
이중게이트 MOSFET의 채널도핑에 따른 문턱전압이하 전류 변화 분석

정חק기*

Analysis of Subthreshold Current Deviation for Channel Doping of Double Gate MOSFET

Hakkee Jung*

요 약

본 연구에서는 이중게이트 MOSFET의 채널도핑농도의 변화에 따른 문턱전압이하 전류의 변화를 분석하였다. 이를 위하여 이중게이트 MOSFET의 채널 내 전위분포를 구하기 위하여 포아송방정식을 이용하였으며 이때 전하 분포함수에 대하여 가우시안 함수를 사용하였다. 전위분포는 경계조건을 이용하여 채널크기에 따른 해석학적인 함수로 구하였다. 가우시안 함수의 변수인 이온주입범위 및 분포편차 그리고 채널도핑농도 등에 대하여 문턱전압 이하 전류 특성의 변화를 관찰하였다. 본 연구의 전위모델에 대한 타당성은 이미 기존에 발표된 논문에서 입증하였으며 본 연구에서는 이 모델을 이용하여 문턱전압이하 전류 특성을 분석하였다. 분석결과, 문턱전압이하 전류는 채널도핑농도 및 가우시안 분포함수의 변수 등에 크게 영향을 받는 것을 관찰할 수 있었다.

ABSTRACT

This paper analyzed the change of subthreshold current for channel doping concentration of double gate(DG) MOSFET. Poisson's equation had been used to analyze the potential distribution in channel, and Gaussian function had been used as carrier distribution. The potential distribution was obtained as the analytical function of channel dimension, using the boundary condition. The subthreshold current had been analyzed for channel doping concentration, and projected range and standard projected deviation of Gaussian function. Since this analytical potential model was verified in the previous papers, we used this model to analyze the subthreshold current. As a result, we know the subthreshold current was influenced on parameters of Gaussian function and channel doping concentration for DGMOSFET.

키워드

DGMOSFET, 문턱전압이하 전류, 가우시안 분포, 채널도핑농도, 포아송방정식

Key words

DGMOSFET, subthreshold current, Gaussian function, channel doping concentration, Poisson equation

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

접수일자 : 2013. 05. 01

심사완료일자 : 2013. 05. 24

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

여기서 F, G, B, λ 등은 참고문헌[5]에 표기하였다. 또한 V_G 는 게이트전압, V_{fb} 는 평탄전압을 나타낸다. 차단전류를 구하기 위하여 상하단 게이트전압의 영향에 의하여 전위분포가 x 방향으로 최소인 점을 x_{min} 이라 할 때, 두 부분으로 전류를 나누어 합산한다. 즉,

$$I_{off} = I_{off}^f (0 \leq x \leq x_{min}) + I_{off}^b (x_{min} \leq x \leq t_{si}) \quad (4)$$

$$I_{off}^f = \frac{WV_t \mu_n n_i^2 x_{min} (1 - e^{-V_{DS}/V_t}) (e^{\phi_s^f/V_t} - e^{\phi_{min}/V_t})}{L_g N_p (\phi_s^f - \phi_{min})} \quad (5)$$

$$I_{off}^b = \frac{WV_t \mu_n n_i^2 (t_{si} - x_{min}) (1 - e^{-V_{DS}/V_t}) (e^{\phi_s^b/V_t} - e^{\phi_{min}/V_t})}{L_g N_p (\phi_s^b - \phi_{min})} \quad (6)$$

여기서 ϕ_s^f 는 상단 게이트단자와 접하는 표면전위 중 $y = y_{min}$ 일 때의 전위이며 ϕ_s^b 는 하단 게이트단자와 접하는 표면전위 중 $y = y_{min}$ 일 때의 전위이다. 이론적으로 x 방향으로 대칭적인 전위를 보인다면 $x_{min} = t_{si}/2$ 지만 이온주입범위 R_p 와 분포편차 σ_p 에 따라 x_{min} 값은 변화를 겪게 된다[4]. 그러므로 상단전류 I_{off}^f 와 하단전류 I_{off}^b 는 총 차단전류에서 차지하는 비율이 변화하게 된다. 본 연구에서는 이와 같이 상하단전류의 합으로 계산되는 총 차단전류를 채널도핑농도에 대하여 고찰할 것이다.

III. 채널도핑농도에 따른 문턱전압이하 전류 고찰

식 (4)의 문턱전압이하 전류모델의 타당성은 기준에 발표된 논문[6]에서 이미 언급하였으므로 이 절에서는 채널도핑농도 변화에 대하여 문턱전압이하 전류의 변화를 고찰할 것이다.

