
이중게이트 MOSFET의 채널구조에 따른 항복전압 변화

정חק기*

Breakdown Voltages Deviation for Channel Dimension of Double Gate MOSFET

Hakkee Jung*

요 약

본 연구에서는 이중게이트 MOSFET의 채널크기 변화에 따른 항복전압의 변화를 분석하였다. 차세대 나노소자인 DGMOSFET에 대한 단채널효과 중 매우 작은 값을 갖는 항복전압은 정확한 분석이 요구되고 있다. 항복전압분석을 위하여 포아송방정식의 분석학적 전위분포를 이용하였으며 이때 전하분포함수에 대하여 가우시안 함수를 사용함으로써 보다 실험값에 가깝게 해석하였다. 가우시안 함수의 변수인 이온주입범위 및 분포편차 그리고 소자 파라미터인 채널의 두께, 도핑농도 등에 대하여 항복전압 특성의 변화를 관찰하였다. 본 연구의 모델에 대한 타당성은 이미 기존에 발표된 논문에서 입증하였으며 본 연구에서는 이 모델을 이용하여 항복전압특성을 분석할 것이다. 분석결과 항복전압은 소자파라미터 및 가우시안분포함수의 모양에 크게 영향을 받는 것을 관찰할 수 있었다.

ABSTRACT

This paper have analyzed the change of breakdown voltage for channel dimension of double gate(DG) MOSFET. The breakdown voltage to have the small value among the short channel effects of DGMOSFET to be next-generation devices have to be precisely analyzed. The analytical solution of Poisson's equation have been used to analyze the breakdown voltage, and Gaussian function been used as carrier distribution to analyze closely for experimental results. The breakdown voltages have been analyzed for device parameters such as channel thickness and doping concentration, and projected range and standard projected deviation of Gaussian function. Since this potential model has been verified in the previous papers, we have used this model to analyze the breakdown voltage. As a result, we know the breakdown voltage is influenced on Gaussian function and device parameters for DGMOSFET.

키워드

DGMOSFET, 항복전압, 가우시안 분포, 단채널효과, 포아송방정식, 채널크기

Key word

DGMOSFET, breakdown voltage, Gaussian function, short channel effect, Poisson equation, channel dimension

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

접수일자 : 2012. 11. 12

심사완료일자 : 2012. 12. 07

I. 서 론

집적회로의 미세화에 부응하여 트랜지스터의 크기도 최소화되고 있다. 기존의 CMOSFET 구조는 10 nm 이하의 채널 길이로 제작하기 위해선 심각한 단채널 효과 문제를 해결하여야만 한다. 채널길이의 감소는 전류량의 증가, 입력커패시턴스의 감소, 스위칭주파수의 증가 및 셀면적의 감소 등과 같은 중요한 출력효과를 나타내는 반면, 문턱전압의 이동, 드레인 유도장벽감소, 문턱전압이하 스윙특성 저하 및 항복전압특성 저하 등과 같은 심각한 단점도 나타내고 있다. 이러한 단점 중 항복전압특성의 저하는 트랜지스터의 동작범위를 축소시켜 집적회로의 오동작을 유도할 수 있는 매우 심각한 단채널효과이다. 단채널효과를 해결하기 위한 트랜지스터구조의 변경에 대한 연구 결과, 다중게이트 MOSFET는 미래 CMOSFET를 대체할 가장 각광받는 소자로 떠오르고 있다[1].

다중게이트 MOSFET는 기존의 CMOSFET와는 달리 게이트를 두 개 이상 제작하여 게이트의 전류제어능력을 향상시키고 채널길이 감소에 의하여 발생하는 단채널 효과를 감소시킬 수 있다[2]. 또한 다중게이트 MOSFET의 경우 채널 내 도핑을 감소시켜 완전공핍영역(fully depleted region)을 구현할 수 있을 뿐만 아니라 불순물 산란을 거의 제거할 수 있으므로 궁극적으로 스위칭속도를 크게 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 다중게이트의 구조적인 특성에 의하여 FinFET[3], 이중게이트(Double Gate) MOSFET[4] 등으로 구분되며 이중게이트 MOSFET는 간단한 구조로 제작할 수 있어 더욱 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 이중게이트 MOSFET에서 채널구조에 따른 항복전압의 변화를 관찰함으로써 이중게이트 MOSFET의 집적회로 사용에 기틀을 마련하고자 한다.

