

論文96-33A-11-13

# Full 밴드 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 GaAs 임팩트이온화에 관한 연구

## (Impact Ionization for GaAs using Full Band Monte Carlo Simulation)

鄭鶴起 \*

(Hak Kee Jung)

### 요 약

본 연구에서는 7.8 및 5.6의 지수를 갖는 수정된 Keldysh 공식으로 GaAs의 임팩트이온화모델을 제시하였다. 임팩트이온화율을 계산하기 위하여 페르미의 황금법칙과 의사포텐셜방법에 의하여 계산된 full 에너지밴드 구조를 사용하였다. 임팩트이온화율은 저에너지영역(<3eV)에서 이방성특성을 나타내나 임팩트이온화가 주로 발생하는 고에너지영역(>3eV)에서는 등방성특성이 나타나는 것을 알 수 있었다. GaAs 임팩트이온화모델의 타당성을 고찰하기 위하여 full 밴드 Monte Carlo 시뮬레이터를 제작하였으며 결과적으로 임팩트이온화계수를 실험값 및 이방성 임팩트이온화모델의 결과와 비교함으로써 본 연구에서 제시한 임팩트이온화모델의 우수성을 증명하였다. 또한 full 밴드모델을 사용하여 브릴로우인영역에서 전자들의 움직임을 전계에 따라 관찰함으로써 에너지의 변화에 따른 밸리간 전이를 설명하였다.

### Abstract

Impact ionization model in GaAs has been presented by modified Keldysh formula with two sets of power exponent of 7.8 and 5.6 in this study. Impact ionization rate is derived from Fermi's golden rule and full energy band structure based on empirical pseudopotential method. Impact ionization rates show anisotropic property in low energy region (<3eV), but isotropic in high energy region (>3eV). Full band Monte Carlo simulator is coded for investigating the validity of the GaAs impact ionization model, and validity is checked by comparing impact ionization coefficients with experimental values and ones in anisotropic model. Valley transitions to energy alteration are explained by investigating electron motion in Brillouin zone for full band model to electric field variation.

### I. 서 론

최근 소자의 미세화에 의한 고전계효과 및 초고주파 효과에 대한 관심이 집중되면서 임팩트이온화(Impact Ionization; I.I.)모델에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 특히 단일소자의 크기가 점점 작아져 Submicron 시대에 접어들면서 임팩트이온화현상은 소자에서 발생

하는 필수적인 산란이 되었으나 이에 대한 일반적인 모델은 아직 제시되고 있지 않다.

임팩트이온화현상은 높은 운동에너지를 갖는 핫(hot) 캐리어가 다른 산란메카니즘에 의하여 에너지손실이 발생하기 전에 전자정공쌍을 생성하는 과정으로써 지금까지는 임팩트이온화가 발생하는 문턱에너지  $E_{th}$ 와 임팩트이온화의 강도를 나타내는 척도인 P에 의하여 표시되는 Keldysh 공식이 이용되었다.<sup>11)</sup> 즉, 임팩트 이온화계수를 실험값과 정합시키기 위하여  $E_{th}$  및 P를 조정하였으며 특히 포논산란율도 함께 조정하여 임팩트 이온화율을 구하였다. 그러나 Keldysh 공식은 포물

\* 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: 1996年1月27日, 수정완료일: 1996年11月9日

선에너지밴드(parabolic energy band)구조를 사용하였을때 유도되는 공식으로써 에너지가 높은 영역에서 발생하는 임팩트이온화를 해석하는데에는 물리적인미를 갖지 못한다. 그러므로 본 연구에서는 페르미의 황금법칙과 GaAs의 full 에너지밴드를 이용하여 임팩트 이온화율을 구한 후, 이 이온화율과 에너지관계를 나타내는 해석식을 설정하여 Monte Carlo 시뮬레이션에 이용하였다. 이때 유전함수는 파수 및 주파수에 의존하는  $\epsilon(\mathbf{q}, \omega)$ 를 구하여 사용하였으며 umklapp 항도 포함하여 계산하였다.<sup>[2]</sup>

해석모델은 고에너지에서는 실제 에너지밴드구조와 매우 큰 차이를 보이므로 본 연구에서는 full 밴드를 구하여 사용하였다. full 밴드를 구하기 위하여 의사포텐셜방법(empirical pseudopotential method)을 이용하였다.<sup>[3]</sup>

Keldysh 공식은 임팩트이온화의 이방성을 나타낼 수 없다는 단점이 있으나 임팩트이온화가 발생하는 에너지영역에서는 등방성특성을 나타내므로 본 연구에서는 임팩트이온화의 이방성에 대해선 고찰하지 않았다. 그러나 Kolnik et al.에 의하여 제시된 이방성 모델<sup>[4]</sup>과 비교한 결과, 본 연구에서 제시한 등방성 모델이 더욱 우수한 특성을 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 Monte Carlo 시뮬레이션에 의하여 임팩트이온화가 발생하는 에너지영역을 전계에따라 구하였으며 전계에 따른 전자들의 에너지분포등을 구하였다. 타 모델과 비교하기 위하여 양자생성효율(quantum yield)을 구하였으며 실험값과 비교하기 위하여 임팩트이온화계수(impact ionization coefficients)를 구하였다. 브릴로우인영역(Brillouin zone)에서의 전자분포를 전계에따라 구함으로써 full 밴드 Monte Carlo 시뮬레이션의 유용성을 제시하고자 한다.

