

論文 90-27-3-9

Monte Carlo Method에 의한 GaAs의 Hydrodynamic Model Parameter의 추출

(Extraction of Hydrodynamic Model Parameters for GaAs Using the Monte Carlo Method)

朴 成 鎬* 韓 百 亨**

(Seong Ho Park and Baik Hyung Han)

要 約

Hydrodynamic model에 의해서 submicron GaAs device를 simulation 할 때 필요한 hydrodynamic model parameter 들을 Monte Carlo code를 개발하여 추출하였다. GaAs 전도대의 밴드구조로 Γ , L, X세개의 valley를 고려하였고, 산란기구로는 polar optic phonon, acoustic phonon, equivalent intervalley, non-equivalent intervalley, ionized impurity 및 piezoelectric scattering을 고려하였다. 계산으로부터 얻은 속도-전계 곡선은 실험결과와 잘 일치하였고, 다른 연구자들이 소자 시뮬레이션에 사용할 수 있도록 모델 파라미터들을 표로 제시하였다.

Abstract

The hydrodynamic model parameters for the submicron GaAs simulation are calculated using the Monte Carlo method. Γ -, L-, and X-valleys are included in the conduction band of GaAs, and polar optic phonon, acoustic phonon, equivalent intervalley, non-equivalent intervalley, ionized impurity, and piezoelectric scatterings are taken into account. The velocity-electric field strength curve obtained in this paper is in good agreement with experimental one. We present the results in tabular form so that other participants can make use of them to simulate the submicron GaAs devices by the hydrodynamic model.

I. 서 론

고 집적도와 고속 동작을 구현하기 위하여 반도체 소자의 활성길이(active length)가 $1\mu\text{m}$ 이하로 작아짐에 따라서, velocity overshoot과 ballistic transport

와 같은 비평형 전송현상(non-equilibrium transport phenomena)이 소자의 거시적인 전류-전압특성에 결정적인 영향을 미치게 되었다.^[1]

종래의 반도체소자 시뮬레이션에서 널리 사용된 drift-diffusion model^[2]은 캐리어가 전계의 변화에 순간적으로 반응한다고 가정함으로써, 이 비평형 전송 현상을 고려할 수 없었다. 그러므로 이 현상을 고려하여 시뮬레이션 함으로써 submicron device의 물리적, 전기적 특성을 밝혀내기 위한 많은 노력이 진행되었다.

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

**正會員, 漢陽大學校 物理學科
(Dept. of Physics, Hanyang Univ.)

接受日字: 1989年 1月 25日

비평형 전송현상을 고려하여 소자를 해석하는 방법으로는 Monte Carlo method⁽³⁻⁴⁾와 hydrodynamic model⁽⁷⁻⁸⁾을 들 수 있다. 이 두가지 방법을 비교해보면, 결과의 정확성 면에서는 Monte Carlo method가 CPU 시간 즉, 비용면에서는 hydrodynamic model이 유리하다. 컴퓨터 계산처리 능력으로 판단하여 볼때, 비평형 전송현상을 고려할 수 있으면서도 CPU 시간이 보다 적게 드는 hydrodynamic model이 submicron device의 CAD를 구현하기 위한 수단으로 적합하다고 할 수 있다.

Hydrodynamic model에서는 산란항을 이완시간 근사(relaxation time approximation)시켜 운동량 이완시간(momentum relaxation time)과 에너지 이완시간(energy relaxation time)으로 나타낸다. 이들은 각각 캐리어의 평균에너지(또는 평균온도)의 함수이고, 평균에너지(평균온도)는 전계의 함수이다. 그리고 실효질량은 상수가 아니라 평균에너지나 평균온도의 함수로 된다. 또, 이동도와 확산계수를 drift-diffusion model에서처럼 전계의 함수로 취급하지 않고, 에너지의 함수로 사용한다. 따라서 hydrodynamic model을 사용하여 submicron device를 시뮬레이션하기 위해서는 먼저 이 hydrodynamic model parameter들을 알아야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 hydrodynamic model에 의한 submicron device simulation에 필요한 모델 파라미터를 추출하기 위하여 one-particle Monte Carlo code를 개발하여 비평형 전송현상이 현저하게 나타나는 물질인 GaAs에 대하여 적용하였다. GaAs 전도대의 밴드구조로 Γ , L, X 세개의 valley를 고려하였고, 산란 기구로는 polar optic phonon, acoustic phonon, equivalent intervalley, non-equivalent intervalley, ionized impurity, piezoelectric scattering을 고려하였다. 계산된 전계에 따른 전자의 평균속도 값은 실험결과와 잘 일치하였으며, 계산결과를 표로 제시하여 다른 연구자들이 이를 사용하여 submicron GaAs device를 시뮬레이션할 수 있도록 하였다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. II절에서는 hydrodynamic model과 모델 파라미터에 대하여 기술하고, III절에서는 모델 파라미터를 추출하기 위하여 본 연구에서 개발한 Monte Carlo code를 설명한다. IV절에서는 본 연구로부터 얻은 GaAs의 모델 파라미터들을 제시하였고, 끝으로 결론 및 검토를 V절에 기술하였다.

