

서브미크론 MESFET의 DC 특성

The DC Characteristics of Submicron MESFETs

10-10-4

임 행 삼*, 손 일 두**, 홍 순 석**

(Haeng-Sam Lim, Il-Doo Son, Soon-Seuk Hong)

Abstract

In this paper, the current-voltage characteristics of a submicron GaAs MESFET is simulated by using the self-consistent ensemble Monte Carlo method. The numerical algorithm employed in solving the two-dimensional Poisson equation is the successive over-relaxation(SOR) method. The total number of employed superparticles is about 10000 and the field adjusting time is 10fs. To obtain the steady-state results, the simulation is performed for 10ps at each bias condition. The simulation results show the average electron velocity is modified by the gate voltage.

Key Words(중요용어) : Self-Consistent Ensemble Monte Carlo Method(셀프컨시스턴트 앙상블몬테 카를로 방법), Two-Dimensional Poisson Solver(2차원 포아송 수치 해석), Scattering Rate(산란율).

1. 서 론

최근의 반도체 소자 공정 기술의 발전으로 인해 채널 길이가 짧은 소자의 제조가 가능하면서 서브미크론(submicron) GaAs MESFET 소자의 응용이 급격히 늘고 있다. 화합물 반도체 재료인 갈륨비소(GaAs)가 갖고 있는 전자의 높은 이동도는 실리콘(Si)보다 우수하여 소자의 성능을 향상시킨다^{1,2)}. 특히 채널 길이가 서브미크론 단위로 짧은 소자의 경우 단순히 채널 길이 축소에 의한 성능 향상 이외에 비평형 전송(nonstationary transport) 특성인 탄도 비행(ballistic transport) 현상과 과도 속도 오버슈트(transient velocity overshoot) 현상은 소자의 전기적 특성을 크게 향상시킬 수 있다³⁾.

비평형 전송 특성이 잘 나타나는 서브미크론 GaAs MESFET 소자의 전기적 특성에 대한 모델링 방법으로 표동-확산 모델(drift-diffusion model)과 수력학적 모델(hydrodynamic model)은 열평형 상태에서 많이 벗어난 상태에 대한 해석에는 한계가 있다. 이에 반해 볼츠만 수송 방정식(Boltzmann

transport equation)의 해를 푸는 한 방법으로서 몬테카를로 방법(MCM : Monte Carlo Method)이 많이 이용되고 있으며, 실험치에 매우 가까운 결과를 보여주고 있다^{4,5)}. 또한 이 방법은 소자의 단자 전류와 같은 전기적인 파라미터 추출에 이용될 뿐만 아니라 전자의 속도와 같이 측정하기 어려운 미시적인 값들에 대한 정보도 얻을 수 있다. 이러한 이유 때문에 다른 반도체 소자 및 재료에 대한 연구 방법으로 광범위하게 이용되고 있다^{6,7,8)}. 몬테카를로 방법은 적용 범위에 따라 세가지로 분류할 수 있으며, 단일 입자 몬테카를로 방법(Single Particle MCM)은 반도체 벌크에서의 정상 상태 전송 특성 연구에 이용되고, 앙상블 몬테카를로 방법(Ensemble MCM)은 반도체 벌크에서의 과도 전송 특성 연구에 적용되고 있으며, 셀프컨시스턴트 앙상블 몬테카를로 방법(Self-Consistent Ensemble MCM)은 반도체 소자의 전기적 특성 연구에 이용된다.

본 연구에서는 셀프컨시스턴트 앙상블 몬테카를로 방법을 이용하여 서브미크론 GaAs MESFET 소자의 DC 특성을 연구하였다. 2장에서 셀프컨시스턴트 앙상블 몬테카를로 방법에 대하여 언급하였고, 3장에서는 시뮬레이션 결과를 검토하고, 4장에서 결론을 논하였다.

