온화하지 않는다. 또한  $Al_xGa_{1-x}As$  layer 내의 conduction band energy는 gate 전압의 함수로써도 나타나기 때문에, conduction band와 Fermi-level 간의 energy 차가 gate 전압에 따라 변하게 되어, 주입된 불순물이 완전히 이온화되기도 하고, 부분적으로 이온화되기도 한다. 주입된 불순물이 부분적으로 이온화된 때, Boltzmann 통계는 많은 오차를 야기시키기 때문에, MODFET의 해석에서는 Fermi-Dirac 통계를 사용하여야 한다.<sup>1,2,3</sup> 그러나 Fermi-Dirac 통계를 사용할 때 poisson 방정식은 적분방정식으로 나타나기 때문에, conduction band energy를 해석적으로 구할 수가 없다. 따라서, 본 논문에서는 conduction band와 Fermi-level 간의 energy 차가 큰 영역(완전 이온화 영역)과 작은 영역(부분 이온화 영역)의 두 영역으로 나누어, 최대 오차가 3% 미만인 근사식을 사용하여 conduction band energy를 해석적으로 유도해 낸다. 유도된 conduction band energy로부터,  $Al_xGa_{1-x}As$  layer 내의 위치에 따른 전계의 분포와, 이온화된 donor의 농도를 각각 계산해 내며, 또한 gate 전압에 따른 TEG density의 변화를 보인다. 덧붙여, gate 전압이 크게 인가되는 경우,  $Al_xGa_{1-x}As$  layer내에 MESFET 동작을 위한 채널이 형성되는 과정을 보인다.

II. 본 론

$Al_xGa_{1-x}As$  layer는 normally-off device인 경우, schottky-barrier height  $\phi_m$ 에 의해 완전히 deplete 되어 있다. 그러나 gate 전압이 점점 크게 인가될 때, schottky contact에 의한 surface depletion layer는 점점 줄어들게 되며,  $Al_xGa_{1-x}As$  layer 내에 기생적인 MESFET 동작을 위한 채널이 형성된다. 따라서  $Al_xGa_{1-x}As$  layer가 schottky-barrier height  $\phi_m$ 에 의해 완전히 deplete된 경우와, 부분적으로 deplete된 경우의 두 경우로 나누어 이론을 전개한다.

1. 완전히 Deplete된 경우

$Al_xGa_{1-x}As$  layer가 완전히 deplete된 경우의 conduction band의 모델 구조는 그림 1과 같다. 여기서  $d_1$ 는 undoped  $Al_xGa_{1-x}As$  layer의 두께,  $d$ 는  $Al_xGa_{1-x}As$  layer의 전체 두께,  $E_c(z)$ 는 깊이  $z$ 의 함수로써의 conduction band energy,  $E_0$ ,  $E_1$ 은 각각 potential well 내의 1'st, 2'nd quantized subband level이며,  $\Delta E_c$ 는  $Al_xGa_{1-x}As$  layer와 GaAs layer의 conduction band discontinuity,  $E_f$ 는 Fermi-level을 나타낸다.  $Al_xGa_{1-x}As$  layer 내의 poisson 방정식은 다음과 같이 주어진다.

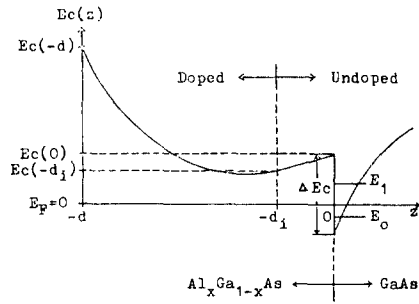


그림 1. 완전히 deplete된 경우의 conduction band 모델 구조  
Fig. 1. Conduction Band Model Structure of the Completely Depleted Case.

$$\frac{d\epsilon(z)}{dz} = \frac{\rho(z)}{\epsilon_1} \tag{1}$$

여기서  $\epsilon(z)$ 는 전계,  $\epsilon_1$ 과  $\rho(z)$ 는 각각  $Al_xGa_{1-x}As$  layer 내의 유전율과 전하 밀도를 나타낸다.  $Al_xGa_{1-x}As$  layer는 보통 n-type로 highly doped되기 때문에, hole과 acceptor 이온의 농도는 무시할 수 있으며, 또한 depletion region 내의 자유 전자 농도는 무시할 수 있으므로, 전하 밀도  $\rho(z)$ 는 다음 식으로 나타내어진다.

$$\rho(z) = qN_d^+(z) \tag{2}$$

여기서  $q$ 는 전하,  $N_d^+(z)$ 는 다음 식으로 주어지는 이온화된 donor의 농도이다.<sup>4</sup>

$$N_d^+(z) \approx \begin{cases} 0 & \text{for } -d_1 \leq z \leq 0 \\ \frac{N_d}{1 + \beta \cdot \exp\left[\frac{E_d + E_f - E_c(z)}{kT}\right]} & \text{for } -d \leq z \leq -d_1 \end{cases} \tag{3}$$

여기서  $\beta$ 는 spin degeneracy factor ( $\beta=2$ ),  $E_d$ 는 donor 이온화 energy,  $k$ 는 Boltzmann 상수, 그리고  $T$ 는 온도이다. 식(2)와 식(3)을 식(1)에 대입하여 poisson 방정식을 풀면 다음과 같다.

