
가우스함수를 이용한 DGMOSFET의 문턱전압이하 스윙분석

정חק기, 한지형, 이재형, 정동수, 이종인, 권오신
군산대학교 전자공학과

Analysis of Subthreshold Swing for Double Gate MOSFET Using Gaussian Function

Hakkee Jung, Jihyung Han, Jaehyung Lee, Dongsoo Jeong, Jongin Lee, Ohshin Kwon
Department of Electronic Eng., Kunsan National University

요 약

본 연구에서는 가우스 함수를 이용한 포아송방정식으로부터 DGMOSFET에서 채널내 전위와 전하분포의 관계를 유도하고자 한다. 이때 가우스 함수의 변수인 이온주입범위 및 분포편차에 대하여 문턱전압이하 스윙의 변화를 관찰하고자 한다. 포아송방정식으로부터 해석학적 전위분포 모델을 구하였으며 이를 이용하여 문턱전압이하 스윙값을 구하였다. 문턱전압이하 스윙은 게이트전압에 대한 드레인전류의 변화를 나타내고 이론적으로 최소값 60mV/dec을 나타내며 디지털소자응용에 매우 중요한 요소이다. 본 연구의 모델이 타당하다는 것을 입증하기 위하여 포텐셜 분포값을 수치해석학적 값과 비교하였다. 결과적으로 본 연구에서 제시한 포텐셜모델이 수치해석학적 시뮬레이션모델과 매우 잘 일치하였으며 가우스 함수의 형태에 따라 문턱전압이하 스윙을 분석하였다.

Abstract

In this paper, the relationship of potential and charge distribution in channel for double gate(DG) MOSFET has been derived from Poisson's equation using Gaussian function. The subthreshold swing has been investigated according to projected range and standard projected deviation, variables of Gaussian function. The analytical potential distribution model has been derived from Poisson's equation, and subthreshold swing has been obtained from this model. The subthreshold swing has been defined as the derivative of gate voltage to drain current and is theoretically minimum of 60mS/dec, and very important factor in digital application. Those results of this potential model are compared with those of numerical simulation to verify this model. As a result, since potential model presented in this paper is good agreement with numerical model, the subthreshold swings have been analyzed according to the shape of Gaussian function.

키워드

DGMOSFET, 도핑분포, 가우스 함수, 포아송방정식, 문턱전압이하 스윙, 이온주입범위 및 분포편차

I. 서론

이중게이트 MOSFET와 같은 다중게이트 트랜지스터는 단채널효과를 제어하면서 10nm이하의 소자까지도 제작가능한 것으로 알려지고 있다.[1] 단채널효과는 문턱전압의 변화, 문턱전압이하 스윙값의 저하, 드레인전압 유기장벽 감소 등 여러 가지 효과로 나타나면서 결국 소자의 특성을 저하시켜 집적회로에서의 사용을 제한하고 있다. 최근 소자가 20nm이하의 나노화가 진행되면서 양자역학적 효과(Quantum Mechanical Effects)까지 소자해석에 포함하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 이중게이트 MOSFET의 채널 도핑이 가우스 함수로 분포될 때 함수의 모양에 따라 문턱전압이하 스윙값의 변화를 관찰하고자 한다. 포아송방정식을 풀때 전하분포는 일반적으로 최소전위에 따라 볼츠만 통계를 이용하였으나 본 연구에서는 가우스함수를 이용하고자 한다. 특히 가우스함수의 모양에 따라 문턱전압이하 스윙값의 변화를 관찰하기 위하여 이온주입범위 및 분포편차를 변화시켰다.

문턱전압이하 스윙은 게이트전압에 대한 드레인전류의 변화율로 정의되며 ON/OFF의 스위칭에 의한 메모리 역할을 하는 디지털소자에서 매우 중요한 요소이다. 특히 단채널소자 제작시 나타나는 문턱전압이하 스윙값의 저하는 소자의 미세화에 큰 장애가 되고 있다. 그러므로 문턱전압이하 스윙값의 정확한 분석은 소자 미세화의 기초가 될 것이므로 본 연구에서는 가우스함수의 변화에 따라 포아송방정식을 풀어 전위분포를 구한 후, 이를 이용하여 문턱전압이하 스윙을 분석하고자 한다.

