
DGMOSFET에서 문턱전압이하 스윙의 도핑분포 의존성

정학기*

Doping Profile Dependent Subthreshold Swing for Double Gate MOSFET

Hakkee Jung*

요 약

본 연구에서는 이중게이트 MOSFET의 채널내 도핑분포에 따른 문턱전압이하 스윙을 분석하였다. DGMOSFET는 차세대 나노소자로서 단채널효과를 감소시킬 수 있다는 장점 때문에 많은 연구가 진행 중에 있다. 문턱전압이하 스윙특성의 저하는 중요한 단채널 효과로서 디지털소자응용에서 매우 심각한 영향을 미치고 있다. 이러한 문턱전압이하 스윙특성의 저하를 이중게이트(Double Gate; DG) MOSFET의 구조적 파라미터 및 채널 내 도핑분포함수의 변화에 따라 분석하고자 한다. 이를 위하여 가우시안 분포함수를 이용하여 포아송방정식의 해석학적 모델을 유도하였다. 본 논문에서 사용한 해석학적 포아송방정식의 전위분포모델 및 문턱전압이하 스윙모델의 타당성을 입증하기 위하여 수치해석학적 결과값과 비교하였으며 이 모델을 이용하여 이중게이트 MOSFET의 문턱전압이하 스윙을 분석하였다.

Abstract

In this paper, the subthreshold swings for doping distribution in the channel have been analyzed in double gate MOSFET(DGMOSFET). The DGMOSFET is extensively been studying since it can lessen the short channel effects(SCEs) as next-generation nano device. The degradation of subthreshold swing(SS) known as SCEs has greatly influenced on application of digital devices, and has been analyzed for structural parameter and variation of channel doping profile in DGMOSFET. The analytical model of Poisson equation has been derived from nonuniform doping distribution for DGMOSFET. To verify potential and subthreshold swing model based on this analytical Poisson's equation, the results have been compared with those of the numerical Poisson's equation, and subthreshold swing for DGMOSFET has been analyzed using these models.

키워드

DGMOSFET, 포아송 방정식, 도핑분포, 전위분포, 단채널효과, 문턱전압이하 스윙

Keyword

DGMOSFET, Poisson's equation, doping distribution, potential distribution, short channel effect, subthreshold

I. 서 론

최근 메모리가격의 지속적인 하락을 겪고 있는 삼성 전자 및 하이닉스 반도체는 향후 경쟁력확보를 위하여 공격적인 투자를 하고 있다. 이와 같은 취지에서 메이저급 메모리업체에서는 올해부터 20nm급 소자의 비중을 늘리기로 하고 있다. 메모리칩에서 가장 중요한 요소는 고용량집적을 위한 저전력소비와 고속동작을 위한 스위칭시간의 개선이다. 두가지 요소를 만족시키기 위해서 각 업체들은 초소형 트랜지스터의 개발에 박차를 가하고 있으며 이에 따라 고집적 고성능 메모리칩에 사용할 수 있는 FET의 개발에 관심이 집중되고 있다. 현재 메모리칩에 사용중인 CMOS의 경우 크기가 20nm이하까지 감소하면 단채널효과에 의하여 문턱전압의 급격한 변화, 문턱전압이하 스윙(Subthreshold Swing)특성의 저하 그리고 드레인전압 유기장벽감소(Drain Induced Barrier Lowering) 등 여러 가지 마이너스 효과 때문에 집적회로에서의 사용이 제한되고 있다. 단채널효과를 감소시킬 수 있는 가장 유망한 소자로 개발되고 있는 것이 다중게이트(Multi Gate) MOSFET 구조 소자이다.

다중게이트 MOSFET는 게이트를 상하에 제작하는 이중게이트(Double Gate; DG) MOSFET 또는 FinFET와 같이 세 개의 면에 제작할 수 있는 구조등 여러 가지 형태로 개발되고 있다. 어떠한 구조든 관계없이 둘 이상의 게이트에 의한 전하제어 능력이 하나의 게이트만 가진 기존의 MOSFET보다 증가하며 초박막형태로 제작할 수 있어 단채널효과를 감소시킬 수 있다는 장점이 있다.[1,2]

