

# 전력 반도체 소자에 적용되는 원통형 PN 접합의 항복전압에 대한 근사식과 민감도

論 文

57-12-16

## Approximate Equations and Sensitivity for Breakdown Voltages of Cylindrical PN Junctions in Power Semiconductor Devices

尹俊皓\*·金海美\*·徐賢錫\*·曹重烈\*\*·崔然益†

(Jun-Ho Yun · Hae-Mi Kim · Hyeon-Seok Seo · Jung-Yol Jo · Yearn-Ik Choi)

**Abstract** - Approximate equations for cylindrical breakdown voltages of planar pn junctions are proposed and verified. The equations show good agreement with the Baliga's results for  $r_j/W_{pp} \leq 0.3$  and with numerical results for  $r_j/W_{pp} \geq 0.3$  within 1% error. Sensitivity of the breakdown voltage with respect to the doping concentrations is successfully derived using the approximate equations. The sensitivity formula can be utilized in the area of tolerance design of power semiconductor devices.

**Key Words** : Breakdown Voltage, Cylindrical PN Junction, Sensitivity, Junction Depth, Power Semiconductor Devices

### 1. 서 론

전력반도체 소자의 항복전압(breakdown voltage)은 ON 저항과 함께 소자의 전력을 결정하는 중요한 변수이다. 일반적으로 전력반도체 소자는 불순물 농도가 낮은 에피층(epitaxial layer) 위에 하나 이상의 PN접합을 포함하고 있으며, PN접합은 불순물의 플래나 확산공정(planar diffusion process)으로 만들어진다. 이때 불순물의 확산은 확산 창(diffusion window)의 수직방향 뿐만 아니라 수평 방향으로 일어나게 되어 창의 가장자리(window edge)에서 곡률반경(radius of curvature)을 갖는 원통형 접합(cylindrical junction)을 형성하게 된다. 원통형 접합에서는 전계의 크라우딩(electric field crowding) 때문에 평면형 접합(parallel plane junction)의 항복전압보다 더 낮은 전압에서 항복이 발생하게 되어 PN 접합의 항복전압은 원통형 접합의 항복전압에 의해 결정된다.

지금까지 원통형 접합의 항복전압은 Baliga의 해석식[1]을 이용하여 설계해왔다. Baliga의 해석식은 특정 영역에서 수치해석에 의한 항복전압과 잘 일치하지만, 유도과정에서 사용한 근사 조건 때문에 그 외의 영역에서는 잘 일치하지 않는다. 많은 연구자들이 Baliga의 해석식이 잘 맞지 않는 영역에서의 해석적인 식을 유도하기 위한 연구를 해오고 있으나, 이렇다 할 발표된 연구결과가 없다.

최근의 전력반도체는 ON저항을 줄이기 위해 에피층의 도핑농도,  $N_D$ 가 높아져서 공핍층의 두께,  $W_{pp}$ 가 얇으며[2] 작은 면적으로 효율적인 절연성을 얻기 위해 silicon on insulator

(SOI) 기술을 이용한 고전압 전력 소자[3]와 고주파 전력 소자 [4, 5]가 개발되어 Baliga의 해석식이 잘 맞지 않는 영역에 해당하는 전력 반도체가 증가하는 추세이다. 따라서 모든 영역에서 잘 맞는 항복전압식의 유도가 필수적이다.

또한 항복전압은 에피층 농도에 매우 민감한 함수이므로, 항복전압이 주요변수인 전력반도체 소자의 양산설계를 위해서는 농도변화에 대한 민감도 식의 확보가 필수적이다. 그러나 Baliga의 해석식은 민감도식을 유도하기에는 너무나도 복잡하여, 보다 단순한 식의 유도를 절실하게 필요로 한다.

본 논문에서는 Baliga의 해석적인 항복전압 식이 수치해석적인 값과 잘 일치하지 않는 영역에서도 잘 부합될 뿐만 아니라 농도에 대한 항복전압의 민감도를 구하기 용이한 원통형 항복전압에 대한 근사식을 제안하고 이 근사식을 사용하여 에피층 농도에 대한 항복전압의 민감도 식을 유도하였다. 유도된 민감도식을 전력반도체 소자의 양산 설계에 활용함으로써 에피층의 농도에 민감한 항복전압을 보다 안정적으로 제어하는 것이 본 연구의 목적이다.

