

Non-local impact ionization 현상해석을 위한 local model 개발

염기수

대전산업대학교 신소재공학부

Implementation of local model for non-local impact ionization

Keesoo Yeom

Division of Advanced Material, Taejeon National University of Technology

E-mail : ksyem@hyunam.tnut.ac.kr

요 약

Non-local impact ionization 현상의 해석에 사용될 수 있는 새로운 local model이 제시되었다. 새로운 모델은 임의의 점에서 가상의 선형 전기장과 path integral로 계산되는 유효전기장의 값을 이용한다. 이 모델은 불순물 농도, 전자 및 홀 농도, 전기장의 기울기 등의 local 변수만을 이용함으로써 기존의 drift-diffusion 소자 시뮬레이터에 쉽게 적용될 수 있다. 결과를 Monte Carlo 시뮬레이션과 비교하여 새로운 모델이 non-local 현상을 잘 설명하는 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

A new local model for impact ionization coefficients is proposed to account for a non-local effect. New model uses an effective electric field which comes from the path integral of a tangent electric field at an arbitrary point. The model consists of local variables, such as doping concentration, carrier concentration and gradient of the field, and can be easily applied to a conventional drift-diffusion device simulator. By comparing the results with Monte Carlo simulation, it is confirmed that new model explains the non-local effect fairly well.

1. 서 론

MOSFET 공정 기술이 발전함에 따라 고집적과 고속의 동작이 요구되어 deep sub-micron의 소자 제작이 가능하게 되었다. CMOS의 경우 0.18 μm 기술이 가능함에 따라 디지털 분야에서는 1 GDRAM 개발이 가능하게 되었고 특히 통신분야의 경우 RF 대역에서 동작하는 CMOS 기술이 집중적으로 연구되고 있다. CMOS RF 소자의 경우 화합물 반도체 소자에 비해 공정이 쉽고 제작비가 저렴하여 많은 관심을 끌고 있다. 이러한 deep sub-micron 소자에서는 작은 gate length, 얇은 gate 산화막, 그리고 높은 불순물 농도가 필수적이며 이에 따라 소자 내부의 전기장의 세기가 높아져서 이전의 소자보다 hot carrier 효과, non-local 현상 등의 물리적 현상들이 심각해진다 [1]. 실리콘의 경우 짧은 momentum relaxation time 때문에 non-local velocity의 문제는 크지 않

으나 energy relaxation time은 상대적으로 크기 때문에 에너지 의존적인 impact ionization의 경우 non-local 현상을 고려하지 않으면 소자 특성 해석이 어렵다. Deep sub-micron 소자의 drain 부근에는 좁고 큰 전계가 형성되는데 전자와 홀의 평균 에너지가 전계의 변화를 따라가지 못함에 따라 non-local impact ionization 현상이 발생한다.

이제까지 측정된 impact ionization 특성은 균일하고 일정한 전기장이 걸려있는 경우에 한정되어 있으며 많은 측정을 통해 잘 알려져있다 [2]-[6]. 그러나 실제 소자에서의 전기장은 일정하지 않으며 위에서 설명한 바와 같이 deep sub-micron 소자에서는 특히 변화가 심하다.

Impact ionization 현상의 해석에는 주로 (i) drift-diffusion 모델 (ii) energy transport 모델 (iii) Monte Carlo 방법 (iv) simplified energy transport 모델 등이 사용되고 있으나 실제적인

적용이 쉽지 않다. Drift-diffusion 모델은 계산은 빠르나 non-local 현상의 재현이 불가능하고 energy transport 모델 [7]-[9]이나 Monte Carlo 방법 [10]-[12]의 경우는 많은 계산시간을 요구하기 때문에 실제 소자에 적용하기가 쉽지 않다. Energy transport 모델을 일차원적으로 근사화시킨 simplified energy transport 모델의 경우 상대적으로 간단한 모델과 짧은 계산시간이 장점이다. 이 모델은 식 (1)로 표현되는 일차원적 energy transport 모델을 바탕으로 한 것이며 식 (2)와 같이 표현된다 [13], [14].

$$\frac{dT}{dx} + \frac{T - T_0}{\lambda_\epsilon} + \frac{2}{5} \frac{q}{k_B} E(x) = 0 \quad (1)$$

$$T(x) = T_0 + \frac{2}{5} \frac{q}{k_B} \int_0^x E(s) \exp\left(-\frac{s-x}{\lambda_\epsilon}\right) ds \quad (2)$$

