

이중게이트 MOSFET의 채널 크기에 따른 문턱전압이하 전류 변화 분석

정학기*

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

Hakkee Jung*

Department of Electronic Engineering, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea

요 약

본 연구에서는 이중게이트 MOSFET의 채널크기 변화에 따른 문턱전압이하 전류의 변화를 분석하였다. 이를 위하여 단채널 효과를 감소시킬 수 있는 나노소자인 이중게이트 MOSFET에 대한 정확한 해석학적 분석이 요구되고 있다. 채널 내 전위분포를 구하기 위하여 포아송방정식을 이용하였으며 이때 전하분포함수에 대하여 가우시안 함수를 사용하였다. 가우시안 함수의 변수인 이온주입범위 및 분포편차 그리고 채널크기 등에 대하여 문턱전압이하 전류 특성의 변화를 관찰하였다. 본 연구의 모델에 대한 타당성은 이미 기존에 발표된 논문에서 입증하였으며 본 연구에서는 이 모델을 이용하여 문턱전압이하 전류 특성을 분석하였다. 분석결과, 문턱전압이하 전류는 채널크기 및 가우시안 분포함수의 변수 등에 크게 영향을 받는 것을 관찰할 수 있었다.

ABSTRACT

This paper analyzed the change of subthreshold current for channel dimension of double gate(DG) MOSFET. The nano-structured DGMOSFET to reduce the short channel effect had to be precisely analyze. Poisson's equation had been used to analyze the potential distribution in channel, and Gaussian function had been used as carrier distribution. The subthreshold current had been analyzed for device parameters such as channel dimension, and projected range and standard projected deviation of Gaussian function. Since this potential model was verified in the previous papers, we used this model to analyze the subthreshold current. Resultly, we know the subthreshold current was influenced on parameters of Gaussian function and channel dimension for DGMOSFET.

키워드 : 문턱전압이하 전류, 가우시안 함수, 단채널효과, 포아송방정식, 채널크기

Key word : subthreshold current, Gaussian function, short channel effect, Poisson equation, channel dimension

접수일자 : 2013. 10. 01 심사완료일자 : 2013. 11. 06 게재확정일자 : 2013. 11. 20

* **Corresponding Author** Hakkee Jung(E-mail:hkjung@kunsan.ac.kr, Tel:+82-63-469-4684)
Department of Electronic Engineering, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2014.18.1.123>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

전류 I_{off}^b 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$I_{off}^f = \frac{WV_t\mu_n n_i^2}{L_g N_p} (1 - e^{-V_{DS}/V_t}) \int_0^{x_{min}} \exp\left(\frac{\phi_{min}(x)}{V_t}\right) dx \quad (2)$$

$$I_{off}^b = \frac{WV_t\mu_n n_i^2}{L_g N_p} (1 - e^{-V_{DS}/V_t}) \int_{x_{min}}^{t_{si}} \exp\left(\frac{\phi_{min}(x)}{V_t}\right) dx \quad (3)$$

여기서 W 는 채널폭, V_t 는 열전압, μ_n 은 전자이동도, n_i 는 순수반도체의 전자농도, V_{DS} 는 드레인전압, $\phi_{min}(x)$ 는 표면전위 ϕ_s 가 최소가 되는 y 점에서의 x 방향 전위분포이다. 또한 N_p 는 포아송방정식을 풀 때 사용하는 도핑분포함수 $n(x)$ 에 나타나는 이온주입 시도즈량에 의하여 결정되는 최대 도핑분포 값이다. 즉, 포아송방정식을 풀 때 다음과 같은 가우스 함수를 이용하였다.

$$n(x) = N_p \exp\left(-\left\{\frac{x - R_p}{\sqrt{2}\sigma_p}\right\}^2\right) \quad (4)$$

여기서 R_p 와 σ_p 는 각각 이온주입범위 및 분포편차를 나타낸다. $n(x)$ 는 채널 내 두께방향 즉, 깊이방향으로의 불순물원자 분포함수로서 y 와 z 방향으로는 일정하게 분포되며 단지 x 방향으로만 변화한다고 가정하였다. 식(2)와 식(3)을 풀면 다음과 같은 해석학적 차단전류 모델을 구할 수 있다.

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

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

여기서 ϕ_s^f 는 상단 게이트단자와 접하는 표면전위중 $y = y_{min}$ 일 때의 전위이며 ϕ_s^b 는 하단 게이트단자와 접

하는 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. 그러므로 상단전류 I_{off}^f 와 하단전류 I_{off}^b 는 총 차단전류에서 차지하는 비율이 변화하게 된다. 본 연구에서는 이와 같이 이온주입범위 및 분포편차에 따라 변화하는 상하단 차단전류와 각각에 대한 총 차단전류에 대한 비를 고찰하였다.

