

실리콘의 L valley를 고려한
강한 전계에서 전자 수송의 특성

이준구 * 박영준 * 한민구
서울대학교 전기공학과 * 서울대학교 전자공학과

Electron Transport Characterization
Including L Valley at High Field

Jun-Koo Rhee, Young-June Park,* and Min-Koo Han
Dept. of Electrical Eng., Seoul National Univ.
*Dept. of Electronics Eng., Seoul National Univ.

Abstract

Monte Carlo simulations of electron impact ionization in silicon utilizing simple spherical band approximation including L valley are presented. The mean energy of electron at high electric field is lowered and the threshold energy of electron impact ionization is smeared out to E_g by including L valley. This work also presents the importance of the modeling of L valley by calculating the electron population rate of it over the threshold energy of electron impact ionization, which is higher than 10%

1. 서론

최근 반도체 소자의 고밀도화에 따라 크기가 감소하고 소자 내부에 강한 전계가 인가되어, Boltzman Transport Equation(BTE)의 0차, 1차 근사에 의한 전자 수송 모델(Drift-Diffusion model)은 소자의 해석에 많은 오차를 수반하게 된다. BTE의 직접적인 해를 구하는 방법중의 하나로 몬테 칼로 시뮬레이션이 널리 이용되고 있다.

전자의 에너지가 큰 영역에서의 실리콘 에너지 밴드가 복잡하여 X valley만을 고려한 전자 수송 모델은 전자의 에너지가 약 1 eV 이상인 영역에서는 실제와 많은 차이가 나타나게 된다. 본 연구에서는 X Valley 보다 1.05 eV 위에 존재하는 L valley를 고려한 몬테 칼로 시뮬레이션을 수행하였다.[1][2]

강한 전계가 인가된 실리콘 소자에서는 Impact Ionization에 의한 소자의 특성의 해석이 중요해진다. Impact Ionization을 일으킬 수 있는 고에너지 영역에서 전자가 L valley에 분포함으로써 에너지 분포함수의 꼬리 부분의 모양에 변화를 주어 Impact Ionization에 영향을

주는 것을 관찰하였다. 이 영역에서는 전자의 L valley 분포가 증가하여 L valley의 모델링이 매우 중요한 것으로 규명되었다.

2. 에너지 밴드 모델

실리콘의 에너지밴드는 fcc 결정의 Brillouin Zone Boundary의 X점에 제1 전도대(그림1)의 X valley가 존재한다. 비교적 약한 전계에서 전자 수송은 대부분이 X valley에 의해서 이루어지지만, 강한 전계가 인가되어 에너지가 L valley의 최소치(1.05 eV)보다 커지는 전자의 분포가 많아짐에 따라 L valley에 의한 전자의 수송이 중요해지게 된다.[1] 전자가 뜨거워짐에 따라 전자에 의한 Impact Ionization이 일어나게 되는데 이론적으로 Impact Ionization이 일어나는 문턱 에너지(E_{th})는 적어도 에너지 밴드갭(300K에서 1.12 eV) 보다는 큰 값을 갖게 된다. 따라서, Impact Ionization의 특성을 규명하기 위해서 L valley를 포함시켜야 한다. 전자의 에너지가 높은 영역에서 full band-structure를 고려한 몬테 칼로 시뮬레이션이 보고되고 있으나,[1][2] 이 영역의 에너지밴드 구조가 복잡하여 정확한 모델링이 힘들고 매우 많은 계산시간을 소모하게 된다. 본 연구에서는 X valley와 L valley을 각각 Spherical Nonparabolic Energyband, Spherical Parabolic Energyband로 모델링을 하였다. X valley와 L valley의 에너지밴드 모델은 다음과 같다.

표 1. 에너지 밴드 파라미터

	X valley	Y valley
α	0.5 eV ⁻¹	*
m^*	0.32 m_0	0.28 m_0
ELX	*	1.05 eV $\frac{E_g(T)}{E_g(300K)}$

X valley

$$E(1+\alpha E) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*_x}$$

L valley

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*_L} + EL_x$$

- 단, E : 에너지
- k : 파장 벡터
- EL_x : X valley에 대한 L valley의 valley minima의 차
- α : 제 1 전도대의 nonparabolicity constant
- m*_x : X valley의 전자 유효 질량
- m*_L : L valley의 전자 유효 질량
- ħ : 플랑크 상수

본 연구에서 사용된 각 파라미터의 값은 표 1에 나타내었다. X valley와 L valley의 최소에너지의 차(X_{minima}와 L_{minima}의 차) EL_x의 온도에 따른 효과는 표 1에 나타난 것과 같이 에너지밴드갭의 변화에 비례하게 주어졌다.

