
비선형도핑분포를 이용한 DGMOSFET의 산화막두께에 대한 문턱전압이하 특성분석

정חק기*

Analysis of Subthreshold Characteristics for DGMOSFET according to Oxide Thickness
Using Nonuniform Doping Distribution

Hakkee Jung*

요 약

본 연구에서는 이중게이트 MOSFET의 채널도핑이 비선형분포를 가질 때 게이트 산화막의 두께를 변화시키면서 문턱전압이하특성을 분석하였다. 이중게이트 MOSFET는 차세대 나노소자로서 단채널효과를 감소시킬 수 있다는 장점 때문에 많은 연구가 진행 중에 있다. 이에 이중게이트 MOSFET에서 단채널효과로서 잘 알려진 문턱전압이하 스윙의 저하에 대하여 비선형도핑분포를 이용한 포아송방정식의 분석학적 모델로 분석하고자 한다. 또한 나노소자인 이중게이트 MOSFET의 구조적 파라미터 중 가장 중요한 게이트 산화막의 두께에 대하여 문턱전압이하 특성을 분석하였다. 본 논문에서 사용한 분석학적 포아송방정식의 포텐셜모델 및 전송모델의 타당성을 입증하기 위하여 수치해석학적 결과값과 비교하였으며 이 모델을 이용하여 이중게이트 MOSFET의 문턱전압이하 스윙을 분석하였다.

ABSTRACT

In this paper, the subthreshold characteristics have been analyzed for various oxide thickness of double gate MOSFET(DGMOSFET) using Poisson's equation with nonuniform doping distribution. The DGMOSFET is extensively been studing since it can shrink the short channel effects(SCEs) in nano device. The degradation of subthreshold swing(SS) known as SCEs has been presented using analytical form of Poisson's equation with nonuniform doping distribution for DGMOSFET. The SS have been analyzed for change of gate oxide thickness to be the most important structural parameters of DGMOSFET. To verify this potential and transport models of this analytical Poisson's equation, the results have been compared with those of the numerical Poisson's equation, and subthreshold swing has been analyzed using this models for DGMOSFET.

키워드

DGMOSFET, 포아송 방정식, 비선형도핑분포, 포텐셜분포, SCE, 문턱전압이하

Keyword

DGMOSFET, Poisson's equation, nonuniform doping distribution, Short Channel Effect, Subthreshold

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

접수일자 : 2011. 02. 18

심사완료일자 : 2011. 03. 11

I. 서 론

최근 삼성전자 및 하이닉스 반도체와 같은 메이저급 메모리업체에서 2011년도부터 20nm급 소자의 비중을 늘리기로 하고 있다. 이에 따라 고집적 고성능 메모리 칩에 사용할 수 있는 FET의 개발에 관심이 집중되고 있다. 현재 사용중인 CMOSFET의 경우 크기가 20nm이하 까지 감소하면 단채널효과에 의하여 문턱전압의 급격한 변화를 발생시키며 오프(OFF)시 차단전류의 증가로 인한 문턱전압이하 전류특성의 저하 및 드레인전압 유기장벽감소 등 여러 가지 효과 때문에 집적회로에서의 사용이 제한되고 있다. 이와같은 문제를 해결하기 위하여 개발되고 있는 것이 이중게이트(Double Gate; DG) MOSFET 구조 소자이다. DG MOSFET는 게이트를 상하에 제작할 수 있어 게이트에 의한 전하제어 능력이 기존의 MOSFET보다 약 두배로 증가하며 초막막형태로 제작할 수 있어 단채널효과를 감소시킬 수 있다는 장점 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다.[1-4]

