

論文 90-27-4-7

# 입자모델을 이용한 서브마이크론 게이트 GaAs MESFET 특성의 해석

## (Analysis of Submicron Gate GaAs MESFET's Characteristics Using Particle Model)

文 承 煥,\* 鄭 鶴 起,\*\* 金 鳳 烈\*

(Seung Hwan Moon, Hak Kee Jung, and Bong Ryul Kim)

### 要 約

본 논문에서는 hot-electron 전송현상 즉, 속도 오버슈트를 고려할 수 있는 입자 모델을 이용하여 서브마이크론 게이트의 GaAs MESFET의 특성을 연구 하였다.

시뮬레이션에서 GaAs 에너지 밴드로서  $\Gamma$ 계곡 (<000>방향), L계곡 (<111>방향), X계곡 (<100>방향) 과 산란모델로서는 광학적 포논산란, 음향적 포논산란, 동일계곡간산란, 타계곡간산란을 고려하였다. 그리고 입자모델을 이용하는 몬테-칼로 알고리즘에 의하여 자유비행시간, 산란기구, 산란각도를 결정하여 GaAs물성과 소자 시뮬레이션을 시행하였다.

입자 시뮬레이션의 결과로서 게이트 길이  $0.6\mu\text{m}$ 의 소자내에서 전자분포, 포텐셜 에너지 분포와 전자 이동 상황을 구할 수 있었다. 또한 이 과정으로 구한 차단 주파수는 47GHz 로서 이론의 계산결과와 상당히 일치 하였으며 버퍼층에 의한 효과를 고려한 전류-전압 특성 곡선을 얻을 수 있었다. 마지막으로 버퍼층을 지나는 기생 전류를 채널 깊이의 증감으로 해석할 수 있음을 확인할 수 있었다.

### Abstract

In this paper the characteristics of submicron gate GaAs MESFET's have been studied using a particle model which takes into account the hot-electron transport phenomena, i.e., the velocity overshoot.

$\Gamma$  valley (<000> direction), L valley (<111> direction), X valley (<100> direction) as the GaAs conduction energy band and optical phonon, acoustic phonon, equivalent intervalley, nonequivalent intervalley scattering as the scattering models, have been considered in this simulation. And the GaAs material and the device simulation have been done by determination of the free flight time, scattering mechanism and scattering angle according to Monte-Carlo algorithm which makes use of a particle model.

As a result of the particle simulation, firstly the electron distribution, the potential energy distribution and the situation of electron displacement in  $0.6\mu\text{m}$  gate length device have been obtained. Secondly, the cutoff frequency, obtained by this method, is 47GHz which is in good agreement with the calculated result of theory. And the current-voltage characteristics curve which takes account of the buffer layer effect has been obtained. Lastly it has been verified that parasitic current at the buffer layer can be analyzed using channel depth modulation.

\*正會員, 延世大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

\*\*正會員, 群山大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Kunsan Nat'l Univ.)  
接受日字: 1989年 12月 27日

### I. 서 론

GaAs 반도체의 응용소자로써 널리 이용되는 MESFET은 1980년대에 소개된 이래 초고속, 저소비전력 등 그 우수한 특성으로 실리콘소자가 감당하기 어

려운 초고주파 이상의 시스템에서 중요한 역할을 해왔다. 그리고 80년대에 들어와 GaAs 공정기술의 급속한 발달과 함께 실리콘 소자에 이어 VHSIC(very high speed IC), MMIC(monolithic microwave IC) 등으로 GaAs 소자의 집적화에 많은 관심이 모아지고 있는데 GaAs 집적회로가 대중화되면 이 소자를 이용한 많은 응용시스템들이 개발될 것으로 예상되고 있다.<sup>[1]</sup>

이런 상황에서 집적회로 설계자로 하여금 더욱 복잡해지는 회로와 고주파를 쉽게 다룰 수 있게 하고 디자인을 신속하게 할 수 있게하며 수율을 극대화하여 비용을 절감하고 시스템의 신뢰도를 높이기 위하여 CAD 환경이 필수적이게 되었다. 또한 공정 시뮬레이션과 소자 시뮬레이션 그리고 회로분석과 설계용 도구들이 개발되어 있으나 GaAs 공정 시뮬레이션은 아직 미개척 분야에 속하며 소자 시뮬레이션은 회로 시뮬레이션을 위한 회로 파라미터의 추출을 위해 기본 물리적 모델을 이용하여 활발히 연구되고 있다.<sup>[2]</sup>