3. 전자 산란 모델

전자 산란은 전자수송의 모델링에서 가장 중요한 요인

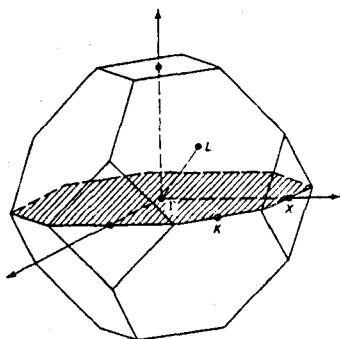


그림 1. (a)

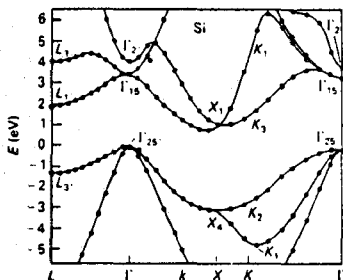


그림 1. (b)

그림 1. (a) fcc 격자의 Brillouin zone (b) 실리콘의 에너지밴드

이다. 본 연구의 몬테 칼로 시뮬레이션에서는 보편적으로 알려진 포논산란과[3] Woods의 충격이온화산란을[4] 고려하여 전자수송 특성을 모델링하였다. Phonon scattering은 acoustic phonon과 두개의 optical phonon을 고려하였다. X valley와 L valley를 고려한 phonon scattering은 X에서 X으로, X에서 L로, L에서 L로, L에서 L로의 scattering이 가능한데, 본 연구에서는 구형 에너지 밴드들의 Density-of-state와 포논결합상수들에 비례하는 비율로 intervalley 또는 intravalley의 scattering rate를 결정하였다. 일반적으로 유동속도-전계 특성과 충격이온화율-전계 특성을 만족시키는 포논산란 파라미터세트는 여러가지가 존재하는 것으로 알려져 있는데,[1][2] 본 연구에서 사용한 포논산란 파라미터세트는 표 2에 제시된 바와 같다.

충격이온화산란에 사용된 Woods의 soft threshold energy 모델은 다음과 같다.[4]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{N e^4}{8\pi \epsilon^2 E_{th} (2m^*E)^{1/2}} \left(\frac{E}{E_{th}} - 1 \right)$$

- 단, E 전자 에너지
- E_{th} 충격이온화 문턱에너지
- N 충격이온화의 표적원자 밀도
- ε 유전율
- m* 전자의 유효질량

충격 이온화산란에 사용되는 파라미터는 포논산란의 메카니즘에 따라 큰 변화가 나타난다.

표 2. 포논 산란 파라미터

	X valley	Y valley
acoustic-phonon deformation potential	7.5 eV	7.0 eV
deformation potential constant for optical-phonon	190K 1.9x10 ⁸ eV/cm	4.0x10 ⁸ eV/cm
	700K 1.4x10 ⁸ eV/cm	1.7x10 ⁸ eV/cm

4. 결과

표 2에 제시된 포논산란 파라미터에 의한 총 산란율을 그림 2에 나타내었다. 그림 3에서는 인가전계에 대한 전자의 유동속도를 나타내고 있다. 에너지밴드 모델에 L valley를고려함으로써 1eV 이상의 고에너지 영역에서 산란율이 급격히 증가하여 에너지 본포함수의 꼬리의 본포를 줄여주고 평균에너지와 충격 이온화산란의 문턱 에너지를 감소시켜 주게 된다.

그림 4에서는 인가전계에 대한 전자의 평균에너지를 L valley를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 비교하였다.[] 그림 3 과 그림 4 에서 보는 바와 같이 L valley를 고려하여 줌으로써 강한 전계가 인가된 경우 전자의 에너지가 비교적 완만하게 증가함을 볼 수 있다. 그

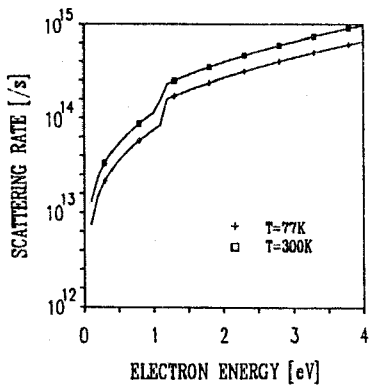


그림 2. 포논에 의한 총산란률

림 5 는 인가전계에 대한 impact ionization rate의 몬테 칼로 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있다. 본 연구에서는 $E_{th}=E_g$, $N=5 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 를 사용하였는데, 참고문헌[5]에 제시된 문턱에너지 1.7 eV 에 비하여 작은 값을 취하고 있다.