### 2. 본 론

#### 2.1 평면형 접합의 항복전압식

단방향 계단형(one-sided step) PN 접합에 역방향 전압  $V_R$ 이 인가되면 공핍영역(depletion region)은 불순물 농도가 낮은 N쪽으로 형성된다. Fulop은 다음 식(1)의 이온화 적분식(ionization integral)을 사용하여 평면 접합에서 항복발생 시 공핍층의 두께,  $W_{pp}$  및 항복전압,  $BV_{pp}$ 을 구한 바 있으며 각각 식(2) 및 (3)에 나타냈다[2].

$$\int_0^{W_{pp}} \alpha dx = 1 \quad (1)$$

여기서,  $\alpha = 1.8 \times 10^{-35} E^7$ ,  $\alpha$ 는 유효이온화 계수(effective ionization coefficient) E는 전계를 가리킨다.

\* 學生會員 : 亞洲大學 電子工學科 碩士課程

\*\* 正 會 員 : 亞洲大學 電子工學科 碩士課程

† 교신저자, 正會員 : 亞洲大學 電子工學科 正教授 · 工博

E-mail : yearnik@ajou.ac.kr

接受日字 : 2008年 10月 16日

最終完了 : 2008年 11月 4日

$$W_{pp} = 2.67 \times 10^{10} N_D^{-0.875} \quad (2)$$

$$BV_{pp} = 5.34 \times 10^{13} N_D^{-0.75} \quad (3)$$

식(2), (3)을 살펴보면 항복발생시 공핍층의 두께,  $W_{pp}$ 와 항복전압  $BV_{pp}$ 는 농도가 증가하면 감소함을 알 수 있다.

### 2.2 원통형 항복전압에 대한 Baliga의 해석식

그림 1에 나타난 원통형 PN접합에 있어서 Baliga는 불순물의 수평방향 및 수직방향 접합깊이를 동일하다고 가정하고, 전계 분포를 식(4)와 같이 근사함으로써 원통형 접합의

$$E(r) = \frac{qN_D}{2\epsilon_s} \left( \frac{r_d^2 - r^2}{r} \right) \cong \frac{K}{r} \quad (4)$$

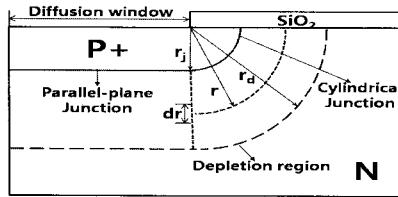


그림 1 원통형 PN접합의 역방향 전압 인가시의 단면도  
Fig. 1 Cross section of cylindrical PN junction with reverse bias

해석적인 항복전압,  $BV_{Baliga}$ 를 구했으며, 이를 평면접합의 항복전압,  $BV_{pp}$ 로 정규화시켜, 다음 식(5)을 얻었다.[1]

$$\frac{BV_{Baliga}}{BV_{pp}} = \frac{1}{2} \left( \frac{r_j}{W_{pp}} \right)^{\frac{6}{7}} \left[ \left( \left( \frac{r_j}{W_{pp}} \right)^{\frac{8}{7}} + 2 \right) \ln \left( 1 + 2 \left( \frac{r_j}{W_{pp}} \right)^{-\frac{8}{7}} \right) - 2 \right] \quad (5)$$

여기서  $BV_{pp}$ 는 식(3)에 주어진 평면접합의 항복전압,  $r_j$ 는 접합깊이,  $W_{pp}$ 는 식(2)의 공핍층의 두께를 나타낸다. 식(5)를  $r_j/W_{pp} = \gamma$  로 놓고 정리하면 식(6)이 얻어진다.

$$R_{Baliga} = \frac{BV_{Baliga}}{BV_{pp}} = \gamma^{\frac{6}{7}} \left[ \left( 1 + 0.5\gamma^{\frac{8}{7}} \right) \ln \left( 1 + \frac{1}{0.5\gamma^{\frac{8}{7}}} \right) - 1 \right] \quad (6)$$