II. Full 밴드모델에 의한 임팩트이온화해석

임팩트이온화는 고전계하에서 고에너지를 얻은 캐리어간의 산란으로써 미세구조소자에서는 매우 중요한 산란메카니즘이다. 전도대와 가전자대의 전자가 산란하여 전도대에 2개의 전자와 가전자대에 1개의 정공을 생성하며 이와같이 생성된 과잉캐리어는 캐리어의 전송에 영향을 미치게 된다. 즉, 그림 1과 같이 전자 1이 전자 2와 충돌하여 전자 1'와 2' 그리고 정공 2가 생

성되는 과정이다. 이를 해석하기 위하여 기존에 사용되어 왔던 해석학적 밴드모델은 고에너지영역에서 실제 에너지와 매우 상이한 결과를 나타내므로 임팩트이온화와 같이 고에너지에서 발생하는 산란은 Full 밴드모델을 반드시 사용하여야만 한다.<sup>[5]</sup> form factor를 이용한 의사포텐셜방법에 의하여 GaAs의 E-k관계를 구하였으며 이를 이용하여 임팩트이온화율을 구하였다.<sup>[3]</sup>

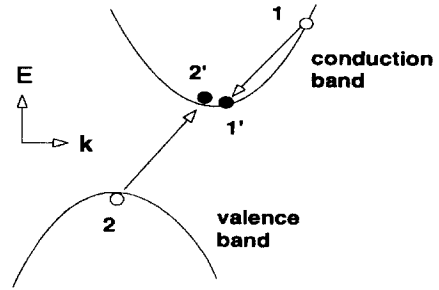


그림 1. 임팩트이온화의 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of impact ionization.

임팩트이온화율을 페르미의 황금법칙과 full 밴드모델을 이용하여 구하기 위하여 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$P_{if}(1, 2, 1', 2') = \frac{2\pi}{\hbar} [|M_d|^2 + |M_e|^2 + |M_d - M_e|^2] \times \delta(E_1 + E_2 - E_{1'} - E_{2'}) \tag{1}$$

델타함수는 에너지보존을 나타내며  $E_i$  ( $i=1, 2, 1', 2'$ )는 각 캐리어의 에너지이다. 행렬요소(matrix element)  $M_d$ 는 direct 항,  $M_e$ 는 exchange 항으로써 다음식에 의하여 계산하였다.

$$M_d = \langle \phi_1(\mathbf{r}_1)\phi_2(\mathbf{r}_2) | \frac{e^2}{4\pi\epsilon(\mathbf{q}, \omega)|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} | \phi_1(\mathbf{r}_1)\phi_2(\mathbf{r}_2) \rangle \tag{2a}$$

$$M_e = \langle \phi_2(\mathbf{r}_1)\phi_1(\mathbf{r}_2) | \frac{e^2}{4\pi\epsilon(\mathbf{q}, \omega)|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} | \phi_1(\mathbf{r}_1)\phi_2(\mathbf{r}_2) \rangle \tag{2b}$$

식 (2a)와 (2b)에서  $\epsilon(\mathbf{q}, \omega)$ 는 파수 및 주파수에 의존하는 GaAs의 유전함수으로써 4개의 가전자대와 11개의 전도대에 대한 E-k관계를 이용하여 계산하였다.<sup>[6]</sup> 식 (1)에서  $|M_d|$ 와  $|M_e|$ 는 이온화에 참여한 두 캐리어의 스핀이 동일할 때이며  $|M_d - M_e|$ 는 스핀이 상이할때의 상호간섭항이다. 또한 식 (2a)와 (2b)에서 알 수 있듯이 전도대의 전자와 가전자대의 전자간 상호관계는 차폐쿨롱포텐셜(screened Coulomb potential)을 사

용하였다. 식 (2)에서 파동함수  $\phi$ 는

$$\phi_{\nu, k} = \frac{1}{\sqrt{V_0}} \sum_G A_{\nu, k}(G) e^{i(k+G) \cdot r} \quad (3)$$

와 같이 역격자벡터  $G$ 에 대한 푸리에급수로 표현되며 이때  $A$ 는 의사포텐셜방법에 의하여 구해진 고유함수이다.  $\nu$ 는 에너지밴드를 나타낸다.