III. 차단전류에 대한 결과 고찰

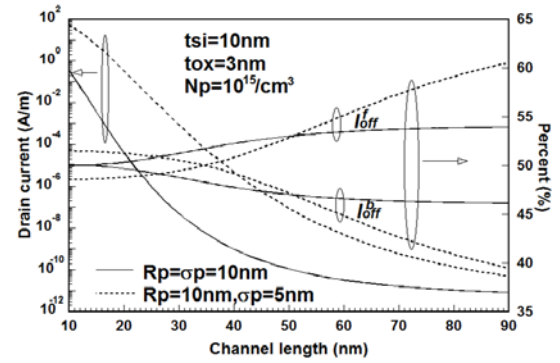


그림 2. 채널길이에 따른 문턱전압이하 전류 및 상단전류와 하단전류의 분포 변화

Fig. 2 The deviation of subthreshold current for channel length and distribution for top and bottom current

식 (5)와 식(6)의 문턱전압이하 전류모델의 타당성은 기존에 발표된 논문[6]에서 이미 언급하였으므로 이 절에서는 채널크기 변화에 대하여 고찰하였다. 그림 2에 채널길이 변화에 대한 문턱전압이하 전류의 변화를 도시하였다. 상단전류 I_{off}^f 와 하단전류 I_{off}^b 의 변화를 채널길이 변화 및 가우스함수의 파라미터인 이온주입범위 그리고 분포편차의 변화에 대하여 도시하였다. 단채널 효과에 의하여 채널길이가 감소할수록 문턱전압이하 전류는 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 채널길이 증가하면, 대칭적인 구조이지만 가우스함수분포에 의한 전하분포에 따라 상단전류가 하단전류보다 문턱전압이하 전류에 대한 구성비가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 이는 이온주입범위 및 분포편차의 변화에

따라 크게 변화하였다. 즉, $R_p = \sigma_p = 10 \text{ nm}$ 인 경우는 채널길이가 약 10 nm 정도에서 상단전류의 구성비와 하단전류 구성비가 거의 동일하며 약 45 nm 정도 이상의 채널길이에선 구성비가 거의 일정하게 유지되고 있다는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 이온주입범위는 일정하게 유지하면서 단지 분포편차를 감소시켜 전하분포의 모양을 변화시키면 즉, $\sigma_p = 5 \text{ nm}$ 로 감소시키면 채널길이가 약 35 nm 이하에선 오히려 하단전류의 구성비가 상단전류의 구성비보다 크게 유지되다가 35 nm 이상의 채널길이에서 상단전류의 구성비가 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이와 같이 상하단 전류의 구성비는 전하분포함수인 가우스함수의 모양에 따라 크게 변화하였다. 문턱전압이하 전류도 가우스함수의 모양에 영향을 받아 $\sigma_p = 5 \text{ nm}$ 로 분포편차가 감소하면 증가추세를 보이고 있었다. 그러나 채널길이가 증가하면 증가분이 감소하여 가우스함수의 모양에 영향을 덜 받는 것을 알 수 있었다.

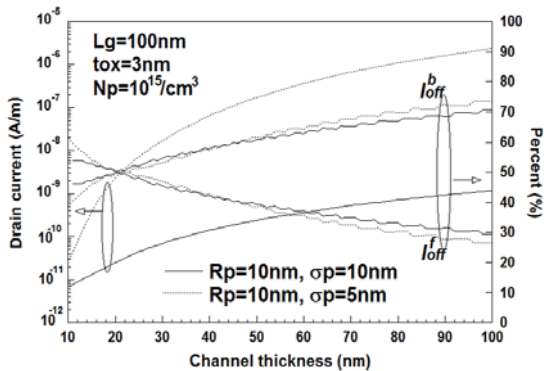


그림 3. 채널두께에 따른 문턱전압이하 전류 및 상단전류와 하단전류의 분포 변화

Fig. 3 The deviation of subthreshold current for channel thickness and distribution for top and bottom current

채널두께의 변화에 대한 문턱전압이하 전류의 변화를 고찰하기 위하여 그림 3에 채널길이가 100 nm 일 때의 결과를 도시하였다. 그림 2의 결과와는 달리 채널두께가 증가할수록 하단전류의 구성비가 증가하고 있었다. 그러나 채널 두께가 약 20 nm 이하에선 상단전류의 구성비가 더욱 크게 분포하였다. 가우스함수의 모양을 결정하는 이온주입범위 및 분포편차의 변화에 대하여 고찰해 보면 상하단전류의 구성비의 경우, 가우스함수

의 모양에 따른 변화는 거의 나타나지 않았다. 그러나 분포편차가 10 nm에서 5 nm로 감소할 경우, 문턱전압 이하 전류는 채널두께가 증가할수록 크게 증가하고 있다는 것을 알 수 있었으며 이 때 문턱전압이하 전류의 차는 채널두께가 감소할수록 일정하게 유지되다가 채널두께가 상하단전류의 구성비가 역전되는 20 nm 이하로 감소하면 차가 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있었다.