이를 위하여 Tiwari 등의 포아송방정식의 해석학적 모델[5]과 Fulop의 애벌런치 항복조건[6]을 이용할 것이다. Tiwari 등의 모델에서는 도핑분포함수로 가우시안분포함수를 사용함으로써 전위분포 및 문턱전압 등에 대하여 실험값에 근사한 값을 유도하였다. 또한 이에 대한 타당성은 이미 발표한 논문에서 입증하였다[7]. Fulop의 항복조건을 이용한 이중게이트 MOSFET에 대한 해석도 기존의 논문에서 타당성이 입증된 바

있다[8].

본 연구에서는 이미 발표된 논문에서 다루지 않았던 채널길이와 채널두께에 대한 항복전압의 등고선 그래프를 관찰함으로써 채널구조에 대한 항복전압의 변화를 보다 상세히 고찰하였다.

2장에서는 포아송방정식의 해석학적 모델 및 애벌런치 항복조건에 대하여 설명할 것이며 3장에서 이 모델을 적용하였을 경우, 항복전압의 변화를 고찰 할 것이다. 또한 4장에서 결론을 맺을 것이다.

II. 전위모델 및 항복조건

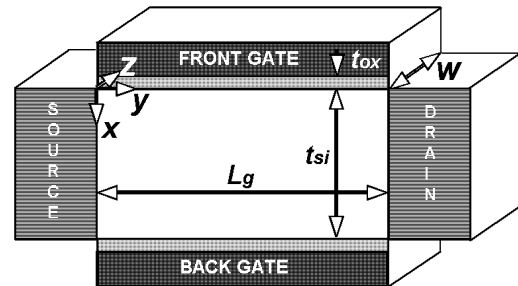


그림 1. DG MOSFET의 개략도
Fig. 1 Schematic view of DG MOSFET

그림 1은 이 논문에서 사용한 DG MOSFET의 개략도이다. 이 구조의 x, y, z방향에 대한 포텐셜 분포를 구하기 위하여 포아송방정식을 이용하였다.

$$\nabla^2 \Psi = qn(x)/\epsilon_{Si} \quad (1)$$

여기서 $n(x)$ 는 채널 내 도핑농도이며 ϵ_{Si} 는 실리콘의 유전율이다. z방향의 전위분포변화는 무시할 수 있을 정도이므로 x와 y방향에 대해서 전위분포를 해석하였으며 이때 전위분포는 다음과 같은 가우스 함수를 이용하였다.

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

여기서 N_p 는 이온주입 시 도즈 량에 의하여 결정되는 최대 도핑 분포값이며 R_p 와 σ_p 는 각각 이온주입의 범위 및 분포편차를 나타낸다. 식 (1)과 (2)를 풀기 위하여 Tiwari 등의 전개방법[5]을 이용하면 표면전위분포 ϕ_s 를 구할 수 있다.

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

여기서 B, λ, F, G 는 참고문헌[5]에 표시되어 있으며 V_G 는 게이트인가전압, V_{fb} 는 평탄전압이다. 항복전압을 구하기 위하여 Fulop의 항복조건[6]을 이용하였다. Fulop의 항복조건은 다음과 같다.

$$1.8 \times 10^{-35} \int_0^{L_g} \left(-\frac{d\phi_s}{dy} \right)^7 dy = 1 \quad (4)$$

식 (4)를 만족하는 드레인 전압을 구하여 항복전압으로 정의함으로써 항복전압을 구할 수 있다. 본 연구에서는 식(4)를 풀기 위하여 Simpson의 법칙을 이용하였다.

III. 항복전압에 대한 결과고찰

그림 2(a)(b)에 채널길이와 채널두께를 변화시키면서 계산한 항복전압을 도시하였다. 이온주입범위 및 분포편차는 5 nm로 동일한 값을 사용하였으며 도핑농도가 $10^{15} / cm^3$ 일 때 게이트산화막 두께에 따른 변화를 관찰하기 위하여 5 nm일 때와 3 nm일 때를 비교하였다. 게이트 산화막 두께가 3 nm일 때는 채널길이가 증가하거나 채널두께가 감소할 때 항복전압이 크게 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 게이트산화막 두께가 5 m 까지 증가하면 전체적으로 항복전압은 증가하나 증가 추세는 변화하는 것을 알 수 있다. 즉, 3 nm와 비교하면 채널두께가 감소하면 항복전압은 감소하나 채널길이가 증가한 다고해서 반드시 항복전압이 증가하진 않는다는 것을 관찰할 수 있다.