* : 홍익대학교 전자공학과

** : 홍익대학교 전자전산공학과

접수일자 : 1997년

심사완료 : 1997년

2. 셀프컨시스턴트 앙상블 몬테카를로 방법

반도체 소자의 전기적인 특성을 해석하기 위하여 소자내의 전계 분포와 전자 분포를 알아야 한다. 전계 분포는 Poisson 방정식을 통해 구하고, 주어진 전계 분포에서 전자 분포는 몬테카를로 입자의 운동식으로부터 구한다. 셀프컨시스턴트 앙상블 몬테카를로 방법은 이 두 식을 연립하여 셀프컨시스턴트한 해를 수치 해석적인 방법으로 구하는 것이다. 다음은 셀프컨시스턴트 앙상블 몬테카를로 시뮬레이션에서 필요한 사항을 간략히 언급하였다.

가) 몬테카를로 입자의 운동 모델

반도체 내의 전자의 상태는 공간 전하와 외부 바이어스 전압에 의한 전계와 산란 기구(scattering mechanism)에 의해 영향을 받는다. 반도체 재료의 격자 구조에 따른 영향은 에너지 밴드(energy band) 모델에서의 유효질량으로 나타난다. 몬테카를로 입자의 운동은 충돌간의 자유 비행과 충돌에 의한 급격한 운동 상태의 변화로 구분된다. 전자의 자유 비행 시간(free flight time)과 충돌 후의 운동량의 변화는 확률적으로 묘사하여 난수(random number) 발생을 통해 값이 결정된다.

에너지 밴드는 Γ , L , X 인 세 계곡을 고려하고 각 계곡에서의 비포물형 밴드(nonparabolic band) 형태로 다음과 같이 모델링된다.

$$E_{\mathbf{k}}(1 + \alpha E_{\mathbf{k}}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2 m_a^*} \quad (1)$$

여기서, $E_{\mathbf{k}}$ 는 전자의 운동에너지, α 는 비포물형 파라미터, \hbar 는 Planck 상수, k 는 파수 벡터 \mathbf{k} 의 크기, m_a^* 는 상태밀도 유효질량(density-of-state effective mass)이다. 자유 비행 시간 동안의 파수 벡터의 변화는

$$\hbar \frac{d\mathbf{k}}{dt} = -e\mathbf{F} \quad (2)$$

이고, 여기서 e 는 전자전하량, \mathbf{F} 는 전계이다. 전자의 운동량 $\hbar \mathbf{k}$ 에 따른 전자의 위치 \mathbf{r} 와 속도 \mathbf{v} 의 시간에 따른 변화는 다음과 같다.

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}(\mathbf{k}) \quad (3)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{k}) = \frac{\hbar \mathbf{k}}{m_a^*(1 + 2\alpha E_{\mathbf{k}})} \quad (4)$$

자유 비행 시간 τ 은 여러 가지 산란 기구에 대한 총 산란율과 가상 산란율(self-scattering rate)⁴⁾을 합하여 전자의 에너지에 대해 일정한 산란율 Γ_0 를

가지고 다음 식으로 부터 구해진다.

$$\tau = -\frac{\ln(r_1)}{\Gamma_0} \quad (5)$$

여기서, r_1 은 0과 1 사이의 난수이다. 본 연구에서는 가상 산란으로 인해 야기되는 계산 시간을 줄이기 위하여 반복적 감마(iterative Gamma) 방법⁵⁾을 이용하여 전자의 자유 비행 시간을 계산하였다. 충돌 후 전자의 운동량은 여러 산란 기구 중 새로운 난수에 의해 선택된 산란 기구에 의해 결정된다. 본 연구에서는 이온화된 불순물(ionized impurity) 산란, 음향 포논(acoustic phonon) 산란, 광학 포논(optical phonon) 산란, 극성 광학 포논(polar optical phonon) 산란, 계곡간 포논(intervalley phonon) 산란 등을 고려하였다.

