

## 밀리미터 주파수에서 전자의 운동에 대한 Hot Phonon의 영향 연구

논문

11-12-3

### A Study on the Effects of Hot Phonon in Electron Transport at Millimeter-wave Frequencies

윤태섭\*  
(Tae Seob Yoon)

#### Abstract

A density of phonon is increased by application of electric field. At this time the phonon which has higher energy than around is called hot phonon, and hot phonon is disappeared after 7 picosecond by scattering with electron and loss energy. Since the lifetime of phonon is very short, the effects of hot phonon can be neglected in the low speed semiconductor device, but it must be considered in high speed devices. DC and AC electric fields are applied to bulk GaAs, and the density of phonon is obtained and analyzed for its effects on electron velocity and electron distribution using Monte Carlo simulation method. Under high electric field the density of hot phonon increased and energy of hot phonon is decreased by scattering with electron on the other hand the energy of electron is increased. Therefore electron move from central valley of conduction band to satellite valleys and the velocity of electron decrease since the mass of electron in satellite valley is heavier than central valley. In millimeter wave frequencies, the effects of hot phonon increased at higher frequencies.

**Key Words(중요 용어)** : Hot-phonon(뜨거운 음자), Monte Carlo simulation(몬테칼로 시뮬레이션), Scattering(산란), GaAs(갈륨 비소)

#### 1. 서론

최근 반도체의 집적도가 점점 높아짐에 따라 반도체 소자에 가해지는 전계는 강해지고 대용량 데이터 처리 또는 고속 통신용 반도체의 동작 속도는 점점 빨라지고 있다. 이와 같이 강한 전계와 고속 동작 환경에서는 hot-phonon의 영향이 반도체의 특성에 중요한 영향을 미친다. 반도체 소자에 강한 전압을 인가하면 전자는 전기장으로부터 에너지를 얻고 전자의 에너지는 LO(longitudinal optical)-phonon을 방출하며 에너지를 소모한다. 이때 phonon의 분포가 불평형 상태가 되고 hot phonon이 분포하게 된다. LO-phonon 만이 전자의 운동에 중요한 역할을

하므로 LA(longitudinal acoustic), TA(Transverse acoustic), TO(Transverse optical) 등 다른 phonon은 무시된다. Hot phonon은 발생후 약 7picosecond 동안 영향을 미친 후 곧 평형상태로 돌아간다. Hot phonon의 생명주기가 매우 짧으므로 동작속도가 느린 반도체 소자에서는 phonon의 영향이 무시되지만 주파수가 phonon의 생명주기와 비교되는 millimeter wave 주파수 대역에서는 중요한 영향을 미친다.

현재는 이동통신 부품 등 통신용 반도체에서 밀리미터주파수 대역의 GaAs 반도체가 많이 사용되고, 반도체 소자의 크기가 점점 작아지면서 강한 전계가 작용하므로 hot phonon의 영향을 고려하여야 한다. 본논문에서는 밀리미터 주파수 대역에서 hot phonon이 GaAs의 전자의 분포 및 속도에 미치는 영향을 연구하여 hot phonon의 효과를 입증하고 시뮬레이션 방법을 제시하였다.

GaAs에서 먼저 DC 전압을 적용하고 phonon의

\* : (주) 삼지전자  
(서울특별시 금천구 시흥동 986-4, Fax:893-5004  
E-mail: tsyoon@unitel.co.kr)  
1998 10월 2일 접수, 1998년 11월 17일 심사완료

영향을 연구하고 AC 와 DC 전압을 동시에 적용한 후 영향을 조사하였다. 사용된 모델은 3개의 conduction band와 3개의 valence band를 가지며 각 band는 nonparabolic이라 가정하였다. 강한 전계에서는 전자의 운동 및 확산계수 사이에 선형관계가 성립되지 않으므로 전자의 운동 방정식인 Boltzmann 방정식을 사용하여야 한다. Boltzmann 방정식의 해법은 분석적 방법(analytical technique), 반복적 방법(iterative technique), Monte Carlo technique 등이 있는데 본 논문에서는 Monte Carlo simulation 방법을 이용하여 hot phonon이 전자의 운동에 미치는 영향을 연구하였다. Monte Carlo 방법은 구현하기가 비교적 쉽고 전자의 운동에 대한 미시적 현상까지 Boltzmann 방정식의 정확한 해석을 제공한다. Monte Carlo 방법은 분석적 방법보다 구현하기가 쉽고 결과가 정확하므로 최근 많이 사용된다. 특히 그동안은 컴퓨터 계산시간이 많아서 대형컴퓨터를 사용하여야 했으나, 최근에는 소형컴퓨터의 계산속도가 빨라져 쉽게 사용할 수 있다. Monte Carlo 방법은 전자의 분포에 대한 사전 가정이 필요없고 전자의 진행속도, impact ionization 속도 등을 계산할 수 있고, 다양한 산란 구조를 포함하므로 polar 또는 nonpolar 반도체 모두에 적용할 수 있다. Hot phonon은 phonon의 발생 초기에는 hot phonon의 밀도가 낮으므로 영향이 적었으나 정상상태에서는 hot phonon의 밀도가 높아져서 전자의 속도를 떨어뜨리고 L 및 X valley에 전자의 밀도를 높였다.

