

---

# 산화막두께 및 도핑분포에 대한 DGMOSFET의 문턱전압이하 스윙분석

정חק기\*

## Analysis of Subthreshold Swing for Oxide Thickness and Doping Distribution in DGMOSFET

Hakkee Jung\*

### 요 약

본 연구에서는 이중게이트(Double Gate; DG)MOSFET의 채널내 전위와 전하분포의 관계를 가우스 함수를 이용한 포아송방정식으로부터 유도하고자 한다. 즉, 도핑분포는 가우스 함수를 이용하였으며 변수인 이온주입범위 및 분포편차에 대하여 문턱전압이하 스윙과 산화막 두께의 관계를 관찰하고자 한다. 포아송방정식으로부터 해석학적 전위분포 모델을 구하였으며 이를 이용하여 산화막 두께에 대한 문턱전압이하 스윙값의 변화를 구하였다. 문턱전압이하 스윙은 게이트전압에 대한 드레인전류의 변화를 나타내고 이론적으로 최소값 60 mV/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 도핑분포에 따라 문턱전압이하 스윙과 산화막두께의 관계를 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 relationship of subthreshold swing and oxide thickness has been investigated according to variables of doping distribution using Gaussian function, i.e. projected range and standard projected deviation. The analytical potential distribution model has been derived from Poisson's equation, and subthreshold swing has been obtained from this model for the change of oxide thickness. The subthreshold swing has been defined as the derivative of gate voltage to drain current and is theoretically minimum of 60 mS/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 relationship of subthreshold swing and oxide thickness have been analyzed according to the shape of doping distribution.

### 키워드

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

### Key words

DGMOSFET, Doping Distribution, Gaussian Function, Poisson's Equation, Subthreshold swing, Projected range, Standard projected deviation

---

\* 정חק원 : 군산대학교(교신저자, hkjung@kunsan.ac.kr)

접수일자 : 2011. 06. 08

심사완료일자 : 2011. 06. 23

## I. 서 론

이중게이트 MOSFET와 같은 다중게이트 트랜지스터는 단채널효과를 제어하면서 10 nm이하의 소자까지도 제작가능한 것으로 알려지고 있다.[1] 단채널효과는 문턱전압의 변화, 문턱전압이하 스윙값의 증가, 드레인전압 유기장벽감소 등 여러 가지 효과로 나타나면서 결국 소자의 특성을 저하시켜 집적회로에서의 사용을 제한하고 있다. 최근 소자가 20 nm이하의 나노화가 진행되면서 양자역학적 효과(Quantum Mechanical Effects)까지 소자해석에 포함하고 있는 실정이다.[2] 이와같이 미세화되고 있는 트랜지스터에서 가장 중요한 단채널효과를 감소시킬 수 있는 소자의 개발은 향후 집적회로의 발전에 중대한 영향을 미칠 것이다.

본 논문에서는 단채널효과를 감소시키는 것으로 알려진 이중게이트 MOSFET에 대한 문턱전압이하 특성에 대하여 고찰하고자 한다. 이중게이트 MOSFET는 게이트를 두개 이상 제작하는 구조로써 게이트전압에 의한 드레인전류제어 능력을 향상시키고 있다. 이는 문턱전압이하 스윙값을 단채널에서 개선시킴으로써 단채널효과를 감소시킬 수 있다.[3] 본 연구에서는 이중게이트 MOSFET의 채널도핑이 가우스 함수로 분포될 때 함수의 모양에 따라 문턱전압이하 스윙값의 변화를 관찰하고자 한다. 포아송방정식을 풀 때 전하분포는 일반적으로 최소전위에 따라 변화하는 볼츠만 통계를 이용하였으나 본 연구에서는 가우스함수를 이용하고자 한다. 특히 가우스함수의 모양에 따라 문턱전압이하 스윙값의 변화를 관찰하기 위하여 이온주입범위 및 분포편차를 변화시켰다. 또한 산화막두께 및 도핑농도에 대한 문턱전압이하 스윙값의 변화를 이온주입범위 및 분포편차를 파라미터로 하여 고찰하였다.