나) 2차원 Poisson 방정식

몬테카를로 방법을 이용한 반도체 소자 시뮬레이션은 전계 재조정 시간(field adjusting time)마다 다음과 같은 2차원 Poisson 방정식에 대한 수치 해석적인 풀이가 요구된다.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \frac{e}{\epsilon_s} (n - N_D^+) \quad (6)$$

여기서 ψ 는 포텐셜(potential), ϵ_s 는 유전율, n 는 전자 밀도, N_D^+ 는 이온화된 도우너(ionized donor) 밀도이다. 본 연구에서는 유한차분법(finite difference method)을 이용하여 Poisson 방정식을 이산화(discretization)하였다. 이온화된 도우너 밀도는 상온에서 모든 도우너가 이온화되었다고 가정하여 도우너 도우핑(doping) 밀도와 같게 하였다. 몬테카를로 입자인 전자는 시뮬레이션 동안 초입자(super-particle)의 전하량으로 소자 내에 불연속인 분포를 갖는다. 이산화된 격자점에서의 전자 밀도 계산은 NGP(Nearest Grid Point) 방법^{4,9)}을 적용하였다. 본 연구에서는 SOR(Successive Over-Relaxation) 방법^{4,9)}을 이용하여 2차원 Poisson 방정식의 해를 구하였다.

다) 경계 조건

2차원 Poisson 방정식의 경계 조건으로 소오스, 드레인, 게이트 등과 같은 금속 접점에서는 Dirichlet 경계 조건을 만족하고, 나머지 경계면은 Neumann 경계 조건을 만족하도록 하였다. 초입자의 운동에 대한 경계 조건은 Poisson 방정식의 경계 조건에 따라 결정된다. Dirichlet 경계 조건이 적용되는 Ohmic contact과 Schottky contact의 경우는 완전 흡수 조건(absorbing boundary condition)을 적용한다.

Ohmic contact에서는 전하 중성 조건을 만족하도록 전계 재조정 시간마다 초입자를 주입하거나 제거한다. Neumann 경계 조건이 적용되는 경계면에서는 완전 반사 조건(reflecting boundary condition)을 적용한다. 본 연구에서 시뮬레이션한 MESFET에서의 경우 Schottky contact인 게이트는 공핍층(depletion layer)이 형성되어 초입자가 게이트 경계면에 도달할 확률이 매우 적으므로 완전 반사 조건을 적용하였다.

3. 시뮬레이션 결과

셀프컨시스턴 앙상블 몬테카를로 시뮬레이션에서 온도는 300 °K, 초기 초입자(superparticle) 수는 10000, 전계 재조정 시간은 10 fs이며, Poisson 방정식에 대한 격자 구조는 간격이 50Å인 균일 격자 구조이며, SOR(Successive Over Relaxation) 방법을 이용하여 해를 구하였다. 한 바이어스 조건 하에서 10 ps 동안 시뮬레이션하였으며, 이 경우 계산 시간은 개인용 컴퓨터(Pentium-166 PC)에서 약 20분 정도 걸렸다.

그림 1은 Γ 계곡에서 운동 에너지 E_k 를 갖는 전자에 대한 각 산란율과 총 산란율(굵은 선)을 나타낸 것이다. 산란 기구는 음향 포논 산란(AP), 극성 광학 포논 산란(POP), 계곡간 포논 산란(IP), 이온화된 불순물 산란(II) 등을 고려하였다. 산란 기구들의

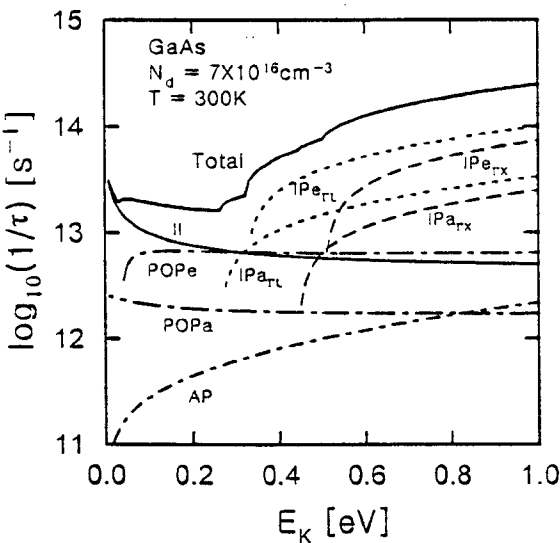


그림 1. 전자 산란율
Fig. 1. Electron scattering rates.

