

원통형 PN접합의 항복전압의 농도에 대한 민감도

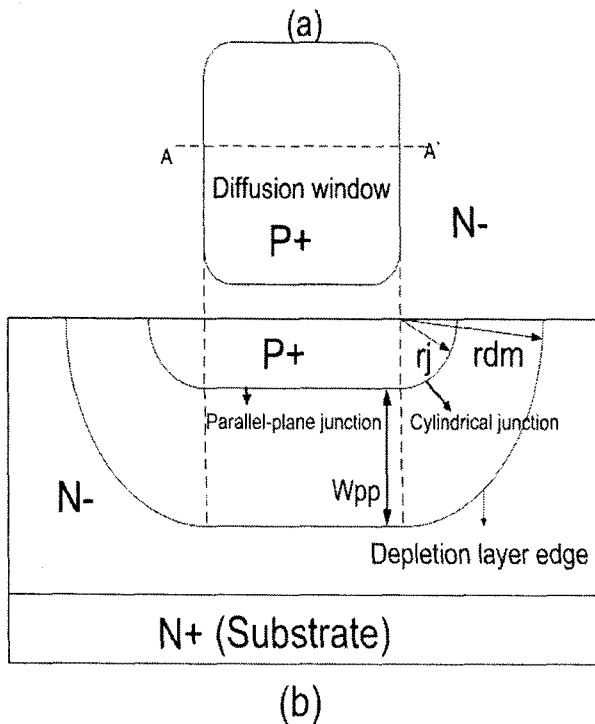
서현석, 조중열, 안희태, 최연익
아주대학교 정보통신대학 전자공학부

Sensitivity Analyses on Breakdown Voltage of Cylindrical PN Junctions to the Doping Concentrations

Hyun-Seok Seo, Jung-Yol Jo, Hee-Tae Ahn, Yean-Ik Choi
School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

Abstract - 원통형 PN접합의 Baliga의 해석적인 항복전압에 대한 근사식을 유도하였다. 근사식은 접합깊이, r_j 와 공핍층 깊이, W_{pp} 의 비 (r_j/W_{pp})가 0.1보다 작은 경우 Baliga식과 잘 일치하였다. 농도에 대한 원통형 접합의 항복전압의 민감도를 유도하였으며, 근사식을 사용한 경우가 Baliga식의 경우보다 민감도식이 더 간단하기 때문에, 민감도를 고려한 소자 설계 시 활용될 수 있으리라 기대된다. 민감도 식을 이용하여 설계한 결과 항복전압의 편차가 10%이내로 제어하기 위해서는 도핑농도가 $10^{15}cm^{-3}$ 이고 접합깊이가 5 μm 인 원통형 접합인 경우 농도 편차가 12.8%이내 이어야한다.

PN 다이오드에서 역방향 항복전압은 순방향 I-V 특성(ON 저항 또는 순방향 전압강하)과 함께 소자의 가장 중요한 특성이다. 일반적인 다이오드는 불순물의 농도가 낮은 에피층 위에 고농도의 불순물을 선택적으로 도핑함으로서 PN접합을 형성한다. 이러한 공정으로 형성된 접합에서는 그림 1에 나타나는 바와 같이 확산 창(diffusion window) 중심부분에는 평면형 접합(parallel-plane junction)이 이루어지지만 가장자리에는 원통형 접합(cylindrical junction)이 형성된다.



<그림 1> 원통형 PN접합의 (a) 평면도 (b) AA' 으로 잘랐을 경우 단면도

원통형 접합이 평면형 접합 보다 먼저 항복이 발생하기 때문에 원통형 접합의 항복전압이 소자의 역방향 특성을 결정한다.

원통형 접합의 항복전압을 구하기 위해서는 다음식의 조건[1]을 만족시켜야 한다.

$$\int_{r_j}^{r_{dm}} 1.8 \times 10^{-35} E^7 dr = 1 \tag{1}$$

여기서 $E = \frac{qN_d}{2\epsilon_s} \left(\frac{r_{dm}^2 - r^2}{r} \right)$ 이다.

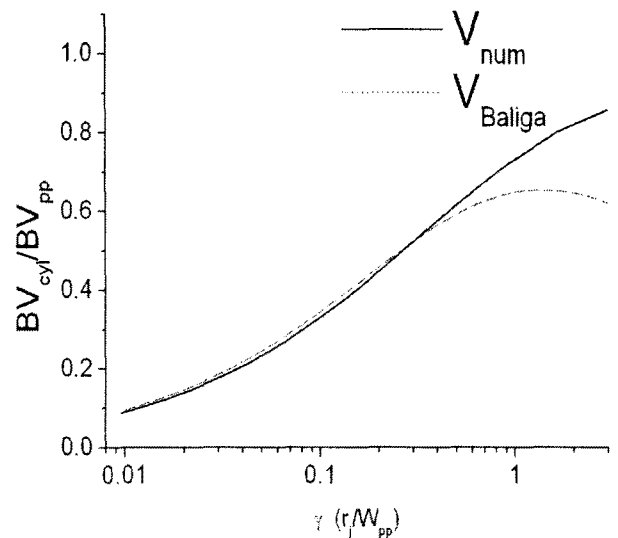
Baliga는 전계를 근사시켜 식(1)을 만족하는 원통형 항복전압 V_{Baliga} 를 유도하였다.[1]

$$V_{Baliga} = \left(\frac{r_j}{W_{pp}} \right)^{\frac{6}{7}} \left[\left(1 + 0.5 \left(\frac{r_j}{W_{pp}} \right)^{\frac{8}{7}} \right) \ln \left(1 + 2 \left(\frac{r_j}{W_{pp}} \right)^{-\frac{8}{7}} \right) - 1 \right] \tag{2}$$

식 (2)에서 V_{Baliga} 는 평면형 항복전압 BV_{pp} 로 정규화 시켰으며, 이때 공핍층 두께는 W_{pp} 이다. 이후 표현의 단순 명료성을 위해 식(2)을 다음과 같이 변환한다.

$$V_{Baliga} = \gamma^{\frac{6}{7}} \left[\left(1 + 0.5\gamma^{\frac{8}{7}} \right) \ln \left(1 + \frac{1}{0.5\gamma^{\frac{8}{7}}} \right) - 1 \right] \tag{3}$$

여기서 $\gamma = r_j/W_{pp}$ 이다.