최근 포아송방정식을 이용하여 DGMOSFET의 전송 특성을 해석할 때 DGMOSFET의 채널내 도핑은 고전적인 볼츠만 분포함수에 의하여 최소채널전위와 관계된 전하 분포식을 이용하여 해석하고 있다.[3,4] 그러나 진보한 MOSFET의 공정상 채널을 형성하는 과정은 대부분 여러번의 이온주입법 및 확산과정 그리고 문턱전압 조정 이온주입 등을 통하여 비선형으로 도핑되고 있다. 이러한 이온주입법을 이용하여 도핑된 채널내 도핑분포는 일반적으로 가우시안(Gaussian) 함수와 같이 비선형으로 분포된다. 가우시안 함수를 이용하여 포아송방정식을 풀 때 해석학적 전송모델을 유도하기 어렵다는

단점이 있으나 오차함수(error function)를 이용하면 가능하다고 알려져 있다.[5] 이와같이 비선형 도핑분포를 이용한 포아송방정식의 전위분포에 대한 해석학적 모델은 기존의 논문에서 제시한 바와 같이 수치해석학 모델과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.[5] 이 전위분포 모델을 이용하면 DGMOSFET 소자의 채널내 캐리어의 전송특성을 분석할 수 있으며 특히 단채널효과를 분석하는데 매우 효과적이라고 판단된다.

본 연구에서는 채널 내 도핑분포가 가우시안 함수로 분포될 때 단채널효과 중 디지털소자 제작시 가장 중요한 요소인 문턱전압이하 스윙에 대하여 분석한다. 문턱전압이하 스윙은 드레인전압을 거의 0V로 인가한 상태에서 게이트 전압을 변화시켜 얻은 차단영역의 전류-전압특성의 기울기 즉, 드레인 차단전류가 한 승수 증가할 때 게이트전압의 변화로 정의된다. 그러므로 문턱전압이하 스윙은 게이트전압에 의한 드레인전류의 제어 능력에 대한 척도가 된다. 이러한 이유로 전도중심이 게이트 단자에 가까울수록 게이트의 드레인전류에 대한 제어능력이 증가하고 문턱전압이하 스윙은 감소한다고 알려져 있다.[6] 즉 문턱전압이하 스윙이 작을수록 드레인전류에 대한 게이트전압의 변화가 급격하여 ON/OFF 경계가 확실하다는 장점이 있다. 그러므로 문턱전압이하 스윙이 작을수록 디지털소자로서 적당하며 이론적인 최소값은 $(kT/g) \ln 10 \cong 60mS/dec$ 로 알려져 있다.

본 논문에서는 비선형 도핑분포를 이용하여 구한 포아송방정식의 해석학적 모델에 대하여 설명하고, 다양한 도핑분포에 대하여 이 모델로 구한 DGMOSFET의 문턱전압이하 스윙 변화를 고찰하고자 한다. 2장에서는 비선형 도핑분포를 갖는 포아송방정식의 해석학적 분석을 통하여 구한 전위분포 모델과 문턱전압이하 스윙 모델에 대하여 설명할 것이며 3장에서는 이 모델을 이용하여 계산한 전위분포 및 문턱전압이하 스윙에 대하여 설명할 것이다. 특히 채널내 다양한 도핑분포함수에 대한 문턱전압이하 스윙의 변화에 중점을 두어 고찰할 것이다. 마지막으로 4장에서 결론을 맺고자 한다.

II. 문턱전압이하 스윙모델

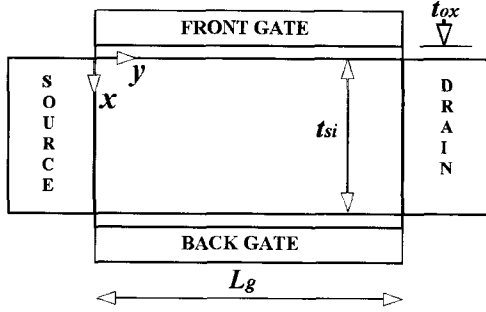


그림 1. DG MOSFET의 개략도
Fig. 1 Schematic view of DG MOSFET

그림 1은 이 논문에서 사용한 DG MOSFET의 개략도로서 x, y 방향에 대한 전위분포를 구하기 위하여 다음과 같은 포아송방정식을 이용하였다.

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

$n(x)$ 는 채널내 도핑분포함수로서 식(2)와 같은 가우시안 분포함수를 이용하였다.