문턱전압이하 스윙은 게이트전압에 대한 드레인전류의 변화율로 정의되며 ON/OFF의 스위칭에 의한 메모리 역할을 하는 디지털소자에서 매우 중요한 요소이다. 특히 단채널소자 제작시 나타나는 문턱전압이하 스윙값의 증가로 인한 트랜지스터특성의 저하는 트랜지스터의 미세화에 큰 장애가 되고 있다. 그러므로 문턱전압이하 스윙값의 정확한 분석은 소자 미세화의 기초가 될 것이므로 본 연구에서는 가우스함수의 변화 및 산화막두께의 변화에 따라 포아송방정식을 풀어 전위분포를

구한 후, 이를 이용하여 문턱전압이하 스윙을 분석하고자 한다.

2장에서 기존 논문[4]에서 발표된 가우스함수를 이용한 포아송방정식의 해를 구하는 방법에 대하여 간략히 설명하고 표면전하분포 및 문턱전압이하 스윙을 해석학적 모델로 유도할 것이다. 3장에서 산화막두께 및 도핑농도, 그리고 이온주입범위 및 분포편차의 변화에 대한 문턱전압이하 스윙을 고찰할 것이며 4장에서 결론을 맺을 것이다.

## II. 가우스 함수를 이용한 포아송방정식의 해

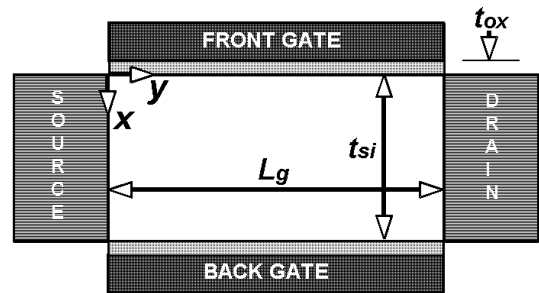


그림 1. DG MOSFET의 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of DG MOSFET

그림 1은 이 논문에서 사용한 DG MOSFET의 개략도이다. 이 구조의 x,y방향에 대한 전위분포를 구하기 위하여 포아송방정식을 이용하였다.

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

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  $\sigma_p$ 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.

$$\begin{aligned} \phi(x, y) \Big|_{x=0} &= \phi_s(y) \\ \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} [V_G - V_{fb} - \phi(0, y)] &= -\epsilon_{si} \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=0} \\ \phi(0, 0) &= V_{bi} \\ \phi(0, L_g) &= V_{bi} + V_D \end{aligned} \quad (3)$$

이 식에 대한 분석학적 모델은 이미 발표한 논문의 식을 참조하였다.[4]

참고문헌 [4]에서 구한 전위분포 및 표면전위분포를 이용하여 구한 문턱전압이하 스윙은 다음과 같다.

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

여기서  $H, P, K, N, E, D, B$  등의 상수는 참고문헌 [5]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 10배 증가할 때 게이트전압의 변화로 정의하며 게이트 산화막의 두께  $t_{ox}$  및 도핑농도를 변화시키면서 문턱전압이하 스윙값을 구하여 고찰하였다.