그림 2에 채널도핑농도가 $10^{15} /cm^3$ 일 때 전하분포 함수로 사용한 가우스함수의 이온주입범위 및 분포편차의 변화에 대한 문턱전압이하 전류의 변화를 도시하였다. 분포편차가 클수록 그리고 이온주입범위가 작을수록 문턱전압이하 전류가 감소한다는 것을 관찰할 수 있다. 감소율을 고찰해보면 분포편차가 크고 이온주입범위가 작을 때 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 전하분포 설계 시 이온주입범위는 작게 하고 분포편차는 크게 설정하여야만 한다.

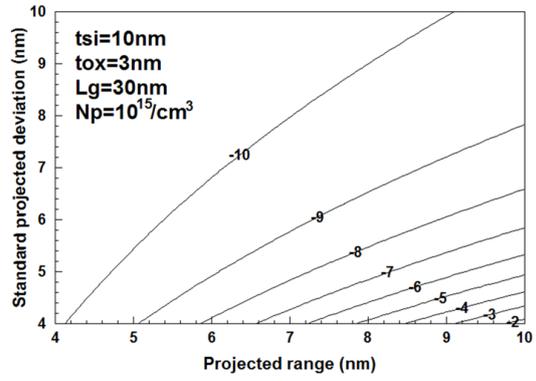


그림 2. 도핑농도가 $10^{15} /cm^3$ 일 때 이온주입범위 및 분포편차에 대한 문턱전압이하 전류의 승수 등고선 곡선
Fig. 2 Contours of the power for subthreshold current with the change of projected range and standard projected deviation 3 nm

채널도핑농도의 변화에 대한 문턱전압이하 전류의 변화를 이온주입범위 및 분포편차의 변화에 대하여 그림 3에 도시하였다. 그림 2와 그림 3을 비교해 보면 채널도핑농도가 증가하면 문턱전압이하 전류가 감소한다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 채널도핑농도가 증가하면 문턱전압이하 전류값을 낮게 설정할 수 있다. 그러나 문턱전압이하 전류의 감소율은 도핑농도가 작을 때와 달리 분포편차 및 이온주입범위에 따라 거의 일정하다는 것을 알 수 있다.

그림 4에 채널도핑 농도가 $10^{15}/cm^3$ 일 때 채널길이 및 채널두께에 따른 문턱전압이하 전류의 승수에 대한 등고선그래프를 도시하였다. 채널길이가 감소하면 문턱전압이하 전류가 크게 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 채널길이가 채널두께보다 큰 영역에서 문턱전압이하 전류가 크게 감소하고 있다는 것을 알 수 있다.

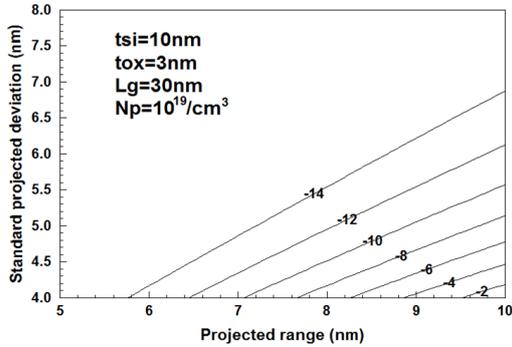


그림 3. 게이트 산화막두께가 1 nm일 때 채널길이 및 채널두께 변화에 대한 문턱전압이하 전류의 승수 등고선 곡선

Fig. 3 Contours of the power for subthreshold current with the change of channel thickness and channel length at gate oxide thickness of 1 nm

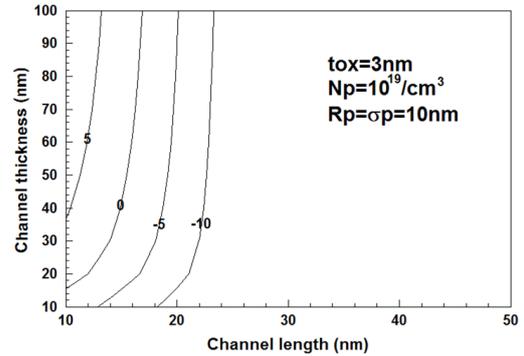


그림 5. $10^{19}/cm^3$ 에서 채널길이 및 채널두께에 따른 문턱전압이하 전류의 승수 등고선 곡선

Fig. 5 Contours of the power for subthreshold current with the change of channel thickness and channel length at $10^{19}/cm^3$