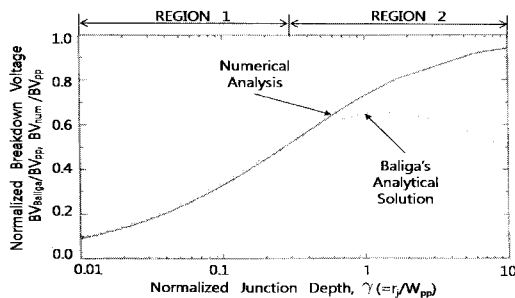


그림 2 원통형 접합에서 Baliga의 항복전압 식  
Fig. 2 Baliga's equation of breakdown voltage of cylindrical junction

그림 2에는 식(6)의  $BV_{Baliga}/BV_{pp}$  및 정규화된 수치해석에 의한 항복전압,  $BV_{num}/BV_{pp}$ 를 나타냈다. 이때 가로축은  $\gamma$ 를 log scale로, 세로축은 정규화 된 원통형 접합의 항복전압을 linear scale로 나타낸 그래프이다. 식(4)와 같이 근사된 전계 분포를 사용하였기 때문에  $\gamma \geq 0.3$ 인 경우(영역2)  $R_{num}$ 과  $R_{Baliga}$ 는 큰 차이가 나타난다.

### 2.3 원통형 항복전압에 대한 근사식

본 논문에서는 그림 2에 근거하여  $\gamma = 0.3$ 을 경계로 두 영역으로 나눠서  $BV_{app}/BV_{pp}$ 를  $k = \ln(\gamma)$ 에 대한 서로 다른 2개의 2차 함수로 근사할 수 있음을 가정한 후 각 영역 별로 수치해석값,  $BV_{num}/BV_{pp}$ 에 잘 맞는 근사식을 다음과 같이 제안했다.

$$\frac{BV_{app}}{BV_{pp}} = a_1 k^2 + a_2 k + a_3 \quad (7)$$

여기서  $a_1 = 0.0211, a_2 = 0.246, a_3 = 0.7856$  ( $\gamma \leq 0.3$ )

$a_1 = -0.0229, a_2 = 0.1477, a_3 = 0.731$  ( $\gamma \geq 0.3$ )

제안된 근사식의 도출 과정은 다음과 같다. 각 영역별로 2차 근사식을 유도하기 위해 그림 2의 수치해석 값 중 다섯 지점을 아래와 같이 선택하였다.

영역1에서는 (0.01, 0.092), (0.1, 0.333), (0.3, 0.520) ( $\gamma \leq 0.3$ )

영역2에서는 (0.3, 0.520), (1, 0.731), (10, 0.950) ( $\gamma \geq 0.3$ )

이때 두 영역의 경계 지점에서의 연속성을 위하여  $\gamma = 0.3$ 의 값을 양쪽 영역에 모두 사용하였다. 또한 얻어진 2차 근사식이 특정 영역의 값에만 잘 맞는 것이 아니라 각 영역의 모든 지점의 값에 잘 맞도록 각 영역의 양끝 지점과 log scale로 표현하였을 경우 중간 지점을 선택하였으며, 이를 이용하여 각 영역에서 2차식의 계수  $a_1, a_2, a_3$ 를 구하였다.

그림 3은 본 논문에서 제안한 근사식,  $BV_{app}/BV_{pp}$ 과 수치해석에 의한 값,  $BV_{num}/BV_{pp}$ , Baliga의 해석식,  $BV_{Baliga}/BV_{pp}$ 를 비교하여 표현하였으며, 표 1은 이를 정량적으로 비교하여 오차를 정리한 것이다. 그림 3, 표 1을 보면 Baliga의 해석식은  $\gamma$ 가 0.3 이하에서만 잘 맞는 반면에 제안한 근사식은 최대 오차 지점,  $\gamma = 0.2$ 에서도  $\pm 1\%$  이내의 오차로 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