## 2. Hot Phonon

GaAs와 같은 극성 반도체에서 높은 에너지를 가진 운반자는 LO-phonon과의 상호작용에 의해 산란되는 것으로 알려졌다<sup>1)</sup>. Conwell 및 Vassel은 이론적인 계산으로 전자와 phonon의 산란 속도가 GaAs에서  $10^{12}/\text{sec}$  이상임을 예측하였다<sup>2)</sup>. GaAs에서 전자의 운동 에너지가 LO-phonon의 에너지보다 훨씬 높을 경우 전자 운동 에너지의 주요 복구 구조는 LO-phonon에 의해 주어진다. 이러한 구조는 직접적인 물리적 실험에 의하여 증명되었다<sup>3),4)</sup>. 예를들면 Shah<sup>5)</sup>는 연속파의 아르곤 레이저를 이용하여 GaAs에서 불평형 LO-phonon을 발생시키고 Raman 산란을 조사하였다. 이때 격자의 온도는 400K이고 관찰된 LO-phonon의 온도는 800K 였으므로 hot phonon이라 불렀다. Von Der Linde<sup>6)</sup>는 GaAs에서 불평형 LO-phonon의 생명주기를 측정하

였는데 77K에서 7 picosecond 였다<sup>7)</sup>. GaAs에서 LO-phonon의 에너지는 0.037 eV이므로 운동 에너지가 높은 전자는 LO-phonon을 연속적으로 방출하면서 0.037eV씩 에너지를 소모하고 평형상태로된다. 방출 시간은 0.1psec 이고 LO-phonon의 생명주기는 7psec 이며 방출된 phonon이 사라지기 전에 또 다른 phonon이 방출되므로 전자가 에너지를 방출하면 phonon의 밀도가 높아진다. Phonon의 밀도가 높아지면 phonon의 흡수산란속도가 증가하고, phonon 흡수산란시에는 에너지를 격자에 방출하므로 전자의 에너지가 증가한다. Phonon 방출산란은 전자가 에너지를 방출하는 과정이므로 phonon의 밀도와는 무관하다. 그러므로 hot-phonon의 영향으로 phonon의 밀도가 증가하면 phonon 흡수산란 속도가 증가하지만 방출산란속도는 일정하므로 전자의 에너지가 증가하게 된다. 전자의 에너지가 증가하면 phonon방출산란속도가 증가하지만 직접적인 관계는 적다. 산란은 전자의 에너지가 충분히 높으면 LO-phonon 방출 산란만 일어나는 것이 아니고 더 높은 에너지를 가지는 L 밸리(0.3eV) 및 X 밸리(0.5eV)에 분포하는 밸리간 산란이 일어난다. 특히 X 밸리 산란은 LO-phonon 방출 산란보다 매우 빠르게 일어나므로 높은 에너지에서는 X 밸리 산란이 주요 산란이 되므로 2.0eV이상의 에너지에서는 phonon의 밀도가 포화상태가 된다<sup>8)</sup>. 밸리간 산란을 고려한 전자의 생명주기는 다음과 같다.

$$\gamma(E) \approx \begin{cases} \infty & E < E_{\Gamma L} \\ \gamma_{\Gamma L}^{-1} & E_{\Gamma L} < E < E_{\Gamma X} \\ (\gamma_{\Gamma L} + \gamma_{\Gamma X})^{-1} & E > E_{\Gamma X} \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $\gamma(E)$ 는 전자의 생명주기이고  $E_{\Gamma L}$  과  $E_{\Gamma X}$ 는 컨덕션 밴드의  $\Gamma$  밸리 최소점에서 L 밸리 및 X 밸리의 최소점 간의 간격이다.  $\gamma_{\Gamma L}$  및  $\gamma_{\Gamma X}$ 는  $\Gamma$  밸리에서 L 밸리 및 X 밸리간의 밸리간 산란 속도를 나타낸다. 밸리간 산란은  $\Gamma$  밸리에서 전자의 생명주기에 영향을 미칠뿐 아니라 L 및 X 밸리의 밸리간 전자의 밀도에도 서로 영향을 미치게 한다.

## 3. Hot Phonon의 Monte Carlo Simulation

전자와 phonon간의 상호 작용은 다음의 Boltzmann 방정식으로 나타낼 수 있다<sup>9)</sup>.

$$\frac{df}{dt} = \frac{df}{dt}_{field} + \frac{df}{dt}_{c-ph} + \frac{df}{dt}_{c-c} + \frac{df}{dt}_{c-imp} \quad (2)$$

$$\frac{dN_q}{dt} = \frac{dN_q}{dt}_{ph-c} + \frac{dN_q}{dt}_{ph-ph} \quad (3)$$

여기서  $f$ 와  $N_q$ 는 전자와 phonon의 분포함수를 각각 나타내고 (2)는 전기, 전자와 phonon, 전자와 전자, 전자와 불순물간의 산란에 의한 전자분포 함수의 변화율을 나타낸다. (3)은 전자와 phonon 및 phonon과 phonon 산란에 의한 phonon 분포함수의 변화율을 나타낸다. phonon-phonon 산란은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dN_q}{dt}_{ph-ph} = -\frac{N_q - N_o}{\tau_{ph}} \quad (4)$$

여기서  $\tau_{ph}$ 는 hot phonon이 평형상태로 돌아가는데 걸리는 시간이고,  $N_o$ 는 Bose-Einstein 분포로 다음과 같다<sup>9)</sup>.