푸리에급수로  $1/|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$ 을 나타내면

$$\frac{1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} = \frac{1}{V_0} \sum_q \frac{4\pi}{q^2} e^{iq \cdot (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)} \quad (4)$$

이다. 식 (1)~ 식 (4)에 의하여 구한  $P_{ii}(1,2,1',2')$ 를 이용하면 상태  $k_1$ 의 전자가 상태  $k_1', k_2, k_2'$ 로 천이할 확률은

$$P_{ii}(1) = \frac{1}{2} \sum_{k_2, k_1', k_2'} P_{ii}(1,2,1',2') \quad (5)$$

이다. 1/2은 스핀축퇴에 의한 효과를 나타낸다. 식 (5)는  $\sum_k \rightarrow \Omega/(2\pi)^3 \int d^3k$ 을 이용하여 브릴로우인영역의 전 범위에 대하여 적분하였다. 브릴로우인영역을 그리드 크기  $1/8(2\pi/a)$ ( $a$ 는 GaAs의 격자상수)으로 등분하여 총 2361개의 점에 대한 에너지 및 파동함수를 구하고 8개의 점으로 이루어진 정육면체를 6개의 동일 체적을 갖는 사면체로 나누어 총 12288개의 사면체에 대하여 체적적분을 행하였다. 이와같은 사면체방법<sup>[7]</sup>은 수치적분을 해석모델로 표현할 수 있다는 장점이 있다. 그림 2는 본 연구에서 구한 임팩트이온화율이며 또는 산란율은 이미 발표된 논문의 값을 사용하였다.<sup>[13]</sup>

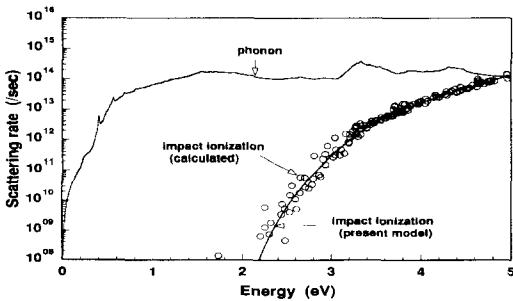


그림 2. 시뮬레이션에 사용한 산란율  
Fig. 2. Scattering rates used in simulation.

이렇게 구한  $P_{ii}$ 를 에너지만의 함수로 나타내기 위해 Keldysh공식형태를 이용하였다. 이는 임팩트이온화가 발생하는 문턱에너지  $E_{th}$ 와 임팩트이온화의 강도를 나타내는  $P$ 의 두 파라미터를 조정하여 다음식과 같이 표

현하였다.

$$P_{ii}[\text{sec}] = P(E - E_{th})^2 \quad (6)$$

그러나  $P$ 와  $E_{th}$ 의 조정만으로는 실제 임팩트이온화에 근사한 모델을 설정할 수 없으며 이 식에 대한 물리적인 의미도 없기 때문에 본 연구에서는 지수 2를 조정한 수정된 Keldysh공식을 제안하고자 한다. 즉, 임팩트이온화율의 경우 에너지가 증가할수록 등방성특성이 나타나므로 다음과 같이 수정된 Keldysh 공식의 형태로 에너지에 대한 함수를 구하여 사용하였다.

$$P_{ii}(E)[\text{sec}] = \begin{cases} 4.57 \times 10^{10} (E - 1.73)^{7.8} & 1.73 \text{ eV} \leq E \leq 3.55 \text{ eV} \\ 1.66 \times 10^{11} (E - 1.73)^{5.6} & 3.55 \text{ eV} \leq E \end{cases} \quad (7)$$

Monte Carlo 시뮬레이션에 이용한 식 (7)의 값을 그림 2에 실선으로 표시하였다.

임팩트이온화후 이차전자의 에너지를 계산하기 위하여 이차전자의 평균에너지를 다음식에 의하여 계산하였다.

$$\overline{E_1}(E_1) = \frac{1}{2} \sum_{k_1'} E_1' \frac{\sum_{\nu_2, \nu_2'} \sum_{k_2, k_2'} P_{ii}(1,2,1',2')}{P_{ii}(1)} \quad (8)$$

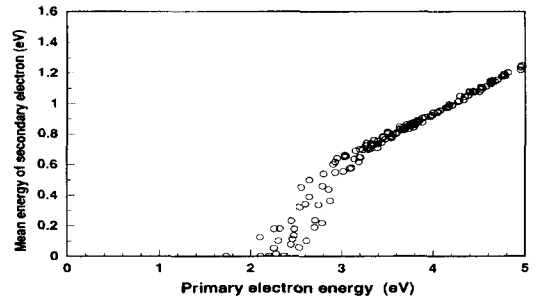


그림 3. 이차전자의 평균에너지  
Fig. 3. Mean energy of secondary electron.

