

---

# 이차원 전위분포모델을 이용한 이중게이트 MOSFET의 항복전압 분석

정חק기\*

Analysis of Breakdown Voltages of Double Gate MOSFET Using 2D Potential Model

Hakkee Jung\*

## 요 약

본 연구에서는 이중게이트 MOSFET에 대한 항복전압의 변화를 채널도핑 및 소자파라미터에 따라 이차원 전위 분포모델을 이용하여 분석한 것이다. 낮은 항복전압은 전력소자동작에 저해가 되고 있으며 소자의 크기가 감소하면서 발생하는 단채널 효과에 의하여 이중게이트 MOSFET의 경우도 심각하게 항복전압이 감소하고 있다. 항복전압 분석을 위하여 포아송방정식의 이차원 해석학적 전위분포모델을 이용하여 채널도핑농도와 소자 파라미터인 채널길이, 채널두께, 게이트산화막 두께 등에 대하여 항복전압의 변화를 관찰하였다. 분석결과 항복전압은 채널도핑농도의 크기뿐만 아니라 소자크기 파라미터에 대해서 커다란 변화를 보이고 있었으며 특히 채널도핑함수인 가우시안 함수의 형태에 따라서도 큰 변화를 보이고 있다는 것을 관찰할 수 있었다.

## ABSTRACT

This paper have analyzed the change of breakdown voltage for channel doping concentration and device parameters of double gate(DG) MOSFET using two dimensional potential model. The low breakdown voltage becomes the obstacle of power device operation, and breakdown voltage decreases seriously by the short channel effects derived from scaled down device in the case of DGMOSFET. The two dimensional analytical potential distribution derived from Poisson's equation have been used to analyze the breakdown voltage for device parameters such as channel length, channel thickness, gate oxide thickness and channel doping concentration. Resultly, we could observe the breakdown voltage has greatly influenced on device dimensional parameters as well as channel doping concentration, especially the shape of Gaussian function used as channel doping concentration.

## 키워드

DGMOSFET, 소자파라미터, 항복전압, 단채널효과, 채널크기

## Key word

DGMOSFET, device parameter, breakdown voltage, short channel effect, channel dimension

---

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

접수일자 : 2013. 01. 09

심사완료일자 : 2013. 02. 08

## I. 서 론

올해 가장 치열한 경쟁을 벌이고 있는 IT업계는 모바일분야라고 할 수 있다. 모바일분야는 크게 스마트폰, 태블릿 PC 및 이에 적용 가능한 소프트웨어 산업 등을 지칭한다. 모바일분야에서 가장 중요한 것은 휴대성이다. 휴대성을 위하여 각 메이저 스마트폰 사업자들은 화면 크기를 크게 하면서도 휴대하기 쉽게 제작하려고 노력하고 있다.

스마트폰의 구성 중 모바일 CPU는 수년전부터 켈컴의 스냅드래곤을 중심으로 개발되어 오늘날 쿼드코어를 중심으로 상업화하기에 이르렀다. 이와 같이 모바일 산업에서 중요한 휴대성에 부응하기 위하여 집적회로는 데이터처리능력은 향상시켜면서 크기를 줄여야하는 문제에 접근하게 된다. 집적회로 크기 감소에 대한 연구는 개별소자인 트랜지스터 크기 감소에 대한 연구로 이어지며 트랜지스터 크기 감소 시 발생하는 단채널 효과에 관심이 집중되고 있다.

올해 20-30 nm 공정을 이용하여 칩을 생산하고 있지만 크기는 향후 더욱 작아질 것이다. 이와 같이 트랜지스터의 크기가 감소하면 기존의 CMOSFET를 이용하여 집적회로를 제작할 때 발생하는 문턱전압의 이동, 드레인 유도장벽감소, 문턱전압이하 스윙특성 저하 및 항복전압특성 저하 등과 같은 심각한 단채널 효과[1]가 집적회로 특성을 저하시켜 크기감소의 한계에 도달할 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 개발된 소자가 다중게이트 MOSFET 소자이다.