II. 가우스 함수를 이용한 포아송방정식의 해

그림 1은 이 연구에서 사용한 DG MOSFET의 개략도이다. 이 구조의 x,y방향에 대한 전위 분포를 구하기 위하여 포아송방정식을 이용하였다.

$$\nabla^2\Psi = qn(x)/\epsilon_{Si} \quad (1)$$

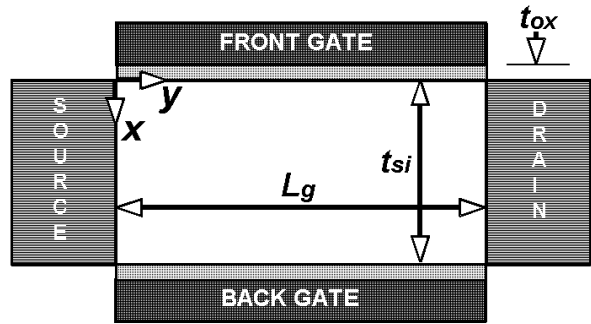


그림 1. DG MOSFET의 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of DG MOSFET

여기서 $n(x)$ 는 채널내 도핑농도로서 식 (2)와 같은 비선형 가우시안 분포함수를 이용하였다.

$$n(x) = \frac{N_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2\sigma_p^2}} \quad (2)$$

여기서 N_i 는 이온주입시 도즈량이며 R_p 와 σ_p 는 각각 이온주입의 범위 및 분포편차를 나타낸다. 또한 $N_i/\sqrt{2\pi}\sigma_p$ 는 상수값으로 N_p 라 하였다. 식 (1)을 풀기위한 경계조건은 다음과 같다.

$$\phi(x, y) |_{x=0} = \phi_s(x)$$

$$\frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} [V_G - V_{fb} - \phi(0, y)] = -\epsilon_{si} \frac{\partial\phi}{\partial x} |_{x=0} \quad (3)$$

$$\phi(0, 0) = V_{bi}$$

$$\phi(0, L_g) = V_{bi} + V_D$$

이 식에 대한 분석학적 모델은 이미 발표한 논문의 식을 참조하였다.[2]

참고문헌 [2]에서 구한 전위분포 및 표면전위분포를 이용하여 구한 문턱전압이하 스윙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SS &= \frac{\partial V_G}{\partial \log I_D} = \frac{kT}{q} \ln 10 \left(\frac{\partial\phi(\eta, y_{min})}{\partial V_G} \right)^{-1} \\ &= \frac{kT}{q} \ln 10 \left(1 + \Gamma \left(\frac{d\phi_{smin}}{dV_G} - 1 \right) \right)^{-1} \\ &= \frac{kT}{q} \ln 10 \left(1 + \Gamma \left(\frac{2HKV_G - (HP + KN)}{\sqrt{FG}} \right) \right)^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Gamma = \frac{E - D\eta + \eta \operatorname{erf}(\eta) + \exp(-\eta^2)/\sqrt{\pi}}{E - D\eta + B \operatorname{erf}(B) + \exp(-B^2)/\sqrt{\pi}}$$

여기서 H, P, K, N, E, D, B 등의 상수는 참고문헌 [3]에 표시되어 있다. 식 (4)에서 y_{min} 은 표면전위가 최소일 때 y 값을 의미한다. 식(4)를 이용하여 문턱전압이하 스윙을 구하였다. 문턱전압이하 스윙은 문턱전압이하에서 차단전류가 10배증가할 때 게이트전압의 변화로 정의하였으며 게이트산화막의 두께 t_{ox} 를 변화시키면서 문턱전압이하 스윙값을 구하여 고찰하였다.

III. 문턱전압이하 스윙에 관한 고찰

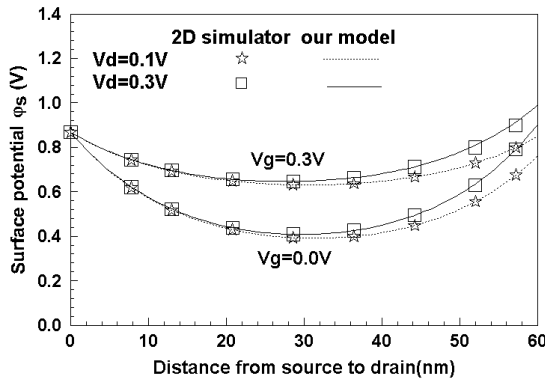


그림 2. 표면전위분포
Fig. 2. Surface potential distribution

그림 2에 본 연구에서 사용한 분석학적 모델과 이차원시뮬레이터의 결과를 비교하였다. 비교결과 매우 잘 일치하는 것으로 나타났으므로 식 (4)를 이용하여 문턱전압이하 스윙을 분석할 것이다.