(i) for  $-d_1 \leq z \leq 0$

이 영역은 undoped  $Al_xGa_{1-x}As$  layer이므로  $N_d^+(z) = 0$ 이다. 따라서 전하 밀도  $\rho(z)$ 는 zero가 되며,

$$\epsilon(0) = \epsilon(-d_1) \tag{4}$$

가 유도된다. 이 식(4)는 undoped  $Al_xGa_{1-x}As$  layer 내에서 전계가 일정하다는 것을 의미한다.

(ii) for  $-d \leq z \leq -d_1$

이 구간에서 poisson 방정식 (1)을 한번 적분하면, 다음 식이 유도된다.

$$\frac{1}{q} \cdot \frac{dE_c(z)}{dz} = \left[ \frac{2kT N_d}{\epsilon_1} \cdot \ln\left(\beta' + \exp\left[\frac{E_c(z)}{kT}\right]\right) + C \right]^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

여기서  $\beta' = \beta \cdot \exp(E_d/kT)$ 이며,  $E_F$ 를 energy level의 기준 level로 취했다(즉,  $E_F = 0$ ). 또, C는 적분 상수이다.  $2kT \cdot N_d/\epsilon_1 = a$ ,  $E_c(z)/kT = y(z)$ 라 두면, 식(5)는 다음 식으로 나타내어진다.

$$\frac{kT}{q} \frac{dy(z)}{dz} = \left[ a \cdot \ln(\beta' + \exp\{y(z)\}) + C \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

이 식(6)은 적분 불능이기 때문에,  $y(z)$ 에 대한 관계식을 해석적으로 유도할 수 없다. 그러나  $\ln(\beta' + \exp\{y(z)\})$  항은  $y(z) > 8$  인 범위에서는  $y(z)$ 로,  $y(z) \leq 8$  인 범위에서는 2차 함수로 근사화 할 수 있다.

$$\ln(\beta' + \exp\{y(z)\}) = \begin{cases} y(z) & \text{for } y(z) > 8 \quad (7a) \\ k_1(y(z) - k_2)^2 + k_3 & \text{for } y(z) \leq 8 \quad (7b) \end{cases}$$

여기서 식(7b)의 계수  $k_1, k_2, k_3$ 는 온도가 300K일 때 표 1과 같은 값을 가지며, 원식과 근사식의 차이는 그림 2, 3에 각각 나타내었다. 이때 근사식은 최대 오차가 3% 미만인 범위에서 원식과 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서  $y(z) > 8$  인 경우와,  $y(z) \leq 8$  인 경우로 나누어 poisson 방정식을 풀면 다음과 같다.

(a)  $y(z) > 8$  ( $E_c(z) > 8kT$ )일 때

식(7a) 식(6)에 대입하여 적분하면, 구하고자 하는 conduction band energy  $E_c(z)$ 와 전계  $\epsilon(z)$ 는 각각 다음과 같이 유도된다.

$$E_c(z) = \left\{ \frac{q^2 N_d}{2\epsilon_1} (z-d+2d_i) + q\epsilon(-d_i) \right\} (z+d) + q(\phi_m - V_0) \quad (8)$$

$$\epsilon(z) = \frac{qN_d}{\epsilon_1} (z+d_i) + \epsilon(-d_i) \quad (9)$$

여기서 적용된 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \epsilon(z=-d_i) = \epsilon(-d_i) \\ E_c(z=-d) = q(\phi_m - V_0) \end{cases} \quad (10)$$

유도된 식(8)과 (9)는 주입된 불순물이 완전히 이온화되었다는 가정 하에 구한 결과 식과 같다.