다중게이트 MOSFET 소자는 여러 개의 게이트를 채널 주변에 배치하여 채널 내 전자/정공의 제어능력을 향상시키고 전류밀도를 배가시키는데 목적이 있다. 그러나 다중게이트 MOSFET를 제작하기는 매우 어려운 공정상의 문제가 있으며 이를 위하여 공정이 비교적 쉬운 이중게이트(Double Gate; DG) MOSFET[2]와 채널을 지느러미처럼 가늘고 길게 제작하는 FinFET[3] 형태로 개발되었다.

이 가운데 이중게이트 MOSFET는 비교적 제작이 용이하여 가장 많이 연구, 개발되고 있는 대표적인 다중게이트 MOSFET이다. 이는 단채널 효과를 해결하기 위하여 게이트를 상하 두 개로 제작하여 게이트의 전류 제어능력을 약 2배 정도 향상시켜 채널길이 감소에 의한

단채널 효과를 근본적으로 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 특히 DGMOSFET의 경우 채널로 순수반도체 또는 저도핑반도체를 사용함으로써 불순물 산란을 거의 제거할 수 있으므로 동작속도를 크게 향상시킬 수 있다. 단채널 효과 중 전력트랜지스터의 동작범위를 제한하고 오동작을 유도하는 항복전압특성의 저하는 매우 심각한 단채널 효과이다.

이에 본 연구에서는 DGMOSFET에서 채널구조 및 채널도핑농도가 항복전압에 미치는 영향을 관찰함으로써 DGMOSFET를 이용한 집적회로설계의 기본자료를 마련하고자 한다. 이를 위하여 Tiwari 등의 포아송방정식의 해석학적 모델[4]과 Fulop의 애벌런치 항복조건[5]을 이용할 것이다. Mohammad 등[6]은 DGMOSFET의 항복전압을 구하기 위하여 전위분포로 이차원 포물선함수를 이용하였으나 본 연구에서는 실험값에 가장 근사한 도핑농도함수인 가우스함수를 이용하여 구한 이차원 전위분포함수를 이용할 것이다.

2장에서는 전위의 이차원 해석학적 모델과 항복조건에 대하여 설명할 것이며 3장에서 이 모델을 적용하였을 경우, 항복전압의 변화를 채널도핑 및 도핑함수의 형태 그리고 채널크기의 변화에 따라 고찰할 것이다. 또한 4장에서 결론을 맺을 것이다.

## II. 전위분포와 항복전압 모델

그림 1은 이 논문에서 사용한 DGMOSFET의 개략도이다.

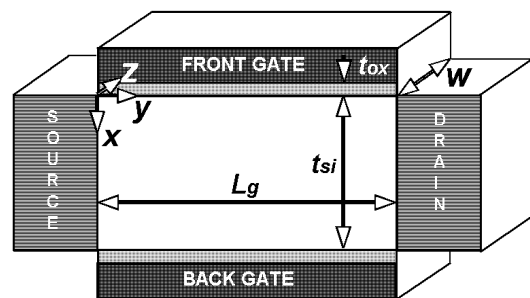


그림 1. DGMOSFET의 개략도  
Fig. 1 Schematic view of DGMOSFET

이 구조의  $z$  방향에 대한 분포는 거의 일정하므로[7] 단지  $x$  와  $y$  방향에 대한 전위분포를 구하기 위하여 다음과 같은 포아송방정의 해를 구한다.

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

여기서  $\epsilon_{si}$ 는 실리콘의 유전율이며  $n(x)$ 는 다음 식으로 주어지는 도핑분포이다.

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

$N_p$ 는 이온주입 시 도즈 량에 의하여 결정되는 최대 도핑분포 값이며  $R_p$ 와  $\sigma_p$ 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 (1)과 식 (2)를 Tiwari의 경계조건 등을 적용하여 풀면 다음과 같은 표면전위분포를 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  $F, G, B, \lambda$  등은 참고문헌[8]에 표기하였다. 또한  $V_G$ 는 게이트전압,  $V_{fb}$ 는 평탄전압을 나타낸다.

식 (3)을 이용하여 항복전압을 구하기 위하여 Fulop의 항복조건[5]을 이용하였다. Fulop의 항복조건은 다음과 같다.

