

---

# 도핑분포함수의 형태에 따른 DGMOSFET의 문턱전압이하특성

정חק기\*

Subthreshold Characteristics of Double Gate MOSFET for Gaussian Function Distribution

Hakkee Jung\*

## 요 약

본 연구에서는 가우스분포함수의 형태에 따라 DGMOSFET에 스킨링이론을 적용하였을 때 문턱전압이하특성의 변화를 분석하고자 한다. 포아송방정식의 분석학적 해를 구할 때 사용하는 전하분포함수에 가우시안 함수를 적용함으로써 보다 실험값에 가깝게 해석하였으며 이때 가우시안 함수의 변수인 이온주입범위 및 분포편차에 대하여 문턱전압이하 특성의 변화를 관찰하였다. 본 연구의 모델에 대한 타당성은 이미 기존에 발표된 논문에서 입증하였으며 본 연구에서는 이 모델을 이용하여 문턱전압이하 특성을 분석할 것이다. 스킨링이론은 소자파라미터의 변화에 대하여 출력특성을 변함없이 유지하기 위하여 적용하는 이론이다. DGMOSFET에 스킨링이론을 적용한 결과, 가우스함수의 형태에 따라 문턱전압이하 특성이 매우 크게 변화하였으며 특히 문턱전압의 변화는 상대적으로 매우 크게 나타난다는 것을 관찰하였다.

## ABSTRACT

This paper have presented the change for subthreshold characteristics for double gate(DG) MOSFET based on scaling theory and the shape of Gaussian function. To obtain the analytical solution of Poisson's equation, Gaussian function been used as carrier distribution and consequently potential distributions have been analyzed closely for experimental results, and the subthreshold characteristics have been analyzed for the shape parameters of Gaussian function such as projected range and standard projected deviation. Since this potential model has been verified in the previous papers, we have used this model to analyze the subthreshold characteristics. The scaling theory is to sustain constant outputs for the change of device parameters. As a result to apply the scaling theory for DGMOSFET, we know the subthreshold characteristics have been greatly changed, and the change of threshold voltage is bigger relatively.

## 키워드

DGMOSFET, 문턱전압이하, 문턱전압, 가우스함수, 포아송방정식, 스킨링

## Keyword

DGMOSFET, Subthreshold, Threshold, Gaussian function, Poisson equation, scaling

---

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

접수일자 : 2012. 06. 01

심사완료일자 : 2012. 06. 01

## I. 서론

반도체소자가 나노단위로 제작됨에 따라 기존 CMOSFET의 한계가 드러나고 있다. 나노단위에서는 단채널효과가 심각하게 나타나 차단전류의 증가 및 문턱전압이 이동 등 심각한 소자성능의 저하를 야기시킨다. 그러나 생산성향상 및 소자성능향상 그리고 가격경쟁력 향상 등을 이유로 소자의 미세화는 필연적인 요소이다.

소자의 크기가 줄어들 때 출력특성을 소자크기 감소 비율 즉, 스켈링 인자에 따라 일정하게 유지시키기 위하여 사용하는 이론이 스켈링 이론이다. 스켈링 이론에 따르면  $S$ 배 만큼 소자의 크기를 감소시키면 전류는  $S$ 배, 동작주파수는  $S^2$ 배 만큼 증가하는 것으로 알려져 있다.[1] 이와같이 출력 특성의 변화뿐만 아니라 문턱전압이하에서도 특성이 변화될 것이다. 문턱전압이하 특성 중 단채널효과로 알려진 문턱전압의 이동현상, 문턱전압이하 스윙특성의 저하 및 드레인유도장벽감소 현상 등은 기존 CMOSFET 소자에서 가장 큰 문제가 되고 있는 요소들이다. 이러한 요소들의 효과를 감소시키기 위하여 개발되고 있는 소자가 다중게이트 MOSFET 소자이다. 이 중에서도 가장 간단히 제작할 수 있는 이중게이트(Double Gate ; DG) MOSFET는 이론적인 연구에 많이 사용되고 있으며 특히 포아송방정식을 이용한 채널내 전위분포에 대한 해석학적 모델의 개발이 활발히 진행되고 있다. 또한 이 모델을 이용한 문턱전압의 분석, 드레인유도장벽감소 현상 및 문턱전압이하 스윙의 분석은 많은 연구가 진행되고 있다[2]. Tiwari 등은 포아송방정식을 풀 때, 가장 실험치에 근사한 가우스함수를 전하분포함수로 이용하여 해석학적 전위분포 모델을 제시하고 이를 이용하여 해석학적 문턱전압모델을 유도하였다[3].

