
플밴드 임팩트이온화모델을 이용한 GaAs 전자전송특성 분석

- 전계방향에 따른 분석 -

정 학 기*, 이 종 인*

Analysis of electron transport characteristics using full band impact
ionization model on GaAs

- field direction dependent analysis -

Hak-Kee Jung, Jong-In Lee

요 약

본 논문에서는 GaAs 플밴드 E-k관계를 이용하여 전계방향에 따라 임팩트이온화가 전자전송에 미치는 영향을 분석하였다. E-k관계를 구하기 위하여 페르미황금법칙과 local form factor를 이용하는 의사포텐셜방법을 사용하였으며 임팩트이온화율을 구하기 위하여 브릴로우인영역을 사면체로 분할하여 각 사면체마다 적분하는 사면체방법을 이용하였다. 임팩트이온화의 이방성분석을 위하여 Monte Carlo시뮬레이션을 수행하였다. 특히 임팩트이온화의 과도상태분석을 수행한 결과, 이방성은 과도상태에서만 발생하는 것으로 나타났으며 정상상태에서는 등방성특성을 보이는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시한 GaAs 임팩트이온화의 이방성특성은 GaAs 소자의 과도응답특성분석에 사용될 수 있으리라 사료된다.

Abstract

The field dependent characteristics of electron transport with GaAs impact ionization have been analyzed, using GaAs full band E-k relationship. The E-k relationship is derived from empirical pseudopotential method,

* 군산대학교 전자정보공학부 반도체 및 통신소자분과
접수일자 : 1999년 11월 18일

using Fermi's golden rule and local form factor, and Brillouin zone is divided into tetrahedrons for calculating impact ionization rate, and tetrahedron method, in which integrates each tetrahedrons, is used. Monte Carlo simulation is used for analyzing anisotropy of impact ionization. A result of transient analysis for impact ionization has presented that anisotropy of impact ionization only arises during transient state and impact ionization is isotropic under steady state. Anisotropic characteristics of impact ionization for GaAs, which is presented in this paper, can be used in carrying out a transient analysis for GaAs devices

I. 서 론

반도체소자가 극미세화되고 있는 요즘 임팩트이온화(Impact Ionization; I.I.)와 같은 고전계에 의한 입자산란효과는 입자전송특성에 매우 중요한 영향을 미치고 있다.[1,2] 종래 입자의 전송특성을 고찰하기 위하여 사용되었던 포물선 및 비포물선 E-k관계는 임팩트이온화와 같이 고에너지에서 발생하는 산란을 고찰하기에는 부적당하며, 특히 포물선모델을 사용하여 제시된 Keldysh공식은 물리적 의미를 갖지 못하는 것으로 나타나고 있다. 그러므로 본 연구에서는 GaAs의 폴밴드 E-k관계를 이용하여 임팩트이온화를 고찰하고자 한다. 특히 임팩트이온화의 과도특성을 Monte Carlo시뮬레이션에 의하여 분석함으로써 기존에 에너지만의 함수로 제시된 임팩트이온화모델[3]을 상세히 분석하고자 한다.

고전계하의 전송특성 해석시 폴밴드 E-k모델이 필수적이며 최근 컴퓨터의 계산능력이 향상되면서 이에 대한 연구가 활발히 진행중에 있다. 본 논문에서는 GaAs의 폴밴드 E-k관계를 유도하기 위하여 페르미황금법칙(Fermi's golden rule)과 local form factor를 이용한 의사포텐셜방법(empirical pseudopotential method)[4]을 사용하였다. 이 방법은 실험적 E-k관계에 가장 근접한 결과를 유도할 수 있으며, 단지 form factor의 조정으로 실험값에 접근시키는 방법으로 광범위하게 사용하고 있다.