(b)  $y(z) \leq 8$  ( $E_c(z) \leq 8kT$ )일 때

식(7b)를 식(6)에 대입하여 적분하면, 구하고자 하는  $E_c(z)$ 와  $\epsilon(z)$ 는 각각 다음과 같이 유도된다.

$$E_c(z) = kT \cdot$$

$$\left[ k_3 + \frac{\left\{ \frac{q}{kT} (\phi_m - V_0) - k_1 \right\} \cdot \cosh\left\{ \frac{q\sqrt{a}}{kT} (z+d_i) \right\} + \frac{\epsilon(-d_i)}{\sqrt{a}} \sinh\left\{ \frac{q\sqrt{a}}{kT} (z+d) \right\}}{\cosh\left\{ \frac{q\sqrt{a}}{kT} (d-d_i) \right\}} \right] \quad (11)$$

$$\epsilon(z) =$$

$$\frac{\sqrt{a} \left\{ \frac{q}{kT} (\phi_m - V_0) - k_1 \right\} \cdot \sinh\left\{ \frac{q\sqrt{a}}{kT} (z+d_i) \right\} + \epsilon(-d_i) \cdot \cosh\left\{ \frac{q\sqrt{a}}{kT} (z+d) \right\}}{\cosh\left\{ \frac{q\sqrt{a}}{kT} (d-d_i) \right\}} \quad (12)$$

표 1. 식(7b)의 계수  $k_1, k_2, k_3$   
Table 1. Coefficients  $k_1, k_2, k_3$  of Eq(7b).

$k_1$	0.0788050908966
$k_2$	0.25349584368
$k_3$	3.2796230103

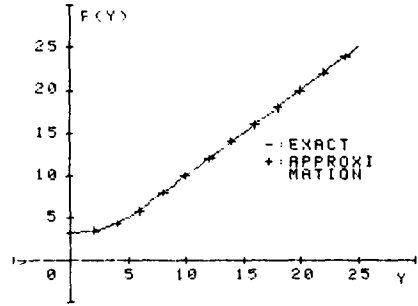


그림 2. 원식과 근사식의 비교  
Fig. 2. Comparison of Exact Eq. with Approximated Eq.

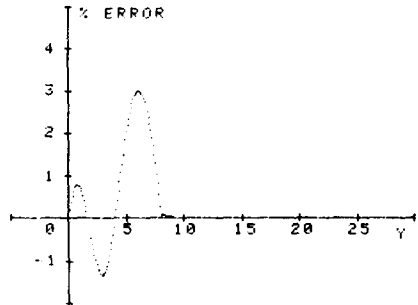


그림 3. 원식과 근사식 사이의 %오차  
Fig. 3. % error Between Exact Eq. and Approximated Eq.

여기서

$$\alpha = 2kT \cdot N_d \cdot k_1/\epsilon_1 \quad (13)$$

이며, 적용된 경계 조건은 식(10)과 같다. 이때, 유도된 식(11)과 (12)는 주입된 불순물이 완전히 이온화되었다는 가정 하에 구한 결과 식들과는 전혀 다른 형태임을 알 수 있다. 실제로 highly doped된 경우에는, 주입된 불순물이 완전히 이온화 되지 않기 때문에,  $E_c(z)$ 와  $\epsilon(z)$ 는 식(8)과 (9)로 구한 결과와는 많은 차이를 보이게 된다.

2. 부분적으로 Deplete된 경우

Gate 전압이 크게 인가되어  $Al_xGa_{1-x}As$  layer가 완전히 deplete되지 않은 경우의 conduction band의 모델 구조는 그림 4 와 같다. 여기서  $W_1$ 은  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  heterointerface에서의 depletion layer의 경계점,  $W_2$ 는 gate surface에서의 gate potential에 의한 depletion layer의 경계점이다. 이때,  $Al_xGa_{1-x}As$  layer는 완전히 deplete되어 있지 않기 때문에,  $-W_2 \leq Z \leq -W_1$ 의 구간에서 자유 전자의 농도를 무시할 수 없으며, 따라서 전하 밀도  $\rho(z)$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\rho(z) = q[N_d^+(z) - n(z)] \quad (14)$$

여기서 자유 전자의 농도  $n(z)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$n(z) = \begin{cases} 0 & \text{for } -w_1 \leq z \leq 0 \\ N_c \cdot F_{\frac{1}{2}}(\eta) & \text{for } -w_2 \leq z \leq w_1 \\ 0 & \text{for } -d \leq z \leq -w_2 \end{cases} \quad (15)$$

여기서  $N_c$ 는  $Al_xGa_{1-x}As$  layer의 conduction band 내의 상태 밀도이며,  $F_{\frac{1}{2}}(\eta)$ 는 Fermi-integral로써 다음과 같이 근사화된다.<sup>2,4)</sup>

$$F_{\frac{1}{2}}(\eta) \approx \frac{\exp\left[-\frac{E_c(z)}{kT}\right]}{1 + 0.27 \cdot \exp\left[-\frac{E_c(z)}{kT}\right]} \quad (16)$$

한편, 이온화된 donor농도  $N_d^+(z)$ 는 식(3)과 같이 주어진다. 식(3)과 (15), (16)을 식(14)에 대입하여 poisson방정식을 풀면 다음과 같다.