그림 3은 이차전자의 계산된 평균에너지이다. Monte Carlo 시뮬레이션에서 사용하기 위하여 에너지에 대한 다음과 같은 선형함수를 구하여 이용하였다.

$$\overline{E} \text{ (eV)} = \begin{cases} 0.66E - 1.42 & 1.73 \text{ eV} \leq E \leq 3.18 \\ 0.32E - 0.35 & 3.18 \text{ eV} \leq E \end{cases} \quad (9)$$

에너지보존여부를 조사하기 위하여 각 캐리어의 에너지관계 즉,  $E_1 + E_2 - E_{1'} - E_{2'}$ 를  $E_1$ 의 에너지에 대하여 계산하였다. 그림 4는 에너지보존에 관한 그래프이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 상대적으로 낮은 에너지에서

는 브릴로우인영역내 계산격자의 제한된 크기때문에 발생하는 계산오차에 의하여 에너지보존이 잘 이루어지고 있지 않지만 임팩트이온화가 주로 발생하는 3eV 이상의 에너지대에서는 거의 에너지가 보존되고 있음을 알 수 있다.

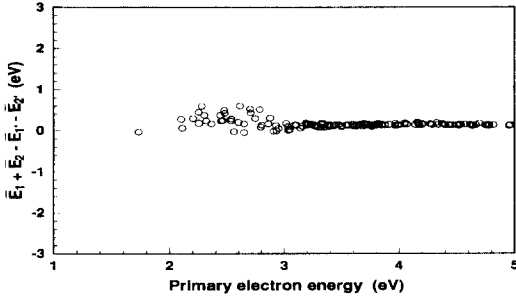


그림 4. 임팩트이온화후 에너지보존  
Fig. 4. Energy conservation after impact ionization.

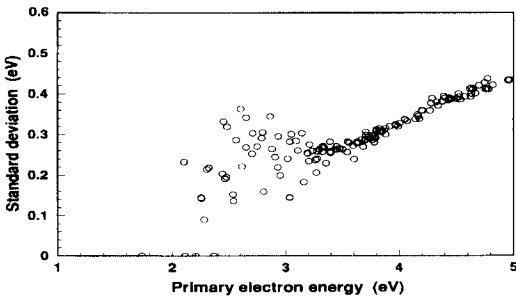


그림 5. 이차전자에너지의 표준편차  
Fig. 5. Standard deviation of energy for secondary electron.

식 (9)의 평균에너지에 대한 표준편차를 다음식에 의하여 계산하였다.

$$\sigma_1 = \left( \frac{1}{2} \sum_{k_1} (E_1 - \bar{E}_1)^2 P_{ii}(1,1') / P_{ii}(1) \right)^{1/2} \quad (10)$$

그림 5는 계산 결과이며 이를 다음과 같이 선형함수로 나타내었다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 0.15E - 0.185 & 1.73eV \leq E \leq 3.18 \\ &= 0.12E - 0.147 & 3.18eV \leq E \end{aligned} \quad (11)$$

결과적으로 에너지가 증가할수록 분포가 넓어지는 것을 알 수 있다.

### III. Monte Carlo 시뮬레이션 및 결과고찰

임팩트이온화현상을 상세히 고찰하기 위하여 Monte

Carlo 시뮬레이터를 제작하였다. 각 산란율과 포논산 관계, 에너지상태밀도등을 full 밴드에서 계산하여 입력하였으며 브릴로우인영역을 각 축방향으로 공히  $1/20(2\pi/a)$  등분하여 총 33,861개의 점에 대하여 시뮬레이션하였다. 또한 각 점에서의 에너지  $E_v(\mathbf{k})$ , 일차미분항  $\partial E_v(\mathbf{k})/\partial k_i$ , 이차미분항  $\partial^2 E_v(\mathbf{k})/\partial k_i \partial k_j$ 이 테이블로 작성되어 입력되었다. 이때  $i, j$ 는 x,y,z좌표를 나타낸다. 임의의 파수  $\mathbf{k}=(k_x, k_y, k_z)$ 에서의 에너지는  $\mathbf{k}$ 가 속해 있는 미소정육면체의 각 꼭지점의  $k_\lambda$  ( $\lambda=1,2,\dots,8$ )을 구하고 각 꼭지점에서의 에너지값 및 미분값을 이용하여 다음식에서 구하였다.<sup>15)</sup>