임팩트이온화율을 계산하기 위하여 브릴로우인영역을 k_x, k_y, k_z 방향으로 16등분하였으며 사면체방법(tetrahedron method)[5]을 이용하여 적분함으로써 임팩트이온화율의 변화를 구하였다. 전자전송특성의 전계방향에 따른 이방성을 고찰하기 위하여 정상상태와 과도상태특성을 비교·분석함으로써 정확한 임팩트이온화의 발생메카니즘을 제시하고자 한

다. 또한 Monte Carlo 시뮬레이션에 의하여 임팩트이온화상수 등을 구하였고 이때 군속도를 구하여 과도상태특성을 분석하였으며 임팩트이온화의 발생빈도수 및 위치 등을 시간에 따라 분석함으로써 전계방향에 따른 임팩트이온화의 과도상태특성을 자세히 고찰하였다.

II. 폴밴드 E-k관계와 임팩트이온화

본 연구에서는 GaAs의 폴밴드구조를 유도하기 위하여 실험적 E-k관계에 가장 접근된 결과를 유도할 수 있는 의사포텐셜방법을 이용하였다. 의사포텐셜방법은 Cohen et al.에 의하여 제시된 방법으로 폴밴드 E-k관계를 구하기 위하여 가장 광범위하게 사용되어지고 있다. 이는 주기적인 Bloch 파동함수와 역격자벡터 G 를 사용하며 여기서는 113개의 G 벡터를 이용하여 계산하였다. 즉, 식 (1)과 같이 주어진 헤밀토니안 $H^{ij}(k)$ 의 고유값을 구함으로써 밴드구조를 계산할 수 있다.

$$H^{ij}(k) = \frac{\hbar^2}{2m} |k + G_i + V_i(0) + V_i(G_i - G_j) \cos[(G_i - G_j) \cdot r] + iV_A(G_i - G_j) \sin[(G_i - G_j) \cdot r] \quad i \neq j$$

.....(1)

여기서 k 는 브릴로우인 영역내의 파동벡터이다. G_i 와 G_j 는 두 개의 역격자 벡터이고 $r = a/16[111]$ 이며 a 는 격자상수이다. 실리콘과 같은 단원자 반도체와는 달리 GaAs에서는 대칭성과 비대칭성을 함께 고려하며, V_s 와 V_A 는 의사포텐셜 form factor의 대칭성과 비대칭성을 나타내는 함수이다. Nonlocal corrections와 spin-orbit splitting에 의한 효과는 무시하였으며 최저의 form factor를 구하기 위하여 steepest descent방법[6]을 이용하였다. 결과적으로

표 1의 form factor를 최적값으로 구하였으며 주요 점들의 에너지값과 실험값을 표 2에서 비교하였다. 계산결과 실험값과 거의 일치하는 E-k관계를 유도할 수 있었으며 그림 1에 계산된 E-k관계를 도시하였다.

표 1. 의사포텐셜 form factor

Table 1. Empirical pseudopotential form factors in Ry. (단위 : Ry)

V_3^a	V_8^s	V_{11}^s	V_3^a	V_4^a	V_{11}^a
-0.2350	0.0164	0.0500	0.0786	0.0526	0.0051

표 2. 대표적인 실험값과 계산값의 에너지 비교
Table 2. Comparison with experimental and calculated energy in eV. (단위 : eV)

State	Experimental	Present
$\Gamma_{8v} - \Gamma_{6c}$	1.42 ^a	1.42
$\Gamma_{8v} - L_{6c}$	1.71 ^a	1.71
$\Gamma_{8v} - X_{6c}$	1.90 ^a	1.91
$\Gamma_{8v} - \Gamma_{7c}$	4.63 ^b	4.46
$\Gamma_{7v} - \Gamma_{6c}$	1.77 ^b	1.42
$\Lambda_{4,5v} - \Lambda_{6c}$	2.89 ^b	2.75

^a Ref.7 ^b Ref.8

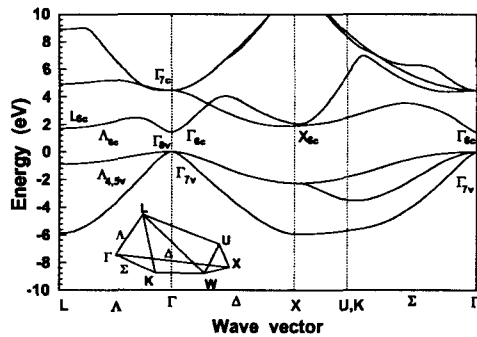


그림 1. 의사포텐셜방법에 의하여 유도된 GaAs의 플랜드 E-k관계.