(i) for  $-d_1 \leq z \leq 0$

이 영역에서  $N_d^+(z) = 0$ ,  $n(z) = 0$  이므로 전하 밀도  $\rho(z) = 0$  이며, 따라서,

$$\mathcal{E}(0) = \mathcal{E}(-d_1) \quad (17)$$

가 유도된다.

(ii) for  $-w_1 \leq z \leq -d_1$

이 구간에서 자유 전자의 농도  $n(z)$ 는 zero이므로,

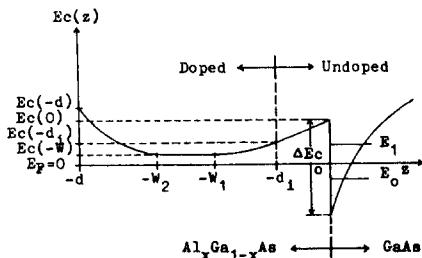


그림 4. 부분적으로 Deplete된 경우의 Conduction band 모델구조

Fig. 4. Conduction Band Model Structure of the Partially Depleted Case.

전하 밀도  $\rho(z)$ 는

$$\rho(z) = -qN_d^+(z) = q \cdot \frac{N_d}{1 + \beta' \cdot \exp\left[\frac{E_F - E_c(z)}{kT}\right]} \quad (18)$$

이다. 이 식(18)을 식(1)에 대입하여 한번 적분하면, 식(6)이 유도된다. 따라서 1 - ii) 절에서의 같은 방법으로 conduction band energy를 구하면 다음과 같다.

(a)  $y(z) > 8$  ( $E_c(z) > 8kT$ ) 일 때

식(7a)를 식(6)에 대입하여 적분하면,  $E_c(z)$ 와  $\mathcal{E}(z)$ 는 각각 다음과 같이 유도된다.

$$E_c(z) = \left[ \frac{q^2 N_d}{2\epsilon_1} (z - w_1 + 2d_1) + q\mathcal{E}(-d_1) \right] \cdot (z + w_1) + E_c(-w_1) \quad (20)$$

$$\mathcal{E}(z) = \frac{qN_d}{\epsilon_1} (z + d_1) + \mathcal{E}(-d_1) \quad (21)$$

이때 적용된 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \mathcal{E}(z = -d_1) = \mathcal{E}(-d_1) \\ E_c(z = -w_1) = E_c(-w_1) \end{cases} \quad (22)$$

한편,  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  heterointerface에서의 depletion layer의 경계점  $w_1$ 은  $\mathcal{E}(z = -w_1) = 0$ 인 관계를 이용하면, 식(21)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$w_1 - d_1 + \frac{\epsilon_1}{qN_d} \mathcal{E}(-d_1) \quad (23)$$

(b)  $y(z) \leq 8$  ( $E_c(z) \leq 8kT$ ) 일 때

식(7b)를 식(6)에 대입하여 적분하고, 식(22)의 경계 조건을 적용하면,  $E_c(z)$ 와  $\mathcal{E}(z)$ 는 각각 다음과 같이 구해진다.

$$E_c(z) = kT \cdot$$

$$\left[ \frac{\left(\frac{E_c(-w_1)}{kT} - k_2\right) \cosh\left[\frac{q\sqrt{\alpha}}{kT}(z + d_1)\right] + \mathcal{E}(-d_1) \sinh\left[\frac{q\sqrt{\alpha}}{kT}(z + w_1)\right]}{\cosh\left[\frac{q\sqrt{\alpha}}{kT}(w_1 - d_1)\right]} \right] \quad (24)$$

$$\mathcal{E}(z) =$$

$$\frac{\sqrt{\alpha} \left[ \frac{E_c(-w_1)}{kT} - k_2 \right] \sinh\left[\frac{q\sqrt{\alpha}}{kT}(z + d_1)\right] + \mathcal{E}(-d_1) \cosh\left[\frac{q\sqrt{\alpha}}{kT}(z + w_1)\right]}{\cosh\left[\frac{q\sqrt{\alpha}}{kT}(w_1 - d_1)\right]} \quad (25)$$

여기서  $\alpha$ 는 식(13)과 같다. 또한  $w_1$ 은  $\mathcal{E}(z = -w_1) = 0$ 인 관계를 이용하여 식(25)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$w_1 = d_1 + \frac{kT}{q\sqrt{\alpha}} \cdot$$

$$\ln \left[ \frac{\sqrt{\mathcal{E}(-d_1)^2 + \alpha \left[ \frac{E_c(-w_1)}{kT} - k_2 \right]^2} + \mathcal{E}(-d_1)}{\sqrt{\alpha} \left[ \frac{E_c(-w_1)}{kT} - k_2 \right]} \right] \quad (26)$$