이 결과는 이차원시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 결과를 보였다. 본 연구에서는 Tiwari의 해석학적 전위분포 모델과 스켈링 이론을 이용하여 문턱전압이하 특성을 분석하고자 한다. 특히 가우스함수의 파라미터인 이온주입범위 및 분포편차에 따라 스켈링 이론이 문턱전압이하 특성에 미치는 영향을 분석함으로써 스켈링 이론과 문턱전압이하 특성의 관계를 보다 자세히 고찰하고자 한다.

2장에서는 포아송방정식의 해석학적 모델 및 스켈링 이론에 대하여 설명할 것이며 3장에서 이 모델의 이온주입범위 및 분포편차등의 변화에 따라 스켈링 이론을 적용하였을 경우, 문턱전압이하 특성의 변화를 고찰 할 것이다. 또한 4장에서 결론을 맺을 것이다.

## II. 문턱전압이하 특성

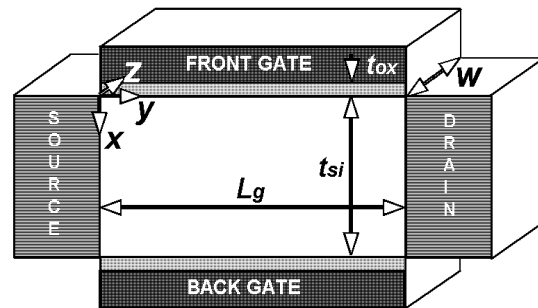


그림 1. DG MOSFET의 개략도  
Fig. 1 Schematic view of DG MOSFET

그림 1은 DG MOSFET의 개략도이다. 도시한 바와같이  $x, y$ 방향에 대해서만 전위분포를 구할 것이다. 즉, 채널폭 방향인  $z$ 방향으로의 전위분포는 거의 일정하므로 [4]  $x, y$  방향의 2차원 전위분포만을 다음과 같은 포아송방정식을 이용하여 구한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \frac{qn(x)}{\epsilon_{si}} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_{si}$ 는 실리콘의 유전율이며  $n(x)$ 는 채널내 도핑분포함수로서 식(2)와 같은 가우시안 분포함수를 이용하였다.

$$n(x) = N_p \exp\left(-\frac{(x - R_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (2)$$

여기서  $N_p$ 는 이온주입시 도즈량에 의하여 결정되는 최대 도핑분포값이며  $R_p$ 와  $\sigma_p$ 는 각각 이온주입의 범위

및 분포편차를 나타낸다.

식 (1)과 (2)를 풀기 위하여 **Tiwari** 등의 전개방법을 이용하면 식 (3)과 같은 전위분포를 구할 수 있다. 이미 발표한 논문에서 전위분포 관련식에 관하여 검증하였다[5].

$$\phi_s = F \exp(y/\lambda) + G \exp(-y/\lambda) + V_G - V_{fb} - \lambda^2 q N_f \exp(-B^2) / \epsilon_{Si} \quad (3)$$

