2003년도 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집 제26권 제1호

폴리게이트의 양자 효과에 따른 Double-Gate MOSFET의 단채널 효과 분석

박 지 선, 신 형 순
이화여자대학교 정보통신학과
전화 : 02-3277-2806 / 핸드폰 : 011-9604-3292

Analysis of Short-Channel Effect due to the 2D QM effect in the poly gate of Double-Gate MOSFETs

Jisun Park and Hyungsoon Shin
Dept. of Information Electronic Engineering, Ewha W. University
E-mail : jungerl@ewha.ac.kr

Abstract

Density gradient mothed is used to analyze the quantum effect in MOSFET. Quantization effect in the poly gate leads to a negative threshold voltage shift, which is opposed to the positive shift caused by quantization effect in the channel. Quantization effects in the poly gate are investigated using the density gradient method, and the impact on the short channel effect of double gate device is more significant.

I. 서론

MOSFET 소자가 deep submicron 영역으로 scaling down됨에 따라 subthreshold swing (SS), V_T roll off 나 drain-induced barrier lowering(DIBL)과 같은 단채널 효과가 증가하기 때문에 double-gate MOSFET와 같은 새로운 소자구조에 대한 연구가 이루어지고 있다. Double-gate MOSFET는 기존의 bulk MOSFET의 구조에 gate가 하나 더 있기 때문에 bottom gate 및 top gate의 control에 의해, drain bias에 의한 단채널 특성의 증가를 효과적으로 제어하면서 높은 drive current를 갖게 된다. 얇은 산화막 두께를 사용하는 소자는 양자 효과나 poly depletion 효과에 의한 전기적 산화막 두께 증가를 고려하여야 하는데, 1-D (dimension) self consistent Schrödinger-Poisson solver[1]나 2-D nonequilibrium Green's function[2]을 사용해서 이러한 특성을 분석하고 있다. 또한 poly/oxide interface에서의 quantum mechanical(QM) depletion에 의한 charge-dipole 형성으로 V_T 변화를 분석하기 위한 1-D simulation 결과들이 발표되고 있다.[1] 그러나 drain 쪽의 gate corner에서의 dipole 형성으로 인한 SCE 특성의 심화 원인을 분석한 2-D simulation 결과는 발표되지 않았다.

본 논문은 double-gate MOSFET의 poly gate에서의 QM 효과 분석을 위하여 density-gradient (DG) method를 사용하여 drain 쪽의 gate corner에서의 charge-dipole 형성과 단채널 특성을 2-D로 분석하였다.

II. Density-Gradient method

Density-Gradient method[3-5]는 drift-diffusion model에 QM term을 추가한 것으로 multi dimension을 쉽게 구현하고 효율적인 계산을 얻을 수 있다는 장점이 있다. DG method에서 사용되는 electron flux는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$F_n = -D_n \nabla n + \mu_n n \nabla (\Psi + 2b_n \frac{\nabla^2 \sqrt{n}}{\sqrt{n}}) \quad (1)$$

여기에서 $b_n = \hbar^2/12qm^*_n$이며, m^*_n는 electron effective mass의 값이다.

아래 PDE 식들의 해는 Ψ, $\sqrt{n}$, $\sqrt{p}$, Φ_n, Φ_p이다.

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \Psi) + q(p - n + N_D^+ - N_A^-) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (b_n \nabla \sqrt{n}) + \frac{\sqrt{n}}{2}\left(\Psi - \frac{kT}{q}\ln\frac{n}{n_i} - \Phi_n\right) = 0$$

$$\nabla \cdot (b_p \nabla \sqrt{p}) - \frac{\sqrt{p}}{2}\left(\Psi + \frac{kT}{q}\ln\frac{p}{n_i} - \Phi_p\right) = 0$$

$$\nabla \cdot (\mu_n\, n \nabla \Phi_n) + \frac{dn}{dt} + r = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\mu_p\, p \nabla \Phi_p) - \frac{dp}{dt} - r = 0 \quad (6)$$

여기에서 Φ는 potential function, r은 net electron-hole pair recombination rate를 나타내고, b_n과 b_p는 양자효과를 고려하기 위한 값들이다.

III. 폴리게이트의 2-D dipole 형성

Polysilicon을 gate로 사용하는 현재의 기술에도 불구하고, 폴리게이트에서의 QM modeling의 중요성은 무시되어 왔다. 논문 [1]과 같이 poly/oxide interface에서의 QM depletion에 의한 영향으로 capacitance와 V_T가 변화하는 1-D 분석은 이미 발표되었지만, drain의 영향으로 인한 2-D 분석은 미미한 상태이다. 따라서 본 논문은 그림 1과 같은 구조를 갖는 symmetric double gate 소자에 대하여 DG method를 적용하여 2-D 양자효과를 분석하였다.