파라미터 값들은 표 1에 나타난 값을 이용하였다. 그림 2는 시뮬레이션에 이용된 $0.65 \mu\text{m} \times 0.1 \mu\text{m}$

표 1. GaAs 파라미터 [10]
Table 1. Parameters for GaAs [10]

| Bulk Material Parameters | | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------|
| Lattice Constant (10^{-8}cm) | 5.653 | | | |
| Acoustic Deformation Potential (eV) | 7.170 | | | |
| Sound Velocity (10^5cm/sec) | 3.803 | | | |
| Longitudinal Optical Phonon Energy (eV) | 0.0353 | | | |
| Low Frequency Dielectric Constant | 13.18 | | | |
| High Frequency Dielectric Constant | 10.89 | | | |
| Alloy Scattering Potential (eV) | ... | | | |
| Valley Dependent Parameters | | | | |
| | G ₋ Valley | L ₋ Valley | X ₋ Valley | |
| Energy Gaps (eV) | 1.420 | 1.710 | 1.910 | |
| Effective Mass Ratio | 0.067 | 0.560 | 0.850 | |
| Nonparabolicity (eV^{-1}) | 0.613 | 0.113 | 0.012 | |
| Number of Equivalent Valley | 1 | 4 | 3 | |
| Intervalley Deformation Potential (10^9eV/cm) | G ₋ Valley | ... | 1.0 | 1.0 |
| | L ₋ Valley | 1.0 | 1.0 | 0.9 |
| | X ₋ Valley | 1.0 | 0.9 | 0.9 |
| Intervalley Phonon Energy (eV) | G ₋ Valley | ... | 0.0300 | 0.0299 |
| | L ₋ Valley | 0.0300 | 0.0290 | 0.0293 |
| | X ₋ Valley | 0.0299 | 0.0293 | 0.0299 |

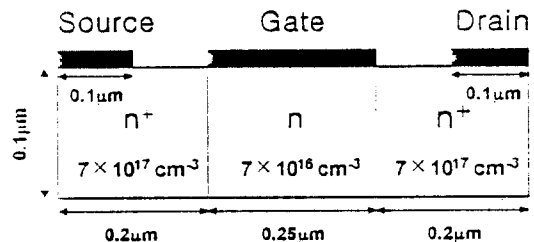


그림 2. 시뮬레이션에 이용된 MESFET의 2차원 구조
Fig. 2. Two dimensional structure of the simulated MESFET.

의 2차원 MESFET 구조를 나타낸 것으로, 채널 길이가 $0.25\ \mu\text{m}$ 인 self-aligned 구조를 이루고 있다. 소오스와 드레인 영역의 도우너 도핑 밀도는 $7 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ 이고, 채널의 도우너 도핑 밀도는 $7 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 이다. Ohmic contact인 소오스와 드레인 금속 경계면 밀부분의 격자 셀(cell)은 $2 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 의 도우핑 농도를 갖으며, 전계 재조정 시간마다 전하 중성 조건을 유지하도록 하였다. 그림 3은 소오스를 기준으로 한 드레인 전압이 0.8V 인 조건에서 게이트 전압이 -0.05V 와 -0.4V 일 때의 정상 상태 전자 분포를 나타내었다. 공핍층의 두께가 게이트 전압에 따라 변화하는 것을 보여주고 있다. 게이트 전압은 내부 전위(built-in potential) 0.8V 를 포함한 값이다. 그림 4은 정상 상태에서 채널 방향으로의 전자의 평균 속도 분포를 나타내었다. 게이트 전압이 공핍층의 두께뿐만 아니라 전자의 평균 속도에도 영향을 주고 있음을 보여주고 있는데, 이는 전계의 변화에 기인한 것으로 예측된다. 최대 평균 전자 속도는 약 $2.8 \times 10^7\ \text{cm/s}$ 로 나타났다. 그림 5에서는 시뮬레이션을 통하여 얻은 MESFET의 전류-전압 특성 곡선을 나타낸 것이다.