그림 6 는 인가전계에 따라 E_{th} 이상의 에너지를 갖는 전자의 L valley의 분포율을 나타내었다. 인가전계가 커짐에 따라 뜨거운 전자들에 의한 충격이온화가 나타나고 SiO_2 장벽을 넘는 전자들이 생기게 된다. 전자들의 충격이온화의 문턱에너지는 에너지밴드갭보다 크고, SiO_2 장벽을 넘는 전자의 문턱에너지가 약 3.2 eV 이므로, 높은 에너지

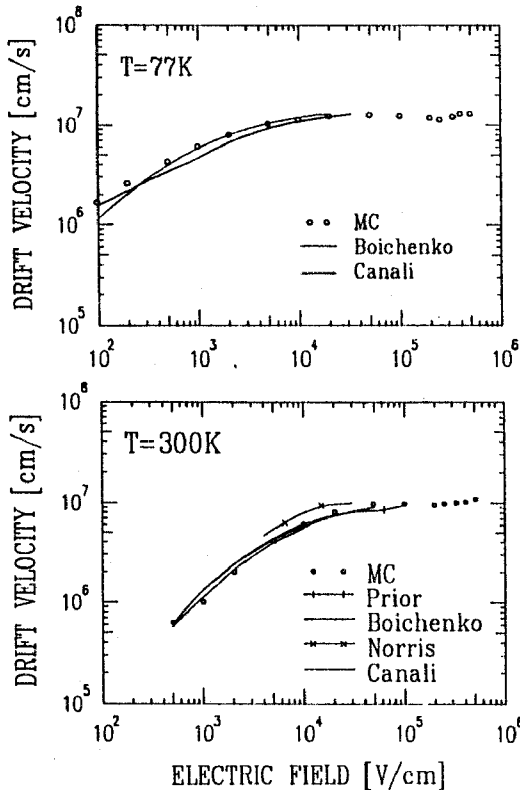


그림 3. 77 K 와 300 K 에서 인가전계에 대한 전자의 유동 속도

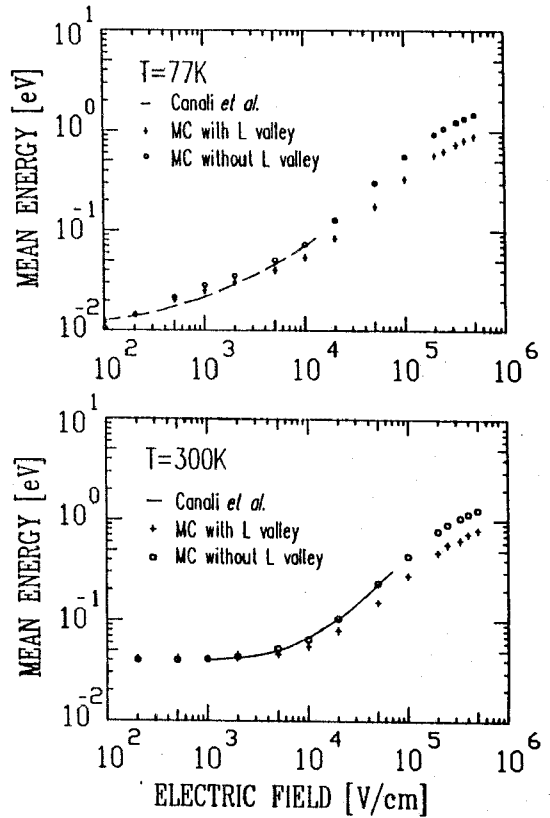


그림 4. 77 K 와 300 K 에서 인가전계에 대한 전자의 평균 에너지

의 분포에 대한 L valley의 영향이 중요함을 알 수 있다. 앞에서 언급된 바와 같이 포논산란에 따라 에너지분포의 모양이 변하게 되는데 L valley의 포논 결합상수는 주로 에너지분포의 꼬리부분의 모양에 영향을 주게 된다. 따