II. Hydrodynamic Model과 Model Parameters

반도체 소자 내부의 캐리어 전송은 다음과 같은

semiclassical Boltzmann transport equation (이하 BTE)에 의하여 지배된다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f + \frac{q\mathbf{F}}{\hbar} \cdot \nabla_{\mathbf{k}} f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{coll}} \quad (1)$$

여기서 $f=f(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t)$ 는 캐리어 분포함수이고, \mathbf{r} 는 위치벡터, \mathbf{k} 는 파동벡터, t 는 시간, \mathbf{v} 는 속도, \mathbf{F} 는 전계, q 는 기본전하량, \hbar 는 reduced Planck 상수이다.

Hydrodynamic model의 기본방정식은 BTE의 moment를 취함으로써 얻게 된다. 즉, 임의의 함수 $\phi(\mathbf{k})$ 에 대한 BTE의 moment equation은

$$\int \phi(\mathbf{k}) \frac{\partial f}{\partial t} d\mathbf{k} + \int \phi(\mathbf{k}) \mathbf{v} \cdot \nabla f d\mathbf{k} + \int \phi(\mathbf{k}) \frac{q\mathbf{F}}{\hbar} \cdot \nabla_{\mathbf{k}} f d\mathbf{k} = \int \phi(\mathbf{k}) \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{coll}} d\mathbf{k} \quad (2)$$

(2)식에서 적분구간은 first Brillouin zone 이고, 우변은 산란효과를 나타내는 항으로 통상 이완시간 근사로 취급한다. $\phi(\mathbf{k})$ 에 $1, \hbar\mathbf{k}, \hbar^2 k^2/2m^*$ 를 각각 대입하여 적분하면, single electron gas에 대한 hydrodynamic model의 기본방정식을 얻을 수 있다.⁽⁷⁾

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot (\nabla n) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \frac{q\mathbf{F}}{m^*} + \frac{1}{m^* n} \nabla (nk_B T) = -\frac{\mathbf{v}}{\tau_m} \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + q\mathbf{v} \cdot \mathbf{F} + \mathbf{v} \cdot \nabla w + \frac{1}{n} \nabla \cdot (n\mathbf{v}k_B T) + \nabla \cdot \mathbf{Q} = -\frac{w-w_0}{\tau_w} \quad (5)$$

(3)~(5) 식은 각각 전자 수, 운동량, 에너지의 보존을 나타내는 보존방정식이다. 여기서 n, w, T, m^* 는 각각 single electron gas에 대한 전자의 농도, 평균에너지, 평균온도 및 실효질량을 나타내는데, 여기서 평균의 의미는 III절에서 설명할 것이다. k_B 와 w_0 ($=\frac{3}{2}k_B T_0$)는 Boltzmann 상수와 열평형 에너지를 나타낸다. (5)식에서 \mathbf{Q} 는 heat flow vector로 대칭 분포함수에 대해서는 존재하지 않지만, 비대칭 분포함수인 경우에는 전자의 평균온도의 함수로서 나타난다.⁽⁸⁾ (3)~(5) 식의 우변들은 각각 산란에 의한 전자의 농도, 속도 및 에너지의 변화를 이완시간 근사로 나타낸 것으로, 운동량 이완시간 τ_m 과 에너지 이완시간 τ_w 는 평균에너지의 함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_m(w) = \frac{m^*(w) v(w)}{qF} \quad (6)$$

$$\tau_w(w) = \frac{w - w_0}{qv(w)F} \quad (7)$$

여기서 $F = |F|$, $m^*(w)$ 와 $v(w)$ 는 각각 실효질량과 평균속도로서 평균에너지의 함수를 의미한다.

정상상태에서 운동량 보존방정식 (4)의 $(v \cdot \nabla)v$ 항을 무시하고 양변에 $qn\tau_m$ 을 곱해서 정리하면, 이 식은 drift-diffusion model에서 잘 알려진 전류밀도 식과 같은 형태로 된다.

$$J_n = qn\mu_n F + q\nabla(D_{nn}) \quad (8)$$

여기서 $J_n = qn v$ 이고, μ_n 과 D_{nn} 은 drift-diffusion model 과는 달리 전자의 평균에너지의 함수로 정의된다.

$$\mu_n(w) = \frac{q\tau_m(w)}{m^*(w)} \quad (9)$$

$$D_{nn}(w) = \frac{k_B T \mu_n(w)}{q} \quad (10)$$

Poisson 방정식을 포함한 (3)~(10) 식은 hydrodynamic model을 구성한다. 이 모델을 사용해서 소자 시뮬레이션을 할 때에는 독립변수로서 포텐셜 ψ , n , v , w 또는 ψ , n , v , T 를 사용한다. 이때, 아래와 같은 평균에너지와 평균온도사이의 관계식이 필요하다.

$$W = \frac{1}{2} m^* v^2 + \frac{3}{2} k_B T \quad (11)$$

Hydrodynamic model로 소자를 시뮬레이션하기 위해서는 (6), (7), (9), (10) 식에서 정의된 모델 파라미터를 알아야만 한다. 이에는 전자의 평균에너지 w , 평균온도 T , 평균실효질량 m^* 및 평균속도 v 가 필요한데, 이 값들은 III절에서 설명할 Monte Carlo method로 계산할 것이다.