$$\begin{aligned} E_v(\mathbf{k}) &= \sum_{i=1}^8 W_i E_{v,i}(\mathbf{k}) \\ E_{v,i}(\mathbf{k}) &= E_v(\mathbf{k}_i) + \frac{\partial E_v(\mathbf{k}_i)}{\partial k_j} (k_j - k_{j,i}) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E_v(\mathbf{k}_i)}{\partial k_j \partial k_l} (k_j - k_{j,i})(k_l - k_{l,i}) \\ W_i &= \left[ 1 - \frac{k_x - k_{x,i}}{l} \right] \left[ 1 - \frac{k_y - k_{y,i}}{l} \right] \left[ 1 - \frac{k_z - k_{z,i}}{l} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $l$ 은  $1/20(2\pi/a)$ 이다. 초기 온도 T와 전계가 주어질때 초기에너지  $3k_B T/2$ ( $k_B$ 는 볼츠만상수)인 전자 10,000개의 전송특성을 해석하여 통계를 구하였다. 이때 4psec까지 시뮬레이션하였으며 2psec이후의 결과만을 이용하였다. full 밴드 Monte Carlo 알고리즘은 일반적인 모델<sup>18)</sup>을 사용하였으며 산란의 종류결정 및 산란후 에너지의 상태결정, 자유비행시간결정등에는 일정한 분포를 갖는 난수를 사용하였다.

#### 1. 임팩트이온화의 발생빈도와 에너지분포

임팩트이온화는 고에너지를 얻은 캐리어간의 산란으로써 저전계에서는 발생할 수 있는 에너지를 얻지 못한다. 그림 6은 캐리어의 에너지와 전계의 함수로 표현된 임팩트이온화의 빈도수이다. 전술한 바와같이 에너지가 클수록 그리고 전기장이 강할수록 임팩트이온화가 자주 발생함을 알 수 있다. 그러므로 3eV이하의 에너지를 갖는 캐리어의 경우 임팩트이온화는 거의 발생하지 않으며 전계가 200kV/cm정도 이하에서도 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

그림 7은 에너지분포를 나타낸다. 전계가 증가할수록 Maxwell-Boltzman분포와 매우 상이해지며 300kV/cm 이상의 전계가 인가되었을 경우 3eV이상의 에너지를 갖는 입자가 존재하나 임팩트이온화현상에 의하여 에너지가 감소하므로 분포함수가 3.5eV 근처에서 다시 줄어드는 것을 알 수 있다. 이와같이 임팩트이온화가 발생한 입자들의 에너지가 줄어들기 때문에  $0eV < E < 2.0eV$ 의 폭이 전계가 증가할수록 증가함을 알 수

있다. 또한 높은 전계가 인가되었을 경우  $2.4\text{eV} < E < 3.2\text{eV}$ 의 범위에서 분포함수에 스텝이 형성됨을 알 수 있다. 이는 이 영역에서 포논산란율이 상대적으로 낮으므로 이 영역밖의 에너지범위에서 임팩트이온화보다는 포논산란이 자주 발생하기 때문이다. 그러나 그 이상의 에너지에서는 임팩트이온화가 매우 큰 영향을 미치므로 분포가 급격히 감소한다. 이를 좀더 자세히 고찰하기 위하여  $500\text{kV/cm}$ 의 경우 임팩트이온화를 포함시키지 않고 시뮬레이션하였을때 분포를 조사하여 그림 7에 도시하였다. 예측한 바와같이 임팩트이온화를 포함시키지않으면 고에너지의 분포가 증가하여 과다추정됨을 알 수 있다.

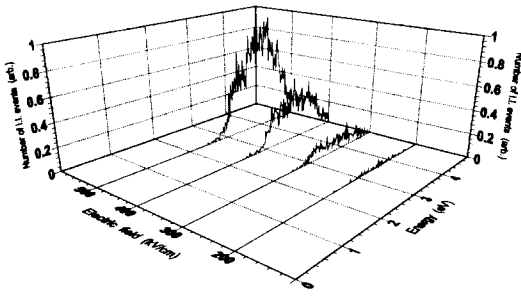


그림 6. 임팩트이온화의 발생빈도수  
Fig. 6. Number of impact ionization events.

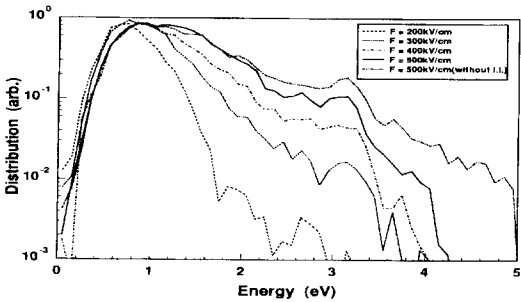


그림 7. 전자들의 에너지분포  
Fig. 7. Electron energy distribution

2. 양자생성효율(Quantum Yield)