여기서  $B, \lambda, F, G$ 는 참고문헌[3]에 나와있으며  $V_G$ 는 게이트인가전압,  $V_{fb}$ 는 평탄전압이다. 이렇게 구한 전위분포 중, 게이트산화막과 반도체와의 계면에서 표면전위를 구하고 이의 최소값을 구하면 문턱전압을 구할 수 있다. 즉, 문턱전압의 정의를 이용하면 표면전위의 최소값  $\phi_{smin}$ 이 페르미전위  $\phi_f$ 의 2배가 될 때 게이트전압을 구하여 문턱전압으로 정한다. 즉,

$$V_{th} = V_G |_{\phi_{smin} = 2\phi_f} \quad (4)$$

디지털소자에서 매우 중요한 요소인 문턱전압이하 스윙은 차단전류가 10배 변화할 때 게이트전압의 변화로 정의된다. 즉,

$$SS = \frac{\partial V_G}{\partial \log I_D} \quad (5)$$

이는 문턱전압이하 영역에서 전류의 감소율을 나타내는 척도가 된다. 그러므로 문턱전압이하 스윙이 커지면 감소율이 작아지므로 OFF상태로 진행하는데 상당한 시간이 요구될 뿐만 아니라 차단상태에서 기생전류가 증가하며 소자특성에 악영향을 미치게 된다. 그러므로 문턱전압이하 스윙은 100mV/dec이하의 작은 값을 유지하여야만 한다.

드레인유도장벽감소는 드레인전압이 소스측 에너지 장벽에 영향을 미치는 정도를 나타내는 척도로서 단채널에서 나타나는 효과이다. 그러므로

$$DIBL = V_{th}|_{V_D=0V} - V_{th}|_{V_D=1V} \quad (6)$$

로 정의된다.

일반적인 스켈링 이론에 따라 전기적 출력특성을 유지하기 위하여 채널길이, 채널두께, 게이트산화막 두께, 채널폭 등을 스켈링 인자  $S$ 배 만큼 감소시켰을 때 채널도핑농도는  $S^2$ 배만큼 증가시켜야 한다. 그러므로 본 연구에서는 스켈링 이론의 타당성 여부를 문턱전압이하 특성과 가우스함수의 모양을 결정짓는 이온주입범위 그리고 분포편차 등의 변화에 대하여 고찰할 것이다.

### III. 가우스함수에 따른 문턱전압 이하특성의 변화

그림 2에 이온주입범위가 1에서 10까지 변화할 때 스켈링 인자를 파라미터로 하여 구한 문턱전압을 도시하였다. 이온주입범위가 증가할수록 문턱전압은 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 스켈링 인자가 증가할수록 문턱전압이 증가하였다.

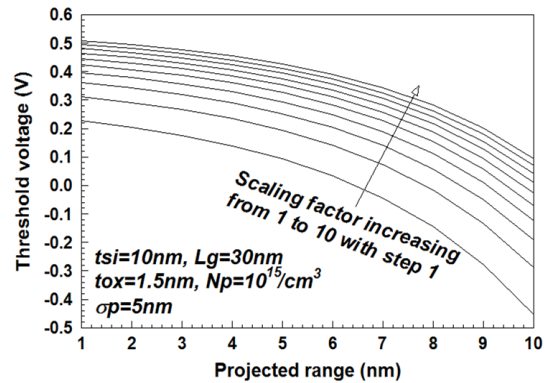


그림 2. 스켈링 인자를 파라미터로 한 이온주입 범위에 따른 문턱전압의 변화

Fig. 2 The variation of threshold voltage for the change of projected range according to scaling factor

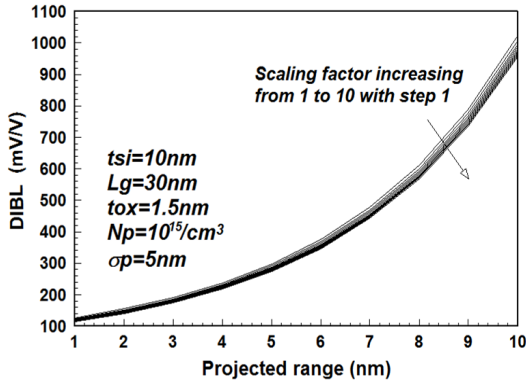


그림 3. 스켈링 인자를 파라미터로 한 이온주입범위에 따른 드레인유도장벽감소  
Fig. 3 The drain induced barrier lowering for the change of projected range according to scaling factor

스켈링인자에 대한 효과는 참고문헌[6]에서 서술하였다. 또한 이온주입범위가 증가하면 전도중심이 채널 내부로 이동하여 게이트전압에 의한 전류제어 능력이 감소하므로 문턱전압이 감소하는 것이다.