III. Monte Carlo Code

Monte Carlo method 에서는 반도체 소자내의 전자의 운동을 자유비행과 산란의 연속적인 사건으로 생각하여 추적한다. 이때 자유비행시간과 산란기구의 선택 및 산란 후의 파동벡터의 방향은 물리적인 확률분포에 대응하는 난수를 발생시켜서 결정한다. 전자의 평균속도나 이동도와 같은 거시적인 정보들은 미시적인 운동을 추적하는 동안의 순간적인 해당값들을 적절하게 평균해서 얻어낸다.

Monte Carlo method는 그 성격상 one-particle Monte Carlo method^{[9]-[5]}와 many-particle Monte Carlo method(ensemble Monte Carlo method)^[6]로 나눌 수 있다. One-particle Monte Carlo method는

전자의 운동을 운동량공간에서만 추적하고 거시적인 물리량을 얻기 위하여 시간에 대한 평균을 취하기 때문에, 반도체의 정상상태 전송특성을 구하는데 사용된다. 반면에 many-particle Monte Carlo method는 수천~수만개의 전자의 운동을 운동량 공간과 위치공간에서 동시에 추적하여 전자수에 대한 평균을 취하기 때문에, 과도상태의 전송특성을 해석하거나 Poisson equation과의 self-consistent solution을 구하여 반도체 소자의 전기적 특성을 규명하는데 사용된다.

본 논문에서는 hydrodynamic model parameter를 추출하기 위하여 one-particle Monte Carlo code를 개발하였다. 이 Monte Carlo code에 밴드구조와 물질상수만을 입력으로 주면, 어떠한 반도체물질에 대해서도 정상상태의 전송특성을 해석할 수 있을 뿐만 아니라, 그 물질의 hydrodynamic model parameter들에 대한 정보도 얻을 수 있다. 본 연구에서 개발한 Monte Carlo code의 흐름도는 그림 1과 같다.

그림 1의 흐름도에서 각각의 주요 단계들을 설명하면 다음과 같다.

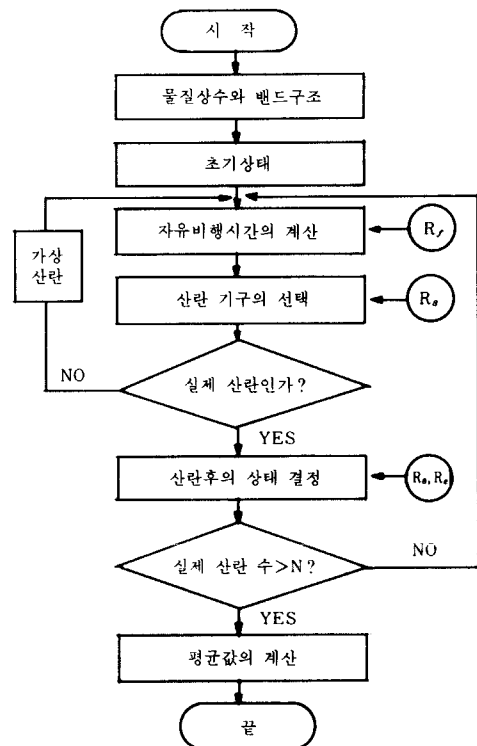


그림 1. Monte Carlo code의 흐름도
Fig. 1. Flow chart of Monte Carlo code.

1) 밴드구조와 산란기구

GaAs 전도대의 밴드구조로 Γ , L, X세개의 valley를 고려하였다. 임의의 valley i 의 에너지(E_i)-파동벡터(k) 관계식은 (12)식과 같다.

$$E_i(1 + \alpha_i E_i) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_i^*} \quad (12)$$

여기서 α_i 는 valley i 의 nonparabolicity factor를 나타낸다. (12) 식으로 부터 전자의 군속도(group velocity)는 식 (13)으로 주어진다.

$$v_i = \frac{\hbar k}{m_i^* (1 + \alpha_i E_i)} \quad (13)$$

본 연구에서 개발한 Monte Carlo code 에는 polar optic phonon, acoustic phonon, equivalent intervalley, non-equivalent intervalley, ionized impurity, piezo-electric scattering¹⁹⁾을 고려하였다. 불순물농도가 10^{17} cm^{-3} 일 때, 각각의 valley에서의 총산란율을 그림 2

에 제시하였다. 사용한 물질상수 값들은 표 1 과 같다.