따라서 물리적 모델은 전체 시스템 해석에 근본적인 영향을 미치므로 매우 중요하며 궁극적으로 맥스웰 방정식과 볼츠만 전송방정식 또는 슈뢰딩거 방정식을 풀어야 한다. 슈뢰딩거 방정식은 소자 해석에 시도되고 있는 파동 방정식이지만 막대한 계산시간(70h/1ps, Cray X-MP)과 경계조건 등 이론적인 불완전함으로 아직 실험적인 단계이다.<sup>[3][4]</sup> 이에 전자를 입자로 보고 해석하는 볼츠만 전송방정식을 풀기 위한 방법이 활발히 연구되고 있는데 이 역시 난해한 편미분 방정식이기 때문에 수력학적(Hydrodynamic) 모델로 근사화하여 풀거나 전자들을 초입자(Super Particle)로 표현하여 양자역학적 에너지 밴드구조상에서 시뮬레이션하고 그 결과를 통계적으로 해석, 궁극적으로 볼츠만 방정식의 해를 제공하는 MC(Monte Carlo) 방법으로 풀게 된다. 그런데 수학적 모델은 난해하고 또 운용파라미터들을 MC 방법등을 이용하여 구해야 하므로 오히려 MC 방법에 의해 직접 시뮬레이션 하는 것이 더욱 정확한 해를 얻을 수 있으며 현재 컴퓨터의 처리속도 향상과 더불어 서브마이크론 소자에 적합한 볼츠만 전송방정식의 해석 방법으로서 MC 방법의 이용범위가 넓혀지고 있다.<sup>[5][6]</sup>

따라서 본 논문에서는 반도체 물성과 소자 시뮬레이션을 모두할 수 있는 MC 방법을 이용하여 볼츠만 방정식에 의해 GaAs 반도체와 서브 마이크로 게이트 GaAs MESFET을 확률 통계적으로 해석하였다.

## II. GaAs의 에너지 밴드구조와 산란모델

GaAs의 에너지 밴드는 전자가 1.5eV 이상의 에너

지를 얻지 않는다고 가정하면 최대 세 개의 계곡 즉,  $\Gamma$ (〈000〉 방향), L(〈111〉 방향), 그리고 X(〈100〉 방향)을 갖는 에너지 밴드로 단순화 할 수 있다.

각 계곡의 E-k 관계식은

$$E(1 + \alpha_i E) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_i} \\ \alpha_i = 1/E_g (1 - m_i/m_e)^2$$

와 같이 표현되며  $m_i$ 는 각 계곡에서의 유효질량이다 그리고 계곡에서의 유효질량비( $m_i/m_e$ )는  $\Gamma$ , L, X 각각 0.062, 0.17, 0.58로서 속도 오버슈트의 원인이 된다.<sup>[7]</sup>

전자가 GaAs 반도체의 전도대 이동시에 발생할 수 있는 산란기구로서는 격자의 진동수에 따라 광학적 포논(Optical Phonon) 산란, 음향적 포논(Acoustic Phonon) 산란, 계곡천이에 따라 동일계곡간(Equivalent intervalley) 산란, 타계곡간(Non-equivalent intervalley) 산란이 있으며 불순물을 넣어 도핑 하였을 때 불순물(Impurity) 산란 등 총 28개의 산란율이 계산되어 고려되었다.

## III. 전자전송해석을 위한 입자시뮬레이션 방법

볼츠만 전송방정식은 식(1)과 같이 표현되며 해석적인 방법으로 풀기는 거의 불가능하다.

$$\partial f / \partial t + v \cdot \nabla_r f + k \cdot \nabla_k f = (\partial f / \partial t)_{\text{coll}} \quad (1) \\ f(r, k, t) : \text{볼츠만 분포함수}$$

따라서 확률 통계적으로 해석하는 입자시뮬레이션 방법이 제안되었다. 각 단계에서의 계산 방법은 다음과 같다.