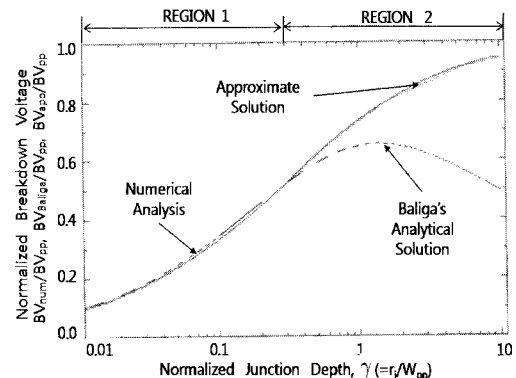


그림 3 원통형 접합에서 항복전압의 근사식  
Fig. 3 Approximate equation of breakdown voltage for cylindrical junction

표 1 원통형 접합에서 항복전압의 정량적 비교

Table 1 Quantitative analysis of breakdown voltage for cylindrical junction

영역	$\gamma$	$BV_{num}/BV_{pp}$			$BV_{Baliga}/BV_{pp}$	
		수치해석	해석식	오차	근사식	오차
1	0.2	0.447	0.457	2.24%	0.444	0.67%
2	2	0.820	0.646	21.22%	0.822	0.24%

2.4 농도변화에 따른 항복 전압의 민감도

Baliga의 해석식, 식(6)을 이용하여 농도변화에 따른 항복 전압의 민감도를 구하기는 복잡하다. 그러나 본 논문에서 제안한 근사식, (7)은 2차 함수의 꼴로 단순화 되어있기 때문에 손쉽게 민감도 식을 유도할 수 있다.

제안한 근사식, (7)을 사용하여 원통형 접합의 항복전압,  $BV_{app}$ 를 에피층 농도,  $N_D$ 의 함수로 표시하면 식(8)과 같다.  $BV_{app}/BV_{pp}$ 는 이후 계산의 용이성을 위해  $R_{app}$ 로 치환하였다.

$$BV_{app} = R_{app} \times BV_{pp} = [a_1 k^2 + a_2 k + a_3] b N_D^{-0.75} \quad (8)$$

여기서  $R_{app} = \frac{BV_{app}}{BV_{pp}}$ ,  $k = \ln(\gamma) = \ln\left(\frac{r_j}{c} N_D^{0.875}\right)$ ,

$b = 5.34 \times 10^{13}$ ,  $c = 2.67 \times 10^{10}$  이다.

식(8)을 사용하여 농도에 대한 항복전압의 민감도[6]를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_{N_D}^{BV_{app}} &= \frac{\partial BV_{app}}{\partial N_D} \times \frac{N_D}{BV_{app}} \\ &= \left( \frac{\partial R_{app}}{\partial N_D} \times BV_{pp} + R_{app} \times \frac{\partial BV_{pp}}{\partial N_D} \right) \frac{N_D}{(R_{app} BV_{pp})} \\ &= \left( \frac{1}{R_{app}} \times \frac{\partial R_{app}}{\partial N_D} + \frac{1}{BV_{pp}} \times \frac{\partial BV_{pp}}{\partial N_D} \right) N_D \\ &= 0.875 \left( \frac{2a_1 k + a_2}{a_1 k^2 + a_2 k + a_3} \right) - 0.75 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $a_1 = 0.0211$ ,  $a_2 = 0.2460$ ,  $a_3 = 0.7856$  ( $\gamma \leq 0.3$ )

$a_1 = -0.0229$ ,  $a_2 = 0.1477$ ,  $a_3 = 0.7310$  ( $\gamma \geq 0.3$ )

$r_j$ 가 3 $\mu$ m, 5 $\mu$ m인 경우, 농도에 대한 항복전압의 민감도를 그림 4에 표현 하였다.

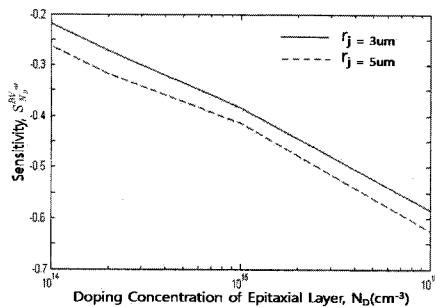


그림 4 농도에 대한 원통형 항복전압의 민감도

Fig. 4 Sensitivity of cylindrical breakdown voltage to the doping concentration

반도체 제작 공정에서 접합깊이,  $r_j$ 와 에피층의 농도,  $N_D$ 가 정해지면 식(9)를 이용하여 민감도를 구하고 이를 이용하여 아래와 같이 항복전압을 제어할 수 있다.