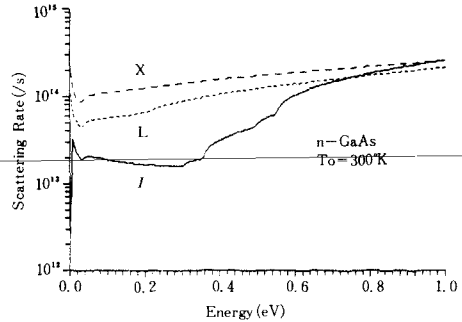


그림 2. 각 valley에서의 총산란율

Fig. 2. Total scattering rates in Γ , L, and X valleys.

표 1. GaAs의 물질상수¹⁴⁾

Table 1. Material constants for GaAs.¹⁴⁾

Material constant	unit	Value		
		Γ	L	X
Density	g/cm^3	5.360		
Sound velocity	cm/s	5.240×10^5		
High-frequency dielectric constant		10.92		
Static dielectric constant		12.90		
Lattice constant	cm	5.642×10^{-8}		
Effective mass	m_i^*	0.063	0.222	0.58
Number of valleys		1	4	3
Nonparabolicity	eV^{-1}	0.610	0.461	0.204
Valley separation from Γ valley	eV	—	0.33	0.67
LO phonon energy	eV	0.03536	0.03536	0.03536
Acoustic deformation potential	eV	7.0	9.2	9.7
Piezoelectric constant	C/m^2	0.16		
Intervalley deformation potential	eV/cm			
Γ		0	1×10^9	1×10^9
L		1×10^9	1×10^9	5×10^8
X		1×10^9	5×10^8	7×10^8
Intervalley phonon energy	eV			
Γ		0	0.0278	0.0299
L		0.0278	0.0290	0.0293
X		0.0299	0.0293	0.0299

2) 자유비행시간의 계산

전자의 자유비행시간 t_f 는 (0, 1) 사이에서 균일한 분포를 갖는 난수 R_f 를 발생시켜서 다음 식을 수치적으로 풀어 구한다.

$$R_f = 1 - \exp\left(-\int_0^{t_f} \lambda_R(t) dt\right) \quad (14)$$

그러나, 그림 2에서와 같이 총 산란율이 에너지에 따라 매우 복잡하게 변화하므로 (14)식을 직접 푸는 것은 어렵고 또 CPU 시간도 많이 소모된다. 따라서 가장적인 자기산란(self scattering)의 개념¹⁰⁾을 도입하여 총산란율을 상수로 만들면, 아래와 같이 간단한 해석적인 식으로 부터 t_f 를 계산할 수 있다.

$$t_f = -\frac{\ln(R_f)}{\lambda_T} \quad (15)$$

여기서 $\lambda_T = \lambda_R + \lambda_S$, λ_R 은 각각의 산란기구의 산란율을 모두 더한 것이고, λ_S 는 자기산란율을 나타낸다. 자기산란이 일어나면 전자상태는 조금도 변하지 않고 자유비행을 계속하는 것으로 취급한다.

3) 산란기구의 선택

산란기구의 선택 시에는 (0, 1) 사이에 균일한 분포를 갖는 다른 난수 R_S 를 발생시켜서 이 난수가 다음과 같은 부등식

$$\sum_{i=1}^{m-1} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_T}\right) \leq R_S < \sum_{i=1}^m \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_T}\right) \quad (16)$$

을 만족하면 산란기구 m 이 일어난 것으로 선택한다. 모든 산란기구에 대해서도 이 부등식이 만족되지 않으면 자기산란이 일어난 것으로 간주한다. 자기산란이 발생할 확율을 줄여 불필요한 CPU시간이 적게 들도록 Yoshii 등이 제안한 fast self-scattering algorithm¹¹⁾을 사용하였다.

4) 산란 후의 상태 결정

산란 후의 파동벡터의 크기는 산란기구를 통해서 일의적으로 결정되는 에너지값을 (12)식에 대입하여 구한다. 산란 후의 파동벡터의 방향각 ϕ 와 산란전, 후의 파동벡터사이의 각 θ 는 난수쌍 R_ϕ 와 R_θ 을 발생시켜서 아래식들을 풀어 결정한다.

$$R_\phi = \frac{1}{2}(1 - \cos\phi) \quad (17)$$

$$R_\theta = \int_0^\theta P_j(\theta') d\theta' / \int_0^\pi P_j(\theta') d\theta' \quad (18)$$

여기서, $P(\theta)$ 는 각각의 산란기구에 대한 각 분포함수(angle distribution function)를 나타낸다. θ 를 구할 때 polar optic phonon scattering에 대해서는 Kratzer가 제안한 rejection method¹²⁾를 사용했고, 나

머지 산란기구에 대해서는 (18)식을 해석적으로 풀어 구하였다.