그동안 포아송방정식의 2차원적 해석을 이용하여 DG MOSFET의 전송특성을 해석하였으나 DG MOSFET의 채널내 도핑은 일정하다는 가정하에서 해석하였다.[5] MOSFET의 공정상 채널을 형성하는 과정은 대부분 이온주입법을 이용하며 이러한 이온주입법을 이용하여 도핑된 채널내 도핑분포는 가우시안(Gaussian) 함수와 같이 비선형으로 분포된다고 알려져 있다. 가우시안 함수를 이용하여 포아송방정식을 풀때 분석학적 전송모델을 유도하기 어렵다는 단점이 있으나 오차함수(error function)의 간단한 수치해석학적 해를 이용하면 가능하다고 알려져 있다.[6] 이와같이 비선형 도핑분포를 이용한 포아송방정식의 포텐셜분포에 대한 해석학적 모델은 기존의 논문[6,7]에서 제시한 바와같이 수치해석학적 모델과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이러한 포텐셜 모델은 DG MOSFET 소자의 채널내 캐리어의 전송특성을 분석하는데 사용될 수 있으며, 특히 단채널효과를 분석하는데 매우 효과적이라고 판단된다.

본 연구에서는 단채널효과 중 디지털소자 제작 시 가장 중요한 문턱전압이하 스윙(Subthreshold Swing; SS)에 대하여 분석한다. 문턱전압이하 스윙은 소자 오프시 드레인 차단전류가 10배 증가할 때 게이트전압의 변화로 정의된다. 즉 문턱전압이하 스윙이 클수록 드레인전류에 대한 게이트전압의 변화가 완만하여 온/오프 경계가

모호하다는 문제가 있다. 그러므로 문턱전압이하 스윙이 작을수록 디지털소자로서 적당하며 이론적인 최소값은 60mS/dec로 알려져 있다.

본 논문에서는 비선형 도핑분포를 갖는 포아송방정식의 해석학적 모델을 이용하여 DG MOSFET의 문턱전압이하 스윙 등 전송특성을 관찰하고 DG MOSFET 제작 시 상하의 산화막두께에 따른 문턱전압이하 스윙의 변화를 고찰하고자 한다. 2장에서는 비선형 도핑분포를 갖는 포아송방정식의 해석학적 모델에 대하여 설명할 것이며 3장에서는 이 모델을 이용하여 계산한 포텐셜분포 및 문턱전압이하 스윙에 대하여 설명할 것이다. 특히 게이트산화막 두께의 변화에 대한 문턱전압이하 스윙의 변화에 중점을 두어 고찰할 것이다. 마지막으로 4장에서 결론을 맺고자 한다.

II. 이론적 배경

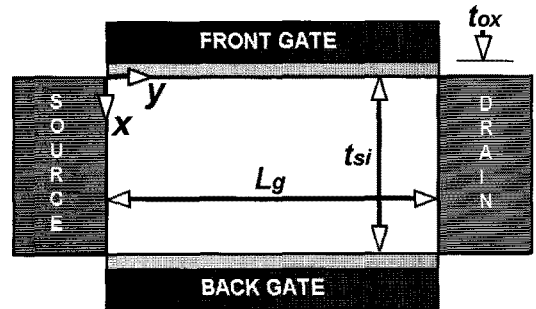


그림 1. DG MOSFET의 개략도
Fig. 1 Schematic view of DG MOSFET

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

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

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 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.

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

여기서 ϕ_s 는 표면전위이며 V_{fb} 는 평탄전위, V_{bi} 는 전위장벽을 나타내며 V_G 와 V_D 는 각각 게이트 및 드레인 전압이다. 식 (1), (2), (3)을 풀기위하여 Zhang et al[7]과 Tiwari et al[6]의 방법을 이용하면 포텐셜분포는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(\eta, y) &= V_G - V_{fb} + (E - D\eta + \eta \operatorname{erf}(\eta) + \exp(-\eta^2)/\sqrt{\pi}) \\ &\times \left(\frac{\phi_s - V_G + V_{fb}}{E - D\eta + \operatorname{Berf}(B) + \exp(-B^2)/\sqrt{\pi}} \right) \quad (4) \end{aligned}$$

$$\eta = (x - R_p) / \sqrt{2}\sigma_p$$

$$A = (t_{si} - R_p) / \sqrt{2}\sigma_p$$

$$B = -R_p / \sqrt{2}\sigma_p$$

$$C = \frac{t_{ox}\epsilon_{si}}{\sqrt{2}\epsilon_{ox}\sigma_p}$$

$$D = \{ \operatorname{Cerf}(B) - \operatorname{Berf}(B) - \exp(-B^2)/\sqrt{\pi} + \operatorname{Aerf}(A) + \exp(-A^2)/\sqrt{\pi} + \operatorname{Cerf}(A) \} / \{ 2C - B + A \}$$

$$E = D(A + C) - \operatorname{Aerf}(A) - \exp(-A^2)/\sqrt{\pi} - \operatorname{Cerf}(A)$$