### III. 문턱전압이하 스윙에 관한 고찰

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

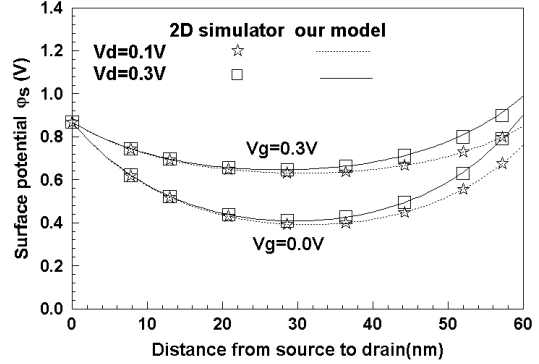


그림 2. 표면전위분포  
Fig. 2. Surface potential distribution

그림 3에 문턱전압이하 스윙값의 등고선곡 선을 산화막 두께 및 분포편차에 대하여 도시하였다. 결과적으로 산화막 두께가 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 산화막 두께와 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 1 nm에서 2 nm정도로 매우 작을 때는 분포편차와 관계없이 문턱전압이하 스윙은 70 mV/dec 이하의 우수한 특성을 보이고 있다. 이는 산화막 두께가 얇아지면 전도중심이 게이트로 이동하여 게이트의 전류제어능력이 증가하기 때문이다.[6] 그러므로 산화막 두께를 얇게 하는 것은 단채널효과를 줄이는 가장 중요한 요인으로 작용하고 있다. 산화막 두께가 작을수록 그리고 분포편차가 클수록 문턱전압이하 스윙의 변화는 매우 완만하게 나타나고 있으며 이와반대로 산화막 두께가 증가하거나 분포편차가 감소하면 문턱전압이하 스윙의 변화가 급격히 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

도핑농도의 크기에 따른 문턱전압이하 스윙 값을 관찰하기 위하여 게이트 산화막두께 및 분포편차에 대한 함수로 도핑농도를  $10^{19}/cm^3$ 으로 변화시켜 그림 4에 문턱전압이하 스윙의 등고선 곡선을 도시하였다. 그래프의 형태는 그림 3과 유사하나 문턱전압이하 스윙값은 약간 변화하고 있다는 것을 알 수 있다.

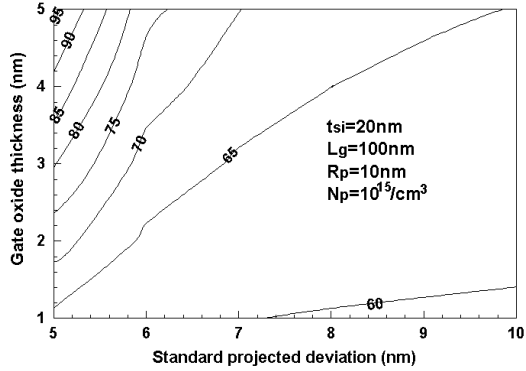


그림 3. 산화막두께 및 분포편차에 따른 문턱 전압이하 스윙의 등고선분포 ( $N_p = 10^{15}/cm^3$ )  
 Fig. 3. Contour of subthreshold swing as a function of oxide thickness and standard projected deviation ( $N_p = 10^{15}/cm^3$ )

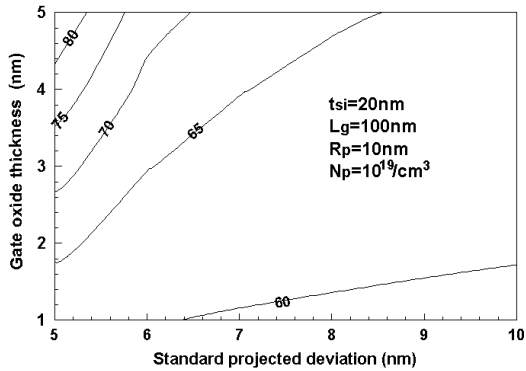


그림 4. 산화막 두께 및 분포편차에 따른 스윙의 등고선분포 ( $N_p = 10^{19}/cm^3$ )  
 Fig. 4. Contour of subthreshold swing as a function of oxide thickness and standard projected deviation ( $N_p = 10^{19}/cm^3$ )

즉 전체적으로 문턱전압이하 스윙값이 감소하였으며 게이트 산화막 두께 및 분포편차에 대한 변화율도 완만하다는 것을 알 수 있다. 이는 도핑농도가 증가하면 전도중심이 게이트단자 방향으로 이동하여 게이트전압에 드레인전류가 더욱 영향을 받기 때문이다.[7] 게이트 산화막 두께 및 분포편차에 대한 변화율을 보면 그림 3과 같이 거의 직선의 분포를 보이므로 변화율은 도핑농도의 크기에 따라 크게 변화하지 않는다는 것을 알 수 있

다. 또한 도핑농도가 크면 산화막 두께에 따른 변화가 더욱 완만하다는 것을 관찰 할 수 있다. 산화막 두께가 2 nm이하에선 분포편차와 관계없이 거의 65 mV/dec이하의 문턱전압이하 스윙값을 보이고 있다.