5) 평균속도와 평균에너지

전계가 k_z 방향으로 인가되었다고 하면, 각각의 valley 에서의 전자의 평균속도는 (13)식을 적분하여 다음과 같이 계산한다.

$$\langle v_{zj} \rangle = \frac{\sum (E_f - E_i)}{\hbar k_{zj}} \quad (19)$$

(19)식에서 첨자 j 는 valley j 를 의미하고, E_i 와 E_f 는 각각 자유비행의 초기와 최종상태의 에너지, k_{zj} 는 \mathbf{k} 공간에서의 전자궤적의 총길이를 나타내고, \sum 은 모든 자유비행에 대한 합을 의미한다. 전자의 평균속도는 (19)식을 전체 valley에 대한 평균을 취함으로써 얻는다. 즉,

$$v_z = \sum_j f_j \langle v_{zj} \rangle \quad (20)$$

여기서 f_j 는 valley j (단, $j = \Gamma, L, X$)의 전자점유율로, 전자가 valley j 에서 머무른 총 시간(총 자유비행시간)을 전체 valley에 대한 총 자유비행 시간으로 나누어서 계산한다.

각각의 valley 에서의 전자의 평균에너지는 (12)식으로 부터 아래와 같이 주어진다.

$$\langle w_j \rangle = \frac{1}{K_{zj}} \sum_{k_{zi}}^{k_{zf}} E_i dk_z \quad (21)$$

여기서 k_{zi} 와 k_{zf} 는 각각 자유비행 초기와 최종상태에서의 \mathbf{k} 의 z 성분을 나타낸다. Γ valley의 바닥 에너지를 에너지 기준점으로 선택하면, 평균에너지도 (21)식과 같이 전체 valley에 대한 평균을 취하여 계산한다.

$$w = \sum_j f_j \langle w_j \rangle + f_L \Delta_{L\Gamma} + f_X \Delta_{X\Gamma} \quad (22)$$

(22)식에서 $\Delta_{L\Gamma}$ 는 Γ 와 L valley 사이의 바닥에너지 차이, $\Delta_{X\Gamma}$ 는 L, X 두 valley 사이의 에너지차이를 나타낸다.

같은 방법으로, 전자의 평균실효질량도 다음과 같은 식으로 부터 구할 수 있다.

$$m^* = \sum_j f_j m_j^* \quad (23)$$

IV. 계산결과

GaAs의 hydrodynamic model parameter를 계산하기 위해서 III절에서 설명한 Monte Carlo code를 온도 300°K, 불순물농도 $N_d = 1 \times 10^{14}, 1 \times 10^{15}, 1 \times 10^{16}, 1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 인 각각의 n-GaAs에 대하여 수행하였다. 고려한

전계범위는 1~100 kV/cm이고, 그림 1의 흐름도에서 실제 산란수를 나타내는 N을 50,000으로 취하였다. 불순물농도가 $1 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 일 때, 실제 산란수에 따른 평균속도의 수렴성을 그림 3에 보였다. 저전계 (1 kV/cm)와 고전계 (100 kV/cm) 모두에 대하여 평균속도는 $N=50,000$ 에서 충분히 수렴함을 알 수 있다.

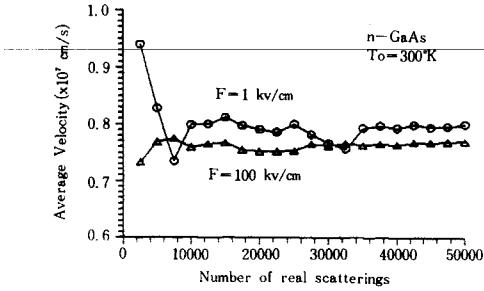


그림 3. 산란수에 대한 평균속도의 수렴성
Fig. 3. Convergency of average velocity with the number of real scatterings.

계산결과와 타당성을 입증하기 위하여 $T_0=300^\circ\text{k}$, $N_a=1 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 일 때의 계산된 평균속도 값을 실험값^{[11][12]}과 비교하여 그림 4에 보였다. 고려한 전계범위에 대해서 실험값과 잘 일치하여 계산결과가 타당함을 알 수 있다.

그림 5에 각각의 도핑농도에 대한 평균에너지와 이동도의 관계를 보였다. 약 0.3eV 이하의 저 에너지 범위에서는 ionized impurity scattering의 영향으로 이동도가 도핑농도에 따라 차이가 많지만, 그 이상에서는 이 scattering의 영향이 작아서 별 차이가 없음을 보이고 있다.

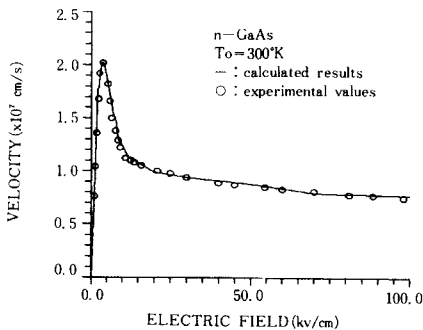


그림 4. 전자의 평균속도의 계산값과 실험값의 비교
Fig. 4. Comparison between calculated average electron velocity and experimental one.