여기서 erf 는 오차함수를 의미한다. 식 (4)를 이용하여 구한 표면전위분포는 Tiwari et al[5]의 방법을 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_s &= F \exp(y/\lambda) + G \exp(-y/\lambda) + V_G - V_{fb} \\ &\quad - \lambda^2 q N_p \exp(-B^2) / \epsilon_{si} \quad (5) \end{aligned}$$

여기서 λ 는 특성값으로서 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda^2 = \sqrt{\pi} \sigma^2 \left\{ \frac{DB - E - \operatorname{Berf}(B) - \exp(-B^2)/\sqrt{\pi}}{\exp(-B^2)} \right\}$$

또한 F 와 G 값은 다음 식으로 구해지는 상수값이다.

$$\begin{aligned} H &= \frac{\exp(-L_g/\lambda) - 1}{\exp(-L_g/\lambda) - \exp(L_g/\lambda)} \\ K &= \frac{\exp(L_g/\lambda) - 1}{\exp(L_g/\lambda) - \exp(-L_g/\lambda)} \\ M &= V_{bi} + V_{fb} + \lambda^2 q N_p \exp(-B^2) / \epsilon_{si} \\ N &= H(M - V_D) / (\exp(-L_g/\lambda) - 1) \\ P &= K(M - V_D) / (\exp(L_g/\lambda) - 1) \\ F &= N - HV_G \\ G &= P - KV_G \end{aligned}$$

식 (4)를 이용하여 문턱전압이하 스윙을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SS &= \frac{\partial V_G}{\partial \log I_D} = \frac{kT}{q} \ln 10 \left(\frac{\partial \phi(\eta, y_{\min})}{\partial V_G} \right)^{-1} \\ &= \frac{kT}{q} \ln 10 \left(1 + \Gamma \left(\frac{d\phi_{\min}}{dV_G} - 1 \right) \right)^{-1} \quad (6) \\ &= \frac{kT}{q} \ln 10 \left(1 + \Gamma \left(\frac{2HKV_G - (HP + KN)}{\sqrt{FG}} \right) \right)^{-1} \\ \Gamma &= \frac{E - D\eta + \eta \operatorname{erf}(\eta) + \exp(-\eta^2)/\sqrt{\pi}}{E - D\eta + \operatorname{Berf}(B) + \exp(-B^2)/\sqrt{\pi}} \end{aligned}$$

식 (6)에서 y_{\min} 은 표면전위가 최소일 때 y 값을 의미한다. 식 (6)을 이용하여 문턱전압이하 스윙을 구하였다. 문턱전압이하 스윙은 문턱전압이하에서 차단전류가 10배증가할 때 상단 게이트전압의 변화로 정의하였으며 게이트산화막의 두께 t_{ox} 를 변화시키면서 문턱전압이하 스윙값을 구하여 고찰하였다.

III. 포텐셜분포와 문턱전압이하 스윙

그림 2에 식(5)를 이용하여 구한 표면전위값을 도시하였다. 드레인 전압이 0.1V와 0.3V일 때 그리고 게이트

전압이 0.1, 0.3, 0.5V일 때 이 논문의 모델을 이용하여 구한 값과 이차원 수치해석학적 방법으로 구한 결과[6]를 비교하였다. 비교 결과 매우 우수하게 일치하고 있는 것을 알 수 있었다. 그러므로 식 (4)의 포텐셜 모델은 유용한 것으로 판단되어 식 (4)를 이용하여 구한 식 (6)의 문턱전압이하 스윙을 계산하였다. 산화막두께를 파라미터로 하여 도핑농도 즉 N_p 의 변화에 대한 문턱전압이하 스윙의 변화를 알아보기 위하여 그림 3에 결과를 도시하였다.