(iii) for  $-w_2 \leq z \leq -w_1$

이 구간은 bulk region이므로 다음과 같은 전하 중성 조건을 만족하여야 한다.

$$\rho(z) = q[N_d(z) - n(z)] = 0 \quad (27)$$

식(3)과 (15)를 식(27)에 대입하여 풀면, bulk region에서 전계  $\epsilon(z)$ 는 zero이며,  $E_c(z)$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} E_c(z) &= E_c(-w_1) = E_c(-w_2) \\ &= kT \cdot \left[ \ln(2\beta') - \right. \\ &\quad \left. \ln \left[ \left( \frac{0.27N_d}{N_c} - 1 \right) + \sqrt{\left( \frac{0.27N_d}{N_c} - 1 \right)^2 + 4 \cdot \frac{N_d}{N_c} \cdot \beta'} \right] \right] \end{aligned} \quad (28)$$

$$\epsilon(z) = 0 \quad (29)$$

(iv) for  $-d \leq z \leq -w_2$

이 구간에서 자유 전자의 농도  $n(z)$ 는 zero이므로, 전하밀도  $\rho(z)$ 는 식(18)로 나타내어진다. 1 - (ii) 절에서와 같은 방법으로 conduction band energy를 구하면 다음과 같다.

(a)  $y(z) > 8$  ( $E_c(z) > 8kT$ ) 일 때

식(7a)를 식(6)에 대입하여 적분하면,  $E_c(z)$ 와  $\epsilon(z)$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$E_c(z) = \frac{q^2 N_d}{2\epsilon_1} (z+d+2w_2)(z+d) + q(\phi_m - V_G) \quad (30)$$

$$\epsilon(z) = \frac{qN_d}{\epsilon_1} (z+w_2) \quad (31)$$

이때 적용된 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \epsilon(z = -w_2) = 0 \\ E_c(z = -d) = q(\phi_m - V_G) \end{cases} \quad (32)$$

한편, gate surface에서의 gate potential에 의한 depletion layer의 경계점  $w_2$ 는  $E_c(z = -w_2) = E_c(-w_1)$ 의 관계로부터 다음과 같이 유도된다.

$$w_2 = d - \left[ \frac{2\epsilon_1}{qN_d} \left\{ \phi_m - V_G - \frac{E_c(-w_1)}{q} \right\} \right]^{1/2} \quad (33)$$

(b)  $y(z) \leq 8$  ( $E_c(z) \leq 8kT$ ) 일 때

식(7b)를 식(6)에 대입하여 적분하고, 식(32)의 경계 조건을 적용하면,  $E_c(z)$ 와  $\epsilon(z)$ 는 각각 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} E_c(z) &= kT \cdot \\ &\quad \left[ k_2 + \left\{ \frac{q}{kT} (\phi_m - V_G) - k_2 \right\} \cdot \frac{\cosh \left[ \frac{q\sqrt{\alpha}}{kT} (z+w_2) \right]}{\cosh \left[ \frac{q\sqrt{\alpha}}{kT} (d-w_2) \right]} \right] \end{aligned} \quad (34)$$

$$\epsilon(z) = \sqrt{\alpha} \left[ \frac{q}{kT} (\phi_m - V_G) - k_2 \right] \cdot$$

$$\frac{\sinh \left[ \frac{q\sqrt{\alpha}}{kT} (z+w_2) \right]}{\cosh \left[ \frac{q\sqrt{\alpha}}{kT} (d-w_2) \right]} \quad (35)$$

여기서  $\alpha$ 는 식(13)과 같다. 또한  $w_2$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} w_2 &= d - \frac{kT}{q\sqrt{\alpha}} \cdot \\ &\quad \ln \left[ \frac{q(\phi_m - V_G) - kT \cdot k_2}{E_c(-w_1) - kT \cdot k_2} + \sqrt{\left[ \frac{q(\phi_m - V_G) - kT \cdot k_2}{E_c(-w_1) - kT \cdot k_2} \right]^2 - 1} \right] \end{aligned} \quad (36)$$

### 3. 경계 전압 $V_{GP}$ 의 결정

이상으로부터, 주입된 불순물이 완전히 이온화되는 경우와 부분적으로 이온화되는 경우,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer 내의 conduction band  $E_c(z)$ 와 전계  $\epsilon(z)$ 가 전혀 다른을 알 수 있다. 또한 gate 전압이 크게 인가될 때는  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer가 완전히 deplete되지 않고, layer 내에 bulk region이 형성됨을 알 수 있다. 이 bulk region은 highly doped되어 있기때문에, MESFET 동작을 위한 채널로써 작용하게 되어, MODFET 내에서 기생적인 MESFET 동작이 가능하게 된다. 따라서 그 때의 경계전압  $V_{GP}$ 를 결정해 주어야 한다. 이 경계 전압  $V_{GP}$ 는  $w_1$ 과  $w_2$ 가 일치할 때의 gate 전압으로 정의되며,  $E_c(-w_1)$  또는  $E_c(-w_2)$ 에 따라 다음과 같이 두 영역으로 나누어 해석해야 한다.