$$N_o = \frac{1}{e^{h\omega/k_B T_L} - 1} \quad (5)$$

여기서  $h$ 는 플랑크 상수,  $\omega$ 는 phonon의 각 주파수,  $k_B$ 는 Boltzmann 상수,  $T_L$ 은 전자의 절대온도이다. Finite difference 방법을 (2)에 적용하면 다음과 같이 된다.

$$N_q(j\Delta t) = N_q((j-1)\Delta t) + \delta N_q(j\Delta t)_{e-ph} - (N_q(j\Delta t) - N_o) \frac{\Delta t}{\tau_{ph}} \quad (6)$$

시뮬레이션은 LO-phonon의 산란시간보다 훨씬 짧은 시간간격  $\Delta t$ 로 세분되고 다음 절차를 따른다.

i) LO- $h_q$  phonon 분포  $N_q$ 의 시간에 다른 변화는 메시(mesh) 크기가  $\Delta q$ 인  $q$  공간에서 히스토그램을 설정한다. LO-phonon을 포함하는 산란이 일어날 때마다 각  $q$ -셀(cell)에서 흡수 또는 방출된 phonon의 수를 기록하여 히스토그램을 갱신한다. 이는 운반자와 phonon 간의 산란을 통한 phonon 밀도의 변화를 모니터링하는 것이다.

ii) 시뮬레이션 도중 지정된 시간  $T=j\Delta t$ 에서  $N_q$ 는(5)에 의해 계산된다.  $\delta N_q(j\Delta t) = A\Delta h_q$ 는  $\Delta t$  시간동안 전자가 phonon의 밀도에 미친 영향을 나타낸다.  $A$ 는  $q$  공간에서의 상태밀도와 여기된 전자 밀도와 시뮬레이션 전자 수를 고려한 정규화 인자이다. 여기서  $\Delta h_q$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta h_q = N_q(j\Delta t) - N_q((j-1)\Delta t) \quad (7)$$

iii) phonon이 전자와 phonon 간의 산란에 미친 영향을 고려하기 위해 시뮬레이션 초기에 인위적으로 높은 phonon 밀도를 사용하여 LO-phonon의 전체 산란 확율을 계산한다. LO-phonon을 포함하는 각 산란 프로세스의 최종상태 선택은 미소 산란 속도와 최대화된 것을 비교하는 거부 방법(rejection technique)을 이용한다<sup>10),11)</sup>.

이러한 방법으로 증가된 phonon 분포에 의한 산란과 초기에 최대화된 산란(시뮬레이션에서는 자체 산란으로 취급됨)을 구별할 수 있다. 그림 1은 hot-phonon의 영향을 포함하는 ensemble Monte Carlo 프로그램의 흐름도이다.

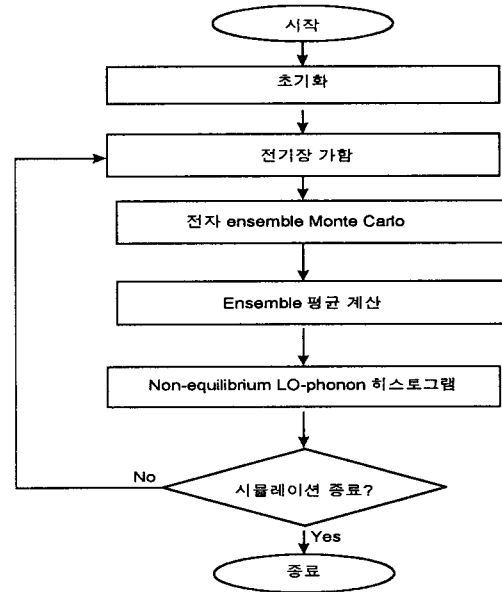


그림 1. hot-phonon 효과를 위한 ensemble Monte Carlo 프로그램의 흐름도

Fig. 1. Flow chart of the ensemble Monte Carlo program for hot phonon effect.

#### 4. Ensemble Monte Carlo Method

Monte Carlo 방법의 이름은 모나코의 Monte Carlo 도시에 있는 도박장 카지노에서 유래되었다. 여기서 사용하는 수학적 기법은 랜덤 넘버(random number)의 선택에 기초를 둔다. 현재 형태의 Monte Carlo 방법은 Fermi가 중성자 운동 연구에 적용하였다<sup>12)</sup>. Monte Carlo 방법은 다양한 문제에

적용할 수 있는 일반적인 수학적 방법으로 반도체에서 강전계하의 전자 전송에 적용은 Kurosawa<sup>13)</sup>에 의해 도입된 후 많은 개선이 이루어지고 다양한 분야에 활발하게 사용되었다. 이 방법은 결정내의 한 개의 전자가 결정에 전기장이 가해졌을 때 산란 구조를 시뮬레이션한다.