Fig. 1. Full band E-k relation for GaAs obtained from empirical pseudopotential method.

GaAs의 임팩트이온화에 대한 연구결과는 Keldysh공식을 이용한 해석학적 모델에서 플랜드 모델을 이용한 수치적 모델까지 광범위하게 발표되고 있다.[9,10] 포물선 E-k관계에서 유도된 Keldysh공식은 에너지의 제공에 비례하는 임팩트이온화율을 제시하였으나 Keldysh공식은 임팩트이온화가 발생하는 문턱에너지 E_0 와 임팩트이온화의 강도를 나타내는 P의 두 파라미터를 조정하여 실험값에 근사시키는 방법으로써 물리적 의미가 희박하다. 본 논문에서는 상세한 임팩트이온화에 대한 해석을 위하여 식 (2)를 플랜드에서 계산하였다. 즉, 전도대내의 전자(1상태)가 가전자대의 전자(2상태)와 임팩트이온화한 후, 각각 전도대로 천이(1'와 2') 하였다면 페르미황금법칙에 의하여 임팩트이온화율은

$$S_{ii}(1) = \frac{1}{2} \sum_{\mathbf{q}} \sum_{\mathbf{q}'} \sum_{\mathbf{q}''} \frac{2\pi}{\hbar} [|M_a|^2 + |M_d|^2 + |M_a - M_d|^2] \times \delta(E_1 + E_2 - E_{1'} - E_{2'}) \dots \dots \dots (2)$$

와 같이 표현될 수 있다. 실제 계산에서 1'와 2'가 바뀐 경우도 동일한 임팩트이온화로 두 번 반복계산되기 때문에 1/2를 곱하였다. 여기서 M_a 와 M_b 는 direct와 exchange 행렬요소(matrix element)로써

$$M_a = \langle \phi_{1'}^*(\mathbf{r}_1) \phi_{2'}^*(\mathbf{r}_2) | \frac{e^2}{4\pi\epsilon(\mathbf{q}, \omega) |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} | \phi_{1'}(\mathbf{r}_1) \phi_{2'}(\mathbf{r}_2) \rangle$$

$$M_b = \langle \phi_{2'}^*(\mathbf{r}_1) \phi_{1'}^*(\mathbf{r}_2) | \frac{e^2}{4\pi\epsilon(\mathbf{q}, \omega) |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} | \phi_{1'}(\mathbf{r}_1) \phi_{2'}(\mathbf{r}_2) \rangle \dots \dots \dots (3)$$

와 같으며 $\epsilon(\mathbf{q}, \omega)$ 는 주파수와 파동벡터에 의존하는 GaAs의 유전상수이며 상태 ξ 에서 전자의 파동함수 ϕ_{ξ} 는 역격자벡터를 기본벡터로 하는 가상파동함수를 사용하였다. 위와같이 표현되는 임팩트이온화율을 계산하기 위하여 먼저 브릴로우인영역을 16등분하여 각 그리드점에 대한 E-k관계를 계산하였다. 즉,

$$(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y, \mathbf{k}_z) = \frac{1}{16} (l, m, n) \dots \dots \dots (4)$$

과 같이 브릴로우인영역내에 존재하는 정수 l, m, n에 대하여 E-k관계를 계산하였으며 이때 사용된 총 그리드점은 17,585개이다. 각점에 대하여 의사

포텐셜방법으로 에너지와 고유값을 구하였으며 식 (2)를 $\Sigma k \rightarrow \Omega/(2\pi)^3 \int d^3k$ 의 관계에 의하여 적분으로 수정한 후 적분을 행하였다. 적분은 사면체방법을 이용하여 수치적분을 해석학적 수식으로 표현하여 수행하였으며 이때 사용된 사면체의 개수는 98,304개로써 전체 브릴로우인 영역에 대하여 적분하였다.