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

식 (4)를 만족하는 드레인 전압을 구하여 항복전압

으로 정의함으로써 항복전압을 구할 수 있다[6]. 드레인 전압은 참고문헌 [4]에서 알 수 있듯이  $F, G$ 의 변수에 포함되어 있다. 본 연구에서는 식 (4)를 풀기 위하여 심슨(Simpson)의 법칙을 이용하였으며 드레인 전압에 대하여 정리하면 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다[9].

$$(A_1 + A_2 V_D)^7 + 4(A_3 + A_4 V_D)^7 + (A_5 + A_6 V_D)^7 + A_7 = 0 \quad (5)$$

여기서 계수  $A_1$ 에서  $A_7$ 는 참고문헌[8]에 표시되어 있다. 식 (5)를 풀기 위하여 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 알고리즘을 이용하였으며, 이는 수치해석학적인 방법 일지라도 매우 신속히 해를 구할 수 있었다.

### III. 항복전압 및 전도중심에 대한 결과고찰

식 (3)과 식 (5)의 타당성 검토는 이미 발표된 논문 [4,5,8,9]에서 수행되었으므로 이 논문에서는 식 (5)를 이용하여 구한 채널도핑농도 및 소자파라미터 그리고 도핑분포함수의 형태 등에 대한 항복전압의 변화에 대하여 분석할 것이다.

먼저 그림 2에 채널도핑농도와 채널길이에 따른 항복전압의 등고선 분포를 도시하였다. 그림 2의 (a), (b) 그리고 (c)는 채널두께 20 nm, 게이트산화막 두께 3 nm인 경우 각각 채널도핑형태의 차이에 의한 항복전압의 등고선 분포도이다. 도핑농도가 증가하면 항복전압이 감소하는 것을 그림 2(a)(b)(c)에서 관찰할 수 있다. 이는 채널도핑의 형태에 관계없이 관찰할 수 있다. 그러나 이온주입범위  $R_p$ 가 분포편차  $\sigma_p$ 보다 클 경우만 비교적 큰 항복전압을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 2(a)에서 알 수 있듯이 채널도핑농도가 약  $10^{18} / \text{cm}^3$ 까지는 거의 일정한 항복전압을 얻을 수 있었으나 도핑농도가 그 이상 증가하면 분포곡선이 크게 변화하며 거의 항복전압이 포화되는 것을 관찰할 수 있다. 채널길이가 매우 작을 때는 단채널 효과에 의하여 항복전압이 크게 감소하는 것[9]을 그림 2(a)에서

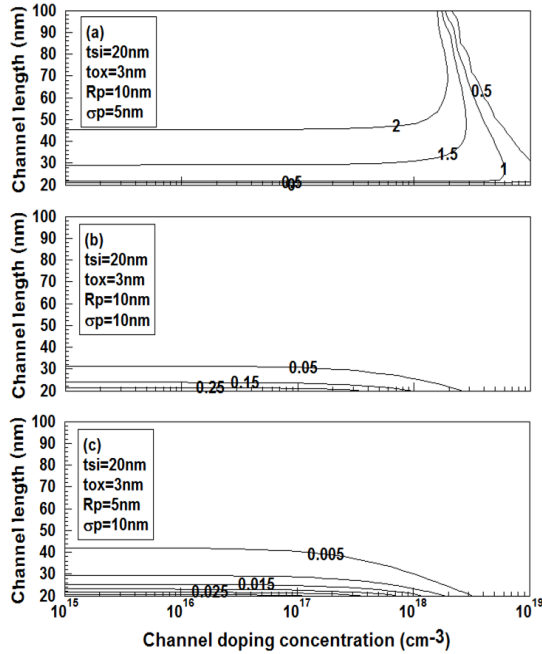


그림 2.  $t_{Si} = 20 \text{ nm}$ 와  $t_{ox} = 3 \text{ nm}$ 일 때 채널 도핑농도와 채널길이에 따른 항복전압의 등고선 곡선 (a)  $R_p = 10 \text{ nm}$ 와  $\sigma_p = 5 \text{ nm}$ 일 때 (b)  $R_p = 10 \text{ nm}$ 와  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$ 일 때 (c)  $R_p = 5 \text{ nm}$ 와  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$ 일 때  
Fig. 2 Contours of breakdown voltage for channel doping concentration and channel length at  $t_{Si} = 20 \text{ nm}$  and  $t_{ox} = 3 \text{ nm}$  in the case of (a)  $R_p = 10 \text{ nm}$  and  $\sigma_p = 5 \text{ nm}$  (b)  $R_p = 10 \text{ nm}$  and  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$  (c)  $R_p = 5 \text{ nm}$  and  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$