EMC(Ensemble Monte Carlo) 방법은 한개의 입자를 수천번 반복 시뮬레이션하여 평균을 구하기 보다는 한번에 수천개 입자의 운동을 시뮬레이션하여 ensemble average를 구한다. 이 방법은 모든 평균이 ensemble 평균이므로 프로세스의 ergodicity에 관계없이 적용할 수 있으므로 천이영역에서 사용할 수 있다. 일반적으로 Monte Carlo 방법은 많은 컴퓨터계산 시간이 소요되는데 이 방법은 특히 벡터 컴퓨터에서 매우 효율적이므로 현재는 대부분 EMC 방법을 사용한다. 예를들면 전자의 진행속도는 다음과 같다.

$$V_d(t) \equiv \langle V(t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i(t) \quad (8)$$

여기서 N 은 ensemble에서 입자의 수이다. EMC 방법은 정해진 시간 간격마다 평균을 계산하는데 이 시간 간격마다 가속을 완료하는 입자는 극소수이다. 인위적으로 평균을 계산하는 시간에 가속 프로세스를 종료시키기 위해서 관심있는 주파수의 역수보다 훨씬 작은 시간간격을 도입한다. 각 입자마다 별도의 시간 간격을 유지하며 그림 2 에 보여준다. 그림 3은 EMC 프로그램의 흐름도를 보여준다. 프로그램은 먼저 초기시간 t=0에서 모든 산란 프로세스를 에너지 함수로 저장하는 산란 매트릭스를 만든다. 운반자간의 힘이 분자역학에 의하여 실제공간에서 계산되면 공간에서 초기 분포와 관련된 힘의 초기값이 계산된다. 초기화 과정은 N 개의 전자에게 각자의 첫 산란시간  $t_{1i}$ 를 할당한다.  $t_{1i}$ 는 i 번째 전자의 첫 번째 산란시간이고 시간은 관찰시간 간격  $\Delta t$  만큼씩 증가한다. 입자는 이 기간동안 가속되고 산란된다. 이 시간간격 끝에서는 앙상블 평균이 계산되고 분자역학 힘은 갱신된다. 시간이 최종 시뮬레이션 시간에 도달하면 모든 과정이 종료되고 그렇지 않으면 관찰시간이 증가된 지점으로 프로세스는 돌아간다. 가속 및 산란과정은 그림 4에 자세히 설명되었다. 먼저 각 전자는  $\min(t_{1i}, \Delta t)$  시간동안 가속된다. 마스크 벡터의  $t_{1i}$ 가  $\Delta t$ 보다 작은 값의 전자는 플래그 값을 1로 설정하고  $t_{1i}$ 가  $\Delta t$ 보다 큰 그룹의 전자는 플래그를 0으로 설정한다.  $t_{1i}$ 가  $\Delta t$ 보다 큰 값의 전자 그룹은 산란을 수

행하고,  $t_{1i}$ 가  $\Delta t$ 보다 작은 그룹의 전자는 이 기간 동안 산란을 하지 않기 위해 플래그가 1로 설정된 전자만 선별하여, 랜덤 넘버에 의해 주어진 산란을 수행한다.  $t_{1i}$ 가  $\Delta t$ 보다 작은 전자는 다시 산란을 수행하고 없으면 앙상블 평균을 계산한다. 이 과정은 그림 2에서 보듯이 전자의 개별 시간과 전체 앙상블 관측 시간과의 상호작용이 필요하다.

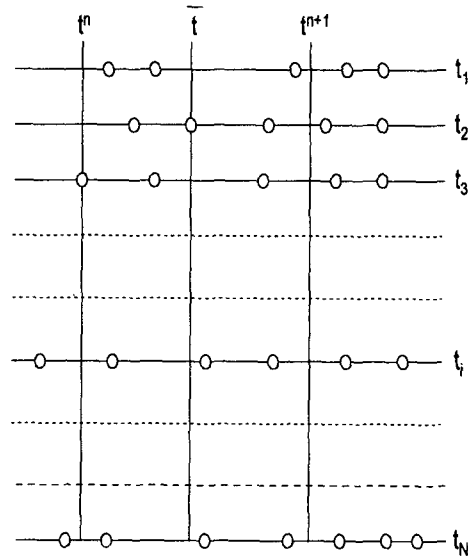


그림 2. 동기식 앙상블 방법의 설명. 여기서 i(1,2,3,...N)는 i 번째 입자의 시간축을 나타내고, (o)는 산란발생, t는 정상상태의 시간이다. 각 전자에 대한 시간축은 시뮬레이션 기간동안 계속 유지되어야 하며 앙상블 평균 시간과는 간격이 다르다.

Fig. 2. Sketch for the synchronous-ensemble method. subscripts I (1,2,3..N) label the time axis of the ith particle; (o) indicate scattering events; t is the generic time of a steady-state condition. The time coordinate for each electron must be maintained through the simulation, while ensemble average times may be on a different scale.

5. 결 과

Monte Carlo 방법을 GaAs에 적용하여 밀리미터 주파수에서 hot-phonon의 효과를 연구하기 위해 DC, 25GHz, 50GHz, 100GHz, 200GHz에서 DC 전압이 없을 때와 있을 때 및 hot-phonon을 포함시켰을 때 및 포함되지 않았을 경우를 시뮬레이션 하였다. AC 전계의 진폭은 10KV/cm인 sine 파형이고, DC 전계는 3KV/cm, 전자의 밀도는  $3 \times 10^{17}/cm^3$ , 온도는 200K, 앙상블 크기는 5000개의 전자이다. 각각의 경우에 전자의 속도, hot-phonon의 분포, 전자의 분포를 구하였다.