채널두께 및 채널길이에 대한 문턱전압이하 전류의 변화를 고찰하기 위하여 그림 4에 문턱전압이하 전류의 승수변화에 대한 등고선 그래프를 도시하였다. 채널길이가 짧아지면 단채널효과에 의하여 문턱전압이하 전류가 급격히 상승하고 있다는 것을 관찰할 수 있다. 일반적으로 채널두께보다 채널길이를 길게 제작하므로 채널길이가 채널두께보다 길 경우, 상대적으로 문턱전압이하 전류가 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 채널길이가 채널두께보다 매우 길어지면 문턱전압이하 전류는 매우 작아지나 상대적으로 이중게이트 MOSFET의 크기가 커지는 문제가 있다. 그러므로 채널길이와 채널두께의 결정은 문턱전압이하 전류의 관점에서 볼 때 매우 민감한 사항이다.

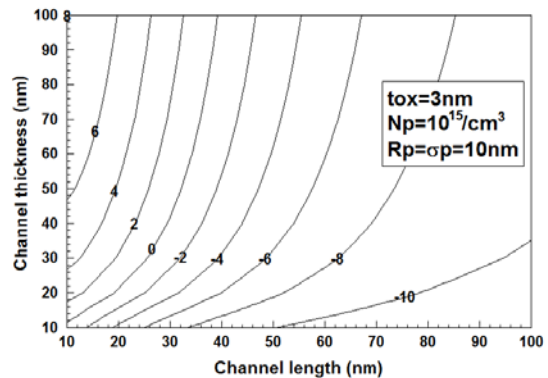


그림 4. 채널두께 및 채널길이에 따른 문턱전압이하 전류의 승수에 대한 등고선

Fig. 4 The contours of the power of subthreshold current for channel length and thickness

가우스함수의 변수인 이온주입 범위 및 분포편차의 변화에 대한 문턱전압이하 전류의 변화를 관찰하기 위하여 그림 5와 그림 6에 이온주입 범위 및 분포편차를 5 nm로 변화시킨 문턱전압이하 전류의 변화를 도시하였

다. 이온주입범위를 변화시킨 그림 5와 그림 4를 비교해 보면 동일한 채널길이에 채널두께를 가진 경우, 이온주입 범위가 감소하면 문턱전압이하 전류의 크기가 상대적으로 감소하고 있다는 것을 알 수 있다.

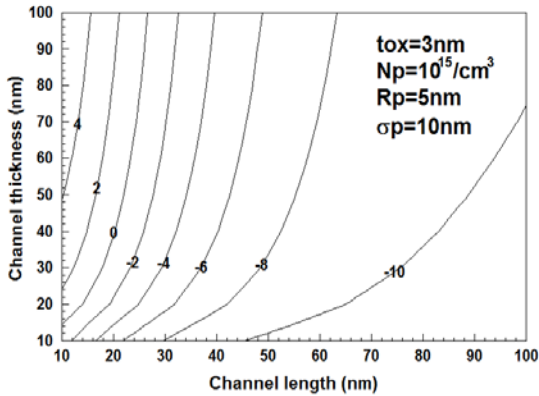


그림 5. 이온주입 범위가 5 nm로 감소한 경우, 채널두께 및 채널길이에 따른 문턱전압이하 전류의 승수에 대한 등고선
Fig. 5 The contours of the power of subthreshold current for channel length and thickness in the case of decreasing with 5 nm of projected range

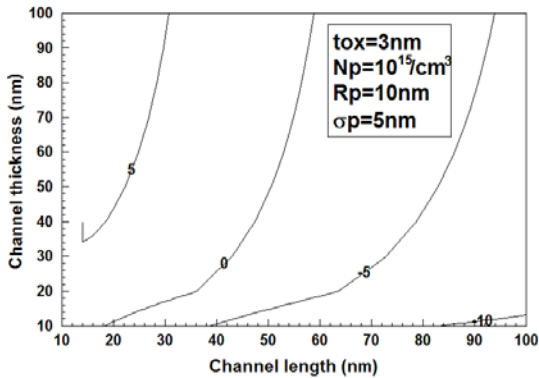


그림 6. 분포편차가 5 nm로 감소한 경우, 채널두께 및 채널길이에 따른 문턱전압이하 전류의 승수에 대한 등고선
Fig. 6 The contours of the power of subthreshold current for channel length and thickness in the case of decreasing with 5 nm of standard projected deviation

그러나 감소 정도는 매우 미미하여 이온주입 범위의 변화에 대한 문턱전압이하 전류의 변화는 거의 무시할 수 있을 정도라는 것을 알 수 있다. 그림 4와 동일하게 채널두께가 작을 경우 채널길이에 따른 문턱전압이하

전류의 변화가 더욱 크게 나타나며 채널두께가 클 경우, 상대적으로 채널길이 증가에 따른 문턱전압이하 전류의 변화가 완만하게 나타나고 있다는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 변화정도는 채널길이가 길 경우, 이온주입 범위가 작은 그림 5의 경우가 더욱 완만하게 나타나고 있다.