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

여기서 N_p 는 이온주입시 도즈량이며 R_p 와 σ_p 는 각각 이온주입의 범위 및 분포편차를 나타낸다. 식 (1)과 (2)를 풀기위하여 Zhang et al.[7]과 Tiwari et al.[5]의 경계 조건 등을 이용하면 전위분포는 식(3)과 같으며 이를 이용하여 구한 표면전위분포는 식(4)와 같다.

$$\phi(\eta, y) = V_G - V_{fb} + (E - D\eta + \eta \text{erf}(\eta) + \exp(-\eta^2)/\sqrt{\pi}) \times \left(\frac{\phi_s - V_G + V_{fb}}{E - D\eta + \text{Berf}(B) + \exp(-B^2)/\sqrt{\pi}} \right) \quad (3)$$

$$\phi_s = F \exp(y/\lambda) + G \exp(-y/\lambda) + V_G - V_{fb} - \lambda^2 q N_p \exp(-B^2)/\epsilon_{si} \quad (4)$$

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

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

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

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

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

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

$$F = N - HV_G$$

$$G = P - KV_G$$

$$H = \frac{\exp(-L_g/\lambda) - 1}{\exp(-L_g/\lambda) - \exp(L_g/\lambda)}$$

$$K = \frac{\exp(L_g/\lambda) - 1}{\exp(L_g/\lambda) - \exp(-L_g/\lambda)}$$

$$M = V_{bi} + V_{fb} + \lambda^2 q N_p \exp(-B^2)/\epsilon_{si}$$

$$N = H(M - V_D / (\exp(-L_g/\lambda) - 1))$$

$$P = K(M - V_D / (\exp(L_g/\lambda) - 1))$$

여기서 erf 는 오차함수를 의미하며 ϕ_s 는 표면전위이며 V_{fb} 는 평탄전위, V_G 와 V_D 는 각각 게이트 및 드레인 전압이다. 여기서 λ 는 특성값[5]이다.

식 (3)을 이용하여 문턱전압이하 스윙을 구하면 다음과 같다.

$$SS = \frac{\partial V_G}{\partial \log I_D} = \frac{kT}{q} \ln 10 \left(\frac{\partial \phi(\eta, y_{\min})}{\partial V_G} \right)^{-1} = \frac{kT}{q} \ln 10 \left(1 + \Gamma \left(\frac{d\phi_{s\min}}{dV_G} - 1 \right) \right)^{-1} = \frac{kT}{q} \ln 10 \left(1 + \Gamma \left(\frac{2HKV_G - (HP + KN)}{\sqrt{FG}} \right) \right)^{-1} \quad (5)$$

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

식(5)에서 y_{\min} 은 표면전위가 최소일 때 y 값을 의미한다. $\phi(\eta, y_{\min})$ 과 $\phi_{s\min}$ 은 y_{\min} 을 대입하여 구한 전위분포값이다. 식(5)를 이용하여 이온주입 범위, 분포편차, 게이트산화막의 두께 t_{ox} 및 도즈량 등을 변화시키면서 문턱전압이하 스윙값을 구하여 고찰하였다.

III. 문턱전압이하 스윙에 관한 결과고찰

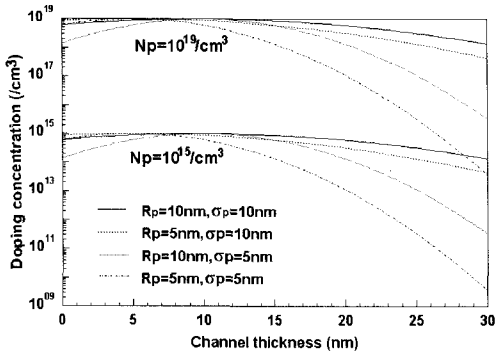


그림 2. 식(2)의 파라미터 변화에 따른 채널내 도핑분포

Fig. 2 Doping profile in channel for change of parameters in Eq.(2)

그림 2에 식(2)를 이용하여 구한 도핑분포를 이온주입 범위 및 분포편차 그리고 N_p 의 변화에 대하여 도시하였다. 도즈량 N_p 값에 대한 차이는 명백하며 이온주입 범위가 클수록 채널깊이방향으로 더 깊게 도핑됨을 알 수 있다. 또한 분포편차가 작을수록 도핑분포가 좁게 분포됨을 알 수 있다. 이와 같이 도핑분포의 변화를 나타내는 파라미터에 대하여 문턱전압이하 스윙의 변화를 관찰하고자 한다.