### 1. 자유비행시간 결정

각 산란율에 자기산란을 더한 총산란율  $\lambda_{ss}$ 가 상수라고 가정하면 전자가 비행을 시작하고서 t 시간뒤 충돌할 확률은

$$P(t) = \lambda_{ss} \cdot \exp(-\lambda_{ss} \cdot t) \quad (2)$$

로 나타낼 수 있으며<sup>[8]</sup>, r을 [0, 1]의 균일한 분포를 갖는 랜덤넘버라고 가정하면

$$r = \int_0^t \lambda_{ss} \cdot \text{Exp}(-\lambda_{ss} \cdot T) dT = 1 - \exp(-\lambda_{ss} \cdot t) \quad (3)$$

이다. 따라서 전자가 산란이 일어나기까지의 자유비행시간  $t_f$ 는

$$t_f = -1/\lambda_{ss} \cdot \ln(1-r) = -1/\lambda_{ss} \cdot \ln(r) \quad (4)$$

로써 결정할 수 있다.

2. 파동벡터  $k$ 와 전자위치  $r$  결정

앞에서 구한 자유비행시간  $t_f$ 와 전자가 받는 전계를 가지고 다음식에 의해 파동벡터  $k$ 와 위치  $r$ 을 결정할 수 있다.<sup>9)</sup>

$$k = k_0 - e \cdot F \cdot t_f / \hbar \tag{5}$$

$$r = r_0 + e \cdot F \cdot t_f^2 / (2m_1) + \hbar \cdot k \cdot t_f / m_1 \tag{6}$$

여기에서  $k_0$ 와  $r_0$ 는 계산 전의 파동벡터와 전자위치의 초기상태이다. 그리고  $m_1$ 는 전자가 위치해 있는 계곡에서의 유효질량이다.

3. 산란기구 결정

산란기구를 결정하기 위해서는 우선 2장의 산란율 계산결과를 이용하여 각 산란의 크기에 따라 동일평면상을 구획 나눈다. 그리고 랜덤넘버를 발생시켜 그 크기에 해당하는 구역의 산란을 발생된 산란으로 가정하여 산란후의 상태를 결정하는데 이용한다. 즉,<sup>10)</sup>

$$\frac{\sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i}{\sum_{i=1}^M \lambda_i} < \lambda_{ss} \cdot r < \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^M \lambda_i} \tag{7}$$

$\lambda_{ss}$  : 총 산란율  
 $r$  : [0, 1]의 랜덤넘버  
 $n \leq M$

인 경우  $M$ 개의 산란중  $n$  번째의 산란이 일어난다고 보는 것이다.

4. 산란각도 결정

전자가 산란이 일어난 전와 후의 파동벡터 사이의 각도 ( $\theta$ ) 결정은 계곡간 산란을 제외하고는 구하는 변수가 두개이상 없게 있어 많은 계산시간이 소요되는 부분이다.

계곡간의 천이에 의한 산란인 경우 에너지 밴드구조가 대칭적 이어서 산란각도가 임의적이라는 가정하에 그 각도를 난수로부터 직접 구한다.

$$\begin{aligned} \theta &= \pi \cdot r_1 \\ \phi &= 2\pi \cdot r_2 \\ r_1, r_2 &: \text{Random number} \end{aligned} \tag{8}$$

반면에 광학적 포논, 음향적 포논, 불순물 산란각도인 경우는  $\theta$ 의 확률분포가 다음 식들과 같다.<sup>11)</sup>

1) 광학적 포논 산란(optical phonon scattering)

$$P(\theta)d\theta \sim \frac{[\gamma^{1/2}(E)\gamma^{1/2}(E) + \alpha EE\cos\theta]^2 \sin\theta d\theta}{[\gamma(E) + \gamma(E) - 2\gamma^{1/2}(E)\gamma^{1/2}(E)\cos\theta]}$$

$$\gamma(E) = E(1 + \alpha_1 E) \tag{9}$$

2) 음향적 포논 산란(acoustic phonon scattering)

$$P(\theta) d\theta \sim [1 + \alpha_1 E(1 + \cos\theta)]^2 \sin\theta d\theta \tag{10}$$