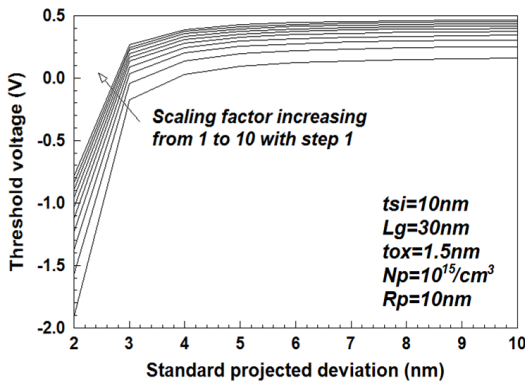


그림 4. 스켈링 인자를 파라미터로 한 분포편차에 따른 문턱전압의 변화  
Fig. 4 The variation of threshold voltage for the change of standard projected deviation according to scaling factor

그림 3에 이온주입범위의 변화에 대한 드레인유도장벽감소의 변화를 도시하였다. 이온주입범위가 증가할수록 드레인유도장벽감소현상이 더욱 증가하는 것을

알 수 있었으며 특히 스켈링 인자에 따라서는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있었다.

분포편차에 대한 문턱전압의 변화를 관찰하기 위하여 그림 4에 스켈링 인자를 파라미터로 하였을 때 분포편차의 변화에 대한 문턱전압의 변화를 도시하였다. 이온주입범위의 경우와는 달리 분포편차가 증가할수록 그리고 스켈링인자가 증가할수록 문턱전압도 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 분포편차가 5nm 이상에서는 문턱전압이 거의 일정한 값을 유지하는 것을 알 수 있었다.

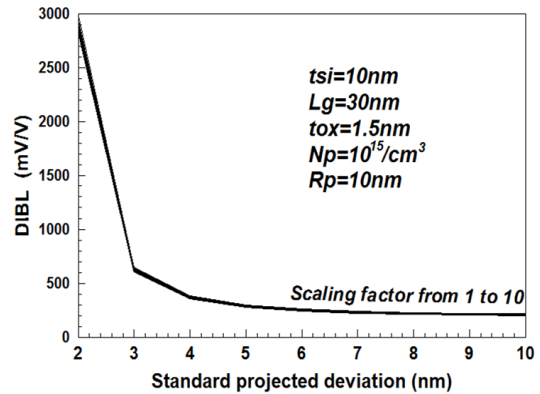


그림 5. 스켈링 인자를 파라미터로 한 분포편차에 따른 드레인유도장벽감소  
Fig. 5 The drain induced barrier lowering for the change of standard projected deviation according to scaling factor

그림 5에 분포편차의 변화에 대한 드레인유도장벽감소의 변화를 스켈링인자를 파라미터로 도시하였다. 분포편차가 증가하면 드레인유도장벽감소현상은 줄어드는 것을 알 수 있다.

또한 5nm 이상의 분포편차에서는 거의 일정한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 스켈링인자에 따른 드레인유도장벽감소의 변화는 관찰되지 않는다는 것을 알 수 있었다.

분포편차와 이온주입범위에 대한 문턱전압이하스윙의 변화를 그림 6과 그림 7에 각각 도시하였다. 각 그림에서 알 수 있듯이 스켈링 인자에 따라 문턱전압이하스윙은 거의 변화가 없었으며 이온주입범위의 증가와 함께 문턱전압이하스윙은 증가하며 분포편차

의 증가와 함께 감소하는 것을 알 수 있었다. 전술한 바와같이 이온주입범위가 증가하면 전도중심이 채널 내부로 이동하여 게이트전압의 전류제어 능력이 감소하기 때문에 문턱전압이하 스윙이 증가하는 것을 알 수 있다.