$r_j$ 가 3 $\mu$ m이고 에피층 농도가  $10^{15} \text{cm}^{-3}$ 인 경우, 식(9)에 적용하여 민감도를 구하면 -0.384의 민감도를 얻을 수 있다. 농도에 관한 민감도가 음수인 것은 농도가 증가할수록 항복전압이 낮아지는 것을 나타낸다. 농도의 변화가 10%이면 원통형 접합의 항복전압은 3.84% 변화하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

지금까지 원통형 접합의 항복 전압은 Baliga의 해석식을 이용하여 설계해왔다. 그러나 앞에서 다룬 바와 같이 Baliga의 해석식은 에피층의 도핑농도,  $N_D$ 와 접합깊이,  $r_j$ 가 큰 경우,  $\gamma$  값이 증가하여 실제 수치해석 값과 큰 차이를 보이는 한계를 가진다. 이런 한계의 원인은 해석적인 항복전압을 구하기 위해 원통형 접합의 전계를 근사하였기 때문이다.

본 논문에서는  $\gamma=0.3$ 을 경계로 정규화 된 원통형 항복전압,  $BV_{app}/BV_{pp}$ 를  $k = \ln(\gamma)$ 에 대한 서로 다른 2개의 2차 함수로 근사할 수 있음을 착안하여 각 영역별로 수치해석 값,  $BV_{num}/BV_{pp}$ 에 잘 맞는 근사식을 도출 하였으며 도출한 식은 Baliga의 해석식이 잘 맞지 않는  $\gamma \geq 0.3$ 의 영역에서도  $\pm 1\%$  이내의 오차로 잘 맞음을 확인하였다. 또한 이 근사식은  $\ln(\gamma)$ 에 대한 2차함수로 간단하게 표현됨으로 농도 변화에 따른 항복 전압의 민감도 식을 간단하게 얻어낼 수 있다.

Baliga 식의 한계를 보완한 제안된 근사식은 더욱 넓은 범주의 전력 반도체 소자에서 항복 전압을 정확하게 구할 수 있다. 또한 이를 바탕으로 얻어진 민감도 식은 전력반도체 소자의 양산 설계에 활용하여 에피층의 농도에 민감한 항복전압을 보다 안정적으로 제어할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] B. Jayant Baliga, Power semiconductor devices, PWS Pub. Co., 1996.
- [2] W. Fulop, "Calculation of avalanche breakdown of silicon p-n junctions," Solid State Electron. Vol. 10, pp. 39 - 43. 1967.
- [3] J. Roig et al., "A 200V silicon-on-sapphire LDMOS structure with a step oxide extended field plate," Solid-State Electron. Vol. 48, pp. 1007 - 1015, 2004.
- [4] I. Cortes et al., "A numerical study of field plate configurations in RF SOI LDMOS transistors," Solid State Electron. Vol. 50, pp. 155 - 163. 2005.
- [5] I. Cortés et al., "Super junction LDMOS on thick-SOI technology for RF applications," Microelectronics Journal, Vol. 39, pp 922-927, 2008.
- [6] Sedra and Smith, Microelectronic Circuits, Oxford University Press, 1998.

## 저 자 소 개



**윤 준 호 (尹 俊 皓)**

2007년 아주대학교 전자공학부 졸업  
2007년~현재 동 대학원 전자공학 석사  
과정



**김 해 미 (金 海 美)**

2008년 아주대학교 전자공학부 졸업  
2008년~현재 동 대학원 전자공학 석사  
과정



**서 현 석 (徐 賢 錫)**

2004년 아주대학교 전자공학부 졸업  
2006년 아주대학교 전자공학 석사



**조 중 열 (曹 重 烈)**

1986년 서울대학교 전자공학과 졸업  
1993년 미국 Princeton 대학교 박사  
1995년~현재 아주대학교 전자공학부 재  
직



**최 연 익 (崔 然 益)**

1976년 서울공대 전자공학과 졸업.  
1978년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업  
(공학석사)  
1981년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업  
(공학박사)  
1982년~1984년 미국 버클리대학교 visiting  
research associate  
1984년~현재 아주대학교 전자공학부 교수