여기서 T는 전자온도, T₀는 열적평형상태에서의 전자온도, E는 전기장을 나타낸다. Impact ionization 계수는 전기장의 함수가 아닌 전자온도의 함수로 표현되어 non-local 현상을 재현할 수 있다.

$$\alpha_{eff} = \alpha(T(x)) \quad (3)$$

그러나 simplified energy transport 모델은 근본적으로 non-local 모델이기 때문에 전류의 흐름을 구하고 post-process에 의해 전자온도를 다시 계산해야만 할 뿐만 아니라 self-consistent한 계산이 불가능하여 상업용 소자 시뮬레이션 툴에서 채용되지 않고 있다. 본 논문에서는 기존의 drift-diffusion 모델에 쉽게 적용할 수 있으며 non-local impact ionization 현상의 재현이 가능한 모델을 제시하고자 한다.

II. 모델

서론에서 설명한 바와 같이 simplified energy transport 모델은 그 간명함에도 불구하고 실제 시뮬레이션 툴에서 사용되지 못하는 이유는 non-local 모델이기 때문이다. 이 논문에서는 간단한 가정을 통해 local 모델로 만드는 방법을 제시하고자 한다.

기존의 drift-diffusion 모델은 전기장의 함수로 표현되는 local 모델이다. 따라서 식 (2)를 유효전기장을 구하는 식 (4)로 대체하기로 한다.

$$E_{eff} = \frac{1}{\lambda_\epsilon} \int_0^r E(s) \exp\left(-\frac{r-s}{\lambda_\epsilon}\right) ds \quad (4)$$

여기서 E(s)는 소자 내부의 실제 전기장의 값이며 λ_ε은 impact ionization에서의 scattering length의 의미를 갖는다. 식 (4)를 이용하게 되면

한 점에서의 유효 전기장은 전류가 흐르는 모든 점에 대한 path integral로 표시되어 non-local 모델이 된다. 이를 피하기 위하여 그 점에서의 접선으로 표시되는 선형 전기장에 의하여 impact ionization 특성이 결정된다고 가정하며 이를 그림 1에 나타내었다.

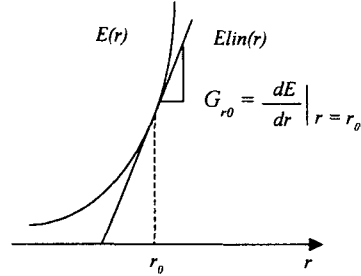


그림 1. 실제 전기장과 local 모델을 위한 선형 전기장의 개념도.

임의의 점 r₀에서의 impact ionization 계수를 구하는 경우, 전자는 실제의 전기장 E(r)에 의하여 가속된다. 그러나 전기장의 크기가 크면 클수록, 그리고 전기장의 폭이 좁으면 좁을수록 E(r)은 선형으로 표시한 E_{lin}(r)에 가깝게 된다. 따라서

$$E(r) \sim E_{lin}(r) \quad (5)$$

$$= G_{r_0} \cdot r,$$

그리고

$$G_{r_0} = |\nabla_{r=r_0} E| \quad (6)$$

$$= \frac{q}{\epsilon} [p(r_0) - n(r_0) + N_d(r_0) - N_a(r_0)]$$

와 같이 나타낼 수 있다. 이러한 선형 전기장의 값을 사용한다면 식 (4)의 유효 전기장은 아래와 같은 local 변수로 표시된다.

$$E_{eff} = E(r_0) - G_{r_0} \lambda_\epsilon \left[1 - \exp\left(-\frac{E(r_0)}{G_{r_0} \lambda_\epsilon}\right) \right] \quad (7)$$

위에서 구한 유효 전기장과 실제 전기장과의 비를 locality γ로 정의한다면 임의의 점 r₀에서의 locality는 다음과 같다.

$$\gamma(r_0) = \frac{E_{eff}}{E(r_0)} \quad (8)$$

$$= 1 - \frac{G_{r_0}}{E(r_0)} \left[1 - \exp\left(-\frac{E(r_0)}{G_{r_0} \lambda_\epsilon}\right) \right]$$

$$= 1 - \frac{1 - \exp(-\xi)}{\xi}$$

γ 가 1이 된다면, 유효 전기장과 실제 전기장의 값이 같은 경우이며 전자가 전기장으로부터 충분히 heating된 경우로 전기장의 폭이 큰 경우 (또는 전기장의 기울기 G_{r0} 가 아주 작은 경우)이다. 반대로 γ 가 0이라면 전기장의 폭이 좁고 기울기가 커서 전자가 충분히 heating되지 못한 경우이며 non-local impact ionization 현상이 큰 경우이다.