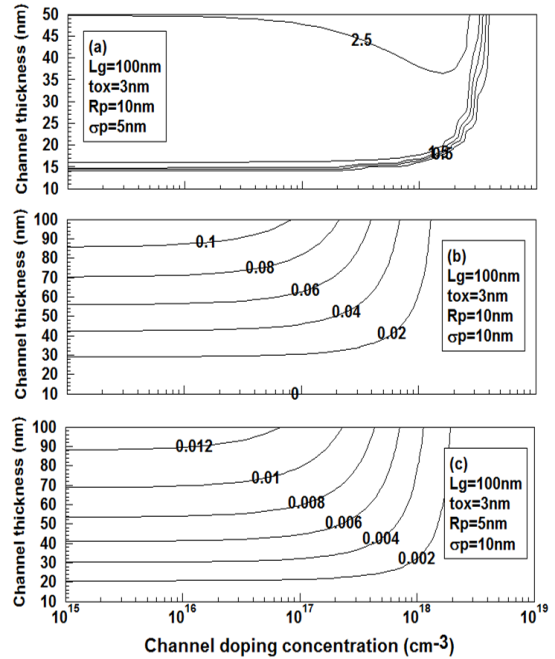


그림 3.  $L_g = 100 \text{ nm}$ 와  $t_{ox} = 3 \text{ nm}$ 일 때 채널 도핑농도와 채널두께에 따른 항복전압의 등고선 곡선 (a)  $R_p = 10 \text{ nm}$ 와  $\sigma_p = 5 \text{ nm}$ 일 때 (b)  $R_p = 10 \text{ nm}$ 와  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$ 일 때 (c)  $R_p = 5 \text{ nm}$ 와  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$ 일 때  
Fig. 3 Contours of breakdown voltage for channel doping concentration and channel thickness at  $L_g = 100 \text{ nm}$  and  $t_{ox} = 3 \text{ nm}$  in the case of (a)  $R_p = 10 \text{ nm}$  and  $\sigma_p = 5 \text{ nm}$  (b)  $R_p = 10 \text{ nm}$  and  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$  (c)  $R_p = 5 \text{ nm}$  and  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$

관찰하였다.

그러나 그림 2(b)와 (c)에서는 채널길이가 감소할 때 약간 항복전압이 증가하나 항복전압이 무시할 수 있을 정도로 매우 작은 값이라 이러한 채널도핑분포에서는 전력트랜지스터로서 제대로 동작할 수 없을 것이다. 이와 같이 채널도핑분포의 형태에 따라 항복전압의 분포는 크게 변화하고 있었다. 결과적으로 그림 2(a)의 조건에서만 트랜지스터로 사용하기 적당한 항복전압을 얻을 수 있었다.

그림 2(a)를 좀더 자세히 관찰해 보면 채널도핑농도가 일정할 때 채널길이가 감소하면 급격히 항복전압감

소 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 이온주입범위가 분포편차보다 큰 조건하에서조차 소자파라미터 및 채널도핑농도를 주의 깊게 조정하여 원하는 항복전압을 얻어야만 할 것이다.

소자파라미터 중 채널두께와 채널도핑농도에 대한 항복전압의 등고선 분포를 관찰하기 위하여 그림 3에 채널길이가 100 nm, 게이트산화막 두께가 3 nm일 때의 결과를 도시하였다. 그림 2와 마찬가지로 이온주입범위 및 분포편차의 변화에 따라 (a)(b)(c)로 나누어 도시하였다.

그림 2에서 언급한 바와 같이 그림 3에서도 마찬가지로

지로 이온주입범위 및 분포편차와 관계없이 채널도핑 농도가 증가하면 항복전압이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 이온주입범위 및 분포편차의 값에 따라 항복전압의 등고선 분포는 매우 상이하다.