먼저 본 연구에서 구한 표면전위 모델 식(4)의 타당성을 조사하기 위하여 그림 3에 이차원 수치해석학적 값과 비교하였다. 즉, 드레인 전압이 0.1V와 0.3V일 때 그리고 게이트 전압이 0.1V, 0.3V일 때 이 논문의 모델을 이용하여 구한 값과 이차원 수치해석학적 방법으로 구한 결과를 비교하였다. 비교 결과 매우 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있었다. 그러므로 식(3)과 (4)의 전위분포 모델은 유용한 것으로 판단되어 식(3)과 (4)를 이용하여 구한 식 (5)의 문턱전압이하 스윙을 도핑분포의 파라미터를 이용하여 계산하였다. 계산 결과를 그림 4에 도시하였다. 채널길이를 20nm에서 200nm까지 변화시키면서 이온주입범위가 5nm와 10nm에 대하여 도즈량 및 게이트 산화막두께의 변화에 대한 문턱전압이하 스윙의 변화를 관찰하였다. 이때 분포편차는 5nm로 고정하였다. 일반적으로 알려진 바와 같이 도즈량이 증

가하면 문턱전압이하 스윙값이 감소함을 알 수 있으며 채널깊이가 감소하면 단채널효과에 의하여 문턱전압이하 스윙값이 갑자기 증가하게 된다. 또한 게이트산화막의 두께가 증가할 때도 문턱전압이하 스윙값은 증가하게 된다.[8] 이온주입 범위 R_p 가 증가하면 도즈량에 관계없이 문턱전압이하 스윙값이 증가한다. 그림 2에서 알 수 있듯이 이온주입 범위가 커면 도핑분포가 거의 일정하게 되어 R_p 가 작을 때보다 전도중심이 게이트단자에서 멀어져게이트의 전하제어 능력이 떨어지기 때문이다.[6]

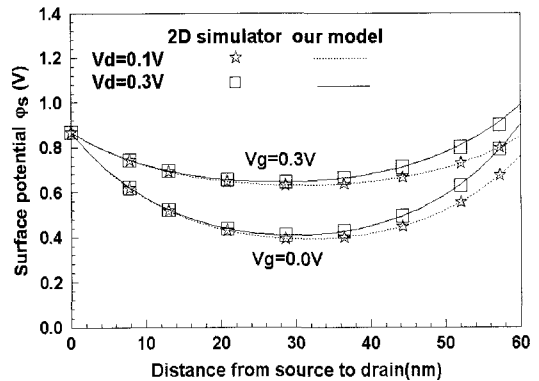


그림 3. 인가전압에 따른 표면전위분포
Fig. 3 Surface potential distribution according to applied voltage

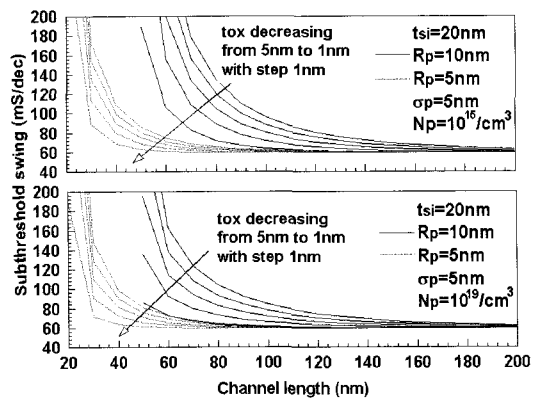


그림 4. 이온주입범위의 변화에 따른 문턱전압이하 스윙의 변화

Fig. 4 The variation of subthreshold swing according to the change of projected range

즉, 도핑분포의 형태에 문턱전압이하 스윙이 크게 영향을 받고 있다. $R_p = 5nm$ 정도일 때는 도즈량이나 게이트산화막의 두께에 관계없이 채널길이가 40nm 정도에서도 100mS/dec 이하의 적당한 문턱 전압이하 스윙값을 갖는다. 그림 4에서 알 수 있듯이 이온주입 범위가 크면 게이트산화막 두께의 변화에 따라 문턱 전압이하 스윙값의 변화가 더욱 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 이온주입범위가 작을 때는 게이트산화막의 두께가 1nm에서 5nm로 변해도 채널길이가 60nm 정도까진 거의 일정한 문턱전압이하 스윙값을 유지함을 알 수 있다.