임의의 점에서 전기장, 전기장의 기울기, λ_ϵ 의 변화에 따른 γ 의 변화를 그림 2에 나타내었다.

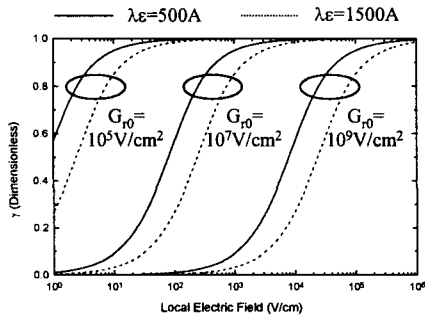


그림 2. 전기장, 전기장의 기울기(G_{r0}), λ_ϵ 에 따른 locality(γ)의 변화.

그림에서 보는 바와 같이, scattering length가 길수록, 전기장의 기울기가 클수록 γ 가 작아지는 것을 볼 수 있으며 non-local 현상이 커짐을 보여 준다. 따라서 impact ionization 계수를 계산함에 있어 실제 전기장의 값 대신 유효 전기장의 값을 사용한다면 non-local impact ionization 현상을 재현할 수 있게된다. 이 모델에서의 impact ionization 계수는 유효 전기장의 함수로 표현되며 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_{eff}(r_0) &= \alpha(E_{eff}) \\ &= \alpha(\gamma(r_0) \cdot E(r_0)) \end{aligned} \quad (9)$$

III. 시뮬레이션 및 검증

새로운 impact ionization 모델은 하나의 fitting parameter, λ_ϵ 를 가지며 이 값을 얻기위해 Monte Carlo simulation을 수행하였다. 6개의 non-parabolic valley를 갖는 bandstructure를 사용하였으며 [15] impact ionization에 대해서는 soft threshold를 재현하는 Thoma 모델이 사용되었다 [16]. Monte Carlo 계산과의 비교를 통하여 λ_ϵ 가 300Å일 때 Monte Carlo 결과와 가장 잘 일치함을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 local impact ionization 모델의 검증에 위해 노이즈 측정을 이용한 실험결과를 이용하였다 [17]. 이 실험에서는 높은 불순

물 농도가 사용된 pn 다이오드를 사용함으로써 non-local impact ionization 현상이 크게 나타난다. 측정에는 상업용 다이오드인 IN746 ~ IN752가 사용되었는데 본 논문에서는 IN751과 IN752 두 개의 측정결과가 이용되었으며 소자 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 측정 다이오드의 소자 파라미터

	IN751	IN752	Unit
Doping density (p)	9	9	10^{18} cm^{-3}
Doping density (n)	2.02	1.75	10^{18} cm^{-3}
Built-in potential	1.04	1.0	V
Peak electric field	1.24	1.17	MV/cm
Junction width	500	526	Å

표에서 보는 바와 같이 측정에 사용된 다이오드는 높은 불순물 농도와 높은 전기장 때문에 non-local impact ionization 현상이 크게 나타나게 된다. 위 두 소자에 대한 전류 증폭도를 본 논문에서 제안한 새로운 impact ionization 모델을 이용하여 계산한 결과를 노이즈 측정, local 전기장을 이용하는 기존의 drift-diffusion 모델과 비교하였으며 그림 3에 나타내었다.

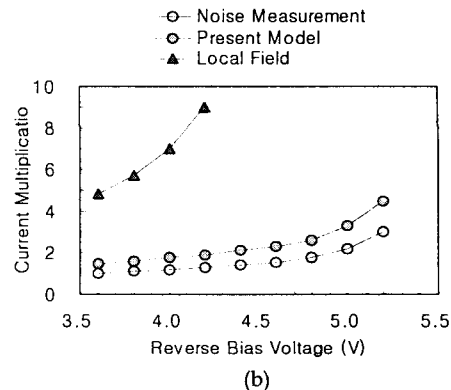
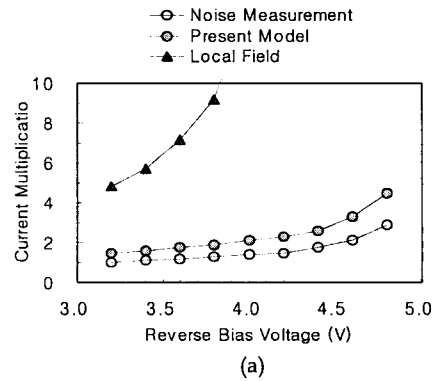


그림 3. 다이오드 (a) IN751과 (b) IN752에서의 전류증폭도와 전압과의 관계.