즉, 그림 3(a)와 같이 이온주입범위가 분포편차보다 클 경우, 채널도핑농도가 약  $10^{18} / \text{cm}^3$ 까지 항복전압이 거의 일정하다가 더욱 도핑농도가 증가하면 항복전압이 포화되는 것을 알 수 있다. 즉, 채널도핑농도에 따른 변화를 고찰해 보면 항복전압은 저 농도에서는 채널도핑농도에 영향을 받지 않으나 고 농도 도핑의 경우, 도핑농도에 따라 항복전압이 크게 변화하는 것을 관찰할 수 있다.

채널두께가 감소하면 역시 단채널 효과에 의하여 갑자기 항복전압이 감소하는 것을 그림 3(a)에서 알 수 있다. 이온주입범위가 분포편차 보다 작아지는 채널도핑 분포에서는 항복전압의 등고선 분포가 크게 변화하고 있다.

그러나 그림 3(b)와 (c)에서 알 수 있듯이 트랜지스터로 사용하기엔 항복전압이 너무 작다. 그림 3(b)와 (c)를 비교해 보면, 분포편차가 증가할수록 항복전압의 감소 현상이 심화되는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 2에서도 언급한 바와 같이 이온주입범위보다 분포편차가 클 경우, 채널길이가 100 nm로 클지라도 소자파라미터 및 채널도핑농도에 관계없이 항복전압이 매우 작다는 것을 알 수 있다.

게이트산화막 두께와 채널도핑농도의 변화에 대한 항복전압의 등고선 분포를 채널길이 100 nm, 채널두께 20 nm일 때 이온주입범위 및 분포편차에 대하여 그림 4에 도시하였다.

그림 2와 그림 3에서 언급한 바와 같이 그림 4에서도 동일하게 채널도핑농도가 증가할수록 항복전압은 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 채널도핑농도가 저 농도일 경우, 도핑농도와 관계없이 일정한 항복전압을 보이다가 고 농도에서는 게이트산화막 두께에 관계없이 일정한, 즉 포화되는 경향을 보이고 있다. 포화되는 농도는 이온주입범위가 분포편차보다 클 경우 더욱 고 농도에서 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 그림 4(a)(b)(c) 모두 게이트산화막 두께가 감소하면 단채널 효과에 의하여 급격히 항복전압이 감소하고 있다는 것을 알 수 있다.

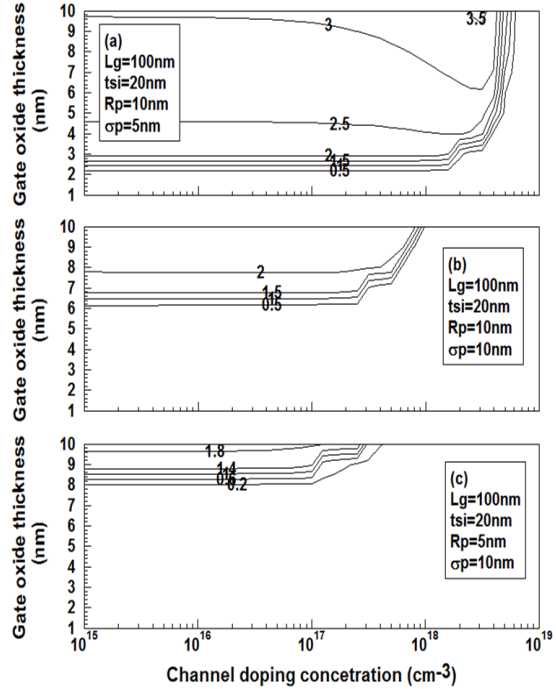


그림 4.  $L_g = 100 \text{ nm}$ 와  $t_{ox} = 3 \text{ nm}$ 일 때 채널도핑농도와 게이트산화막 두께에 따른 항복전압의 등고선 곡선 (a)  $R_p = 10 \text{ nm}$ 와  $\sigma_p = 5 \text{ nm}$ 일 때 (b)  $R_p = 10 \text{ nm}$ 와  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$ 일 때 (c)  $R_p = 5 \text{ nm}$ 와  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$ 일 때