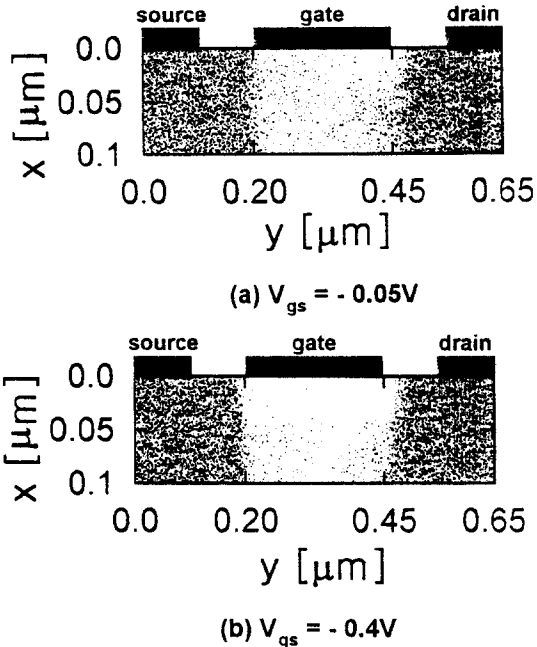


그림 3. 전자 분포 ($V_{ds} = 0.8\text{V}$).
Fig. 3. Electron distribution ($V_{ds} = 0.8\text{V}$).

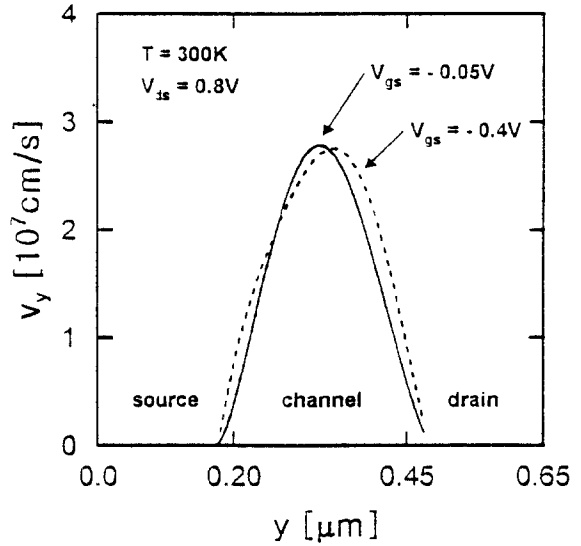


그림 4. 평균 전자 속도 분포
Fig. 4. Profiles of average electron velocity.

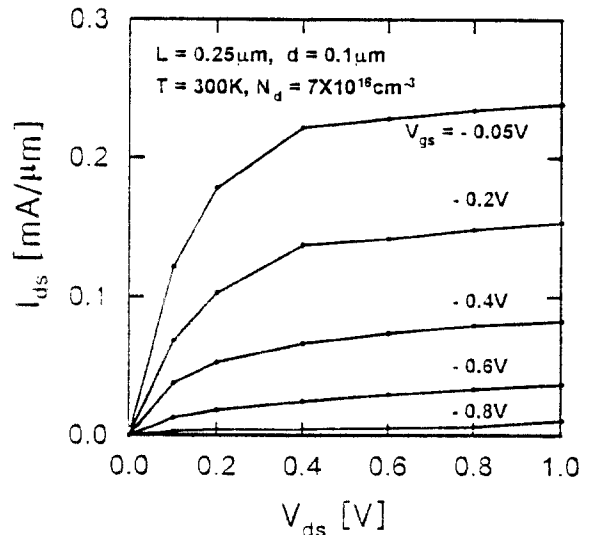


그림 5. 전류-전압 특성
Fig. 5. The current-voltage characteristics.