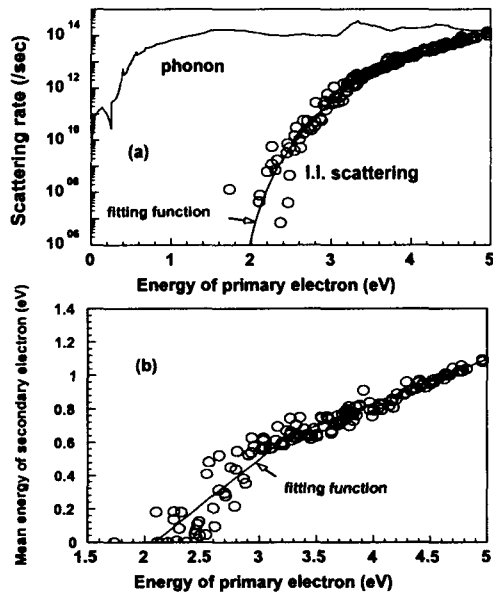


그림 2. 폴밴드 E-k관계를 이용하여 계산된 (a) 임팩트이온화율과 (b) 평균이차전자에너지.
Fig. 2. (a) impact ionization rate and (b) mean energy of secondary electron calculated by full band E-k relation.

계산된 임팩트이온화율을 폴밴드에서 계산된 포논산란율[11]과 함께 그림 2(a)에 ○표시로 도시하였다. 상대적으로 낮은 에너지에서는 이방성을 나타내나 임팩트이온화가 자주 발생하는 고에너지 영역에서는 거의 등방성특성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 임팩트이온화가 발생한 후, 전자들의 에너지변화를 구하기 위하여 식 (5)를 이용하여 구한 이차전자의 평균에너지를 그림 2(b)에 ○표시로 도시하였다.

$$\bar{E}_1(1) = \frac{1}{2} \sum_{\vec{k}} \sum_{\vec{k}'} \frac{2\pi}{\hbar} E_1 [|M_a|^2 + |M_b|^2 + |M_a - M_b|^2] \times \delta(E_1 + E_2 - E_1' - E_2') / S_{if}(1) \dots (5)$$

식 (5)의 계산결과, 고에너지 영역에서 에너지에 선형적으로 비례하는 결과를 유도할 수 있었으므로 임팩트이온화율과 이차전자에너지를 식 (6a)와 (6b) 같이 각각 에너지의 함수로 fitting하여 모델화하였으며 그림 (2a)(2b)에 fitting 함수를 도시하였다.

임팩트이온화율 :

$$S_{if}(E) = 5.32 \times 10^{11} (E - 1.73)^{4.44} \dots (6a)$$

이차전자에너지:

$$\bar{E} = \begin{cases} 0.55E - 1.15 & 1.73eV < E < 3.18eV \\ 0.267E - 0.237 & E > 3.18eV \end{cases} \dots (6b)$$

III. Monte Carlo시뮬레이션 및 결과 고찰

전계방향에 따른 전자전송에 임팩트이온화가 미치는 영향을 상세히 고찰하기 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 행하였으며 산란율은 그림 2(a)와 같은 포논산란율과 식 (6a)로 fitting된 임팩트이온화율을 테이블화하여 사용하였다.

각 점에서의 에너지를 구하기 위하여 Fischetti가 제시한 방법[12]을 사용하였다. 폴밴드 Monte Carlo 알고리즘은 일반적인 모델[2]을 사용하였으며 산란의 종류결정, 에너지상태결정, 자유비행시간결정 등에 일정한 분포를 갖는 난수를 사용하여 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션은 <100>, <110>, <111>전계방향에 대하여 행하였으며 시뮬레이션의 결과를 고찰하였다.

1. 임팩트이온화 상수 및 균속도

임팩트이온화상수(I.I. coefficients)는 단위길이당 전계에 따라 임팩트이온화가 발생하는 빈도수로 정의된다. Monte Carlo시뮬레이션시 입자수는 10,000 개를 사용하였으며 4ps까지의 결과를 이용하여 임팩트이온화 상수값을 구하였다. 그림 3에 본 연구에서 구한 임팩트이온화상수와 Pearsall et al.의 실

험값[13], 그리고 기존 논문[14]에서 발표된 값들을 비교하였다. 비교한 결과 본 연구에서 사용한 모델이 타 모델보다 Pearsall et al.의 실험값에 일치함을 알 수 있었다. 인가된 전계의 방향에 따른 임팩트이온화상수의 변화는 거의 없었으며 이는 전계가 인가되고 4ps까지의 결과를 평균하였으므로 전계에 따른 변화가 나타나지 않았다고 사료된다.