그림 3에 동일한 문턱전압이하 스윙값을 갖는 곡선을 산화막두께 및 분포편차에 대하여 도시하였다. 결과적으로 산화막두께가 증가하면 문턱전압이하 스윙값도 증가함을 알 수 있었다. 또한 분포편차가 증가하면 문턱전압이하 스윙은 감소하고 있다는 것을 관찰할 수 있다. 그래프의 모양이 거의 직선으로 나타나는 것은 동일한 문턱전압이하 스윙에 대하여 산화막두께와 분포편차가 상호 비례관계에 있다는 것을 의미한다. 분포편차가 작을 때보다 분포편차가 클 때 문턱전압이하 스윙의 변화가 더욱 크다는 것을 알 수 있다. 한편 게이트 산화막 두께가 1nm에서 2nm정도로 매우 작을 때는 분포편차와 관계없이 문턱전압이하 스윙은 70이하의 우수한 특성을 보이고 있다. 그러므로 산화막두께를 얇게하는 것은 단채널효과를 줄이는

가장 중요한 요인이다.

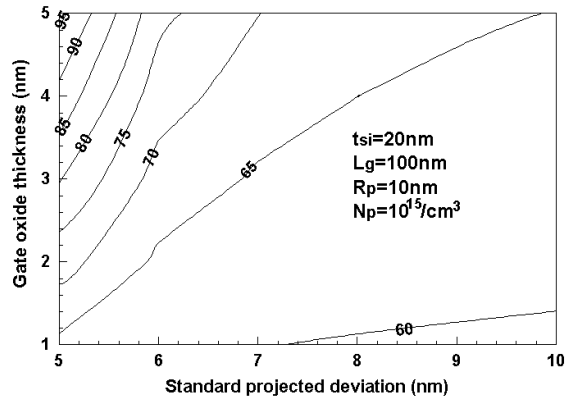


그림 3. 산화막두께 및 분포편차에 따른 동일한 문턱전압이하 스윙분포 ($N_p = 10^{15}/cm^3$)
Fig. 3. Contour of subthreshold swing as a function of oxide thickness and standard projected deviation ($N_p = 10^{15}/cm^3$)

도핑농도의 크기에 따른 문턱전압이하 스윙값을 관찰하기 위하여 게이트 산화막두께 및 분포편차에 대한 함수로 도핑농도를 변화시켜 그림 4에 문턱전압이하 스윙의 변화를 도시하였다. 그래프의 형태는 그림 4와 유사하나 문턱전압이하 스윙값은 약간 변화하고 있다는 것을 알 수 있다. 즉 전체적으로 문턱전압이하 스윙값이 감소하였으며 게이트 산화막 두께 및 분포편차에 대한 변화율도 완만하다는 것을 알 수 있다. 거의 직선의 분포를 가지므로 게이트

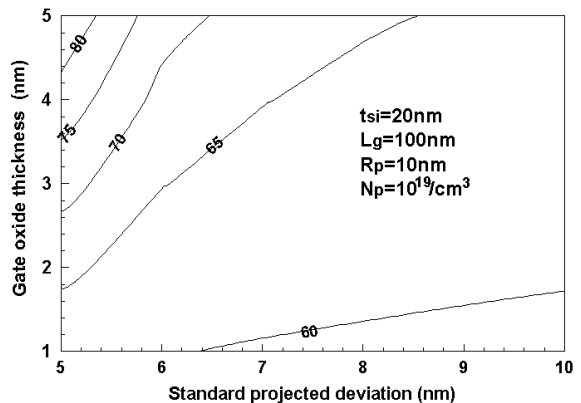


그림 4. 산화막두께 및 분포편차에 따른 동일한 문턱전압이하 스윙분포 ($N_p = 10^{19}/cm^3$)
Fig. 4. Contour of subthreshold swing as a function of oxide thickness and standard projected deviation ($N_p = 10^{19}/cm^3$)

산화막 두께 및 분포편차에 대한 변화도 도핑 농도의 크기에 따라 변화하지 않고 거의 직선의 변화를 보이고 있다. 산화막 두께가 2nm 이하에선 분포편차와 관계없이 거의 65이하의 문턱전압이하 스윙값을 보이고 있다.

