

민 병 혁, 한 민 구
 서울대학교 전기공학부

Analysis of Hot Electrons in nMOSFET by Monte Carlo Simulation

Byung Hyuk Min , Min Koo Han
 Department of Electrical Engineering, Seoul National University

A B S T R A C T

We reported that hot electron phenomena in submicron nMOSFET by Monte Carlo method. In order to predict the influence of the hot electron effects on the device reliability, either simple analytical model or a complete two dimensional numerical simulation has been adopted. Results of numerical simulation, based on the static mobility model, may be inaccurate when gate length of MOSFET is scaled down to less than $1\mu\text{m}$. Most of device simulation packages utilize the static mobility model. Monte Carlo method based on stochastic analysis of carrier movement may be a powerful tool to characterize hot electrons.

In this work, energy and velocity distribution of carriers were obtained to predict the relative degree of short channel effects for different device parameters. Our analysis shows a few interesting results when V_{DS} is 5 volt, average electron energy does not increase with gate bias as evidenced by substrate current.

I. 서 론

실리콘 MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)은 메모리동 VLSI 회로의 핵심 소자로서 채널의 길이가 $1\mu\text{m}$ 만으로 줄어들고 있다. 채널의 길이가 감소되고 oxide 두께가 감소되면서 채널에 인가되는 전계의 세기가 10^5 v/cm 를 초과되고 있다. 인가되는 전계의 세기에 따라서 전자 및 정공의 에너지가 증가되어 hot carrier가 발생되며 소우스와 드레인 사이에서 전자 이동뿐 아니라 게이트로 캐리어

가 주입되고 또한 기판 전류도 형성되어 항복 전압이 감소되고 주입된 전하로 인하여 oxide layer trap이 증가되어서 소자의 신뢰도 및 수명에 치명적인 영향을 미치고 있다.^{1),2)}

Hot carrier 현상을 정확하게 규명하기 위해서는 간단한 해석적 방법보다는 컴퓨터를 이용한 수치 해석으로 접근을 하여야 하는데 현재 일반적으로 반도체 소자의 해석에 널리 쓰이는 유한 차동법은 전류 및 전압 관계에 대한 캐리어의 diffusion 및 drift에 대한 식으로 해석되고 있으나 hot carrier는 이 방식식만으로는 해석이 어렵기 때문에 통계학적 해석 방법인 Monte-Carlo의 사용이 고려되고 있다.³⁾

Monte-Carlo 방법의 장점은 사용이 용이하고 전하의 운동을 직접 해석할 수 있으며 1968년에 Rees⁴⁾에 의해 self-scattering 개념이 도입되어 Monte-Carlo 방법의 최대 난점인 장시간의 컴퓨터 사용 시간을 대폭 감소시킬 수 있었을 뿐 아니라 현재 널리 쓰이는 유한 차동법에서 얻을 수 없는 전하의 velocity overshoot 현상을 규명할 수 있다.

따라서 $\text{Si}^5)$, $\text{GaAs}^6)$ 와 같은 반도체내에서 전계와 온도에 따른 전자 이동도의 변화를 정확히 예측하는데 Monte-Carlo 방법이 도입되었고 반도체내의 비정상적인 캐리어 운동을 이해하는데 적용되어져 왔다. 그러나 현재까지 Monte-Carlo 방법을 응용하여 매우 불균일한 전위 분포와 캐리어 농도를 가진 short channel MOSFET에 관한 보고가 거의 없다.

본 연구에서는 채널 길이가 $1\mu\text{m}$ 이하인 실리콘

nMOSFET 소자의 주요 전류원인 전자의 운동 현상을 정량적으로 분석하고자 한다.

II. 본 론

1. 이 론

Monte-Carlo방법을 반도체의 기본 방정식인 Boltzman transport equation의 해를 얻기 위한 one-particle simulation이다. particle의 상태는 위치 X, momentum K, 그리고 시간 t에 의해 결정된다. 따라서 particle의 X와 K의 값을 알면 구하고자 하는 각 위치에서의 속도나 에너지를 계산할 수 있다.

우선 particle의 초기 상태를 \bar{X}_i 와 \bar{K}_i 라고 가정 하자.

충돌하기 전까지의 시간을 t_{coll} 이라 하면 particle의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{K}_f = \bar{K}_i + \frac{1}{\hbar} \bar{F} t_{coll} \quad (1)$$

$$\bar{X}_f = \bar{X}_i + \bar{V} t_{coll} \quad (2)$$

여기서 V는 energy band에 따라 정해지는 속도이며 F는 외부에서 가해지는 전압이나 내부의 불 균일 성으로 인해 내부에서 발생하는 힘이다.

식(1)은 momentum space에서의 particle의 운동을 기술한 것이며 식(2)는 real space에서의 particle의 위치를 결정한다.

결국, (1), (2)식의 해를 얻기 위해 필요한 free-flight time(t_{coll})과 scattering후의 초기 상태 K_i 를 구하기 위하여 Monte-Carlo 방법을 이용하게 된다. 이를 설명하기 위하여 필요한 transition rate를 고려한다.