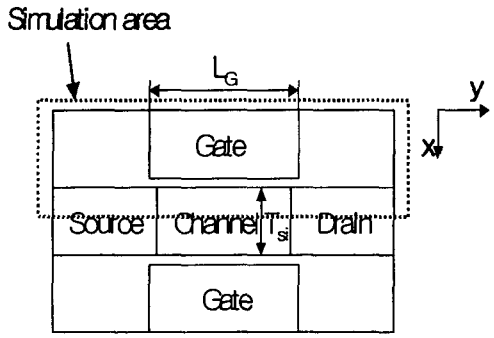
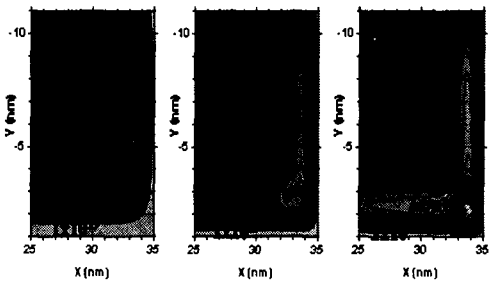


그림 1. Symmetric Double-Gate MOSFETs 구조

그림 2는 electron concentration contour로, gate 영역에서 uniform하지 않고 gate edge에서 pile up 되는 특성을 보인다. 이는 "Quantum mechanical depletion"에 의해 electron이 interface로부터 밀려나면서, charge conservation에 의해 pile up 되는 것으로 gate 영역에서의 양자 효과를 보여준다. 이와 같은 현상은 Schrödinger-Poisson solver를 이용한 1-D 분석에서와 같은 결과를 나타낸다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 2-D 분석의 결과는 gate corner에서 dipole의 peak 값이 나타나, 1-D 분석으로부터는 얻을 수 없는 결과를 2-D 분석으로 얻을 수 있다. 이와 같이 gate corner에 peak가 나타나는 것은 gate와 sidewall oxide의 QM 2-D 특성이고, 2-D 분석이 중요한 이유는 gate와 channel oxide의 QM depletion에 의한 diploe 형성에 QM 2-D 특성이 추가되기 때문이다.



(a) (b) (c)

그림 2. Contour of electron concentration for a double-gate MOSFET at various bias conditions. ($N_G = 10^{20}$ cm^{-3}, V_S = 0V)
(a) V_{GD} = 1V, (b) V_{GD} = 0V, (c) V_{GD} = -1V

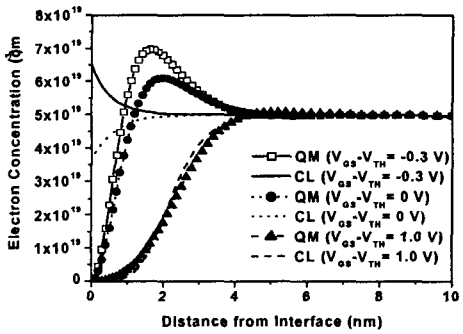


그림 3. Electron concentration in the poly-gate at the center of the channel in a double-gate MOSFET.
($N_G = 5\times10^{19}$ cm^{-3}, V_{DS} = 0V, x=22.5nm)

그림 2는 V_{GD}에 따른 dipole의 위치 변화를 보여주는데, V_{GD}가 감소함에 따라 electron pile up의 peak 값은 증가하고 peak 위치는 gate corner 쪽으로 이동

한다. V_{GD}가 negative일 때, classical(CL) solution인 경우 poly/oxide interface에 electron이 accumulation되지만 QM solution인 경우에는 carrier가 interface에서 떨어져 분포하게 되어 CL과 QM의 차이가 심해진다. 이는 그림 3의 1-D electron 분포의 결과에 의해 검증된다. 그림 3에서 보는 바와 같이 CL과 QM의 차이가 subthreshold bias 조건일 때 가장 차이가 심하다. 따라서 소자의 subthreshold 특성을 정확히 분석하기 위해서는 폴리게이트의 양자 효과를 고려하는 것이 중요하다.