3) 불순물 산란(impurity scattering)

$$P(\theta) d\theta \sim \left[ \frac{1 + \alpha_1 E(1 + \cos\theta)}{2k^2(1 - \cos\theta) + \beta^2} \right]^2 \tag{11}$$

$$\beta = \left[ \frac{q^2 N_D}{\epsilon_0 k_B T} \right]^2 \tag{12}$$

따라서 이 해석적인 해를 구하는 것은 거의 불가능하나 두개의 랜덤넘버를 이용하는 Von Neumann 알고리즘으로 쉽게 구할 수 있으며<sup>12)</sup> 이로써 각 방향으로의 파동벡터를 다음 식에 의해 결정하게 된다.

$$\begin{aligned} k_x &= |k| \cdot (\cos\theta \cdot \cos\theta_k - \sin\theta \cdot \sin\theta_k \cdot \cos\phi) \\ k_y &= |k| \cdot (\sin\theta \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta_k \cdot \cos\phi_k - \sin\theta \cdot \sin\phi \cdot \sin\phi_k \\ &\quad + \cos\theta \cdot \sin\theta_k \cdot \cos\phi_k) \\ k_z &= |k| \cdot (\sin\theta \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta_k \cdot \sin\phi_k + \sin\theta \cdot \sin\phi_k \\ &\quad + \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi_k) \end{aligned} \tag{13}$$

여기에서  $|k|$ 는 산란이 일어난후 파동벡터의 크기이다. 또  $\theta_k$ 는 산란전 파동벡터의 X축과의  $\theta$ 각도이며  $\phi_k$ 는 Y축과의  $\phi$  각도이다.

프로그램은 1000개의 초입자와 이차원 포아송방정식을 풀기 위하여 Iteration 방법중 수렴특성이 좋은 SOR(Successive Over Relaxation) 알고리즘을 사용하였다. 그리고 포아송 방정식을 FDM으로 해석시 각 노드에서의 전자농도를 구하기 위하여 CIC(Cloud-In-Cell) 방법을 사용하였다. 또한 0.05psec의 시간간격으로 시뮬레이션하도록 프로그래밍 하였다.

IV. MESFET 시뮬레이션 결과 및 고찰시

1. 시뮬레이션되는 소자 구조

그림 1에 시뮬레이션되는 소자의 삼차원적인 구조를 나타내었다. 게이트의 길이는 서브마이크론단위의  $0.6\mu m$ 이고 게이트와 소오스, 게이트와 드레인간의 간격도  $0.6\mu m$ 로 주어 대칭적이다. 에피층의 두께는  $0.12\mu m$ 이므로 쇼트키 효과에 의한 공핍층 두께가 약  $0.1\mu m$ 임을 고려하면 거의 Normally-On 상태이다. 그리고 버퍼층의 두께는  $0.4\mu m$ 로서 에피층에서 주입되는 전자의 도달 한계<sup>13)</sup>까지를 고려하였다. Schottky Contact은 Al 또는 TiPtAu로서 접촉전위는  $-0.8V$ 를 가정하였다.<sup>14)</sup>

그리고 Ohmic Contact은 소자의 좌우에 붙어 있는 형태로서 실제 이런 구조의 소자는 제작되어 있지 않지만 구조적으로 MESFET과 다르지 않으며 시뮬

레이션상의 잇점 때문에 연구에 이용되었다. 특히 시뮬레이션되는 범위를 최소화 할 수 있으므로 보다 적은 메모리로 계산이 가능하고 빠른 계산을 할 수 있는 장점이 있기 때문에 채택하였다.

이런 삼차원적인 소자의 구조가 너비방향으로 대칭적이므로 그림 1 과 같이 이차원적인 해석이 가능하여 더욱 많은 메모리 절약과 많은 계산을 생략할 수가 있다. 따라서 그림 2 와 같은 형태의 소자를 해석하게 된다.