이온주입범위 및 게이트 산화막 두께의 변화에 따른 문턱전압이하 스윙의 등고선 곡선을 그림 5에 도시하였다. 전술한 바와같이 게이트산화막 두께의 증가에 따라 문턱전압이하 스윙이 증가하고 있다. 또한 이온주입범위가 증가하면 문턱전압이하 스윙이 증가하고 있다. 그래프의 형태가 게이트 산화막 두께와 이온주입범위간에 반비례하는 관계를 보이고 있다. 그림 3과 그림 4에서 논의한 바와같이 산화막 두께가 2 nm이하에서는 70 mV/dec이하의 매우 우수한 문턱전압이하 스윙특성을 나타내고 있다. 또한 산화막 두께가 5 nm까지 증가하더라도 이온주입범위가 작다면 문턱전압이하 스윙값이 65 mV/dec이하로 우수한 특성을 나타내고 있다. 그러나 이온주입범위와 산화막 두께가 동시에 증가하면 문턱전압이하 스윙값이 증가하여 단채널효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

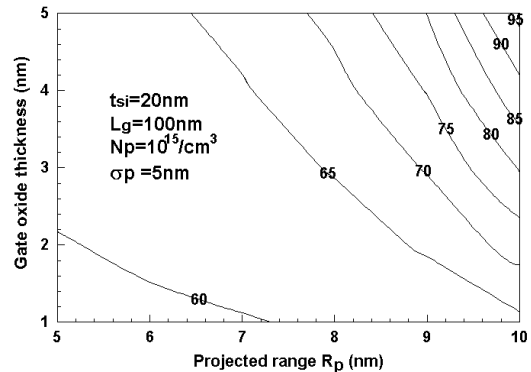


그림 5. 산화막 두께 및 이온주입범위에 따른 문턱전압이하 스윙의 등고선분포 ( $N_p = 10^{15}/cm^3$ )  
 Fig. 5. Contour of subthreshold swing as a function of gate oxide thickness and projected range ( $N_p = 10^{15}/cm^3$ )

변화정도를 관찰해보면 산화막 두께 및 이온주입범위가 작을 때는 변화율이 작다가 산화막 두께 및 이온주입범위가 동시에 증가하면 급격히 문턱전압이하 스윙값이 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 6에 도핑농도의 크기가  $10^{19}/cm^3$ 로 증가했을 경우 산화막 두께와 이온주입범위에 대한 문턱전압이하 스윙값의 등고선 분포를 도시하였다. 그림 3과 그림 4의 비교에서도 언급한 바와같이 전체적으로 문턱전압이하 스윙값이 감소함을 알 수 있다.

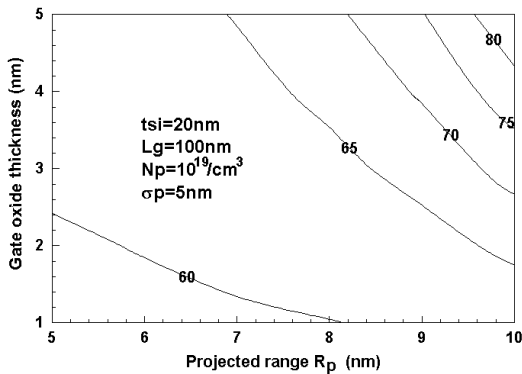


그림 6. 게이트 산화막두께 및 이온주입범위에 따른 문턱전압이하 스윙의 등고선분포 ( $N_p = 10^{19}/cm^3$ )  
 Fig. 6. Contour of subthreshold swing as a function of gate oxide thickness and projected range ( $N_p = 10^{19}/cm^3$ )