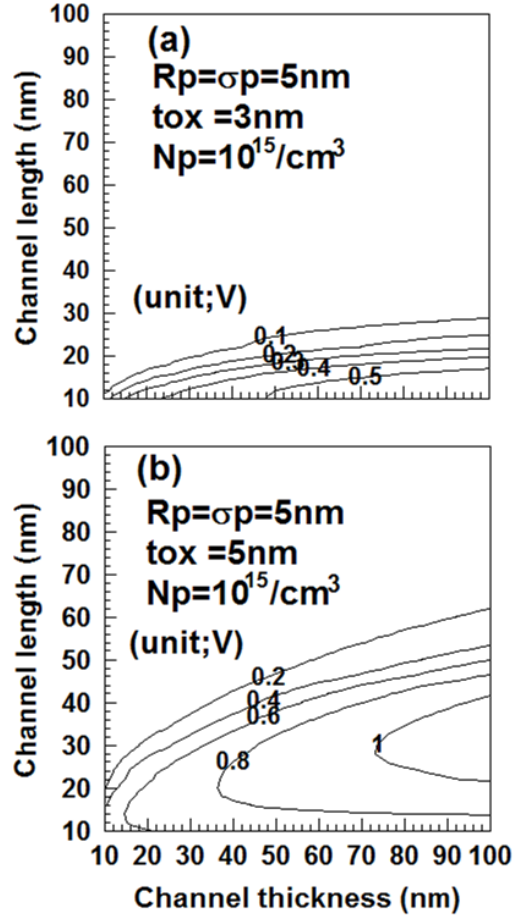


그림 2. 채널길이와 채널두께의 변화에 따른 항복전압의 변화 (a) 게이트산화막두께가 3 nm일 때 (b) 게이트산화막두께가 5 nm일 때
Fig. 2 Deviation of breakdown voltage for channel length and channel thickness in case of gate oxide thickness of (a) 3 nm and (b) 5 nm

이와 같이 게이트산화막 두께를 파라미터로 한 채널 길이 및 채널두께에 따른 항복전압의 변화는 매우 상이하다는 것을 알 수 있었다.

채널도핑의 변화가 항복전압에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 도핑농도를 파라미터로 하여 채널길이 및 채널두께를 변화시키면서 계산한 항복전압의 분포를 그림 3에 도시하였다.

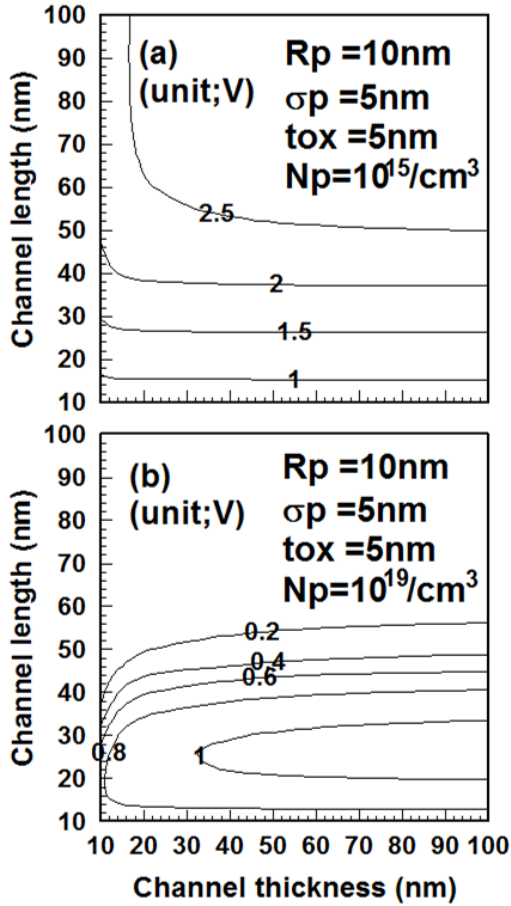


그림 3. 채널길이와 채널두께의 변화에 따른 항복전압의 변화 (a)도핑농도가 $10^{15} / \text{cm}^3$ 일 때 (b) 도핑농도가 $10^{19} / \text{cm}^3$ 일 때
 Fig. 3 Deviation of breakdown voltage for channel length and channel thickness in case of channel doping concentration of (a) $10^{15} / \text{cm}^3$ and (b) $10^{19} / \text{cm}^3$