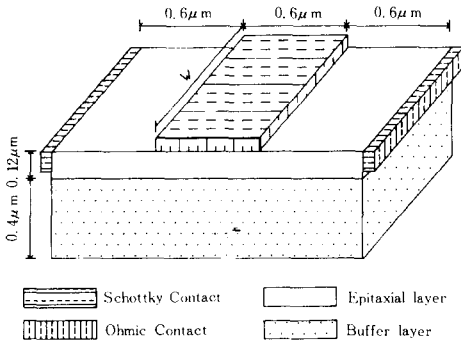


그림 1. 시뮬레이션되는 소자의 구조 (3-Dimension)

Fig. 1. 3-D device structure simulated.

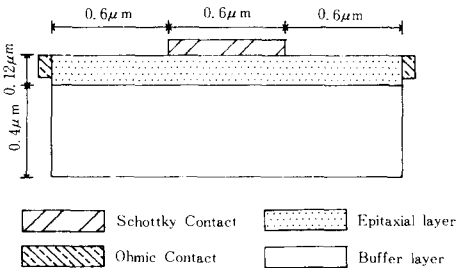


그림 2. 시뮬레이션되는 소자의 구조 (2-Dimension)  
Fig. 2. 2-D device structure simulated.

2. 포화 포텐셜 에너지 분포

초기의 전자상태 및 위치는 시간의 경과와 함께 급한 변화를 보이다가 전체적으로는 안정상태처럼 보이기 시작하는 때가 있다. 이때부터 포텐셜의 변화는 거의 없고 단지 드레인으로 빠지는 전자들이 소오스로 주입되는 과정만이 반복되는 것처럼 보인다. 이 시간은 시뮬레이션이 시작된 뒤 대략 10psec 전

후이었으며 이때의 포텐셜을 포화 포텐셜이라 하고 한 예로서 바이어스가  $V_{GS}=0.0V$ ,  $V_{DS}=2.0V$  일때의 포텐셜 에너지 분포를 그림 3 에 나타내었다. 그림 4 는 이 때의 전자의 위치분포 그림으로서 전체 (T) 와 각 계곡별로 ( $\Gamma$ ), (L), (X)에 나타내었다. 채널깊이  $0.8\mu m$ 에서의 전계분포 그림 5 에서 보듯이 게이트의 드레인쪽에서 강한 전계가 형성되어 전자의 계곡천이가 현저하게 일어나 전자 속도가 포화상태에 이르게 됨을 알 수 있다.

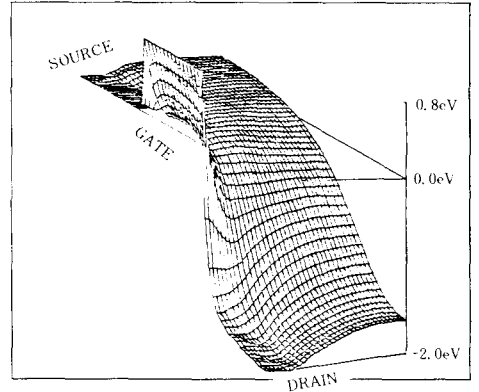
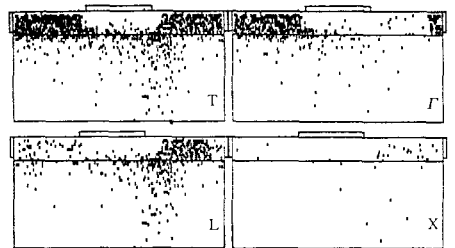


그림 3. 포텐셜 에너지 분포 ( $V_{GS}=0.0V$ ,  $V_{DS}=2.0V$ )  
Fig. 3. Potential energy distribution. ( $V_{GS}=0.0V$ ,  $V_{DS}=2.0V$ )



( $\Gamma$ , L, X계곡과 Total 분포)

그림 4. 전자 분포 ( $V_{GS}=0.0V$ ,  $V_{DS}=2.0V$ )  
Fig. 4. Electron distribution. ( $V_{GS}=0.0V$ ,  $V_{DS}=2.0V$ )

3. 시간에 따른 드레인 전류와 차단주파수 결정  
2 절에서와 같은 포텐셜분포와 전자 상태를 이용하여 입자들을 소오스와 게이트 사이에 두고 시간에 따른 입자들의 이동상태를 추적함으로써 MESFET 을 해석할 수 있는 자료를 얻을 수 있다. 그림 6 은