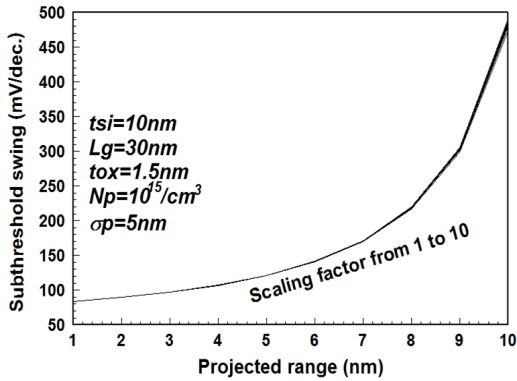


그림 6. 스켈링 인자를 파라미터로 한 이온주입범위에 따른 문턱전압이하 스윙  
Fig. 6. The subthreshold swings for the change of projected range according to scaling factor

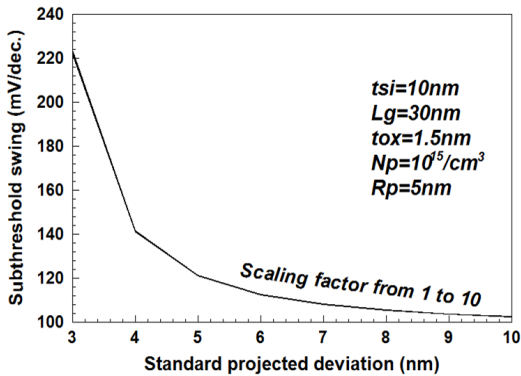


그림 7. 스켈링 인자를 파라미터로 한 분포편차에 따른 문턱전압이하 스윙  
Fig. 7 The subthreshold swings for the change of standard projected deviation according to scaling factor

또한 이온주입범위가 일정할 때 분포편차가 커지면 도핑농도분포가 게이트단자에 가까울수록 증가하는 분포를 보이므로 전도중심이 게이트단자에 가까워지는

것을 알 수 있다. 그러므로 문턱전압이하 스윙이 분포편차가 증가할 때 감소하는 것이다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 가우스분포함수의 형태에 따라 DG MOSFET에 스켈링이론을 적용하였을 때 문턱전압이하 특성의 변화를 분석하였다. 이때 가우시안 함수의 변수인 이온주입범위 및 분포편차에 대하여 문턱전압이하 특성의 변화를 관찰하였다. DG MOSFET에 스켈링이론을 적용한 결과, 가우시안 함수의 형태에 따라 문턱전압 특성이 매우 크게 변화하였으며 드레인 유도장벽감소 현상 및 문턱전압이하 스윙은 스켈링인자에 따라서 거의 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있었다. 이온주입범위 및 분포편차의 변화에 따라 전도중심이 변화하므로 문턱전압 및 문턱전압이하 스윙 등이 변화하는 것을 관찰하였다. 이와같은 결과는 향후 DG MOSFET의 문턱전압이하 연구에 사용될 수 있을 것이라 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] Sima Dimitrijeve, *Principles of Semiconductor Devices*, Oxford, 2012.
- [2] K.A.Shaik, A.Amara, C.D.Parikh and A.Singhal, "Low power and fast adder implementation with Double Gate MOSFETs," 2011 Faible Tension Faible Consommation, pp.23-26, 2011.
- [3] 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.
- [4] D.S.Havaladar, G.Katti, N.DasGupta and A.DasGupta, "Subthreshold Current Model of FinFETs Based on Analytical Solution of 3-D Poisson's Equation," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 53, no.4, 2006.
- [5] H.K.Jung, "Analysis of Doping Profile Dependent Threshold Voltage for DG MOSFET Using Gaussian

Function,” International Journal of KIMICS, Vol.9, No.3, pp.310-314, 2011.

- [6] 정학기, “DG MOSFET의 문턱전압과 스켈링 이론의 관계,” 한국정보통신학회 논문집, Vol.16, No.5, pp. , 2012.

### 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

2011.1 ~ 현재 한국정보통신학회 총무부회장

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