도핑농도가 낮을 때 문턱전압이하 스윙의 변화는 발생하지 않으나 도핑농도가 증가하면 급격히 감소함을 알 수 있다. 그러나 DG MOSFET에서 채널의 도핑농도가 증가하면 채널내 전도중심이 게이트와 멀어져 게이트의 캐리어 제어능력이 감소하기 때문에 DG MOSFET의 제작은 주로 채널을 저농도로 도핑하여 사용하고 있다.[8] 저농도 도핑의 경우 게이트 산화막두께가 증가하면 문턱전압이하 스윙 또한 증가하는 것을 알 수 있다.

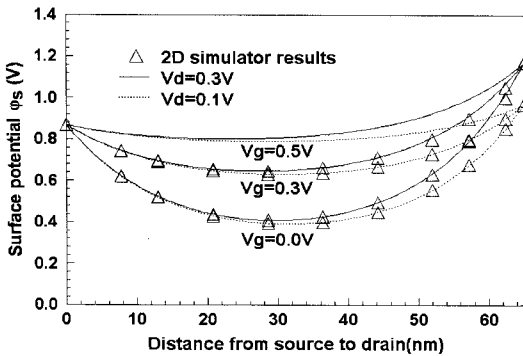


그림 2. 인가전압에 따른 표면전위분포
Fig. 2 Surface potential distribution according to applied voltage

그러므로 게이트 산화막의 두께는 얇게 제작하여야만 한다. 그림 3의 결과는 게이트길이가 30nm, 채널두께가 20nm일 때의 결과이다. 채널두께를 고정시키고 채널 길이만 증가하였을 때 게이트 산화막두께에 따른 문턱전압이하 스윙의 변화를 그림 4에 도시하였다. 그림 3과 결과를 비교하면 도핑농도의 증가에 따라 문턱전압이하 스윙이 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 이는 게이트길이가 증가하여 단채널효과가 사라졌다는 것을 의미한다.

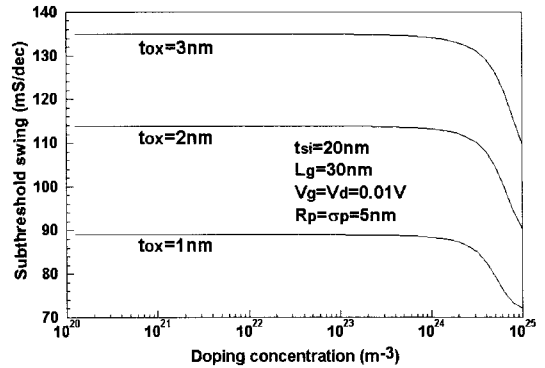


그림 3. 도핑농도 및 산화막 두께에 따른 턱전압이하 스윙 변화(채널길이 30nm)

Fig. 3 The variations of subthreshold swing according to the change of channel doping concentration and gate oxide thickness(channel length of 30nm)

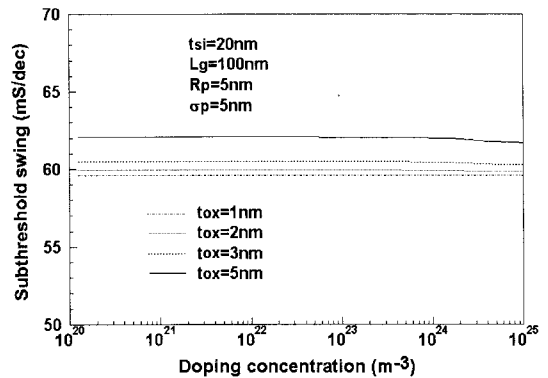


그림 4. 도핑농도 및 산화막 두께에 따른 턱전압이하 스윙 변화(채널길이 100nm)

Fig. 4 The variations of subthreshold swing according to the change of channel doping concentration and gate oxide thickness(channel length of 100nm)

단채널효과의 제거에 의하여 문턱전압이하 스윙값도 이상적인 값 60mS/dec에 근접하여 디지털 소자에 사용하기 적합하다는 것을 알 수 있다. 또한 게이트 산화막 두께의 변화에 대한 문턱전압이하 스윙의 변화도 거의 무시할 수 있을 정도라는 것을 알 수 있다. 즉, 채널길이가 증가하면 게이트 산화막두께는 문턱전압이하 스윙과 같은 단채널효과에 거의 영향을 미치지 못하고 있다. 그림 3에서는 게이트 산화막두께의 증가에 따라 거의 일정한 비율로 문턱전압이하 스윙이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 3과 4에서 알 수 있듯이 채널길이가 작아지면

단채널효과가 발생하여 게이트 산화막두께가 전송특성에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러므로 채널길이가 작아질 때 산화막 두께를 보다 정확하게 제어 하면서 제작하여야만 한다.