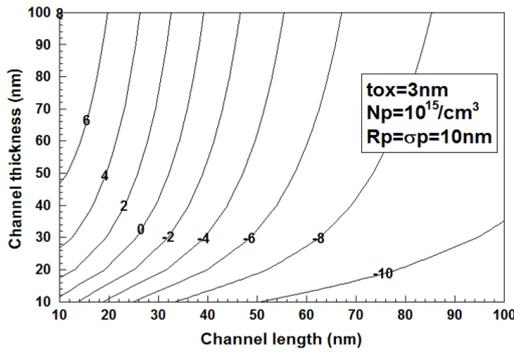


그림 4. $10^{15}/cm^3$ 에서 채널길이 및 채널두께에 따른 문턱전압이하 전류의 승수 등고선 곡선

Fig. 4 Contours of the power for subthreshold current with the change of channel thickness and channel length at $10^{15}/cm^3$

반면 채널두께가 채널길이보다 큰 영역에선 문턱전압 이하 전류가 크게 증가하여 소자로서 사용하기 부적합하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 이중게이트 MOSFET 소자 제작 시 채널길이를 감소시켜 트랜지스터의 면적을 감소시키기 위해서는 채널두께는 가능하면 채널길이보다 작게 제작하여야만 문턱전압이하 특성이 우수한 소자를 제작할 수 있을 것이다.

그림 5에 채널도핑농도를 $10^{19}/cm^3$ 으로 증가시켰을 경우 채널길이 및 채널두께의 변화에 따른 문턱전압이하 전류의 승수에 대한 등고선그래프를 도시하였다.

그림 4와 비교해보면 채널길이 및 채널두께 즉, 이중 게이트 MOSFET의 크기 변화에 따라 전류의 변화가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 특히 채널길이 짧은 영역에서 전류의 변화는 매우 크게 나타났으며 상대적으로 채널두께에는 크게 영향을 받지 않는 것을 관찰할 수 있다. 즉 채널두께가 증가하면 문턱전압이하 전류는 급속히 포화되어 일정한 값을 유지하는 것을 알 수 있다. 특히 그림 4와 비교해보면 채널두께가 채널길이보다 큰 영역에서도 -10의 승수를 갖는 문턱전압이하 전류값을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 참고논문[7]에서도 알 수 있듯이 도핑농도가 증가하면 문턱전압이하 스윙값이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 채널도핑이 증가하면 채널영역을 완전결핍상태로 만들기 어려움이 있어 문턱전압이상 전송특성에 영향을 미칠 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 이중게이트 MOSFET의 채널도핑농도의 변화에 따른 문턱전압이하 전류의 변화를 분석하였다. 이중게이트 MOSFET의 채널 내 전위분포를 구하기 위하여 포아송방정식을 이용하였으며 이때 전하분포함수에 대하여 이온주입범위 및 분포편차에 따라 변화하는 가우시안 함수를 사용하였다. 전위분포는 경계조건을 이용하여 채널길이 및 채널두께 즉, 채널크기에 따른

해석학적인 함수로 구하였다. 가우시안 함수의 변수인 이온주입범위 및 분포편차 그리고 채널길이, 채널두께, 채널도핑농도 등에 대하여 문턱전압이하 전류 특성의 변화를 관찰하였다. 분석결과, 문턱전압이하 전류는 채널도핑농도가 증가할수록 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있었다.

결과적으로 문턱전압이하 전류는 채널도핑농도의 변화에 크게 영향을 받으며 분포편차가 증가할수록 그리고 이온주입범위가 감소할수록 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 도핑농도가 비교적 낮은 경우, 채널길이보다 채널두께가 작아야 낮은 문턱전압이하 전류를 유지할 수 있으며 도핑농도가 증가하면 짧은 채널길이에서조차 낮은 문턱전압이하 전류를 유지할 수 있으나 문턱전압이상의 전송특성에 영향을 미칠 수 있다. 이와 같이 문턱전압이하 전류는 채널도핑농도에 따라 크게 변화하므로 이중게이트 MOSFET 설계 시 주의하여야 할 것이다.

참고문헌

[1] H. K. Jung, "Analysis of Doping Profile Dependent Threshold Voltage for DGMOSFET Using Gaussian Function," International Journal of KIMICS, Vol.9, No.3, pp.310-314, 2011.

[2] M. Schwarz, T.Holtij, A.Kloes and B.Iniguez, "2D Analytical Framework for Compact Modeling of the Electrostatics in Undoped DG MOSFETs," 18th International conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, Poland, 16-18th June, pp.405-410, 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 DGMOSFET Using Gaussian Function," International Journal of KIMICS, Vol.9, No.3, pp.310-314, 2011.

[6] H. K. Jung and J.I.Lee, "Analysis on Off-Current of Double Gate MOSFET for Composition of Forward and Backward Current," Lecture Notes in Electric Engineering 2013, in printing.

[7] 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.1086-1090. 2002.

저자소개



정학기(Hakkee 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
 2013.1-현재 한국정보통신학회 수석부회장
 ※ 관심분야: 반도체소자 시뮬레이션, 몬테칼로 시뮬레이션, 회로 및 시스템 해석 등