- 1)  $E_c(-w_1) = E_c(-w_2) > 8kT$ 인 영역 (완전 이온화 영역)
- 2)  $E_c(-w_1) = E_c(-w_2) \leq 8kT$ 인 영역 (부분 이온화 영역)

(i)  $E_c(-w_1) = E_c(-w_2) > 8kT$ 일 때

이 경우,  $w_1 = w_2$ 일 때의 gate 전압  $V_{GP}$ 는 식(23)과 식(33)으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$V_{GP} = \phi_m - \frac{E_c(-w_1)}{q} - \frac{qN_d}{2\epsilon_1} \left[ d - d_1 - \frac{\epsilon_1}{qN_d} \epsilon(-d_1) \right]^2 \quad (37)$$

(ii)  $E_c(-w_1) = E_c(-w_2) \leq 8kT$ 일 때

이 경우,  $V_{GP}$ 는 식(26)과 식(36)으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} V_{GP} &= \phi_m - \frac{kT}{q} \cdot k_2 + \frac{kT}{q} \cdot \frac{\epsilon(-d_1)}{\sqrt{\alpha}} \sinh \left[ \frac{q\sqrt{\alpha}}{kT} (d-d_1) \right] \\ &\quad - \sqrt{\left[ \frac{kT}{g} \cdot \frac{\epsilon(-d_1)}{\sqrt{\alpha}} \right]^2 + \frac{E_c(-w_1) - kT \cdot k_2}{q}} \\ &\quad \cosh \left[ \frac{q\sqrt{\alpha}}{kT} (d-d_1) \right] \end{aligned} \quad (38)$$

식(37)과 식(38)로 나타내어진  $V_{OP}$  보다 더 큰 gate 전압이 인가되면,  $Al_xGa_{1-x}As$  layer는 완전히 deplete되지 않고, 기생적인 MESFET 동작이 가능하게 된다.

II. Simulation과 고찰

먼저, triangular potential well approximation을 사용하면, heterointerface에서의 conduction band energy  $E_c(0)$ 는 다음식으로 나타내어 진다.

$$E_c(0) = \Delta E_c - kT \cdot \ln$$

$$\left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\left( \frac{E_c}{ekT} + \frac{E_1}{ekT} \right)^2 + 4 \cdot e^{\frac{E_0 - E_1}{kT}} \cdot \left( e^{\frac{n_s}{DkT}} - 1 \right)} \right] - \left( \frac{E_c}{ekT} + \frac{E_1}{ekT} \right) \right\} \quad (39)$$

여기서,  $D$ 는 GaAs layer의 conduction band 내의 2차원적인 상태 밀도이며,  $n_s$ 는 TEG density이다. Potential well내의 subband  $E_0, E_1$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} E_0 = \gamma_0 \cdot n_s^{\frac{2}{3}} \\ E_1 = \gamma_1 \cdot n_s^{\frac{2}{3}} \end{cases} \quad (40)$$

여기서,  $\gamma_0 = 2.5 \times 10^{-13}$ ,  $\gamma_1 = 3.2 \times 10^{-12} (eV \cdot m^3)$ 이다. 또한, undoped  $Al_xGa_{1-x}As$  layer내에서 전계는 일정하기 때문에 다음의 관계식이 성립한다.

$$E_c(z) = E_c(-d_i) + qd_i \epsilon(z) \quad (41)$$

$$\text{또, Gauss의 법칙으로 부터, } \epsilon(0) = qn_s / \epsilon_1 \quad (42)$$

가 유도된다. 식(39), (40), (41), 그리고 식(42)로 부터, 수치 계산법인 false-position method를 사용하여 TEG density  $n_s$ 를 계산할 수 있다. 계산된  $n_s$ 를 다시 관련된 식에 대입하면,  $Al_xGa_{1-x}As$  layer내의 conduction band energy  $E_c(z)$ 와 전계  $\epsilon(z)$ 를 계산할 있으며, 또한 계산된  $E_c(z)$ 를 식(3)에 대입하면, 이온화된 donor 농도  $N_d^+(z)$ 를 계산할 수 있다. 계산된 conduction band diagram과 전계 분포, 이온화된 donor의 농도, 그리고 TEG density를 그림5, 6, 7, 8에 각각 나타내었다. 사용한 parameter의 값은 표 2에 나타내었다.