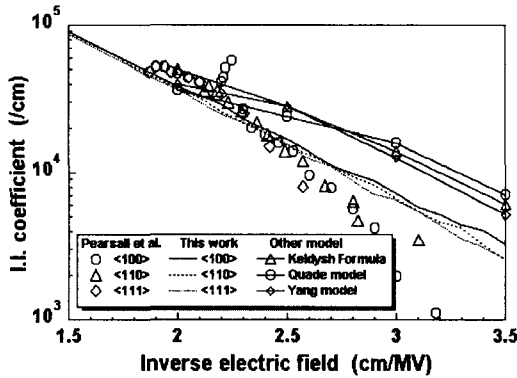


그림 3. 임팩트이온화상수
Fig. 3 Impact ionization coefficients

전계방향이 다를 때 상이한 임팩트이온화특성이 나타나는 것이 실리콘 트랜지스터를 이용하여 발표되었다.[2] GaAs의 경우도 임팩트이온화상수가 전계방향에 따라 상이할 것으로 예측하였으나 그림 3에서 알 수 있듯이 전계가 인가되고 4ps 정도까지의 전계에 따른 변화는 거의 나타나지 않았으므로 전자전송의 과도상태특성을 분석하였다. 즉, 전계인가 후 0.1ps까지의 전자전송에 대한 해석을 위하여 먼저 군속도를 구하였다. <100>방향으로 500kV/cm의 전계를 인가한 후, 0.02ps, 0.03ps, 0.04ps, 0.1ps가 경과한 후 군속도의 변화를 그림 4에 도시하였다. (-) 군속도는 인가전계와 동일한 방향으로 전자가 이동하는 것을 나타낸다. 반면 (+) 군속도는 전계와 반대방향으로 전자가 이동하고 있는 것을 나타낸다. 0.02ps에서 대부분의 전자는 유효질량이 작은 Γ 밸리에 존재하며 (+)군속도의 피크값에 해당하는 속도를 가지고 이동하는 효과를 보이고 있다. 시간이 흐름에 따라 (+) 군속도의 피크값은 사라지며 0.1ps정도에서는 거의 Maxwell-

Boltzmann분포를 보이면서 정상상태를 나타내고 있다.

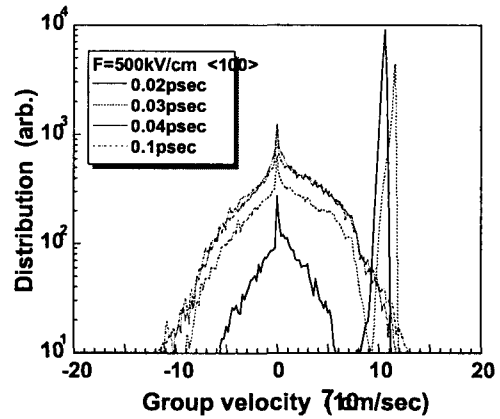


그림 4. 시간에 대한 군속도의 변화
Fig. 4 Group velocity as a function of elapsed time

2. 전계방향에 따른 임팩트이온화의 변화

과도상태에서 전계방향에 따른 임팩트이온화 특성의 변화를 자세히 고찰하기 위하여 <100>, <110>, <111>방향에 500kV/cm의 전계를 인가한 후, 시간에 따른 임팩트이온화의 발생빈도수를 그림 5(a)에 도시하였다. 과도상태동안 이방성특성이 강하게 나타나며 과도상태후 이방성은 매우 약화됨을 알 수 있다. 이와같은 이방성특성은 그림 5(a)(b)와 같이 <100> 방향에서는 임팩트이온화의 발생빈도수가 <110>과 <111>방향보다 매우 크게 나타났으며 <100> 방향에 대한 이방성율은 <110>보다 <111>방향이 더욱 심한 것으로 나타났다. 임팩트이온화율은 그림 (2a)와 같이 에너지에 의존하므로 그림 5(a)(b)와 같은 이방성특성은 방향에 따라 평균에너지의 변화가 다르기 때문이라고 사료된다. 이와같은 현상을 관찰하기 위하여 그림 5(c)에 각 방향에 따른 평균에너지를 시간에 따라 도시하였다. 예측한 바와같이 과도상태동안 에너지차이는 크게 나타나며 시간이 경과하여 정상상태가 되면 각 방향에 따른 에너지의 평균값은 거의 일치하여 이방성특성도 사라질 것으로 사료된다.