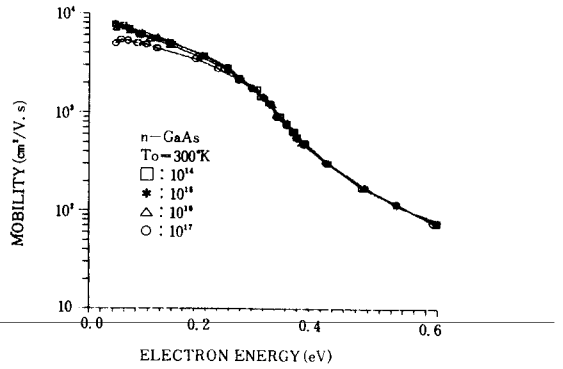


그림 5. 전자의 평균에너지에 대한 이동도
Fig. 5. Mobilities as a function of electron average energy.

그림 6에 이동도를 전자 평균온도의 함수로서 나타냈다. 그림 5에서와 마찬가지로 온도가 낮을 때는 ionized impurity scattering의 영향이 크지만, 온도가 높아질수록 이 영향이 감소한다.

Hydrodynamic model parameter로서 정의된 확산계수를 평균에너지의 함수로 그림 7에, 평균온도의 함수로 그림 8에 보였다. 이동도와 마찬가지로 저에너지 즉, 낮은 온도에서만 ionized impurity scattering의 영향이 큼을 알 수 있다.

여기에서 주목할 점은 위에 제시한 결과에서 불순물농도가 $1 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 사이에서는 hydrodynamic model parameter가 불순물농도에 따라 크게 변하지 않고 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 일 때에만 다른 농도의 모델 파라미터 값들과 차이가 많다는 것이다. 이 결과는 Ruch와 Fawcett의 Monte Carlo 계산결과^[5]로 부터 쉽게 예측할 수 있는 사실이다.

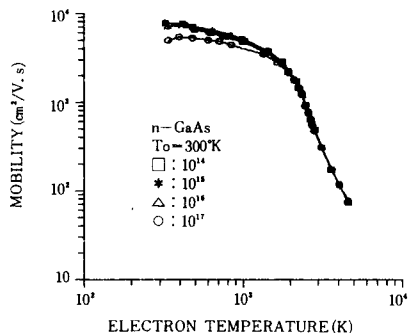


그림 6. 전자의 평균온도에 대한 이동도
Fig. 6. Mobilities as a function of electron average temperature.

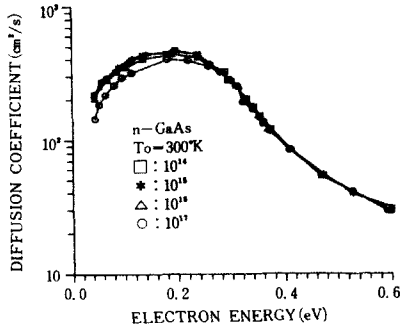


그림 7. 전자의 평균에너지에 대한 확산계수
 Fig. 7. Diffusion coefficients as a function of electron average energy.

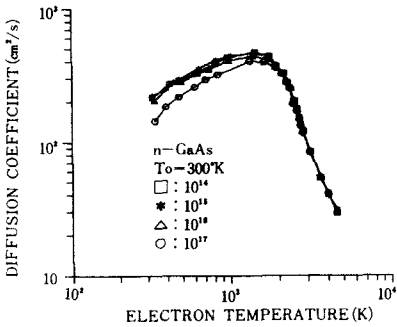


그림 8. 전자의 평균온도에 대한 확산계수
 Fig. 8. Diffusion coefficients as a function of electron average temperature.

다른 연구자들이 본 논문에서 얻은 결과들을 쉽게 사용할 수 있도록, 각각의 도핑농도에 대한 모델 파라미터들을 표 2~표 5에 제시하였다. 여기에서 F는 kV/cm, w는 eV, v는 10⁷cm/s, T는 °K, m*은 m₀ (자유질량), τ_m는 10⁻¹²s, τ_w는 10⁻¹¹s의 단위로 나타내었다.

전계의 세기가 1 kV/cm 이하의 저전계 범위에 대해서는 자기산란이 많이 일어나서 CPU 시간이 불필요하게 많이 소모되고, 전자와 phonon시스템이 격자와 거의 평형상태를 이루고 있으므로 Monte Carlo method로 계산할 필요가 없다. 이 전계범위에 대해서는 전자전송이 저항성 성질을 갖기 때문에 이를 이용하여 파라메터 값들을 해석적으로 계산하면 된다.^[13]

실제 소자 시뮬레이션을 할 때에는, 본 논문에서

표 2. T₀=300°K, N_a=1×10¹⁴/cm³ 일때의 파라메터 값

Table 2. Model parameters at T₀=300°K, N_a=1×10¹⁴/cm³.