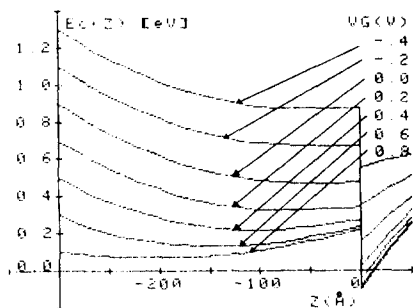


그림 5. Conduction Band Diagram  
Fig. 5. Conduction Band Diagram.

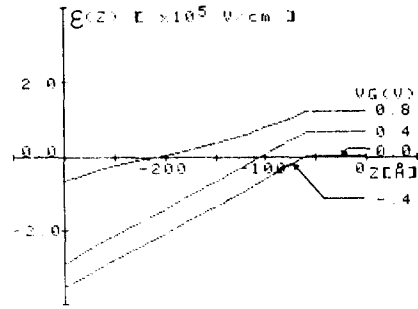


그림 6. 전계의 분포  
Fig. 6. Electric-Field Distribution.

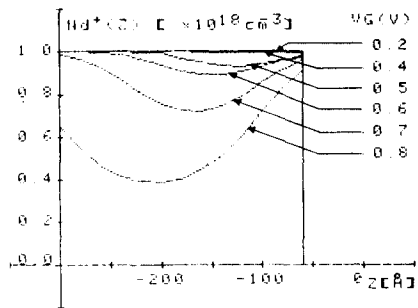


그림 7. 이온화된 donor 농도  
Fig. 7. Ionized Donor Concentration.

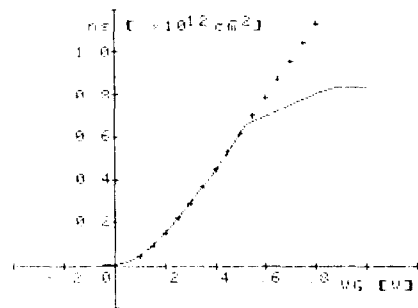


그림 8. TEG Density,  
+ : 완전이온화 모델  
- : 본 논문의 모델  
Fig. 8. TEG Density.  
+ : Complete Ionization Model,  
- : Our Model.

표 2. Parameter의 값  
Table 2. Values of Parameters.

$N_d$	T	$\phi_m$	$d_i$	d	Al mole fraction x
$1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	300K	0.9V	60 Å	300 Å	0.3

그림 5는 gate전압에 따른  $Al_xGa_{1-x}As$  layer 내의 conduction band의 변화를, 그림 6은 전계의 분포를 각각 보여주고 있으며, 그림 7은 이온화된 donor 농도의 변화를 보여주고 있다. Gate전압이 낮게 인가되는 경우에는 conduction band와 Fermi-level간의 energy 차가 비교적 크기 때문에, 주입된 불순물은 거의 모두 이온화된다. 그러나 gate 전압이 점점 커짐에 따라 conduction band와 Fermi-level간의 energy차가 점점 작아지게 되고, 따라서 주입된 불순물은 완전히 이온화되지 않고,  $Al_xGa_{1-x}As$  layer내의 깊이에 따라 이온화되는 donor 농도가 변하게 된다. 그림 8은 완전 이온화 모델과 본 논문의 모델로 계산한 TEG density  $n_s$ 의 gate 전압에 따른 변화를 비교한 것이다. Gate전압이 낮은 경우에는 완전 이온화 모델과 본 논문의 모델로 계산한 TEG density  $n_s$ 가 서로 일치한다. 그러나 gate전압이 크게 인가되는 경우, 완전 이온화 모델로 계산한  $n_s$ 는 gate 전압에 대해 거의 선형적으로 계속 증가하는 것으로 나타나지만, 본 논문의 모델로 계산한  $n_s$ 는 self-consistent method로 계산한 결과와 유사한 형태를 가지며, saturation 값으로 수렴한다는 것을 알 수 있다.