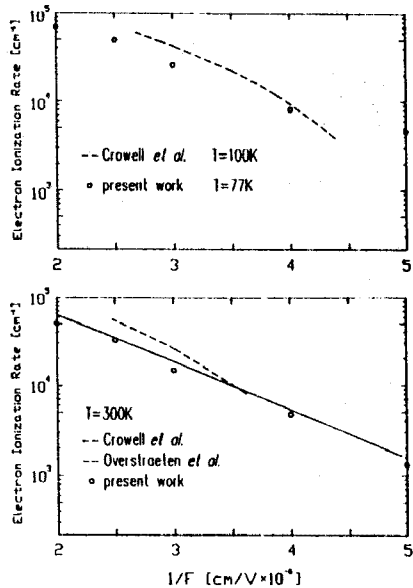


그림 5. 77 K 와 300 K 에서 인가전계에 대한 전자의 충격이온화율

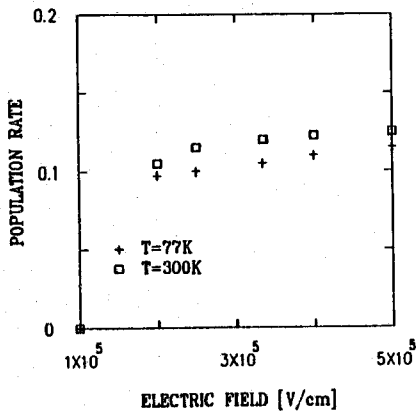


그림 6. 인가전계에 따른 충격이온화 문턱에너지 이상의 에너지를 갖는 전자의 L valley 점유율

라서 정확한 에너지분포를 알기 위해서는 MOSFET에서 SiO₂ 장벽을 넘는 전자에 의한 게이트전류를 모델링하여 실험과 비교하며 포논산란모델 - 특히 L valley의 포논산란모델을 결정하여야 한다.

5. 결 론

실리콘에 1×10⁵ V/cm 이상의 강한 전계가 인가된 경우 전자의 평균에너지는 매우 증가하여 L valley의 minima 보다 큰 에너지를 갖는 전자들의 분포가 증가하게 되어 L valley 의 모델링이 중요한 역할을 하게 된다. 본 연구에서 구형 밴드 근사화된 X valley와 L valley를 고려한 몬테 칼로 시뮬레이션을 이용하여 충격이온화율을 모델링하였다.

표 2 에 제시된 포논산란 파라미터를 사용하여 E_{th} = E_g 가 되는 전자에너지분포를 얻을 수 있었다. 이는 full band structure를 이용한 몬테 칼로 시뮬레이션에서 [1][2] 구하여진 E_{th}와 일치하는 결과를 보이고 있다. 전자의 에너지가 충격이온화 문턱에너지보다 큰 영역에서 10 % 이상의 전자가 L valley 분포하는 것을 관찰 할 수 있었다.

전자의 충격이온화와 실리콘으로부터 SiO₂ 로의 전자의 방출율의 모델링으로 전자의 에너지분포가 결정되는 것으로 보고되어 있다. 본 연구에 이어 전자의 SiO₂ 로의 방출 확률을 모델링하여 더욱 정확한 전자의 에너지분포를 알아 낼 수 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

[1] J. Y. Tang and K. Hess, "Impact Ionization of Electrons in Silicon (steady state)," *Journ. of Appl. Phys.*, vol.54, No.9, p.5139, 1983.

[2] M. V. Fischetti and S. E. Laux, "Monte Carlo analysis of electron transport in small semiconductor devices including band-structure and space-charge effects," *Phys. Rev.*, vol.38, No.14, p.9721, 1988

[3] C. Jacoboni and L. Reggiani, "The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials," *Rev. of Modern Phys.*, Vol. 55, No. 3, p.645, 1983

[4] R. C. Woods " "Soft" Energy Thresholds in Impact Ionization: A Classical Model," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.ED-34, p.1116, 1987.

[5] 이준구, 박영준, 한민구, "몬테 칼로 방법을 이용한 실리콘 MOSFET의 드레인영역에서 77K와 300K의 Impact Ionization 특성," 대한전기학회 추계종합 학술대회 논문집, p131, 1989