F	w	v	T	m*	τ _m	τ _w
1.0	0.043	0.800	324	0.063	0.287	0.069
2.0	0.055	1.460	396	0.063	0.262	0.054
2.5	0.067	1.777	474	0.064	0.260	0.064
3.0	0.090	1.941	640	0.068	0.251	0.088
3.5	0.116	2.022	829	0.076	0.249	0.110
4.0	0.142	2.024	1025	0.082	0.235	0.128
5.0	0.194	1.888	1424	0.099	0.212	0.165
6.0	0.239	1.728	1774	0.116	0.190	0.193
7.0	0.262	1.550	1962	0.124	0.156	0.206
8.0	0.277	1.476	1975	0.131	0.138	0.202
9.0	0.297	1.285	2247	0.143	0.116	0.223
10.0	0.314	1.240	2379	0.152	0.107	0.222
20.0	0.370	0.986	2824	0.187	0.052	0.168
30.0	0.410	0.939	3131	0.217	0.039	0.132
50.0	0.474	0.880	3623	0.268	0.027	0.100
70.0	0.529	0.793	4051	0.313	0.020	0.088
100.0	0.600	0.770	4597	0.357	0.016	0.073

표 3. T₀=300°K, N_a=1×10¹⁵/cm³ 일때의 파라메터 값

Table 3. Model parameters at T₀=300°K, N_a=1×10¹⁵/cm³.

F	w	v	T	m*	τ _m	τ _w
1.0	0.043	0.777	324	0.063	0.278	0.057
2.0	0.058	1.535	416	0.064	0.278	0.063
2.5	0.068	1.750	483	0.065	0.259	0.067
3.0	0.085	1.876	605	0.068	0.241	0.082
3.5	0.113	1.940	813	0.074	0.234	0.110
4.0	0.136	2.046	980	0.079	0.230	0.119
5.0	0.197	1.910	1445	0.100	0.216	0.166
6.0	0.238	1.733	1776	0.115	0.188	0.191
7.0	0.257	1.571	1922	0.124	0.159	0.199
8.0	0.289	1.395	2178	0.138	0.137	0.224
9.0	0.294	1.318	2221	0.141	0.117	0.215
10.0	0.309	1.267	2339	0.149	0.107	0.213
20.0	0.373	0.992	2846	0.189	0.053	0.168
30.0	0.412	0.917	3149	0.216	0.038	0.135
50.0	0.469	0.861	3587	0.264	0.026	0.100
70.0	0.528	0.806	4042	0.315	0.021	0.087
100.0	0.599	0.757	4591	0.355	0.015	0.074

표 4. $T_0=300^\circ\text{K}$, $N_d=1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 일때의 파라미터 값

Table 4. Model parameters at $T_0=300^\circ\text{K}$, $N_d=1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$.

F	w	v	T	m^*	τ_m	τ_w
1.0	0.044	0.716	333	0.063	0.256	0.071
2.0	0.061	1.468	442	0.064	0.269	0.075
2.5	0.069	1.663	494	0.066	0.248	0.072
3.0	0.087	1.819	624	0.068	0.234	0.088
3.5	0.103	1.929	793	0.071	0.223	0.094
4.0	0.136	1.921	986	0.082	0.223	0.126
5.0	0.189	1.844	1390	0.097	0.203	0.163
6.0	0.238	1.641	1773	0.116	0.180	0.202
7.0	0.256	1.538	1917	0.123	0.154	0.202
8.0	0.281	1.415	2116	0.134	0.135	0.214
9.0	0.299	1.330	2259	0.142	0.120	0.218
10.0	0.315	1.223	2388	0.151	0.105	0.226
20.0	0.367	0.998	2800	0.184	0.052	0.164
30.0	0.412	0.935	3147	0.218	0.039	0.133
50.0	0.472	0.863	3610	0.266	0.026	0.100
70.0	0.530	0.815	4056	0.314	0.021	0.086
100.0	0.598	0.743	4585	0.358	0.015	0.075

표 5. $T_0=300^\circ\text{K}$, $N_d=1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 일때의 파라미터 값

Table 5. Model parameters at $T_0=300^\circ\text{K}$, $N_d=1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$.

F	w	v	T	m^*	τ_m	τ_w
1.0	0.044	0.496	337	0.063	0.178	0.114
2.0	0.053	1.085	394	0.063	0.195	0.066
2.5	0.065	1.315	478	0.065	0.196	0.080
3.0	0.082	1.511	601	0.068	0.193	0.094
3.5	0.097	1.707	705	0.071	0.196	0.098
4.0	0.115	1.784	838	0.075	0.189	0.107
5.0	0.181	1.749	1337	0.095	0.189	0.163
6.0	0.220	1.675	1636	0.108	0.172	0.181
7.0	0.257	1.511	1927	0.124	0.152	0.206
8.0	0.279	1.426	2100	0.133	0.135	0.211
9.0	0.300	1.299	2269	0.144	0.118	0.224
10.0	0.312	1.241	2365	0.148	0.105	0.220
20.0	0.371	0.955	2834	0.188	0.051	0.174
30.0	0.408	0.925	3118	0.214	0.038	0.133
50.0	0.474	0.849	3627	0.265	0.026	0.102
70.0	0.528	0.820	4041	0.312	0.021	0.085
100.0	0.592	0.752	4538	0.352	0.015	0.074

제시한 표들의 데이터를 curve fitting 이나 interpolation을 하여 사용할 수 있다고 생각된다.