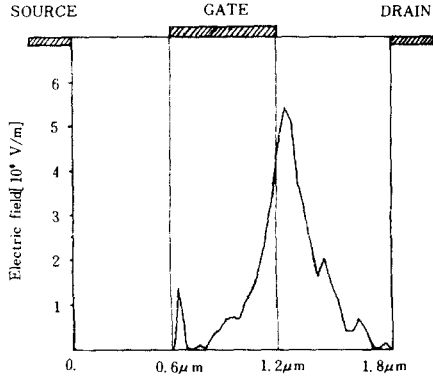


그림 5. 채널에서의 전기분포 (depth 0.8 μm)  
 Fig. 5. Electric field distribution in channel. (depth 0.8 μm)

$V_{GS}=0.0V$ ,  $V_{DS}=2.0V$ 일때 시간의 경과에 따른 초입자들의 이동상태를 출력한 것이다. 이 그림에서 바이어스가 결정된 후에 형성된 채널을 통과하여 전자가 드레인에 이르는 과정을 시각적으로 알 수 있고 상당수의 전자가 버퍼층을 통과하고 있다. 그리고 30psec 동안에 드레인에 도달한 입자의 수를 누적시키면 그림 7과 같은 곡선을 얻을 수 있다. 이때 곡선의 기울기가 그 시간에서의 전류가 되며 일정한 기울기를 갖을 때 까지는 얼마간의 시간지연이 있다. 즉 외부 바이어스에 의해 포텐셜 분포가 결정된 후 게이트 밑의 채널을 지나 드레인에 도달하여 일정한 전류를 형성하기까지 걸리는 시간이 있으며 그림 6에서는 21.2psec이다. 역으로 생각하면 이 수치는 이 소자의 차단 주파수가 되며 이론적으로 사용하는 공식과 비교할 때

$$f_{cut\ off} = \nu_s / \pi L_g = 45GHz \quad (15)$$

$$1/21.2\ psec \cong 47GHz$$

로서 상당히 일치하는 결과이다.

4. 전류-전압 특성 곡선

3절에서처럼 각 바이어스 상태에서의 일정해진 기울기를 정리하여 그림으로 나타내면 그림 8과 같은 전류-전압 곡선을 얻을 수 있다. 이 결과를 Shockley 모델에 의한 Threshold 전압식과 비교하면 다음과 같다.

$$V_T = -\frac{qN_D A^2}{2\epsilon} + V_{B1} \quad (16)$$

$$V_{GS} - V_{DST} = V_T \quad (17)$$

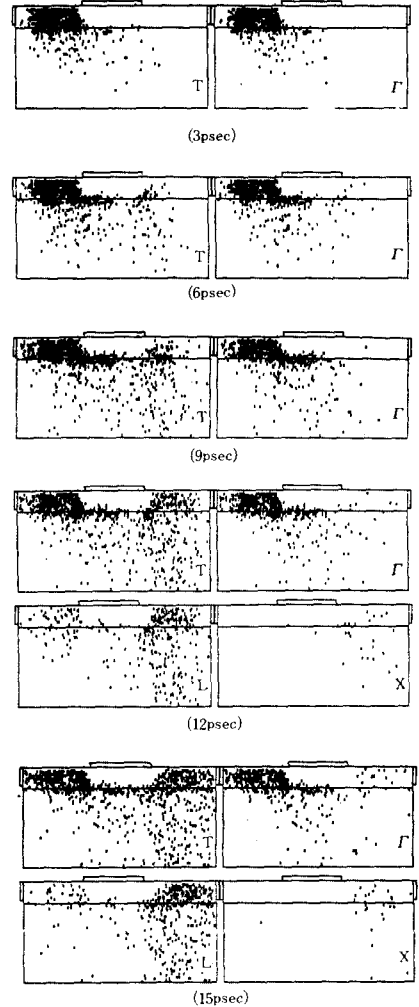


그림 6. 시간에 따른 전자이동 그림  
 Fig. 6. Electron movement according to time.