그림 5는  $t=0$ 에서 DC 전압을 인가했을 경우 hot-phonon의 효과를 보여준다. 초기에는 Hot-phonon의 분포가 적어 영향이 적지만 0.5 picosecond 후에는 hot-phonon의 영향으로 에너지가 증가하고 초기에는 Hot-phonon의 영향으로 phonon의 밀도가 높아진다. Phonon의 밀도가 높아지면 phonon 흡수 산란속도는 높아지지만 phonon 방출은 전자에 의해 일어나므로 방출 산란속도는 변하지 않는다. Phonon 흡수시에는 전자의 에너지가 증가하고 방출시에는 에너지가 감소하므로, hot-phonon의 영향으로 전자의 에너지가 증가하고 전자의 분포는 질량이 무거운 L 및 X 밸리에 증가하므로 전자의 속도가 감소한다. 그림 5의 (a)에서 0.5 Picosecond까지는 hot-phonon의 발생이 적어 전자의 속도에 영향이 적지만 이후에는 전자의 속도가 감소하였다. 그림 5(b)와 (c)를 비교하면 hot phonon의 영향으로 전자의 에너지가 증가하여 L 및 X 밸리의 전자밀도가 증가하였다<sup>14)</sup>. 그림 5 및 그림 6은 각각 DC 전압 및 AC 전압을 적용했을 경우의 전자의 속도이다. 여기서 200GHz의 주기인 5 picosecond는 hot-phonon의 생명주기 7 picosecond보다 짧으므로 전자의 속도가 AC 전압의 변화를 따라가지 못한다. 그러므로 hot-phonon의 영향은 전압의 주기가 hot-phonon의 생명주기 7picosecond보다 짧은 경우에 영향을 고려해야한다. 그림 7 및 그림 8은 hot-phonon의 밀도를 보여준다. 그림 9에서 그림 12는 전자의 분포를 보여준다. Hot-phonon의 영향으로 전자의 에너지가 증가하여 L 및 X 밸리의 전자 분포가 증가하였으며 AC 전계의 주파수가 높아짐에 따라 전자분포가 전계의 파형을 따라 변화하지 못하므로 높은 주파수에서 hot-phonon의 영향이 증가함을 알 수 있다.

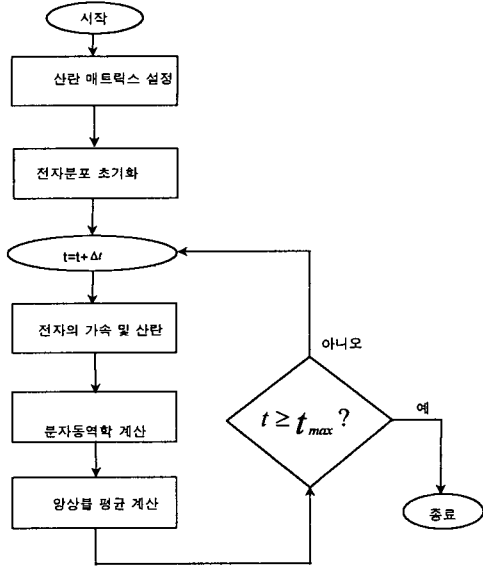


그림 3. ensemble Monte Carlo 프로그램의 흐름도  
Fig. 3. A flow chart for a typical ensemble Monte Carlo program.

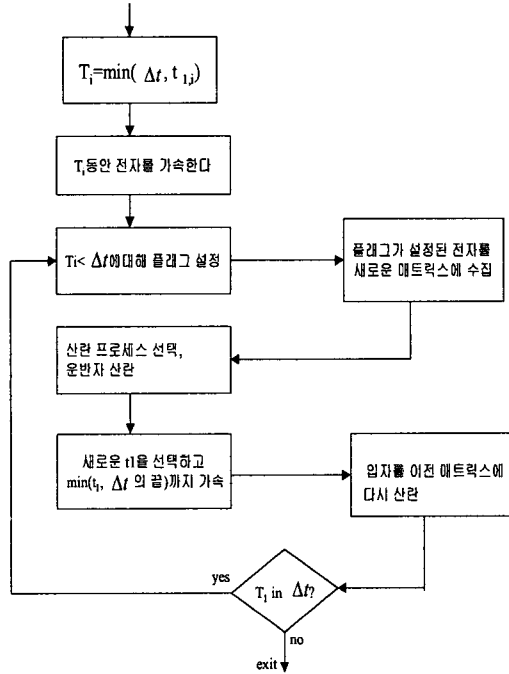


그림 4. EMC에서 가속 및 산란 루프의 상세 과정  
Fig. 4. The details of the acceleration-scattering loop for an ensemble Monte Carlo process.

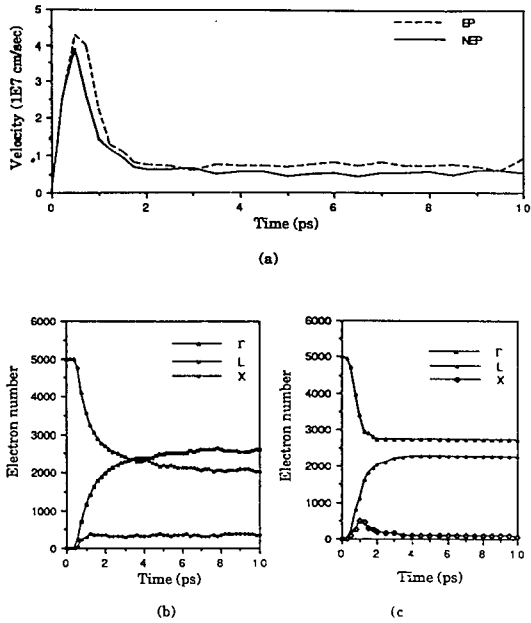


그림 5. DC 전계 강도 8KV/cm에서 (a) Hot-phonon을 고려하지 않은 전자의 속도(EP) 및 Hot-phonon을 고려한 전자의 속도(NEP), (b) Hot-phonon을 포함한 전자의 분포, (c) Hot-phonon을 포함하지 않은 전자의 분포

Fig. 5. Electron velocity with equilibrium phonon(EP) and nonequilibrium phonon (NEP), (b) electron distribution with hot phonon, (c) electron distribution without hot phonon for electric fields of 8kV/cm.