Fig. 4 Contours of breakdown voltage for channel doping concentration and gate oxide thickness at  $L_g = 100 \text{ nm}$  and  $t_{ox} = 3 \text{ nm}$  in the case of (a)  $R_p = 10 \text{ nm}$  and  $\sigma_p = 5 \text{ nm}$  (b)  $R_p = 10 \text{ nm}$  and  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$  (c)  $R_p = 5 \text{ nm}$  and  $\sigma_p = 10 \text{ nm}$

특히 분포편차가 이온주입범위보다 클 경우, 게이트산화막 두께에 대한 감소율이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 또한 분포편차가 이온주입범위보다 같거나 클 경우인 그림 4(b)와 (c)를 관찰해 보면 게이트산화막 두께가 6~7 nm 정도에서도 1V이하의 항복전압 특성을 보이고 있다.

즉, 이온주입범위가 분포편차보다 클 경우, 게이트산화막 두께가 감소하여도 항복전압이 트랜지스터로 사용가능한 값 이상을 유지하고 있으나 분포편차가 이온주입범위보다 클 경우는 게이트산화막 두께가 감소

하면 트랜지스터로 사용하기 어려운 항복전압 값을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 4(a)를 관찰해 보면 약  $10^{18} / \text{cm}^3$  이하의 채널도핑농도의 경우 게이트산화막 두께 감소 시 항복전압이 급격히 감소하며 특히 게이트산화막 두께가 감소할수록 항복전압의 감소율은 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 채널도핑농도 뿐만 아니라 채널도핑형태도 항복전압에 크게 영향을 미치고 있었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 이중게이트 MOSFET에 대한 항복전압의 변화를 채널도핑농도, 채널도핑형태, 채널길이, 채널두께 및 게이트산화막 두께 등의 소자파라미터에 따라 이차원 전위분포모델을 이용하여 분석하였다. 소자크기 감소에 의하여 발생하는 단채널 효과에 의하여 이중게이트 MOSFET의 경우 항복전압이 크게 감소하고 있다는 것을 관찰하였다. 즉, 항복전압은 채널도핑농도의 크기뿐만 아니라 채널도핑형태 및 소자크기 파라미터에 대해서도 커다란 변화를 보이고 있었으며 특히 채널도핑함수인 가우시안 함수의 형태에 따라서 큰 변화를 보이고 있다는 것을 관찰할 수 있었다.

또한 단채널 효과가 발생하여 채널길이, 채널두께 및 게이트산화막 두께가 감소하면 트랜지스터로 사용하기 어려운 정도로 항복전압이 크게 감소하는 것을 관찰하였다. 그러므로 항복전압이 너무 낮게 설계되지 않도록 세심한 주의가 요구되며 본 연구의 결과는 이중게이트 MOSFET의 항복전압 설계 시 기본적인 자료로 사용될 수 있으리라 사료된다.

#### 참고문헌

- [ 1 ] S. Dimitrijevic, Principles of Semiconductor Devices, NewYork, Oxford, 2012.  
[ 2 ] M.Ertosun and C.Saraswat, "Investigation of

Capacitorless Double-Gate Single-Transistor DRAM: With and Without Quantum Well," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 53, No.4, pp.737-741, 2006.

- [ 3 ] D.Tekleab, S.Samavedam and P.Zeitsoff, "Modeling and Analysis of Parasitic Resistance in Double-Gate FinFETs," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 56, No.10, pp.2291-2296, 2009.  
[ 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 ] W.Fulop, "Calculation of Avalanche Breakdown Voltages of Silicon p-n Junctions," Solid-State Electronics, vol.10, pp.39-43, 1967.  
[ 6 ] H.Mohammad, H.Abdullah, C.F.Deer, P.S.Menon and B.Y.Majlis, "A New Analytical Model for Lateral Breakdown Voltage of Double-gate Power MOSFETs," 2011 IEEE Regional symposium on micro and nano Electronics, pp.92-95, 2011.  
[ 7 ] D.S.Havaldar, G.Katti, N.DasGupta and A.Das Gupta, "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.  
[ 8 ] 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.  
[ 9 ] H.K.Jung, "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



### 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

2013. 1 - 현재 한국정보통신학회 수석부회장

※관심분야: 반도체소자 시뮬레이션, 몬테칼로  
시뮬레이션, 회로및 시스템 해석 등