4. 결 론

본 연구에서는 셀프컨시스턴트 앙상블 몬테카를로 방법을 이용하여 서브미크론 GaAs MESFET의 DC 특성을 시뮬레이션하였다. 2차원 Poisson 방정식의 수치 해석 기법으로 간단하고 빠른 수렴성을 갖는 SOR 방법을 이용하였다. 시뮬레이션은 약 10000개

의 초입자 수와 10 fs의 전체 재조정 시간을 가지고 실시하였으며, 각 바이어스 조건에서 10 ps 동안에 시뮬레이션하였다. 게이트 전압이 공핍층의 두께뿐만 아니라 채널 방향의 전자의 평균 속도에도 영향을 주고 있음을 확인하였다. 시뮬레이션을 통해 MESFET의 전류-전압 특성 곡선을 얻었다.

※ 본 연구는 1996년도 홍익대학교 학술연구
조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. M. B. Das, "Millimeter-wave performance of ultrasubmicrometer-gate field effect transistors: A comparison of MODFET, MESFET, and PBT structure," *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. ED-34, no.7, pp.1429-1440, July 1987.
2. D. Widiger, I. C. Kizilyalli, K. Hess, and J. J. Coleman, "Two-dimensional transient simulation of an idealized high electron mobility transistor," *IEEE Trans Electron Dev.*, vol. ED-32, pp.1092-1102, June 1985.
3. Y. Awano, K. Tomizawa, and N. Hashizume, "Principles of Operation of Short-Channel Gallium Arsenide Field-Effect Transistor Determined by Monte Carlo Method," *IEEE Trans Electron Dev.*, vol. ED-31, pp.448-451, April 1984.
4. C. Jacoboni and P. Lugli, *The Monte Carlo Method for Semiconductors Device Simulation*, Springer-Verlag, Wien-New York, 1989.
5. C. Moglestue, *Monte Carlo Simulation of Semiconductors Devices*, CHAPMAN & HALL, 1993.
6. W. Fawcett, A.D. Boardman, and S. Swian, "Monte Carlo determination of electron transport properties in Gallium Arsenide," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 31, pp.1963-1990, 1970.
7. K. Tomizawa and N. Hashizume, "Ensemble Monte Carlo simulation of an AlGaAs/GaAs heterostructure Mis-like FET," *IEEE Trans Electron Dev.*, vol. 35, no. 7, pp.849-856, July 1988.
8. S. Selberherr, *Analysis and Simulation of*

- Semiconductor Devices*, Springer-Verlag, Wien-New York, 1984.
9. W. Hockney and W. Eastwood, *Computer Simulation Using Particles*, McGraw-Hill 1981.
10. S. Adachi, "GaAs, AlAs, and Al_xGa_{1-x}As: Material parameters for use in research and device application," *J. Appl. Phys.*, vol. 58, pp. R1-R29, August 1985.



임행삼

1966년 12월 11일생. 1990년 2월 홍익대학교 전자공학과 공학사. 1992년 2월 동 대학교 대학원 전자공학과 석사. 1997년 8월 동 대학교 대학원 전자공학과 박사. 1997년-현재 홍익대학교 부설 과학기술연구소 연구원.



손일두

1971년 2월 23일생. 1995년 2월 홍익대학교 전자전산공학과 공학사. 1997년 2월 홍익대학교 대학원 전자전산공학과 공학석사.



홍순석

1945년 12월 21일생. 1964년-'71년 인하대학교 공대 전기공학과 졸업. 1972년-'74년 동 대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년-'93년 홍익대학교 대학원(공학). 1997년 현재 홍익대학교 전자, 전기, 컴퓨터공학부 교수.