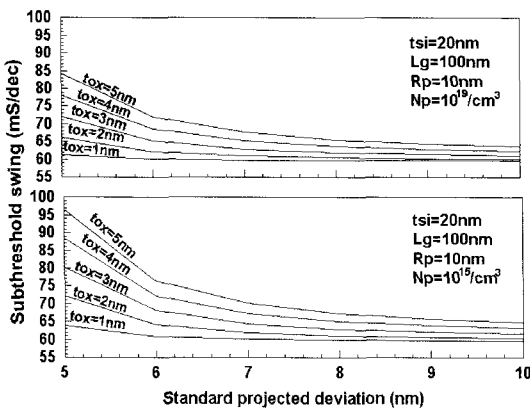


그림 5. 분포편차의 변화에 따른 문턱전압이하 스윙변화

Fig. 5 The variations of subthreshold swing according to the change of standard projected deviation

분포편차에 대한 문턱전압이하 스윙값의 변화를 관찰하기 위하여 그림 5에 해당 값을 도시하였다. 이온주입 범위를 10nm로 고정하고 분포편차를 5nm에서 10nm 까지 변화시키면서 관찰하였다. 그림 2에서 알 수 있듯이 분포편차가 작으면 채널길이 방향으로 도핑의 변화가 심하게 일어나는 것을 알 수 있다. 특히 채널길이 방향으로 심하게 도핑농도가 감소하므로 전도중심의 방향도 채널중심으로 이동하게 된다.[6] 그러므로 게이트전압의 제어능력이 감소하여 그림 5에서 알 수 있듯이 분포편차가 작을 때 문턱전압이하 스윙값이 증가하게 된다. 또한 분포편차가 작을 때 산화막 두께에 따라 문턱전압이하 스윙값의 변화가 심하게 나타나며 분포편차가

증가하면 산화막두께의 변화에 대한 문턱전압이하 스윙의 변화는 무시할 수 있을 정도이다. 도즈량의 변화에 대하여 고찰 해 보면 도즈량이 클 때 문턱전압이하 스윙값은 감소하며 산화막두께에 대한 문턱전압이하 스윙값의 변화도 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 도핑농도에 따라 분석한 Q.Chen et al.[6]의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 6에 이온주입 범위와 분포편차 그리고 산화막두께의 변화에 대한 문턱전압이하 스윙값의 변화를 도시하였다. 그림 6에서 알 수 있듯이 이온주입 범위가 크고 분포편차가 작을 때 문턱전압이하 스윙값은 증가한다는 것을 알 수 있다. 즉 이온주입 범위가 크고 분포편차가 작을 때 전도중심이 채널길이방향으로 이동하여 게이트의 전하제어 능력이 감소하기 때문이다. 또한 게이트산화막의 두께가 크면 이온주입 범위에 대한 변화율도 증가한다는 것을 알 수 있다. 특히 게이트산화막 두께가 1nm 정도로 매우 작을 때 $N_p = 10^{15}/cm^3$ 에서는 분포편차에 대한 문턱전압이하 스윙값의 변화를 거의 관찰할 수 없으며 문턱전압이하 스윙값이 약 65mS/dec 이하로 매우 우수한 특성을 보이고 있다. 그림 5와 6에서 알 수 있듯이 분포편차가 작을 때 이온주입 범위에 따라 변화율이 매우 크고 문턱전압이하 스윙값도 크게 증가한다.

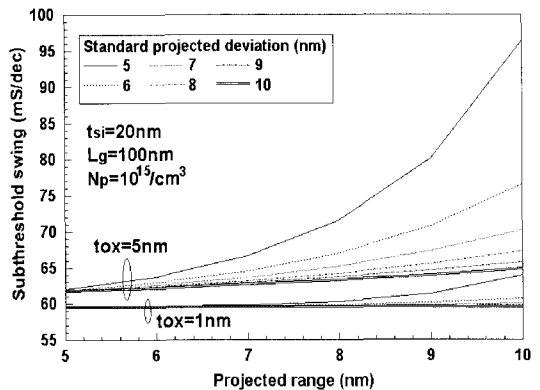


그림 6. 이온주입 범위와 분포편차 그리고 산화막두께의 변화에 대한 문턱전압이하 스윙값의 변화

Fig. 6 The variations of subthreshold swing according to the change of projected range, standard projected deviation and gate oxide thickness

그림 6의 결과를 좀 더 자세히 고찰하기 위하여 이온주입 범위와 분포편차에 대한 문턱전압이하 스윙값의 등고선 그래프를 그림 7에 도시하였다. 그림 7에서 알 수 있듯이 이온주입 범위가 작고 분포편차가 클 때 문턱전압이하 스윙값은 감소한다. 또한 주어진 조건에서 게이트 산화막의 두께가 1nm 정도로 매우 작다면 이온주입 범위와 분포편차에 관계없이 65mS/dec 이하의 우수한 문턱전압이하 스윙값을 보이고 있다. 그러나 게이트 산화막의 두께가 5nm 정도로 상승하면 이온주입 범위나 분포편차에 따라 문턱전압이하 스윙의 변화가 심하게 발생하므로 주의 깊게 도핑분포함수를 선택하여 DGMOSFET를 제작하여야만 한다.