Ⅳ. Evanescent-mode analysis

이번 장에서는 DIBL과 같은 단채널 특성을 폴리게이트에서의 양자 효과 관점에서 분석하였다. 이전까지는 소자의 minimum gate length(L_{min})를 얻기 위해 2-D simulator를 사용하였다. 그러나 최근 연구에서는 subthreshold 영역에서 2-D 특성을 고려하는 characteristic scaling length(λ)를 사용하여 특성 분석을 간단하게 하고 있다. 본 논문에서 사용하는 Evanescent-mode analysis[6-8]는 λ를 사용하여 subthreshold 영역에서 단채널 특성을 분석하는 방법 중의 하나이다.

MOSFETs의 channel potential은 superposition을 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\Psi(x,y) = \Psi_L(x) + \Psi_S(x,y) \qquad (7)$$

여기에서 Ψ_L은 주어진 bias 조건에서 Poisson equation의 long channel solution이고, Ψ_S는 source/drain bias 조건을 고려하는 Laplace equation의 short channel solution이다. Ψ_S를 Fourier expansion을 사용하여 얻은 후, 가장 낮은 order의 term이 단채널 특성에 중요하므로 정리하면 다음과 같다.

$$\Psi_S \approx A\sin\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{T_{si}}{2\lambda} + \frac{\pi}{2}\right)\sinh\frac{y}{\lambda} \qquad (8)$$

여기서 Ψ_S는 symmetrical point $x = \frac{T_{si}}{2}$일 때 최대 값을 갖고, potential은 sine function의 반주기를 갖는다. 식 (8)의 potential이 exp(±y/λ)에 따라 변하므로 MOSFET의 단채널 특성을 L_g/λ로부터 예측할 수 있다. L_g/λ가 작은 값을 갖는 소자의 구조에서는 DIBL과 같은 2-D 단채널 특성이 중요해진다. 그림 4는 DIBL과 L_g/λ의 관계를 보여주는 것으로 DIBL이 60mV 이하의 특성을 갖기 위해서는 L_{min}이 5λ 보다 커야 한다는 조건을 만족해야 함을 알 수 있다.

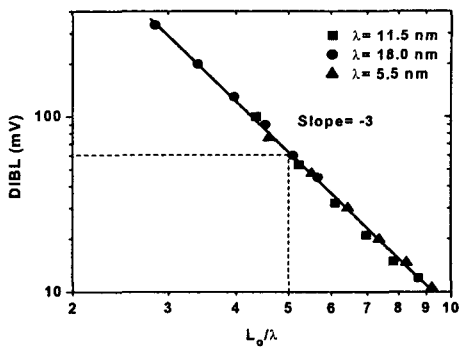


그림 4. DIBL vs. L_g/λ for three strucutres with different λ.(λ=18nm:T_{si}=30nm,T_{OX}=5nm, λ=11.5nm: T_{si}=30nm,T_{OX}=1nm, λ=5.5nm:T_{si}=10nm,T_{OX}=1nm) DIBL is defined as $V_T(V_{DS}=0.1)-V_T$ (V_{DS}=1).

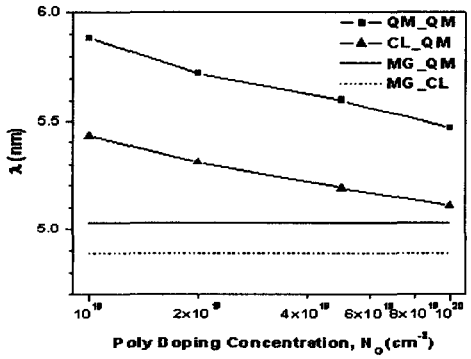


그림 5. Comparison of λ vs. N_G for various simulation conditions of a double-gate MOSFET (T_{OX}=1nm, T_{Si}=10nm)
QM_QM: DG for the poly-gate and the Si film
CL_QM: classical solution for the poly-gate and DG for the Si film
MG_QM: metal gate and DG for the Si film
MG_CL: metal gate and classical solution for the Si film

그림 5에서 보는 바와 같이 QM_QM인 경우, 즉 폴리게이트의 양자 효과를 고려한 경우가 단채널 특성이 증가하고, N_G가 감소함에 따라 정도가 심해진다. 또한 N_G가 클 때도 폴리게이트에서의 양자 효과가 Si film에서의 양자 효과보다 소자의 단채널 특성에 큰 영향을 준다. 그림 6은 폴리게이트 영역에서의 CL과 QM solution의 electron과 potential contour이다. CL solution에서 electron은 poly/oxide interface에

accumulation된다. 반면에 DG solution은 폴리게이트의 양자 효과에 의해 electron이 depletion되어 charge dipole이 drain 쪽의 gate corner에서 생성되고, 따라서 potential contour가 drain 쪽의 폴리게이트에서 penetration되어 단채널 특성을 증가시키는 현상을 보인다.