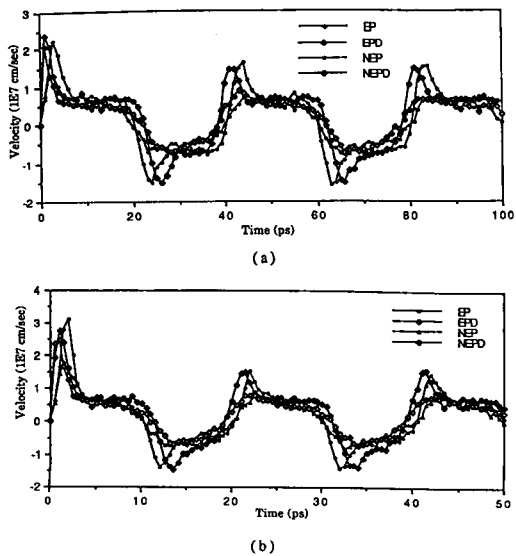


그림 6. 전자의 속도 (a) 25GHz, (b) 50 GHz, hot-phonon 포함(NEP), hot-phonon 및 DC 전계 포함(NEPD), hot phonon 및 DC 없음 (EP), hot-phonon 없음 DC 전계 포함 (EPD)

Fig. 6. Electron velocity for (a) 25GHz, (b) 50GHz, with hot phonon(NEP), with hot phonon and DC field(NEPD), without hot phonon(EP), and without hot phonon and with DC field(EPD)

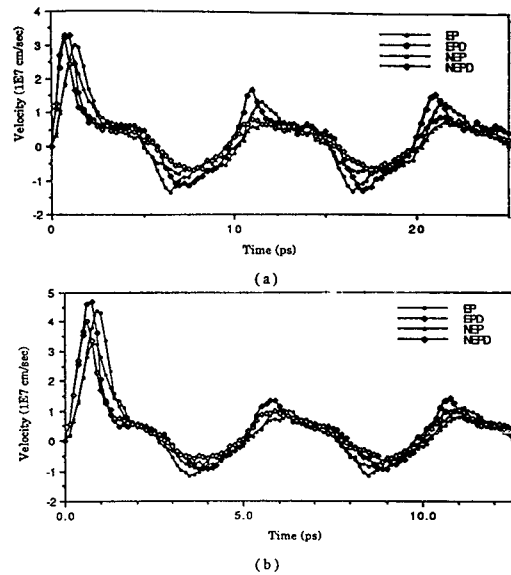
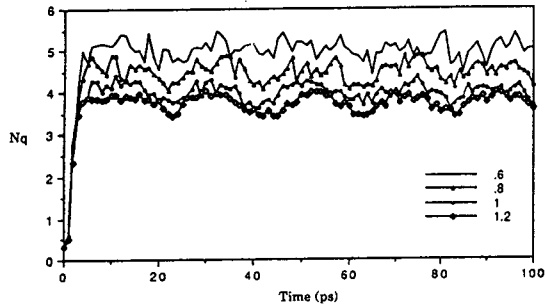
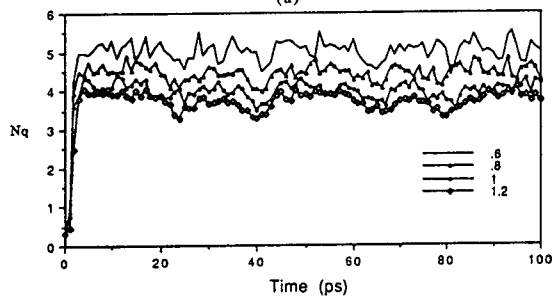


그림 7. 전자의 속도 (a) 100GHz, (b) 200 GHz, hot-phonon 포함(NEP), hot-phonon 및 DC 전계 포함(NEPD), hot phonon 및 DC 없음(EP), hot-phonon 없음 DC 전계 포함 (EPD)

Fig. 7. Electron velocity for (a) 25GHz, (b) 50GHz, with hot phonon(NEP), with hot phonon and DC field(NEPD), without hot phonon(EP), and without hot phonon and with DC field(EPD)

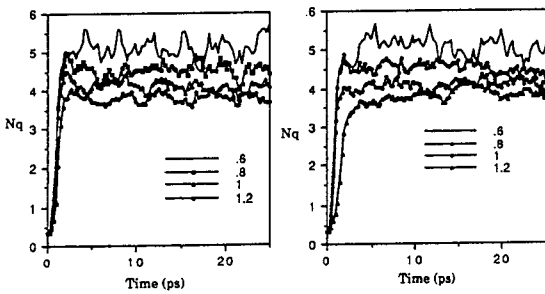


(a)

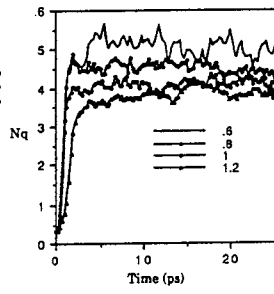


(b)

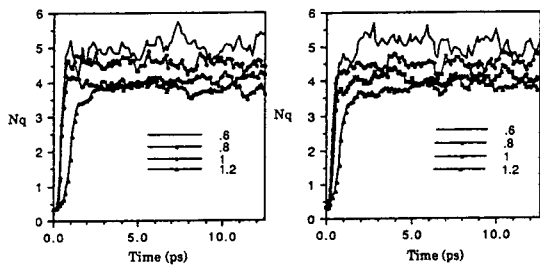
그림 8. 25 GHz에서 전계를 적용한 후 0.6, 0.8, 1, 1.2 Picosecond 에서의 phonon의 분포 (a) DC 전계가 존재, (b) DC 전계 포함  
 Fig. 8. Phonon distribution at 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 picosecond for 25GHz (a) without DC field, (b)with DC field.