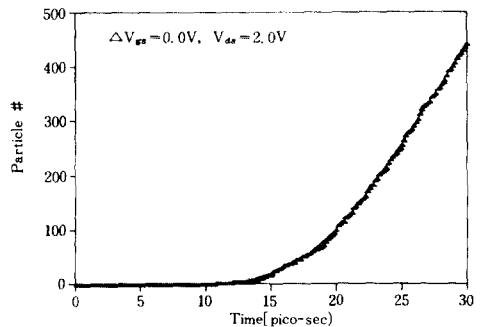


그림 7. 드레인에서의 누적 입자수 ( $V_{GS}=0.0V$ ,  $V_{DS}=2.0V$ )  
 Fig. 7. Accumulated particles in drain. ( $V_{GS}=0.0V$ ,  $V_{DS}=2.0V$ )

$V_{GS}=0.0V$ 일때  $V_{DS}=0.21V$ 임을 감안하면 상당히 근사한 결과이다. 그리고  $V_{DS}$ 의 증가에 따라 전류가 포화상태에 이르지 못하는 것은 버퍼층을 통해서도 전자가 이동되기 때문이며 이의 고찰을 위해서 그림 9와 같이 게이트 바이어스를 일정하게 주고  $V_{DS}$ 를 0.1V, 1.0V, 2.0V로 바꾸어 주면서 게이트의 드레인 쪽에서의 포텐셜에너지 분포를 구하였다. 이 그래프에서 구한 채널의 포텐셜 깊이를 이용하여 Shockley 모델식에 역으로 대입하면 유효채널의 두께를 계산할 수 있는데  $V_{DS}=1.0V$ 에서  $0.121\mu m$ ,  $V_{DS}=2.0V$ 에서  $0.123\mu m$ 로서 버퍼층을 통해 전자가 이동하는 것을 유효채널의 깊이가 증가하는 효과로 해석할 수 있음을 알 수 있다.

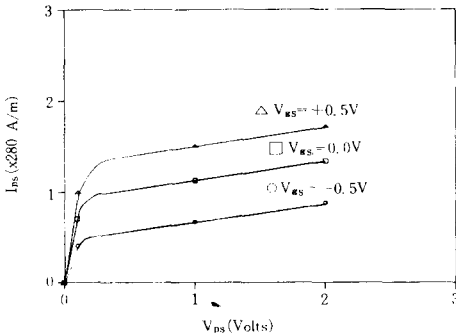


그림 8. 전류-전압 특성 곡선  
Fig. 8. Current-voltage characteristics.

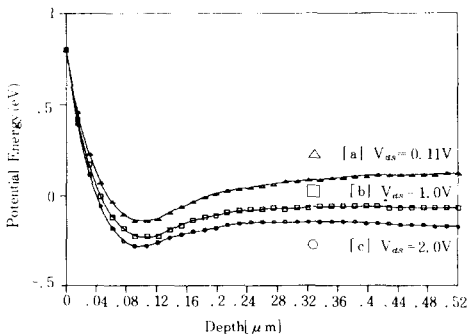


그림 9. 게이트의 드레인쪽에서의 포텐셜 에너지  
Fig. 9. Potential in gate-drain spacing.  
(a)  $V_{DS}=0.1V$ ,  
(b)  $V_{DS}=1.0V$ ,  
(c)  $V_{DS}=2.0V$ .

V. 결 론

화합물 반도체 회로의 집적기술이 발달하고 보다 높은 주파수 영역에서 동작하는 소자에 대한 요구가 증대함에 따라 MESFET 게이트 길이가 서브마이크론 단위로 축소되고 있다. 게이트 길이의 축소로 인한 물리 및 전기적 현상에 대한 이론 정립과 전자의 비정상상태에서의 전송 해석의 필요성이 더욱 커지고 있다. 이에 본 논문에서는 볼츠만 전송 방정식을 확률 통계적으로 해석하는 Monte-Carlo 알고리즘을 이용하여  $0.6\mu m$  게이트 길이를 갖는 GaAs MESFET의 특성 분석을 위한 프로그램을 작성하고 입자 시뮬레이션을 행하였다.

그 결과로 첫째 소자 시뮬레이션으로 소자내의 전자 분포와 포텐셜 에너지를 구하고 전자의 이동을 추적하였다. 이 과정으로 구한 소자의 차단 주파수는 47GHz이며 공식에 의한 계산결과와 상당히 일치하였다. 그리고 드레인전류를 결정하여 전류-전압 특성곡선을 얻었으며 이 모두 버퍼층에 의한 효과를 고려할 수 있었다.