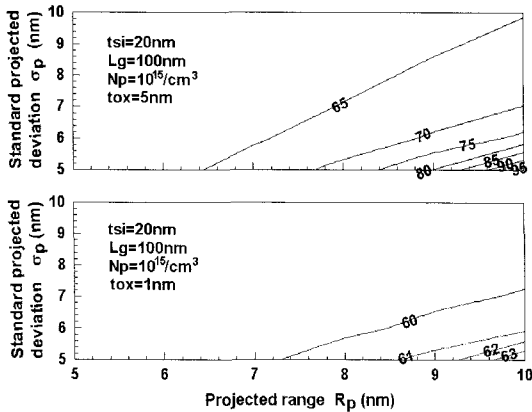


그림 7. 이온주입 범위 및 분포편차에 따른 문턱전압이하 스윙의 등고선

Fig. 7 The contour of subthreshold swing according to the change of projected range and standard projected deviation

IV. 결론

이 논문에서는 DGMOSFET의 채널두께 방향으로의 도핑이 가우스분포일 때 포아송방정식의 해석학적 모델을 유도하였으며 DGMOSFET의 문턱전압이하 스윙을 관찰하였다. 이를 위하여 이미 기존의 논문에서 검증된 해석학적 포아송방정식이 사용되었으며 전위분포를 통하여 이차원 수치해석학적 모델과 잘 일치함을 보였다. 이 전위분포모델을 이용하여 이온주입 범위 및 분포편차 그리고 도즈량, 게이트 산화막두께 등의 변화에 따

라 문턱전압이하 스윙을 구하였다. 결과적으로 이온주입 범위가 증가하고 분포편차가 감소하면 문턱전압이하 스윙값이 증가함을 알 수 있었다. 또한 도즈량이 증가하면 문턱전압이하 스윙값이 감소하며 게이트산화막의 두께 변화에 대하여 문턱전압이하 스윙은 매우 민감하게 변화함을 알 수 있었다. 즉, 게이트 산화막이 두꺼워지고 분포편차가 작아지면 이온주입 범위에 따라 문턱전압이하 스윙값이 크게 변화하므로 주의 깊게 도핑분포함수를 결정하여야만 한다. 이상의 결과, 이온주입 범위, 분포편차 등에 따라 문턱전압이하 스윙이 크게 변화함을 관찰하였으므로 비선형 도핑농도 모델을 반드시 사용하여 문턱전압이하에서의 전송특성을 분석해야만 한다. 이와같은 결과는 DGMOS FET를 이용한 집적회로 설계에 이용될 수 있을 것이라 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] R.A.Vega, K.Liu and T.J.King, "Dopant- Segregated Schottky Source/Drain Double- Gate MOSFET Design in the Direct Source- to-Drain Tunneling Regime", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 56, no.9, pp.2016-2026, 2009.
- [3] H.K.Jung and S.Dimitrijevic, "Analysis of Sub- threshold Carrier Transport for Ultimate DGMOSFET," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 53, no.4, pp.685-691, 2006.
- [4] A. Sahoo, P.Kumar and S. Mahapatra, "A Computationally Efficient Generalized Poisson Solution for Independent Double-Gate Transistors," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 57, no.3, pp.632-636, 2010.
- [5] 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.

- [6] Q.Chen, B.Agrawal and J.D.Mein^o,"A Comprehensive Analytical Subthreshold Swing(S) Model for Double-Gate MOSFETs,"IEEE Trans. Electron Devices, vol. 49, no.6, pp.1086-10902, 2002.
- [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] 정학기, "비선형도핑분포를 이용한 DG MOSFET의 산화막두께에 대한 문턱전압이하 특성분석," 한국해양정보통신학회 논문지, Vol.15, No.8, 2011.

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 한국해양정보통신학회 총무상임이사

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