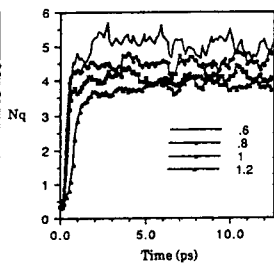
(a)



(b)



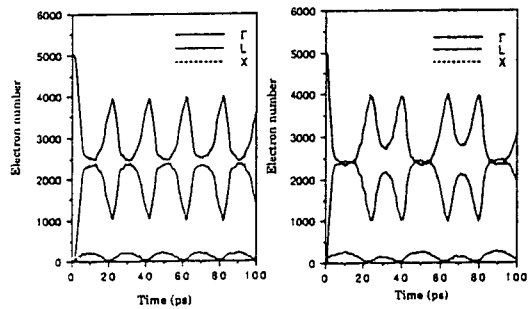
(c)



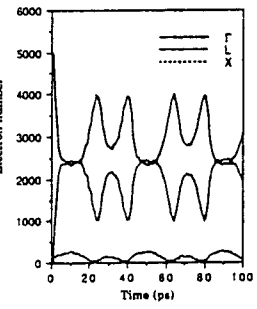
(d)

그림 9. 100 및 200GHz에서의 phonon 분포 (a) 100GHz DC 전계 포함하지 않음, (b)100 GHz DC 전계 포함, (c) 200GHz DC 전계 포함하지 않음, (d)200 GHz DC 전계 포함.

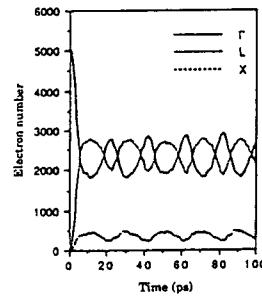
Fig. 9. Phonon distribution for 100 and 200 GHz (a) 100 without DC field, (b)100 with DC field, (c) 200 without DC field, (d) 200 with DC field.



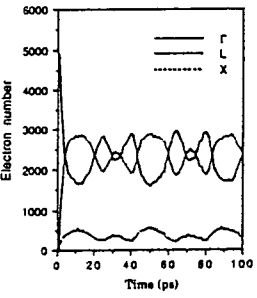
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 10. 25 GHz에서 전자의 분포 (a) DC 전계 및 hot phonon 없음, (b) DC 전계 포함 hot phonon 없음, (c) DC 전계 없고 hot phonon 포함, (d) hot phonon 및 DC 전계 포함

Fig. 10. Electron distribution for 25GHz (a) without DC field and without hot phonon (b) with DC field and without hot phonon (c) without DC field and with hot phonon (d) with DC field and with hot phonon.

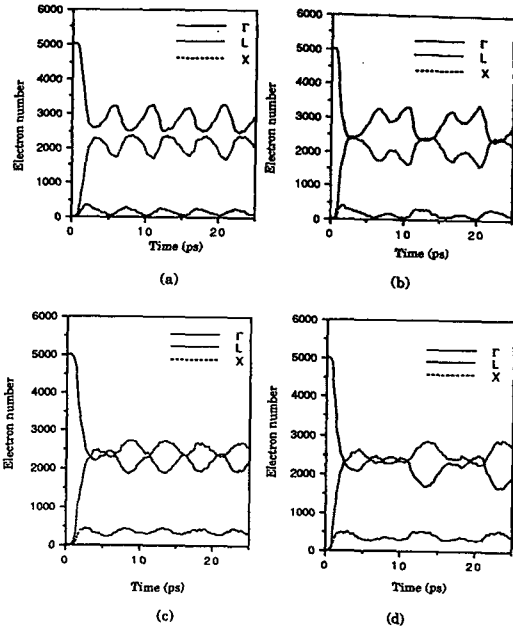


그림 11. 100 GHz에서 전자의 분포 (a) DC 전계 및 hot phonon 없음, (b) DC 전계 포함 hot phonon 없음, (c) DC 전계 없고 hot phonon 포함, (d) hot phonon 및 DC 전계 포함

Fig. 11. Electron distribution for 100 GHz (a) without DC field and without hot phonon, (b) with DC field and without hot phonon, (c) without DC field and with hot phonon, (d) with hot phonon and with DC field.