한편, 표 2의 parameter 값들을 대입하여 계산한 heterointerface에서의 depletion layer의 경계점  $w_1$ 은 약  $282 \text{ \AA}$  정도가 되기 때문에, 기생적인 MESFET 동작 영역을 그림으로 나타내기가 힘들다. 따라서  $Al_xGa_{1-x}As$  layer의 두께  $d$ 를  $400 \text{ \AA}$ 으로 한 결과를 그림 9, 10에 나타내었다. 그림 9, 10을 보면,  $d$ 가  $400 \text{ \AA}$ 일 때,  $V_{op}$ 는 약  $0.839V$ 이며, 이보다 큰 gate 전압이 인가되는 경우  $w_1$ 은 약  $282 \text{ \AA}$ 으로 일정하게 유지되는데 반해,  $w_2$ 는 gate potential에 따라 점점 감소하게 되어 기생적인 MESFET 동작을 위한 channel이 형성됨을 알 수 있다. 이 때의 전계 분포는 그림 11에 나타낸 것

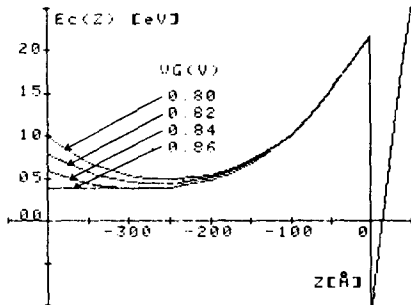


그림 9. 기생적인 MESFET 동작을 위한 채널의 형성 과정

Fig. 9. Channel Formation Process for Parasitic MESFET Operation.

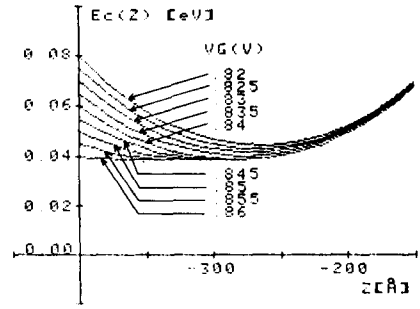


그림 10. 그림 9를 확대한 그림  
Fig. 10. Enlarged Figure of Fig. 9.

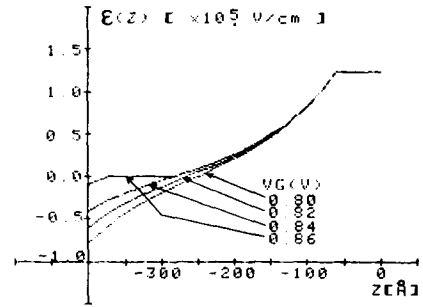


그림 11. 기생적인 MESFET 동작 채널이 형성될 때의 전계 분포

Fig. 11. Electric-Field Distribution when the Channel for Parasitic MESFET's Operation is Formed.

과 같다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 modulation-doped 구조의  $Al_xGa_{1-x}As$  layer내의 특성을 파악하기 위해, Fermi-Dirac 통계와 수치 계산법 (false-position method)을 사용하여 conduction band diagram과 전계 분포, 이온화된 donor 농도, 그리고 TEG density를 각각 계산해 내었다. 인가된 gate전압이 변함에 따라,  $Al_xGa_{1-x}As$  layer는 완전히 deplete되기도 하고, 부분적으로 deplete되어 기생적인 MESFET 동작을 위한 channel이 형성되기도 한다. 또한, 주입된 불순물은 conduction band와 Fermi-level간의 energy차에 따라 완전히 이온화 되기도 하고, 부분적으로 이온화 되기도 한다. 이때 Fermi-Dirac 통계를 사용하여 poisson's equation을 해석적으로 풀어낼 수 없기 때문에, 완전 이온화 영역과 부분 이온화 영역의 두 영역으로 나누어 최대 오차가 3% 미만인 근사식을 사용하여 해석적인 관계식을 유도하였다. 또한 gate전압이 크게 인가되는 경우에 나타나

는 기생적인 MESFET 동작을 위한 channel 형성 과정을 해석하였으며, 그 때의 gate 전압의 경계 전압에 대한 관계식을 유도해 내었다. Simulation한 결과들은  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer 내의 여러 특성들(즉,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer 내의 위치에 따른 전계의 분포 특성, conduction band energy의 변화, 이온화된 donor 농도의 변화, 그리고 TEG density의 변화 특성 등)과, modulation-doped 구조에서의 bias 전압에 따른 소자의 동작 원리를 잘 나타내고 있다.

參 考 文 獻

- [1] Kwangmean Park and Kae-Dal Kwack, "A model for the current-voltage characteristics of MODFET's", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-33, pp. 673-676, May, 1986.
- [2] Kwangmean Park and Kae-Dal Kwack, "Calculation of the two-dimensional electron gas density at the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  GaAs heterointerface", *Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-33, pp. 1831-1832, November 1986.
- [3] K. Lee et al., "Electron density of the two-dimensional electron gas in modulation doped layers", *J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 4, pp. 2093-2096, 1983.
- [4] J.S. Blakemore, *Semiconductor Statistics*. International Series of Monographs on Semiconductors, vol. 3, H.K. Henish, Ed. New York : Pergamon, 1962.
- [5] D. Delagebeaudeuf and N.T. Linh, "Metal-(n) AlGaAs-GaAs two-dimensional electron gas FET", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-29, no. 6, pp. 955-960, 1982.