문턱전압이하 전류의 분포편차에 대한 변화를 고찰하기 위하여 그림 6에 분포편차를 5 nm로 감소한 경우, 문턱전압이하 전류의 변화를 도시하였다. 그림 2와 그림 3에서 관찰한 바와 같이 분포편차가 감소하면 문턱전압이하 전류가 크게 증가하고 있다는 것을 알 수 있었다. 특히 채널길이가 길고 채널두께가 두꺼울 경우, 문턱전압이하 전류의 증가가 더욱 심각하게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 분포편차가 5 nm로 감소한 경우, 그림 4와 비교해 보면 10^{-10} A/m 이하의 우수한 문턱전압이하 전류를 나타내기 위해서 채널길이는 80 nm 이상 이어야하며 채널두께는 15 nm이하여야만 한다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 분포편차가 작아지면 채널두께가 현저히 작아져야만 문턱전압이하 전류특성이 우수하다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 이중게이트 MOSFET의 채널크기 변화 및 전하분포의 변화에 따른 문턱전압이하 전류의 변화를 분석하였다. 나노소자인 이중게이트 MOS FET에 대한 정확한 해석학적 분석을 위하여 전위분포는 포아송방정식을 이용하여 구하였으며 이때 전하분포함수에 대하여 가우시안 함수를 사용하였다. 가우시안 함수의 변수인 이온주입범위 및 분포편차 그리고 채널크기 등에 대하여 문턱전압이하 전류 특성의 변화를 관찰하였다.

결과적으로 문턱전압이하 전류는 채널길이 및 채널두께의 변화에 크게 영향을 받으며 채널길이가 증가할수록 그리고 채널두께가 감소할수록 감소하는 것을 알 수 있었다. 전하분포의 변화에 대한 문턱전압이하 전류의 변화를 고찰해본 결과 분포편차가 감소할수록 문턱전압이하 전류는 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러므로 분포편차가 5 nm정도로 감소하였을 경우 시뮬레이션 조건에서 문턱전압이하 전류가 10^{-10} A/m 이하정도

로 우수한 값을 갖기 위해선 채널두께는 15 nm이하로 매우 작아져야하는 문제점을 나타냈다. 상대적으로 이온주입 범위의 변화는 문턱전압이하 전류값에 그리 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 상-하단전류의 구성비 또한 채널크기 및 이온주입 범위 그리고 분포편차에 따라 크게 변화하였다. 이와 같이 문턱전압이하 전류는 채널의 크기변화 및 전하분포함수의 모양에 따라 크게 변화하므로 이중게이트 MOSFET 설계 시 주의하여야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] A.J.Garcia-Loureiro, N.Seoane, M.Aldegunde and R.Valin, "Implementation of the Density Gradient Quantum Corrections for 3-D Simulations of Multigate Nanoscaled Transistors," *IEEE Trans. on CAD of IC and Systems*, vol.30, no.6, pp.841-851, 2011.
- [2] D.Munteanu and J.Autan, "3-D Simulation Analysis of Bipolar Amplification in Planar Double-Gate and FinFET With Independent Gates," *IEEE Trans. on Nuclear Science*, , vol.56, no.4, pp.2083-2090, 2009.
- [3] S.G.Kwon, J.W.Han and Y.K.Choi, "A Bendable-Channel FinFET for Logic Application," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.31, no.6, pp.624-626, 2010.
- [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] G.Zhang, Z.Shao and K.Zhou, "Threshold voltage model for short channel FD-SOI MOSFETs with vertical Gaussian profile," *IEEE Trans. Electron Device*, vol.55, no.3, pp.803-809, 2008.
- [6] H.K.Jung, "Analysis of Subthreshold Current Deviation for Channel Doping of Double Gate MOSFET," *Journal of KIICE*, vol.17, no.6, pp.1409-1413, 2013.
- [7] 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.



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
 2014.1-현재 한국정보통신학회 회장
 ※관심분야 : 반도체소자 시뮬레이션, 몬테칼로 시뮬레이션, 회로및 시스템 해석 등