양자생성효율은 임의의 에너지를 갖은 전자가 임팩트이온화의 문턱에너지이하로 에너지가 감소하기전까지 발생하는 임팩트이온화의 수로 정의된다. 양자생성효율은 포논산란율( $P_{op}$ )과 임팩트이온화율간의 비에 선형적으로 비례하는 것으로 알려져 있으므로 산란율에 매우 큰 영향을 받는다.<sup>19)</sup> 그림 8에 본 연구에서 구한 양자생성효율과 Kolnik et al.<sup>14)</sup>, 그리고 Quade et

al.<sup>10)</sup>에 의한 결과를 비교하였다. Kolnik모델과 Quade 모델은 동일한 포논산란율 사용하였으므로 결과가 거의 같음을 알 수 있다. 두 모델에서 사용한 포논산란은 변형포텐셜을 상수로 사용함으로써 브릴로우인영역에서 변형포텐셜이 파수에 의존하는 모델을 사용하여 계산한 본 연구의 결과와 상이할 뿐만아니라 비교한 두 모델은  $3\text{eV}$  근처에서 임팩트이온화율이 최고값을 나타내므로  $3\text{eV}$  근처에서 본 연구의 결과와 매우 차이가 나는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 포논산란의 경우  $3\text{eV}$  근처에서 증가하기 시작하여 약  $3.3\text{eV}$  근처에서 최대값을 갖으나 임팩트이온화는 Keldysh 공식에 의하여 지수함수적으로 증가하므로 그림 8의  $P_{ii}/P_{op}$ 의 결과를 보면  $3.3\text{eV}$  정도에서 상대적으로 낮은 값을 보인다. 즉, 이 에너지 근처에서는 상대적으로 임팩트이온화의 발생빈도가 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러므로 비교한 두모델보다 이 에너지 근처에서 양자생성효율이 감소하는 것을 알 수 있다.

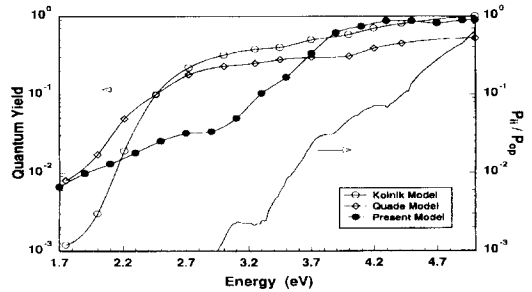


그림 8. 양자생성효율  
Fig. 8. Quantum yield.

3. 임팩트이온화계수

임팩트이온화계수(I.I. coefficients)는 임의의 전기장에 대하여 단위길이당 발생하는 임팩트이온화의 수로써 정의되며 전계의 함수인  $\alpha(F)$ 로 표시한다. 실험<sup>11-18)</sup>에서 밝혀진 바와같이  $\alpha(F)$ 는

$$\alpha(F) = a \exp[-(b/F)^c] \quad (13)$$

의 형태로 표현되며 표 1은 GaAs의 경우 실험에서 밝혀진 a, b, c값이다.

본 연구에서 제시한 식 (7)의 임팩트이온화율에 대한 타당성여부를 조사하기 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 행하였다. 그림 9에서 ●는 <100> 방향으로 해당 전계를 인가하였을때 Monte Carlo 시뮬레이션에 의하여 구한 임팩트이온화계수이며 음영영역은 표 1의

실험값을 표시한다. 시뮬레이션 결과 실험값내에서 일치하므로 본 연구의 임팩트이온화모델은 합당하다고 사료된다. 또한  $k$ 에 관하여 변화하는 즉, 이방성모델을 제시한 Kolnik et al.의 논문결과<sup>[14]</sup>를 점선으로 표시하였다. 결과적으로 인가전계가 감소할수록 이방성모델은 실험값과 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 낮은 전계에서 이방성모델의 임팩트이온화율이 본 연구의 모델과 비교해서 크다는 것을 알 수 있다. 반면 높은 전계가 인가된 경우 이방성모델의 이온화율은 본 연구의 이온화율보다 작다는 것을 알 수 있다.

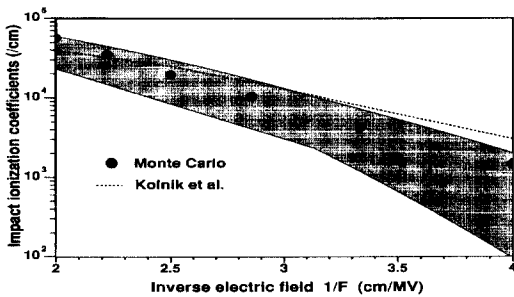


그림 9. 임팩트이온화계수  
Fig. 9. Impact ionization coefficients.

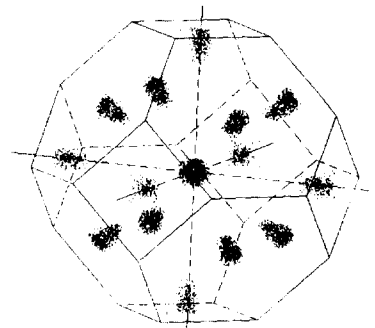
표 1. 식 (13)의 a, b, c 값  
Table 1. Values of a, b, c, in Eq. (13).