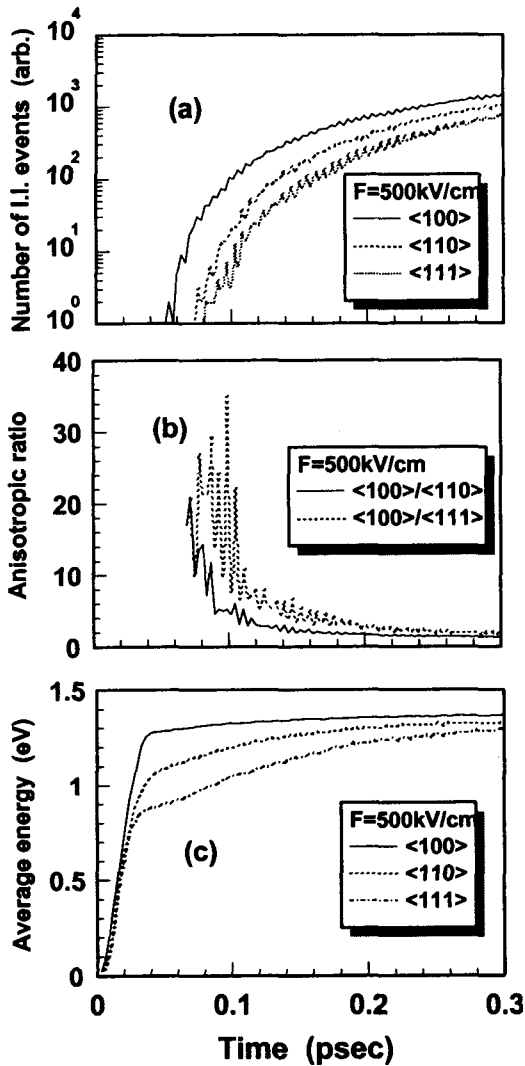


그림 5. (a) 임팩트이온화의 발생빈도수
 (b) 임팩트이온화의 이방성비율
 (c) 시간에 대한 평균에너지의 변화
 Fig. 5. (a) Number of impact ionization events
 (b) Anisotropic ratio of impact ionization
 (c) Average energy during transient time

3. 임팩트이온화가 발생하는 위치 및 밴드

정상상태에서 이방성특성이 사라지며 과도상태에서만 이방성특성이 나타나는 이유를 보다 자세히 고찰하기 위하여 브릴로우인영역에서 임팩트이

온화를 겪는 전자들의 분포를 구하였다. 초기에 Γ 밸리에 위치한 전자들은 0.02ps 정도의 과도상태에서 전계 및 포논산란에 의해서 에너지가 증가하여 빠른 속도로 L, X밸리로 이동한다. 0.1ps 정도에서는 에너지가 더욱 증가하여 브릴로우인영역 전체에 전자들이 분포하며 임팩트이온화가 발생할 수 있는 문턱에너지까지 증가하면 임팩트이온화가 발생하여 다시 에너지를 잃게 된다. 에너지를 잃은 전자들은 Γ , L, X밸리로 천이할 것이다.