### 6. 결 론

Monte Carlo 방법을 이용하여 GaAs에서 hot-phonon의 영향을 연구하였다. 초기에서는 hot phonon의 밀도가 낮아서 전자의 분포나 속도에 영향이 적었으나 정상 상태에서는 hot phonon의 밀도가 높아져서 전자의 분포에 영향을 미친다. Hot-phonon은 전자에 에너지를 전달하고 흡수되므로 hot-phonon의 밀도가 높아지면 전자의 에너지가 증가하여 L 및 X 밸리의 전자 밀도가 증가하였다. L 및 X 밸리의 전자는 질량이 증가하므로 전자의 속도가 떨어졌다. Hot-phonon은 발생 후 7 picosecond 가 지나면 사라지므로 낮은 주파수에서는 전자의 분포에 영향이 적지만 높은 주파수일수

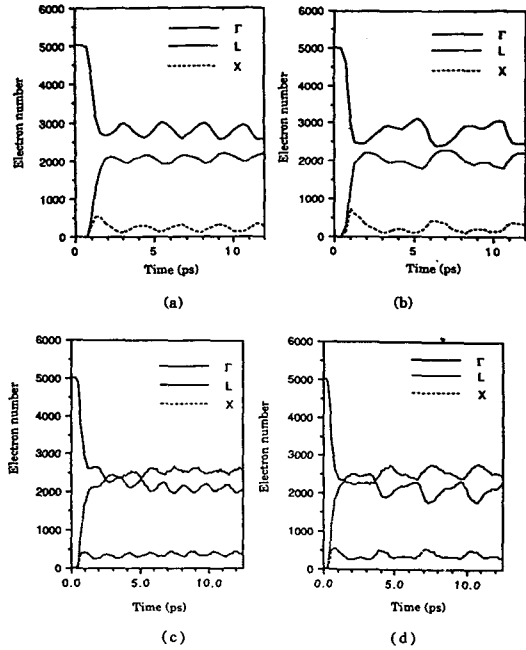


그림 12. 200 GHz에서 전자의 분포 (a) DC 전계 및 hot phonon 없음, (b) DC 전계 포함 hot phonon 없음, (c) DC 전계 없고 hot phonon 포함, (d) hot phonon 및 DC 전계 포함

Fig. 12. Electron distribution for 200GHz (a) without DC field and without hot phonon, (b) with DC field and without hot phonon, (c) without DC field and with hot phonon, (d) with hot phonon and with DC field.

록 영향이 크다. 200GHz 에서는 hot-phonon의 영향으로 전자의 분포가 인가된 전압의 파형을 따라가지 못한다. 이러한 시뮬레이션 결과는 이론적인 연구결과와 일치하며 Monte Carlo 방법의 정확성이 입증되었다. 앞으로 전자에 대한 전계의 효과뿐만 아니라 전자와 정공에 대한 전계(electric field) 및 자계(magnetic field) 효과를 연구해야 한다.

### 참 고 문 헌

1. E.M. Conwell, "High Field Transport in Semiconductors," New York: Academic Press, 1967.
2. E.M. Conwell and M. O. Vassel, "High-field



- distribution function in GaAs,"IEEE Trans. Electron Devices, vol ED-13, pp. 22-27, Jan. 1966.
3. R.J. Nicholas, A.C. Carter, S. Fung, and R. A. Stradling, "A study of the energy loss mechanisms for hot electrons in CdTe and CdS from oscillatory photoconductivity and the megnetophonon effect," J.Phys. C, vol. 13, pp.5215-5231, Oct. 1980.
  4. R. Ulbrich, "Capture of hot electrons by ionized doors in GaAs," Phys. Rev. Lett., vol. 27, pp. 1512-1516, Nov. 1971
  5. J. Shah, R. C. Leite, and J. F. Scott, "Photo excited hot LO phonons in GaAs," Solid State Communications, vol.8, pp. 1089-1093, July 1970.
  6. D. von der Linde, J.Kull, and H. Klingenberg, "Raman scattering from nonequilibrium LO phonons with picosecond resolution, " Phys. Rev.Lett., vol.44, pp. 1505-1508, June 1980.
  7. K. T. Tsen, D. A. Abram, and R. Bray, "Two-phonon Raman-scattering of non-equilibrium high-frequency acoustic phonons: The TA-phonon bottleneck in GaAs," Phys. Rev. B, vol. 26, pp. 4770-4773, Oct. 1982.
  8. P. Lugli, C. Jacoboni, L. Reggiani, and P. Kocevar, "Monte Carlo algorithm for hot phonons in polar semiconductors, "Appl. Phys. Lett., vol. 50, pp. 1251-1253, May 1987.
  9. P. Bordone, C. Jacoboni, P. Lugli, and P. Kocevar, "Effect of a perturbed acoustic-phonon distribution on hot-phonon transport: Monte Carlo Analysis, " J. Appl. Phys., vol. 61, pp. 1460-1468, Feb. 1987
  10. A. Grzesik, "Von Neumann's rejection technique reexamined," SIAM Review, vol. 31 pp. 486-489, Sep. 1989
  11. P. Lugli and D. K. Ferry, "Degeneracy in the ensemble Monte Carlo method for high-field transport in semiconductors," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-32, pp. 2431-2437, Nov. 1985
  12. J. Spanier and M.Gelbard, "Monte Carlo Principles and Neutron Transport Problems, " New York:Addison-Wesley, 1969.
  13. T. Kurosawa and H. Maeda, "Monte carlo calculation of hot electron phenomena I. Streaming in the absence of a magnetic field," J. Phys. Society of Japan, vol.31, pp. 668-678, Sep. 1971.
  14. R. P. Joshi and R. O. Grondin, "Hot-phonon and electron-hole scattering effects on the transient transport of photogenerated electron in GaAs," J. Appl. Phys. vol. 66, pp.4288-4294, Nov. 1989.