참고논문 번호	a(cm)	b(V/cm)	c
11	$1.97 \times 10^5$	$5.58 \times 10^5$	2
12	$5.60 \times 10^6$	$2.41 \times 10^6$	1
13	$3.70 \times 10^5$	$7.20 \times 10^5$	2
14	$2.99 \times 10^5$	$6.85 \times 10^5$	1.6
15	$1.90 \times 10^5$	$5.75 \times 10^5$	1.82
16	$1.00 \times 10^6$	$1.72 \times 10^6$	1
17	$2.00 \times 10^5$	$5.50 \times 10^5$	2
18	$4.00 \times 10^6$	$2.10 \times 10^6$	1

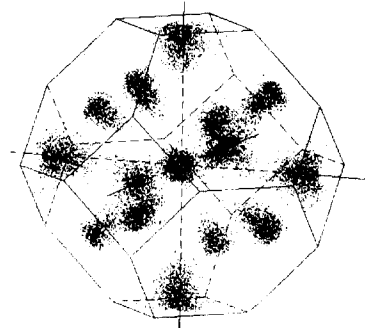
기존의 논문<sup>[5]</sup>에서는 임팩트이온화계수를 실험값에 정합시키기 위하여 포논산란율을 조정하거나 Keldysh 공식에서 P 및  $E_{th}$ 를 조정하였다. 그러나 본 연구에서는 full밴드 및 페르미의 황금법칙을 이용하여 계산한 포논산란율을 사용하였을 뿐만아니라 임팩트이온화율도 full 밴드를 이용한 페르미황금법칙에 의하여 계산된 결과를 토대로 수정된 Keldysh 공식을 유도하여 사용함으로써 실험값에 매우 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

4. 브릴로우인 영역에서의 전자분포

그림 10에 브릴로우인 영역내에서 4psec 시뮬레이션 한 후 전자의 분포를 인가된 전계에 따라 도시하였다. 그림 10(a)와 같이 10kV/cm정도의 저전계를 인가한 경우  $\Gamma$ , L, X밸리의 최하에너지영역에서 벗어날 정도의 에너지를 얻지 못하기 때문에 각 밸리에 구속되어 있음을 알 수 있다. 실리콘의 경우 10kV/cm정도의 전계를 인가하더라도 전도대의 최하밸리인 6개의 X밸리에서 벗어나지 못함을 알 수 있으나 이는 실리콘의 경우 X밸리와 2차밸리의 차가 1eV이상이므로 천이하기 어렵기 때문이다.<sup>[18]</sup> 그러나 GaAs의 경우 중심밸리인  $\Gamma$ 밸리와 L밸리 그리고 X밸리와는 각각 0.3eV와 0.5eV정도 밖에 차이가 없기때문에  $\Gamma$ 밸리 뿐만아니라 L, X밸리에도 천이할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 비록  $\Gamma$ 밸리에 많은 전자들이 구속되어 있으나 각 밸리에 모든 전자가 고루 분포될 수 있는 것이다. 이와 같은 효과는 전계가 증가하여 그림 10(b)와 같이 100kV/cm정도가 되면 보다 높은 에너지를 얻을 수 있으므로 더욱 광범위하게 전자가 분포할 수 있게 된다. 그림 10(c)와 같이 500kV/cm의 높은 전계가 인가 되었을때는 각 전자가 높은 에너지를 얻어 전체 브릴로우인 영역에 고루 분포함을 알 수 있다.



(a) F=10kV/cm



(b) F=100kV/cm

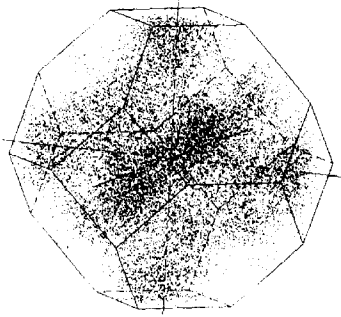
(c)  $F=500\text{kV/cm}$ 

그림 10. 브릴로우인영역내 전자분포

Fig. 10. Electron distributions in Brillouin zone.

#### IV. 결론

본 연구에서는 GaAs의 임팩트이온화현상에 대하여 고찰하기 위하여 full 밴드 Monte Carlo 시뮬레이터를 제작하였다. 임팩트이온화율을 계산하기 위하여 페르미 황금법칙을 사용하였으며 GaAs full 밴드구조를 구하기 위하여 의사포텐셜방법을 이용하였다. 임팩트이온화율을 분석한 결과 문턱에너지근처에서는 이방성특성을 보이나 대부분의 임팩트이온화가 발생하는 3eV이상의 에너지에서는 등방성특성을 가지므로 Keldysh 공식의 지수를 수정한 등방성 임팩트이온화율을 구하여 Monte Carlo 시뮬레이션에 이용하였다. 임팩트이온화가 발생하는 빈도수를 분석한 결과 전계가 증가할수록 빈도수가 증가하며 대부분 3eV 이상에서 임팩트이온화가 발생하는 것을 알 수 있다.