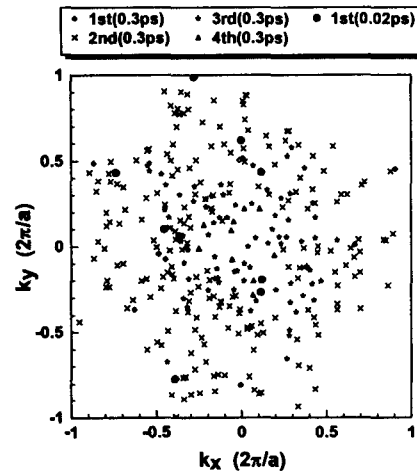


그림 6. 임팩트이온화가 발생한 전자의 위치분포
 Fig. 6 Distribution of electron related to impact ionization processes in momentum space

그림 6은 500kV/cm의 전계를 $\langle 100 \rangle$ 방향으로 인가한 후 0.02ps와 0.3ps에서 임팩트이온화가 발생한 전자위치를 브릴로우인영역의 k_x - k_y 평면에 도식한 것이다. 0.02ps에서의 평균에너지는 약 0.5eV이므로 거의 임팩트이온화가 발생하지 않으나 초기 Γ 밸리에 존재하던 전자가 매우 짧은 시간에 임팩트이온화가 발생할 수 있는 에너지를 얻어 다른 영역으로 천이한 후 임팩트이온화를 겪는 것으로 나타났다. $\langle 100 \rangle$ 방향으로 전계가 인가되었으므로 전자들이 반대방향으로 이동한 것을 알 수 있다. 이는 lucky electron이라 할 수 있다. 반면 그림 6에서 알 수 있듯이 0.3ps에서는 대부분의 임팩트이

온화는 두 번째 전도대에서 발생하는 것을 알 수 있으며 정상상태에 도달한 후 임팩트이온화의 발생은 전체 브릴로우인 영역에서 발생하므로 임팩트이온화의 이방성이 사라지는 것이다. 이것이 임팩트이온화율은 이방성을 보이나 임팩트이온화상수에서는 이방성을 관찰할 수 없는 이유이다.

IV. 결론

본 연구에서는 GaAs 폴밴드 E-k관계와 Monte Carlo 시뮬레이션을 통하여 전계방향에 따라 임팩트이온화율이 전자전송에 미치는 영향을 분석하였다. 폴밴드를 이용하여 임팩트이온화율을 구하기 위하여 먼저 의사포텐셜방법에 의하여 GaAs의 E-k관계를 유도하였으며 브릴로우인 영역을 16등분하여 17,585개의 그리드점을 발생시켜 98,304개의 사면체를 구성하여 적분함으로써 폴밴드를 이용한 임팩트이온화율을 구하였다. 인가된 전계의 방향을 변화시켜 시뮬레이션하였을 때 약 0.1ps정도의 짧은 시간동안에는 이방성특성이 매우 강하게 나타나며, 특히 <110>방향보다 <111>방향에서 강한 이방성특성을 보이는 것을 알 수 있었다.

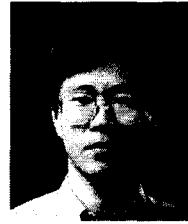
본 논문에서 사용한 임팩트이온화율의 타당성을 조사하기 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션에 의한 임팩트이온화상수를 구하였다. 본 논문에서 구한 값과 기존의 논문에서 발표된 값을 실험값과 비교한 결과, 본 논문에서 사용한 임팩트이온화율이 더욱 타당하다고 사료되며 이를 이용하여 임팩트이온화의 과도특성을 분석하였다. 시간에 대한 균속도의 변화를 살펴보면 0.02ps정도의 매우 짧은 시간동안은 대부분의 전자가 Γ 밸리에만 존재하고 이 가운데 lucky electron만이 임팩트이온화가 발생하며 대부분의 전자들은 전계 및 포논산란에 의하여 에너지가 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 0.05ps이후에는 균속도분포가 거의 Maxwell-Boltzmann 분포를 이루며 정상상태로 접어들고 있는 것을 알 수 있었다. 브릴로우인영역에서의 입자 분포를 시간에 따라 조사한 결과, 0.1ps후에는 전계방향에 관계없이 모든 브릴로우인 영역에 전자들이 존재하게 되며 0.3ps정도에서 임팩트이온화가 발생하는 위치는 전계의 방향과 무관한 등방성특

성이 발생함을 알 수 있었다. 전자들의 평균에너지도 0.3ps후에는 전계방향에 따라 무관한 결과를 유도하였으므로 임팩트이온화는 과도상태에서만 이방성특성이 발생하며 정상상태에서는 등방성특성이 발생함을 알 수 있었다. 이상의 결과는 GaAs를 이용한 소자의 과도응답특성 고찰에 이용할 수 있으리라 사료된다.