도핑농도가 증가하면 항복전압의 절대값이 크게 감소하는 것을 알 수 있었다. 채널도핑농도가 비교적 작을 경우는 채널두께가 20 nm 이상에서는 거의 일정한 항복전압을 보이며 단지 채널길이에 따라 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 도핑농도가 증가하면 항복전압이 급격히 감소하면서 변화패턴도 크게 변화하였다. 그림 3(b)의 변화패턴은 그림 2(b)와 거의 유사하

었다. 그러나 채널두께의 변화에 따라 항복전압은 크게 변화하지 않았으며 단지 채널길이에 따라 항복전압이 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 이와 같이 항복전압은 채널도핑농도의 변화에 따라 채널길이 및 채널두께 변화에 따른 항복전압의 변화패턴은 매우 상이함을 알 수 있었다.

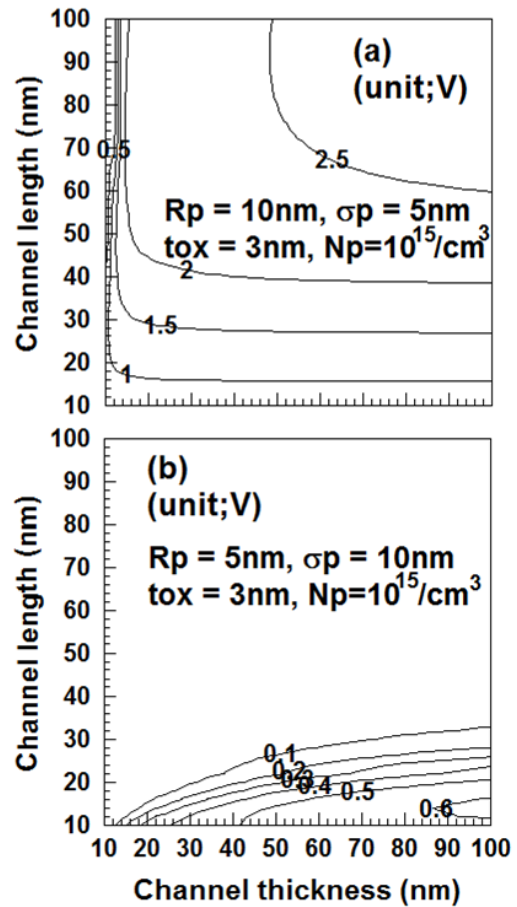


그림 4. 채널길이와 채널두께의 변화에 따른 항복전압의 변화 (a)이온주입범위 10 nm, 분포편차 5 nm일 때 (b) 이온주입범위 5 nm, 분포편차 10 nm일 때
 Fig. 4 Deviation of breakdown voltage for channel length and channel thickness in case of (a) projected range of 10 nm and standard projected range of 5 nm and (b) projected range of 5 nm and standard projected range of 10 nm

항복전압의 변화는 채널도핑분포함수에 따라서도 크게 변화하였다. 그림 2(b)와 그림 3(a)는 단지 이온주입 범위만 다른 경우이다. 이온주입범위가 5 nm에서 10 nm로 증가하면 항복전압이 크게 증가하면서 채널길이 및 채널두께의 변화에 따른 항복전압의 변화패턴도 크게 변화하는 것을 알 수 있었다. 이온주입범위는 채널도핑시 이온이 주입된 평균거리로 볼 수 있으므로 이온주입을 채널의 중심으로 더욱 깊게 주입시키면 항복전압을 증가시킬 수 있다고 사료된다.