임팩트이온화에 의한 양자생성효율을 Monte Carlo 시뮬레이션에 의하여 구하였다. 비교하기 위하여 Kolnik et al.와 Quade et al.의 이방성 임팩트이온화 모델을 고찰한바 포논산란에 매우 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 비교한 두 모델은 3eV정도에서 최대를 갖는 임팩트이온화율을 사용하였으므로 수정된 Keldysh 공식을 사용한 본 연구의 결과와 이 에너지 근처에서 매우 상이한 결과를 유도하였다.

본 연구에서 유도한 임팩트이온화모델의 타당성을 고찰하기 위하여 임팩트이온화계수를 구하여 실험값과 비교하였다. 또한 양자생성효율에서 비교된 Kolnik 모델의 결과도 함께 비교하였다. 결과적으로 Kolnik 모델의 결과는 전계가 감소할수록 실험값에서 벗어나는 것을 알 수 있으나 본 연구의 모델은 전계에 관계없이

실험값의 범위내에서 일치하는 것을 알 수 있었다. Kolnik 모델에 대해선 보다 많은 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

브릴로우인영역에서 전자의 움직임을 고찰하기 위하여 전계를 변화시키면서 관찰한 결과, 낮은 전계를 인가한 경우 전자들은 전도대의 각 밸리에 구속되어 있으나 전계가 증가할수록 점점 밸리에 구속된 전자들의 에너지가 증가하여 전 브릴로우인 영역내로 전자가 확산되는 것을 알 수 있다.

결론적으로 본 연구에서 제시한 임팩트이온화모델을 이용하면 미세한 GaAs소자에서 발생하는 임팩트이온화현상을 고찰할 수 있다고 사료된다.

#### 참고 문헌

- [1] L.V.Keldysh, Sov. Phys. JETP, Vol. 21, p.1135, 1965.
- [2] Y.Kamakura, H.Mizuno, M.Yamaji, M.Morifuji, K.Taniguchi and C.Hamaguch, J. Appl. Phys., Vol. 75, p.3500, 1994.
- [3] H.K.Jung, K.Taniguchi, C.Hamaguchi, J. Appl. Phys., published.
- [4] J. Kolnik, Y. Wang, I. H. Oguzman and Kevin F. Brennan, J. Appl. Phys., vol. 76, pp.3542-3551, 1994.
- [5] M.V.Fischetti and Steven E. Laux, Physical Review B, Vol. 38, p.9721, 1988.
- [6] J. P. Walter and M. L. Cohen, Phys. Rev. B, vol. 5, pp.3101-3110, 1972
- [7] O. Jepsen and O. K. Anderson, Solid State Comm., vol. 9, pp.1763-1767, 1971.
- [8] T. Kunikiyo, M.Takenaka, Y.Kamakura, M.Yamaji, H.Mizuno, M.Morifuji, K.Taniguchi and C.Hamaguchi, J. Appl. Phys., Vol. 75, p.297, 1994.
- [9] E.Cartier, M.V.Fischetti, E.A.Eklund and F.R.McFeely, Appl. Phys. Lett., Vol 62, p. 3339, 1993.
- [10] W.Quade, E.Scholl and M.Rudan, Solid-State Electron., Vol. 36, p.1493, 1993.
- [11] H.David Law and Charles A. Lee, Solid-State Electron., Vol. 21, p.331, 1978.
- [12] M.Ito, S.Kagawa, T.Kaneda and T.Yamaoka, J. Appl. Phys., Vol. 49, p.4607,

- 1978.
- [13] S.N.Shabde and C.Yeh, J. Appl. Phys., Vol. 41, p.4743, 1970.
- [14] G.E.Bulman, V.M.Robbins, K.F.Brennan, K.Hess and G.E.Stillman, IEEE Electron Device Lett., Vol. EDL-4, p.181, 1983.
- [15] G.E.Stillman, V.M.Robbins and K.Hess, Physica, Vol. 134B, p.241, 1985.
- [16] H.Kressel and G.Kupsky, Int. J. Electron., Vol. 20, p.535, 1966.
- [17] R.Hall and J.H.Leck, Int. J. Electron., Vol. 25, p.529, 1968.
- [18] Y.J.Chang and S.M.Sze, J. Appl. Phys., Vol. 40, p.5392, 1969.

---

 저 자 소 개
 

---



鄭鶴起(正會員)

1961년 2월 20일생. 1983년 2월 아주대학교 전자공학과 졸업(BS). 1985년 2월 연세대학교 대학원 전자공학과 석사과정 졸업(MS). 1990년 8월 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정 졸업(Ph.D). 1994년 7월 ~ 1995년 7월 일본 오사카대학 객원 연구원. 1990년 3월 ~ 현재 군산대학교 전자공학과 부교수. 주관심분야는 반도체소자 모델링 및 시뮬레이션 등임