K상태에 있는 캐리어가 가능한 모든 상태로 전이 할 확률 $\lambda(K)$ 는

$$\lambda(K) = \sum S_{kk'} \quad (3)$$

$S_{kk'}$ = transition rate

따라서 임의의 캐리어가 t시간 후에 충돌할 확률 P(t),

$$P(t) = \lambda [K(t)] e^{-\int_0^t \lambda [K(t')] dt'} \quad (4)$$

여기서 컴퓨터로 부터 random number를 발생시켜 다음에 기술하는 확률 밀도 함수를 만족시키는 random time을 정한다.

$$r = \int_0^t P(t') dt' \quad (5)$$

그러나 위 식으로부터 시간 t를 해석적으로 구하기는 거의 불가능하므로 particle의 전체 scattering이 캐리어의 상태에 관계없이 일정하게 유지되도록 가상적인 scattering process (self-scattering)를 도입 한다.

결국, free-flight time, t_{coll} 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_{coll} = -\frac{1}{P} \ln(1-r) \quad (6)$$

P : total scattering rate
r : random number

일단 t_{coll} 이 정해지면 scattering이 일어난 후 particle의 최종 상태를 결정한다. 각각의 scattering center 로 인해 일어나는 transition rate는 식(3)에서 구해지므로 scattering center가 결정되면 scattering 후의 상태의 값을 얻을 수 있게 된다 만약 self-scattering일 경우에는 캐리어의 상태는 변하지 않고 식(6)에 의해 다른 free flight time 이 계산 된다.

2. MOSFET simulation 과정

1) potential solution

simulation 영역내에서 각 mesh point의 lateral field와 transverse field를 구하기 위하여 F.D.M.을 이용한 package program MINIMOS 을 사용하였다.⁷⁾

2) charge assignment

각 점에서 simulation을 할 particle의 갯수를 정하기 위하여 charge assignment를 한다. 이는 particle 를 임의의 값으로 나누어 준 것이다. 즉, particle 은 electron cloud라 할 수 있다.

3) particle pushing

각각의 particle에 초기 속도와 momentum 값을 정한 후 주어진 mesh 영역에서 time step이 끝날 때 까지 scattering 과정을 거치면서 전기장에 의해 드리프트로 진행하게 된다.

이때 time step은 dielectric relaxation time 보다 작아야 하며 보통 0.1p second 이하의 값이 지정된다.

4) free-flight time 계산

캐리어의 free-flight time은 식(6)에 의해 구해지며 particle의 최종 상태는 식(1),(2)에 의해 계산된다.

5) scattering mechanism 선택

scattering rate를 계산하기 위하여 소자내에서 고려되어야 할 scattering center를 선택한다. 보통 Si의 경우 acoustic과 optical phonon이 중요한 scattering center가 된다.

III. simulation 결과 및 검토

MOSFET 소자 특성에 주요 인자로 작용하는 채널 길이, oxide 두께 및 게이트와 드레인 전압에 대한 전자의 lateral velocity, transverse velocity 전자의 에너지 분포를 계산함으로써 각 parameter간의 변화에 따른 영향을 비교, 분석하였다.

a. 게이트 전압을 2.5-6V로 변화시키면서 전자의 속도와 에너지 분포를 계산한 결과 게이트 전압의 증가에 따라 전자의 평균 에너지가 증가하지 않음을 볼 수 있었다 (Fig.2) 그 원인은 MOSFET내의 채널 electric field가 V_{ds} 와 drain saturation 전압(V_{sat})의 차에 비례한다는 원리로 설명할 수 있다.⁸⁾ 즉, V_{gs} 가 V_{ds} 보다 작을 경우, V_{sat} 도 작은 값을 가지므로 드레인 근처에서의 채널 electric field가 매우 증가하여 전자의 에너지는 크게 나타난다. 그러나 이 때의 oxide electric field의 방향은 게이트 전극과 반대 방향이므로 게이트로 주입되는 전류가 작은 반면 V_{gs} 가 V_{ds} 보다 클 경우에는 V_{sat} 로 증가하여 channel electric field가 감소하므로 전자의 에너지도 감소

하는 현상을 나타낸다.

b. V_{ds} 가 5 volt일 경우 최대 평균 에너지가 약 1.7eV로 나타난 결과로부터 Si과 SiO_2 가 전위 장벽이 약 3.2eV임을 볼 때 모든 전자가 게이트 전류로 작용하는 것이 아니라 소수의 전자만이 oxide 장벽을 넘는다는 것을 알 수 있었다.

c. nMOSFET에서 채널 길이가 0.6-1.2um인 범위에서 채널 길이의 변화에 따른 영향 분석.(Fig.3)

d. oxide 두께가 150Å가 250Å인 소자에 대한 비교

e. 드레인 전압 2.5-6V인 범위에서 소자의 변화

채널 길이와 oxide 두께가 감소할수록 전자의 속도와 에너지가 증가한 반면에 드레인 전압이 증가할수록 속도와 에너지가 증가하는 결과를 얻을 수 있었으며 이 결과에 따라 short channel effect도 영향을 받는다는 것과 드레인 부근에서의 overshoot 현상도 관찰할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 submicron MOSFET 소자에 통계학적 해석 방법인 Monte Carlo simulation을 통하여 게이트 전압이 드레인 전압의 1/2일 경우에 전자의 에너지가 최고값을 나타냄을 보임으로써 기판 전류와 게이트 전압과의 상관 관계를 해석하였으며 기존의 반도체 소자 해석에서 얻을 수 없는 velocity overshoot 현상을 확립하였다.