V. 결론 및 검토

본 논문에서는 hydrodynamic model에 의해서 sub-micron device를 시뮬레이션하기 위한 준비단계로 Monte Carlo code를 개발하여 GaAs의 hydrodynamic model parameter 들을 추출하였다. 300°K 의 격자온도에서 불순물농도가 각각 1×10^{14} , 1×10^{15} , 1×10^{16} , $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 일 때, $1 \sim 100 \text{ kV/cm}$ 의 전계범위에 대한 파라미터 값들을 계산하였다. 계산된 전계세기에 대한 전자의 평균속도 값은 실험값과 잘 일치하여, 본 계산결과와의 타당성을 입증해 주었다. 그리고 추출한 모델 파라미터 값들을 표로 제시하여 다른 연구자들이 쉽게 사용할 수 있도록 하였다.

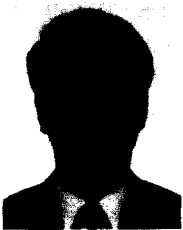
본 논문에서 고려하지 않은 범위의 불순물농도와 전계값에 대한 모델 파라미터값들은 결과로서 제시한 표를 이용하여 interpolation 이나 curve fitting 을 함으로써 얻어낼 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제시한 표들은 hydrodynamic model을 사용하여 sub-micron GaAs device를 해석하고자 하는 연구자들에게 도움이 되리라고 생각된다.

參 考 文 獻

- [1] A. Yoshii, M. Tomizawa, and K. Yokoyama, Submicron Device Simulation, Proc. of the NASECODE III, pp. 66-82, 1983.
- [2] S. Selberher, *Analysis and simulation of semiconductor devices*, Springer-Verlag, 1980.
- [3] S.G. Kratzer, "Computer simulation of electron transport in gallium arsenide," M.S. thesis, Cornell University, 1978.
- [4] M.A. Littlejohn, J.R. Hauser, and T.H. Glisson, "Velocity-field characteristics of GaAs with conduction band ordering," *J. Appl. Phys.*, vol. 48, pp. 4587-4590, 1977.
- [5] J.G. Ruch and W. Fawcett, "Temperature dependence of the transport parameters of gallium arsenide determined by a Monte Carlo method," *Phys. Rev.*, vol. 41, pp. 3843-3849, 1970.
- [6] C. Moglestue, "A self-consistent Monte Carlo particle model to analyze semiconductor microcomponents of any geometry," *IEEE Trans. CAD*, vol. CAD-5, pp. 326-345, 1986.
- [7] K. Blotekjaer, "Transport equations for

- electrons in two-valley semiconductors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-17, pp. 38-47, 1970.
- [8] R.K. Cook, "Physics and numerical modeling of carrier transport in submicron semiconductor devices," Ph.D. Cornell University, 1981.
- [9] B.R. Nag, *Electron transport in compound semiconductors*, Springer-Verlag, 1980.
- [10] H.D. Rees, "Calculation of steady state distribution function by exploiting stability," *Phys. Lett.*, vol. 26A, pp. 416-417, 1968.
- [11] J.G. Ruch and G.S. Kino, "Transport properties of GaAs," *Phys. Rev.*, vol. 174, pp. 921-931, 1968.
- [12] W.T. Hugo, "Electron drift velocities at high electric fields in gallium arsenide and indium gallium arsenide," *Ph. D. thesis, University of Illinois at Urbana Champaign*, 1982.
- [13] R.L. Liboff and G.K. Schenter, "Distribution functions and fluid variables in semiconductor," *J. Appl. Phys.*, vol. 63, pp. 5363-5368, 1988.

 著 者 紹 介


朴 成 鎬 (正會員)

1962年 2月 5日生. 1984年 2月 아주대학교 전자공학과 졸업. 1986년 8월 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업 공학석사학위 취득. 1988년 3월~현재 서울시립대학교 전산통계학과 조교. 1988년 3월~현재 한양대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관심분야는 화합물반도체 소자에서의 hot-carrier transport, submicron device의 모델링 및 시뮬레이션 등임.

韓 百 亨 (正會員)

1938年 8月 21日生. 1963년 2월 한양대학교 물리학과 졸업. 1965년 2월 한양대학교 물리학과 이학석사학위 취득. 1972년 미국 St. Louis Univ. 이학박사학위 취득. 1972~1974년 St. Louis Univ. 연구원. 1974~1977년 중앙대학교 물리학과 조교수. 1977~1986년 한양대학교 전자공학과 교수. 1986~현재 한양대학교 물리학과 교수. 주관심분야는 에너지밴드 구조계산, hot-carrier transport, submicron Si device와 화합물반도체 소자의 모델링 및 시뮬레이션 등임.