이온주입범위 및 게이트 산화막 두께의 변화에 따른 동일한 문턱전압이하 스윙값을 그림 5에 도시하였다. 전술한 바와같이 게이트 산화막 두께의 증가에 따라 문턱전압이하 스윙이 증가하고 있다. 또한 이온주입범위가 증가하면 문턱전압이하 스윙이 증가하고 있다. 그래프의 형태가 게이트 산화막 두께 및 이온주입범위에 대해 반비례하는 관계를 보이고 있다.

그림 6에 도핑농도의 크기가 증가했을 경우 동일한 문턱전압이하 스윙값의 분포를 도시하였다. 전술한 바와같이 전체적으로 문턱전압이하 스윙값이 감소함을 알 수 있다. 또한 문턱전압이하 스윙의 증가율도 매우 완만하다는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 가우스 함수를 이용한 포아송 방정식으로부터 DG MOSFET에서 채널내 전위와 전하분포의 관계를 유도하고자 한다. 이때 가우스 함수의 변수인 이온주입범위 및 분포편차에 대하여 문턱전압이하 스윙의 변화를 관찰하였다. 본 연구의 모델이 타당하다는 것을 입증하기 위하여 포텐셜 분포값을 수치해석학적 값과 비교하여 제시한 포텐셜모델이 수치해석

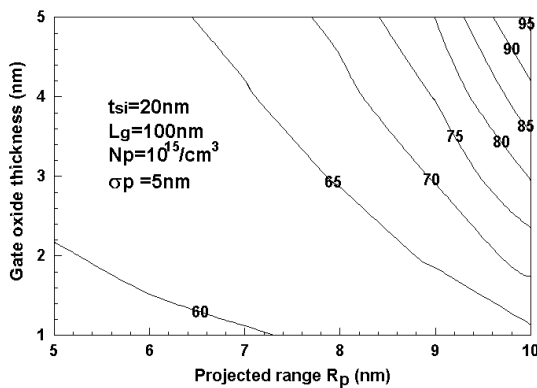


그림 5. 산화막두께 및 이온주입범위에 따른 동일한 문턱전압이하 스윙분포 ($N_p = 10^{15}/cm^3$)

Fig. 5. Contour of subthreshold swing as a function of gate oxide thickness and projected range ($N_p = 10^{15}/cm^3$)

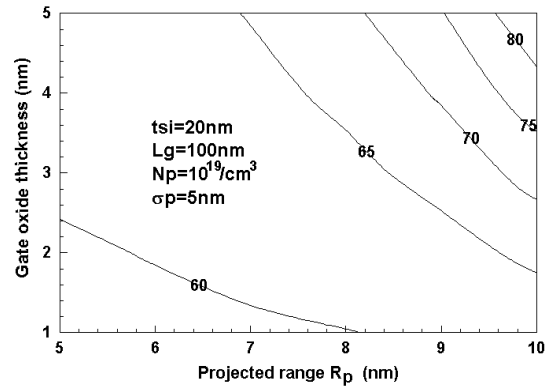


그림 6. 게이트 산화막두께 및 이온주입범위에 따른 동일한 문턱전압이하 스윙분포 ($N_p = 10^{19}/cm^3$)

Fig. 6. Contour of subthreshold swing as a function of gate oxide thickness and projected range ($N_p = 10^{19}/cm^3$)

학적 시뮬레이션모델과 매우 잘 일치하였으며 가우스 함수의 형태에 따라 문턱전압이하 스윙을 분석하였다. 분석결과 산화막두께가 감소하고 도핑농도의 크기가 증가하면 문턱전압이하 스윙이 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 이온주입범위가 증가할수록 그리고 분포편차가 감소할수록 문턱전압이하 스윙이 감소함을 알 수 있었다. 이 연구의 결과는 DG MOSFET를 이용한 집적회로제작시 기초자료로 사용할 수 있다고 사료된다.

참고 문헌

- [1] S.Namana, S.Baishya and K.Koley, "A Subthreshold Surface Potential Modeling of Drain/Source Edge Effect on Double Gate MOS Transistor," 2010 International Conference on Electronics and Information Engineering, vol. 1, pp.87-91, 2010.
- [2] P.K. Tiwari, S. Kumar, S. Mittal, V. Srivastava, U. Pandey and S. Jit, "A 2D Analytical Model of the Channel Potential and Threshold Voltage of Double-Gate(DG) MOSFETs with Vertical Gaussian Doping Profile," IMPACT-2009, pp.52-55, 2009.
- [3] H.K.Jung, "Analysis of Doping Profile Dependent Threshold Voltage for DG MOSFET Using Gaussian Function," 한국해양정보통신학회 영문지, 심사중