참고 문헌

- [1] H.K. Jung, H. Nakano and K. Taniguchi, "Transient Analysis of Impact Ionization Anisotropy using Realistic Band Structure for GaAs", 6th International Workshop on Computational Electronics, pp. 202-205, 1998.
- [2] T. Kunikiyo, M. Takenaka, Y. Kamakura, M. Yamaji, H. Mizuno, M. Morifuji, K. Taniguchi and C. Hamaguchi, "A Monte Carlo simulation of anisotropic electron transport in silicon including full band structure and anisotropic impact ionization model", J. Appl. Phys., vol. 75, no. 1, pp. 297-312, 1994.
- [3] 정학기, "Full 밴드 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 GaAs 임팩트이온화에 관한 연구", 대한전자공학회논문지, vol. 33A, no. 11, pp. 112-120, 1996.
- [4] J. P. Walter and M. L. Cohen, "Frequency and wave vector dependent dielectric function for silicon", Phys. Rev. B., vol. 5, pp. 3101-3110, 1972
- [5] O. Jepsen and O. K. Anderson, "The electronic structure of h.c.p. ytterbium", Solid State Comm., vol. 9, pp. 1763-1767, 1971.
- [6] M. Yamaji, K. Taniguchi and C. Hamaguchi, "複數バレーを用いたモンテカルロシミュレーションによるキャリア輸送解析", Annual Research Report, Dept. of Elec. Eng., Osaka Univ., no. 7, pp. 35-36, 1994.
- [7] L. Reggiani, Hot Electron Transport in Semiconductor, Springer-Verlag, New York, 1985.

- [8] P. Lautenschlager, M. Garriga, S. Logothetidis and M. Cardona, "Interband critical points of GaAs and their temperature dependence", Phys. Rev. B, vol. 35, p. 9174, 1987.
- [9] J. Bude and K. Hess, "Thresholds of impact ionization in semiconductor", J. Appl. Phys., vol. 72, no. 8, pp. 3554-3561, 1992.
- [10] Y. Wang and K. F. Brennan, "Numerical study of the wave-vector dependence of the electron interband impact ionization rate in bulk GaAs", J. Appl. Phys., vol. 76, no. 2, pp. 974-981, 1994.
- [11] H.K.Jung, K.Taniguchi and C. Hamaguchi, "Impact ionization model for full band Monte Carlo simulation in GaAs", J. Appl. Phys., vol. 79, no. 5, pp. 2473-2480, 1996.
- [12] M. V. Fischetti and Steven E. Laux, "Monte Carlo analysis of electron transport in small semiconductor devices including band structure and space-charge effects", Phys. Rev. B, vol. 38, p. 9721, 1988.
- [13] T. P. Pearsall, F. Capasso, R.E. Nahory and A. Pollack, "The band structure dependence of impact ionization by hot carriers in semiconductors : GaAs", Solid-State Elec., vol.21, pp.297-302, 1978.
- [14] J. Konik, Y.Wang, I.H.Oguzman and K.F.Brennan, "Theoretical investigation of wave-vector-dependent analytical and numerical formulations of the interband impact ionization transition rate for electrons in bulk silicon and GaAs", J. Appl. Phys., vol. 76, no. 6, pp.3542-3551, 1994.



정 학 기(Hak-Kee Jung)

1983. 3 아주대학교 전자공학과
공학사

1985. 3 연세대학교 대학원 전자
공학과 공학석사

1990. 8 연세대학교 대학원 전자
공학과 공학박사

1994. 7 - 1995. 7 일본 오사카대학 객원 연구원

1996. 3 - 현재 군산대학교 전자정보공학부 부교수



이 종 인(Jong-In Lee)

1979. 2 울산대학교 전기공학과
공학사

1983. 2 전북대학교 대학원 전기
공학과 공학석사

1987. 2 전북대학교 대학원 전기
공학과 공학박사

1988. 3 군산대학교 전자공학과 전임강사

1999. 4 - 현재 군산대학교 전자정보공학부 교수