채널도핑함수에 대한 고찰을 좀더 상세히 하기 위하여 그림 4에 이온주입범위 및 분포편차의 변화에 따라 게이트산화막 두께가 3 nm일 때 항복전압의 변화를 도시하였다. 그림 2(a)와 그림 4(a)의 비교는 그림 2(b)와 그림 3(a)비교에서도 언급한 바와 같이 이온주입범위 증가에 대한 항복전압의 증가현상을 관찰할 수 있다. 여기서 산화막두께가 감소하여도 유사한 결과를 관찰할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그림 2(a)와 그림 2(b)에서도 설명한 바와 같이 산화막두께가 증가하면 항복전압의 등고선분포가 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 분포도를 관찰해 보면 이온주입범위가 10 nm 정도로 증가하면 채널두께가 상대적으로 작을 때는 채널길이보다 채널두께의 변화에 따라 항복전압이 크게 변화하였으며 채널두께가 증가하면 채널길이에 대하여 항복전압이 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 그림 2(a)와 그림 4(b)는 단지 분포편차만 다른 경우이다. 이온주입범위가 5 nm에서 분포편차가 증가하면 참고문헌[8]에서도 언급한 바와 같이 항복전압분포가 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 증가분은 이온주입범위의 증가에 따른 변화보다 매우 미미하다는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 이중게이트 MOSFET의 채널크기 및 도핑분포 변화에 따른 항복전압의 변화를 분석하였다. DG MOSFET에 대한 단채널 효과 중 항복전압은 정확한 분석이 요구된다. 이를 위하여 포아송방정식의 해석학적 전위분포를 이용하였으며 이때 전하분포함수에 대하여 가우시안 함수를 사용하였다. 가우시안 함수의 변수인 이온주입범위 및 분포편차 그리고 소자 파라미터인 채널의 두께, 채널길이 및 도핑농도 등에 대하여 항

복전압 특성의 변화를 관찰하였다.

결과적으로 게이트산화막 두께를 파라미터로 한 채널길이 및 채널두께에 따른 항복전압의 등고선 변화는 크게 다르다는 것을 알 수 있었다. 그러나 산화막두께가 증가할수록 항복전압의 등고선분포가 전반적으로 상승하고 있는 것을 관찰하였다.

항복전압은 채널도핑농도를 파라미터로 한 채널길이 및 채널두께변화에 따른 항복전압의 변화패턴은 매우 상이함을 알 수 있었으며 도핑분포함수 중 10 nm 이하의 분포편차 및 이온주입범위에서 분포편차보다 이온주입범위가 변화할 때 항복전압분포가 크게 변화한다는 것을 관찰하였다. 또한 채널두께가 상대적으로 작을 때는 채널길이보다 채널두께에 따라 항복전압이 크게 변화하였으며 채널두께가 증가하면 채널두께보다 채널길이에 따라 항복전압이 크게 변화하는 것을 알았다. 이와 같이 항복전압의 변화는 채널크기 및 도핑분포 등에 따라서 크게 변화하므로 이중게이트 MOSFET의 항복전압설계 시 이와 같은 사항을 고려하여야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] A. J. Garcia, N. Seoane, M. Aldegunde and R. Valin, "Implementation of the Density Gradient Quantum Correction for 3-D Simulations of Multigate Nanoscaled Transistors," IEEE Trans. CAD of IC and Systems, Vol. 30, No. 6, pp. 841-851, 2011.
- [3] D. S. Havaldar, 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, pp. 737-741, 2006.
- [4] P. K. Thakur and S. Mahapatra, "Large-Signal Model for Independent DG MOSFET," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 58, No. 1, pp. 46-52, 2011.
- [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] W. Fulop, "Calculation of Avalanche Breakdown Voltages of Silicon p-n Junctions," Solid-State Electronics, Vol. 10, pp. 39-43, 1967.
- [7] H. K. Jung, "Subthreshold Characteristics of Double Gate MOSFET for Gaussian Function Distribution," J. KIICE, Vol. 16, No. 6, pp. 1260-1265, 2012.
- [8] H. K. Jung, "The Analysis of Breakdown Voltage for the Double-gate MOSFET Using the Gaussian Doping Distribution," J. Inf. Commun. Converg. Eng., Vol. 10, No. 2, pp. 200-204, 2012.

저자소개



정 학 기 (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
2013.1-현재 한국정보통신학회 수석부회장
※ 관심분야: 반도체소자 시뮬레이션, 몬테칼로
시뮬레이션, 회로 및 시스템 해석 등