둘째, 채널외로 흐르는, 즉 기생 전류를 채널깊이의 증가로 해석할 수 있었으며  $0.12\mu m$ 의 채널의 깊이가  $V_{DS}=1.0V$ 일 때  $0.121\mu m$ ,  $V_{DS}=2.0V$ 일 때  $0.123\mu m$ 로 드레인 바이어스가 증가함에 따라 유효 채널의 깊이가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같이 Monte-Carlo 알고리즘을 이용하여 확률 통계적으로 소자를 해석할 수 있는 범위는 넓으며 날로 발전하는 컴퓨터의 처리속도와 함께  $1/\sqrt{n}$  (n은 시뮬레이션에 사용되는 입자의 수)이라는 오차상수를 줄일 수 있어 앞으로 소자 해석 방법으로서 입자 시뮬레이션이 널리 활용될 것으로 예상된다.

參 考 文 獻

- [1] David K. Ferry, *Gallium Arsenide Technology*, SAMS, pp. 189-201, 1985.
- [2] Giovanni Ghione etc., "Physical modeling of GaAs MESFET's in an integrated CAD environment: from device technology to microwave circuit performance," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 37, no. 3, pp. 457-468, 1989.
- [3] M.C. Yalabik etc., "Quantum mechanical simulation of charge transport in very small semiconductor structures," *IEEE Trans. Electron Device*, vol. 36, no. 6, pp. 1009-1014, 1989.
- [4] Karl Hess, *Advanced Theory of Semiconductor Devices*, Prentice-Hall International

- Editions, pp. 227-231, 1988.
- [5] C. Moglestue, "Monte carlo particle modelling of local heating in n-Type GaAs FET," *IEE Proc.*, vol. 128, pt. I, no. 4, pp. 131-133, 1981.
  - [6] C. Moglestue, "Monte carlo particle model study of a microwave photodetector," *IEE Proc.*, pt. I, no. 3, pp. 103-106, 1984.
  - [7] 문승환, 정학기, 이문기, 김봉열., "Monte-Carlo 시뮬레이션에 의한 GaAs MESFET의 전자전송 해석," 1989년도 하계종합학술대회논문집, 대한 전자공학회.
  - [8] A.D. Boardman, *Physics Programs*, Johnson Wiley & Sons, pp. 355-410, 1980.
  - [9] C.M. Snowden, *Semiconductor Device Modelling, IEE Materials & Devices Series* 5, pp. 174-202, 1988.
  - [10] 남승현, Monte-Carlo 방법을 이용한 AlGaAs/GaAs 이차원 전자가스층의 전달특성분석, 석사 학위논문, 1987.
  - [11] Micheal Shur, *GaAs Devices and Circuits*, Plenum Press, pp. 11-103, pp. 301-309, 1987.
  - [12] W. Fawcett, D.A. Boardman and S. Swain, "Monte-carlo determination of electron transport properties in gallium arsenide," *J. Phys. Chem., Solids*, vol. 31, pp. 1963-1990, 1970.
  - [13] Osman L. EL-Sayed etc., "Performance analysis of sub-micro gate GaAs MESFETs," *Solid-State Electronics*, vol. 30, no. 6, pp. 643-654, 1987.
  - [14] Joseph Mun, *GaAs Integrated Circuit Design*, BSP Professional Books, pp. 204-319, 1988.

著 者 紹 介



文 承 煥 (正會員)  
 1965年 3月 15日生. 1988年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업.  
 1990年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 공학석사 학위 취득.  
 1990年 2月~삼성전자(주)연구원. 주관심분야는 GaAs Device Modelling 및 Simulation.



鄭 鶴 起 (正會員)  
 1961年 2月 20日生. 1983年 2月 아주대학교 전자공학과 졸업.  
 1985年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 공학석사 학위 취득.  
 1985年 3月~현재 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중.  
 1990年 3月~군산대학교 전자공학과 전임강사. 주관심분야는 GaAs Process 및 Device Modelling과 Simulation 등임.

●

金 鳳 烈 (正會員) 第25卷 第11號 參照  
 현재 연세대학교 전자공학과 교수