이온주입 범위 R_p 에 대한 변화가 문턱전압이하 스윙에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 그림 5에 $R_p = 10nm$ 로 증가하였을 때 문턱전압이하 스윙을 도시하였다. 모든 구조적 조건은 그림 4와 동일하며 단지 이온주입 범위만 두배 증가시켰을 때 문턱전압이하 스윙이 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 먼저 그림 4와 비교하면 채널이 고농도로 도핑되었을 때 문턱전압이하 스윙이 감소하며 그 현상은 게이트 산화막두께가 증가할 때 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. 또한 게이트 산화막두께의 증가에 따른 문턱전압이하 스윙의 증가율도 그림 3과 같이 거의 일정하게 증가하는 것을 알 수 있다. 식 (2)에서 이온주입 범위가 증가하면 두께방향으로 채널의 도핑이 더욱 일정하다는 것을 의미하므로 채널길이가 짧고 이온주입 범위가 짧은 그림 3의 결과와 거의 비슷한 형태가 나오는 것이다. 그러나 그림 4와 비교해 보면 전반적으로 문턱전압이하 스윙이 증가했으며 게이트 산화막의 두께가 증가할수록 문턱전압이하 스윙은 더욱 크게 증가함을 알 수 있다.

이와같이 이온주입 범위의 변화는 문턱전압이하 스윙에 민감한 영향을 미치므로 채널내의 도핑분포는 반드시 비선형 도핑분포를 사용하여야만 한다. 비선형도핑분포는 일반적으로 가우시안 함수를 사용하므로 이온주입 범위 및 분포편차를 정밀하게 조정하여 단채널 효과를 해석하여야만 한다. 이온주입 범위의 변화에 대한 문턱전압이하 스윙의 변화를 좀더 구체적으로 분석하기 위하여 그림 6에 산화막두께를 파라미터로 문턱전압이하 스윙을 도시하였다. 이온주입 범위가 작을 때는 산화막두께에 대한 영향이 거의 없고 이상적인 문턱전압이하 스윙값을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 이온주입 범위가 증가하면 문턱전압이하 스윙도 증가한다. 산화막두께가 작을 때는 이온주입 범위에 대한 영향을 거의 받지 않으나 산화막두께가 증가할수록 이온주입 범위가 증가하면 문턱전압이하 스윙값이 크게 증가한다는 것을 알 수 있다. 이와같이 문턱전압이하 스윙값은 이온주입 범위 등 채널내 도핑분포에 영향을 받으며 산화막 두께에 따라 크게 변화됨을 알 수 있다.

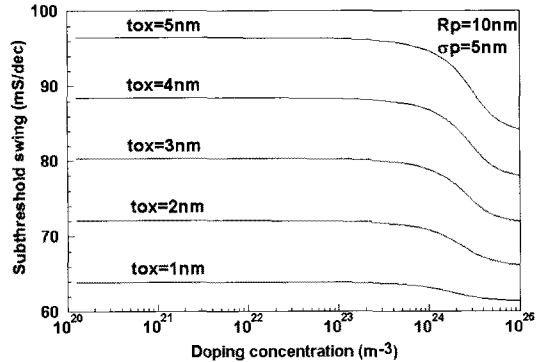


그림 5. 도핑농도 및 산화막 두께에 따른 문턱전압 이하 스윙 변화(이온주입 범위 10nm, 채널길이 100nm)
 Fig. 5 The variations of subthreshold swing according to the change of channel doping concentration and gate oxide thickness(projected range of 10nm, channel length of 100nm)