또한 문턱전압이하 스윙의 증가율도 매우 완만하다는 것을 알 수 있다. 특히 산화막 두께 및 이온주입범위가 동시에 증가할 때 변화율이 매우 완만해지는 것을 알 수 있다. 이 역시 도핑농도의 증가가 전도중심을 게이트 방향으로 이동시켜 문턱전압이하 스윙값의 변화에 영향을 미치기 때문이다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 채널내 가우스 함수의 도핑분포를 갖는 DGMOSFET에서 채널내 전위와 전하분포의 모델을 포아송방정식으로부터 유도하였으며 이 모델을 이용하여 문턱전압이하 스윙에 대한 해석학적 모델을 유도하였다. 이때 가우스 함수의 변수인 이온주입범위 및 분포편차에 대하여 문턱전압이하 스윙의 변화를 관찰하였다. 또한 도핑농도 및 산화막 두께에 대하여 문턱전압이하 스윙의 변화를 고찰하였다. 본 연구의 모델이

타당하다는 것을 입증하기 위하여 포텐셜 분포값을 수치해석학적 값과 비교하여 제시한 포텐셜모델이 수치해석학적 시뮬레이션모델과 매우 잘 일치하였으므로 가우스 함수의 형태에 따라 문턱전압이하 스윙을 분석하였다. 분석결과 산화막 두께가 감소하고 도핑농도의 크기가 증가하면 문턱전압이하 스윙이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 전도중심이 게이트방향으로 이동함으로써 게이트전압이 드레인전류에 더욱 영향을 미치기 때문이다. 또한 이온주입범위가 증가할수록 그리고 분포편차가 감소할수록 문턱전압이하 스윙이 감소함을 알 수 있었다. 이 연구의 결과는 DGMOSFET를 이용한 집적회로 제작시 기초자료로 사용할 수 있다고 사료된다.

#### 참고문헌

- [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] 정학기, "20nm이하 FinFET의 크기변화에 따른 서브 문턱스윙분석," 한국해양정보통신학회 논문지, Vol.10, No.10, pp.1815-1821, 2006.
- [3] U.Monga, T.A.Fjeldly, "Compact Subthreshold Current Modeling of Short-Channel Nanoscale Double-Gate MOSFET," IEEE Tran. Electron Devices, Vol.56, No.7, pp.1533-1537, 2009.
- [4] 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.
- [5] H.K.Jung, "Analysis of Doping Profile Dependent Threshold Voltage for DGMOSFET Using Gaussian Function," 한국해양정보통신학회 영문지, vol.9, no.3, pp.310-314, 2011.
- [6] H.K.Jung and S.Dimitrijevic, "Analysis of Subthreshold Carrier Transport for Ultimate DGMOSFET," IEEE

Tran. Electron Devices, Vol.53, No.4, pp.685-691, 2006.

- [7] Q.Chen, B.Agrawal and J.D.Meindl, "A Comprehensive Analytical Subthreshold Swing(S) Model for Double-Gate MOSFETs," IEEE Tran. Electron Devices, Vol.49, No.6, pp.1086-1092, 2002.

### 저자소개



**정학기(Hak Kee Jung)**

1983.3 아주대학교 전자공학과  
B.S.

1985.3 연세대학교 전자공학과  
M.S.

1990.8 연세대학교 전자공학과 Ph.D

1995.8 일본 오사카대학 교환교수

2005.8 호주 그리피스대학 교환교수

1990.3-현재 군산대학교 전자공학과 교수

2010.1-현재 한국해양정보통신학회 총무상임 이사

※ 관심분야: 반도체소자 시뮬레이션, 몬테칼로  
시뮬레이션, 회로 및 시스템 해석 등