V. 참 고 문 헌

1. Baaz Eitan and Dov Frohman-Bentch kowsky, "Hot-Electron Injection into the Oxide in n-channel MOS Devices, IEEE Trans. on ED, Vol. ED-28, No.3, pp.328-340, 1981.
2. Chenming Hu, Fu-Chieh Hsu, Ping-Keung Ko, Tung-Yichan, Kylew, "Hot-Electron-Induced MOSFET Degradation-Model, Monitor, and Improvement," IEEE Trans. ED. Vol. ED-32, No.2, pp.375-385, 1985.
3. C. Mogleste, "Self-Consistent Monte Carlo Particle Model to Analyze Semiconductor Micro-components of any Geometry", IEEE Trans. on CAD. Vol. No.2, 1986.
4. H.D. Rees, "Calculation of Steady State Distribution Functions by Exploiting Stability." Phys. Lett., Vol.26A, pp.416-417, 1968.
5. C. Canali, C. Jacoboni, F. Nava, G. Ottaviani, and A.A. Quaranta, "Electron Drift Velocity in Silicon," Phys. Rev., Vol.12, No.4, pp.2265-

2284, 1975.

6. W. Fawcett, A.D. Boadman, and S. Swain, "Monte Carlo Determination of Electron Transport Properties in Gallium Arsenide," J. Phys. Chem. Solids, Vol.31, pp.1963-1990, 1970.
7. S. Selberherr, A. Schutz, and H.W. Potzl, "MINIMOS-A Two-Dimensional MOS Transistor Analyzer." IEEE Trans. ED. Vol. ED-27, No.8, pp. 1540-1550, 1980.
8. Simon Tam Ping-Keung Ko, Cheuming Hu, "Lucky-Electron Model of Channel Hot-Electron Injection in MOSFET's" IEEE Trans. ED., Vol. ED-31, No.9, pp.1116-1125, 1984.

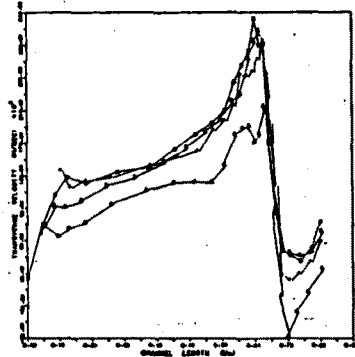


Fig.2-2 Transverse velocity distribution

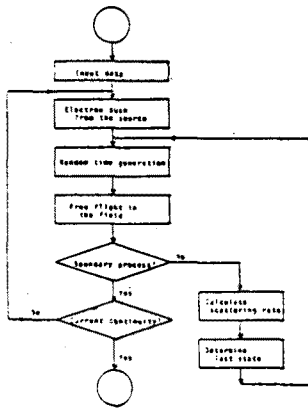


Fig.1 Flow-Chart of simulation

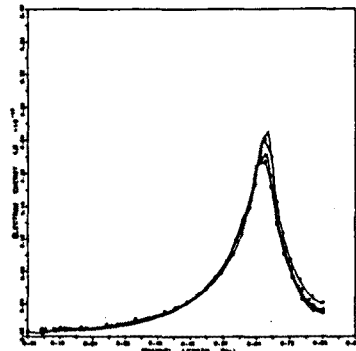


Fig.2-3 Electron energy distribution

Fig.2 게이트 전압의 변화에 따른 비교 ($V_G=2.5, 4, 5, 6V$)
($L=0.8\mu m$, $V_D=5V$, $T_{OX}=250\text{\AA}$)

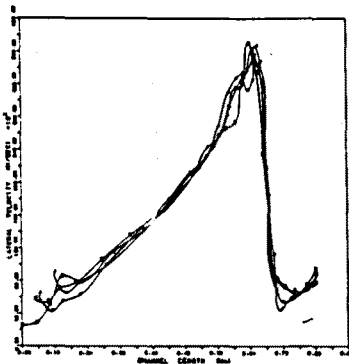


Fig.2-1 Lateral velocity distribution

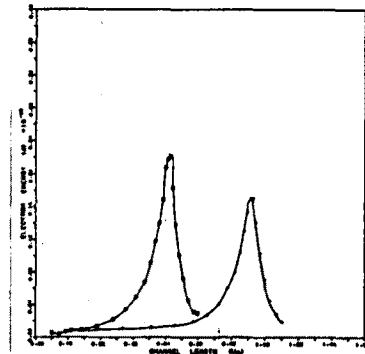


Fig.3 $L=0.8\mu m$ 과 $L=1.2\mu m$ 의 전자의 에너지 비교
($V_D=V_G=5V$, $T_{OX}=250\text{\AA}$)