그림에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제안한 새로운 impact ionization 모델이 local 전기장만을 사용한 drift-diffusion 모델보다 실제 측정값과 잘 일치함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 drift-diffusion 모델을 이용한 소자 시뮬레이션 틀에 쉽게 적용할 수 있으며 non-local impact ionization 현상을 재현할 수 있는 impact ionization 모델을 제안하였다. 새로운 모델은 임의의 점에서 impact ionization 계수를 실제 전기장의 함수가 아닌 유효 전기장의 함수로 표현하였으며 불순물 농도, 전자 및 홀 농도, 전기장의 기울기 등 local 변수만을 사용하기 때문에 계산이 쉽고 기존의 소자 시뮬레이션 틀에 적용이 간단한 장점이 있다. Monte Carlo 계산을 통해 scattering length, λ_{ϵ} 를 구하였으며 300Å일 때 Monte Carlo 결과와 가장 잘 일치함을 확인하였다. 모델의 결과를 측정값과 비교한 결과 측정값과 잘 일치하며 non-local impact ionization 현상을 재현할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] N. G. Einspruch and G. Gildenblat, *Advanced MOS Device Physics, VLSI Electronics Microstructure Science, Volume 18*, Academic Press, 1989.
- [2] C. A. Lee, R. A. Logan, R. L. Bartdorf, J. J. Kleimack, and W. Wiegmann, "Ionization rates of holes and electrons in silicon," *Phys. Rev.*, vol. 134, pp. A761-A773, 1964.
- [3] R. Van Overstraeten and H. De Man, "Measurement of the ionization rates in diffused silicon p-n junctions," *Solid-State Electron.*, vol. 13, pp. 583-608, 1970.
- [4] W. Shckley, "Problems related to p-n junctions in silicon," *Solid-State Electron.*, vol. 2, pp. 35-67, 1961.
- [5] G. A. Baraff, "Distribution functions and ionization rates for hot electrons in semiconductors," *Physical Review*, vol. 128, pp. 2507-2517, 1962.
- [6] R. Chwang, C. Kao, and C. R. Crowell, "Normalized theory of impact ionization and velocity saturation in nonpolar semiconductors via Markov chain approach," *Solid-State Electron.*, vol. 22, pp. 599-620, 1979.
- [7] K. R. Hofmann, C. Werner, W. Weber, and G. Dorda, "Hot-electron and hole emission effects in short n-channel MOSFET's," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-32, pp. 691-699, 1985.
- [8] B. Meinerzhagen and W. L. Engl, "The influence of the thermal equilibrium approximation on the accuracy of classical two dimensional numerical modeling of silicon submicrometer MOS transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-35, pp. 689-697, 1988.
- [9] N. Goldsman and J. Frey, "Efficient and accurate use of the energy transport method in device simulation," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-35, pp. 1524-1529, 1988.
- [10] J. M. Higman, K. Hess, C. G. Hwang, and R. W. Dutton, "Coupled Monte Carlo-drift diffusion analysis of hot-electron effects in MOSFET's," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-36, pp. 930-937, 1989.
- [11] K. Tomizawa and N. Hashizume, "Ensemble Monte Carlo simulation of an AlGaAs/GaAs heterostructure MIS-like FET," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-35, pp. 849-856, 1988.
- [12] K. Kato, "Hot-carrier simulation for MOSFET's using a high speed Monte Carlo method," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-35, pp. 1344-1350, 1988.
- [13] E. F. Crabbe, J. M. C. Stork, G. Baccarani, M. V. Fishetti, and S. E. Laux, "The impact of non-equilibrium transport on breakdown and transit time in bipolar transistor," *IEEE IEDM Tech. Dig.*, pp. 463-466, 1990.
- [14] J. W. Slotboom, G. Streutker, J. J. v. Dort, P. H. Woerlee, A. Pruijboom, and D. J. Gravesteijn, "Non-local impact ionization in silicon devices," *IEEE IEDM Tech. Dig.*, pp. 127-130, 1991.
- [15] Keesoo Yeom, *Transport, Impact Ionization, and Noise Studies in Si, Ge, and SiGe Alloys*, thesis, The University of Michigan, 1996.
- [16] R. Thoma, H. J. Peifer, W. L. Engl, W. Quade, R. Brunetti, and C. Jacoboni, *J. Appl. Phys.* vol. 69, 789, 1991.
- [17] W. A. Lukaszek, A. V. Ziel, and E. R. Chenette, *Solid-State Electron.*, vol. 19, 57, 1976.