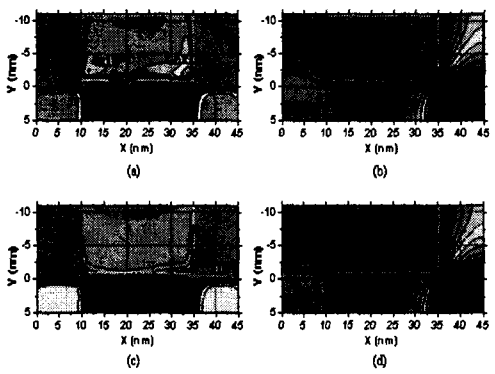


그림 6. Electron concentration and potential contours of DG and the classical solutions for the poly-gate. The DG method is applied in the Si film in both cases.
($N_G=10^{19}$ cm^{-3}, T_{OX}=1nm, T_{Si}=10nm, $V_{GS}-V_T$= -0.3 V, V_{DS}=1V)
(a) Electron concentration and (b) Potential contour of DG solution for the poly-gate
(c) Electron concentration and (d) Potential contour of the classical solution for the poly-gate

V. 결론

DG method를 사용하여 double-gate MOSFET의 poly gate에서의 quantum effect와 단채널 효과의 영향을 2-D로 분석하였다. Poly gate의 dipole 형성으로 인한 2-D quantum effect는 gate corner에서 나타나고 classical 결과와 비교할 때 carrier concentration과 potential contour에서 큰 차이를 갖는다. DG solution인 경우, gate corner에 생긴 dipole에 의해 poly gate 영역으로 potential이 penetration되어 gate가 channel을 control하기 힘들어지게 되어 SCE가 심화되는 것이다. 특히 subthreshold 영역에서 dipole은 bias dependency를 가지게 되어 V_{GD}가 감소함에 따라 poly gate 영역에서 형성되는 dipole peak의 크기값은 증가하고 dipole의 위치는 gate corner 쪽으로 이동한다.

단채널 특성을 분석하기 위하여 evanescent-mode analysis를 사용하여 characteristic scaling-length(λ)를 추출하였다. 폴리게이트 영역에서 QM effect를 고려한 경우에 소자의 단채널 특성이 증가하고, N_G가 감소함에 따라 정도가 심해진다. 또한 N_G가 클 때도 poly gate에서의 양자효과가 Si film에서의 양자효과보다 소자의 단채널 특성에 큰 영향을 준다.

본 논문은 폴리게이트 영역에서의 2-D quantum effect를 고려한 결과로 sub-100nm technology에서의 단채널 특성을 분석하는데 유용하다고 사료된다.

참고문헌

[1] A.S. Spinelli, et al., "Polysilicon quantization effects on the electricla properties of MOS transistors," *IEEE Trans. on Electron Devices*, ED-47, pp. 2366-2371, 2000.

[2] A. Svizhenko, et al., "Two-dimensional quantum mechanical modeling of nanotransistors," J. Appl.phys, vol91, pp. 2343-2354, 2002

[3] C.S. Rafferty, Z. Yu, B. Biegel, M.G. Ancona, J. Bude, and R.W. Dutton,, "Multi-dimensional quantum effect simulation using a density-gradient model and script-level programming techniques," *Proc. IEEE SISPAD*, 1998, pp. 137-140.

[4] M.G. Ancona, "Equations of state for silicon inversion layers," *IEEE Trans. on Electron Devices*, ED-47, pp. 1449-1456, 2000.

[5] D. Connelly, Z. Yu, and D. Yergeau, "Macroscopic simulation of quantum mechanical effects in 2-D MOS Devices via the density gradient method," *IEEE Trans. on Electron Devices*, ED-49, pp. 619-626, 2002.

[6] T.N. Nguyen, "Small-geometry MOS transistors: physics and modeling of surface- and buried-channel MOSFETs," Ph.D. dissertation, Stanford Univ., Stanford, CA, 1984

[7] D.J. Frank, Y. Taur, and H.P. Wong, "Generalized scale length for two-dimensional effects in MOSFET's," *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-19, pp. 385-387, 1998

[8] S.H. Oh, D. Monroe, and J.M. Hergenrother, "Analytic description of short-channel effects in fully-depleted double-gate and cylindrical, surrounding-gate MOSFETs," *IEEE Electron Device Lett.*, EDL_21, pp445-447, 2000