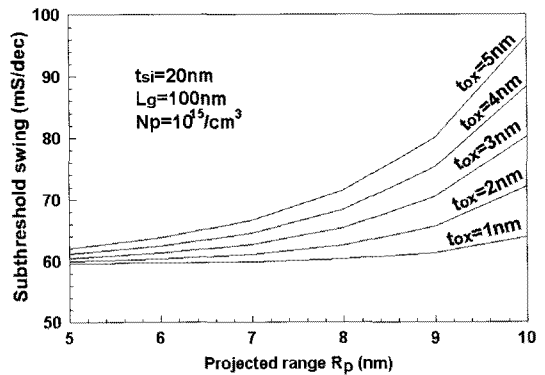


그림 6. 이온주입 범위 및 산화막 두께에 따른 문턱전압 이하 스윙 변화(채널길이 100nm, 도핑농도 $N_p = 10^{15}/cm^3$)
 Fig. 6 The variations of subthreshold swing according to projected range and gate oxide thickness (channel length of 100nm, $N_p = 10^{15}/cm^3$)

IV. 결론

이 논문에서는 비선형 도핑분포를 이용하여 포아송 방정식의 분석학적 모델을 유도하였으며 DG MOSFET의 문턱전압이하 스윙 등 단채널 효과를 관찰하였다. 이를 위하여 이미 기존의 논문에서 검증된 분석학적 포아송방정식이 사용되었으며 포텐셜분포를 통하여 이차원

수치해석학적 모델과 잘 일치함을 보였다. 이 포텐셜 모델을 이용하여 게이트 산화막두께의 변화에 따라 문턱전압이하 스윙을 구하였다. 게이트 산화막의 두께는 단 채널효과를 감소시키기 위하여 보다 작은 값을 사용해야만 하며 또한 이온주입 범위가 증가하면 문턱전압이하 스윙값이 증가하며 게이트산화막 두께에 따른 증가율도 매우 크다는 것을 알 수 있었다.

즉, 채널길이가 증가하여 단채널효과가 감소할 때에도 이온주입 범위가 증가하면 산화막두께 증가에 대하여 문턱전압이하 스윙값이 증가하는 현상이 발생한다. 도핑농도에 대한 분석에서는 도핑농도가 낮을 때 문턱전압이하 스윙의 변화는 발생하지 않으나 도핑농도가 증가하면 급격히 감소함을 알 수 있다. 그러나 이러한 도핑농도에 대한 변화는 이온주입 범위에 따라 크게 변화하기 때문에 비선형 도핑농도 모델을 반드시 사용하여 문턱전압이하에서의 전송특성을 분석해야만 한다. 이와같은 결과는 DGMOSFET를 이용한 집적회로 설계에 이용될 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌

[1] L.Ge and J.G.Fossum, "Analytical Modeling of Quantization and Volume Inversion in Thin Si-Film DG MOSFETs", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 40, No. 12, p.2326, 1993.

[2] 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,"

[3] J.P.Colinge, "Multiple-gate SOI MOSFETs," Solid State Electron., vol. 48, no. 6, pp.897-905,2004.

[4] J.G.Fossum, M.M.Chowdhury, V.P. Trivedi ,T.J.King, Y.K.Choi, J.An and B.Yu, "Physical insights on design and modeling of nanoscale FinFETs," in IEDM Tech. Dig.,pp.679-682, 2003.

[5] H.K.Jung and S.Dimitrijevic, "Analysis of Subthreshold Carrier Transport for Ultimate DGMOSFET," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 53, no.4, pp.685-691, 2006.

[6] 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.

[7] G. Zhang, Z. Shao and K. Zhou, "Threshold voltage model for short channel FD-SOI MOSFETs with vertical Gaussian profile," IEEE Tran. Electron Devices, vol. 55, pp.803-809, 2008.

[8] Q.Chen, B.Agrawal and J.D.Meindl, "A Comprehensive Analytical Subthreshold Swing(S) Model for Double-Gate MOSFETs,"IEEE Trans. Electron Devices, vol. 49, no.6, pp.1086-10902, 2002.

저자소개

정חק기(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 한국해양정보통신학회 총무상임이사
※ 관심분야: 반도체소자 시뮬레이션, 몬테카를로 시뮬레이션, 회로및 시스템 해석 등