<그림 2> 원통형 접합에 대한 Baliga의 해석적인 항복전압.

그림 2에 나타낸 바와 같이 Baliga가 유도한 해석적인 항복전압, V_{Baliga} 식

은 $\Upsilon < 0.3$ 경우에 수치해석에 의한 항복전압, V_{num} 과 잘 맞는다. 보통 사용되는 소자는 $\Upsilon < 0.1$ 경우가 대부분이기 때문에 Baliga가 유도한 식 (2)는 원통형 접합의 항복전압을 설계하는데 유용하게 사용될 수 있다.

$$S_{N_d}^{BV_{cy}} = \frac{1}{-27.14 + 1.143 \ln \gamma + \ln N_d} \quad (8)$$

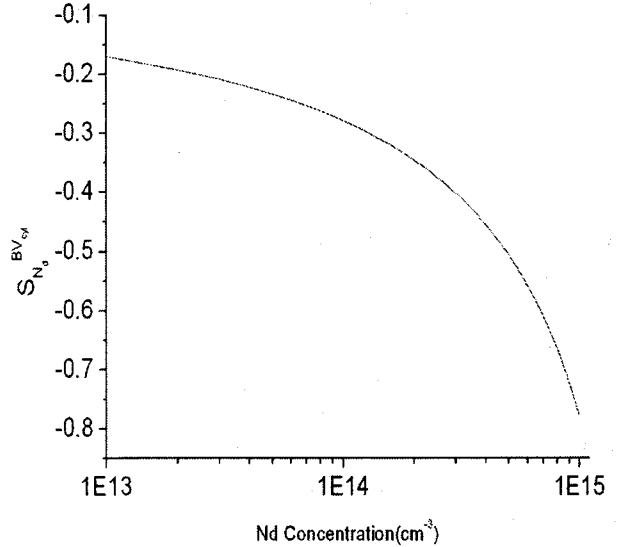
항복전압 설계 시 웨이퍼의 농도 편차에 따른 항복전압의 변화 즉 농도 변화에 대한 항복전압의 민감도(Sensitivity)를 고려하는 것이 매우 중요하다[2]. Baliga의 항복전압 식(3)을 이용하여 민감도 식을 다음과 같이 유도하였다.

그림 4는 접합깊이, r_j 가 5 μm 일때 항복전압의 민감도이다.

$$S_{\gamma}^{V_{app}} = \frac{-2(1+2\gamma^{-\frac{8}{7}}) + (\gamma^{\frac{8}{7}} + \frac{12}{7}\gamma^{-\frac{8}{7}} + \frac{20}{7})\ln(1+2\gamma^{-\frac{8}{7}})}{(1+\frac{1}{2}\gamma^{\frac{8}{7}})\ln(1+2\gamma^{-\frac{8}{7}}) - 1} \quad (4)$$

$$\text{여기서 } \gamma = r_j / (2.67 \times 10^{10} N_d^{-7/8})$$

식 (4)는 민감도, S가 주어지고 N_d 의 편차를 구할 경우 폐쇄형(closed-form)이 아니기 때문에 보다 간단한 식이 요구된다. $0.5\gamma^{\frac{8}{7}} \ll 1$ 인 경우에 식 (2)는 다음식 (5)로 근사된다.

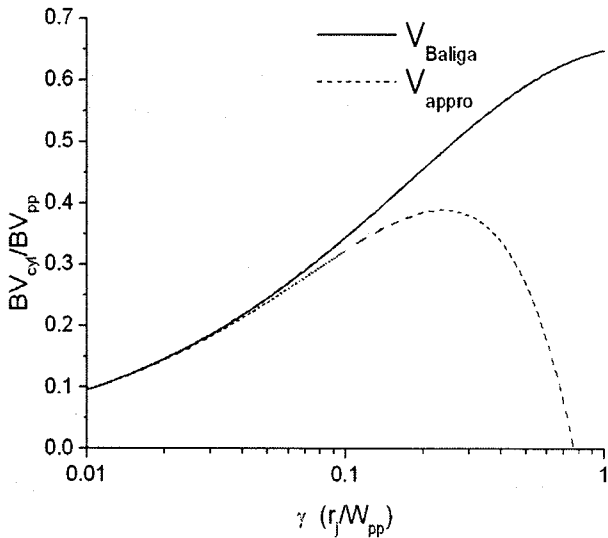


$$V_{app} = -\gamma^{\frac{6}{7}} (0.307 + 1.143 \ln \gamma) \quad (5)$$

식 (5)를 그림 3에 점선으로 나타냈으며, $\Upsilon < 0.1$ 경우에는 Baliga의 식과 커다란 오차 없이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

<그림 4> 근사된 농도에 대한 원통형 접합의 항복전압의 민감도

$N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 일 때, $S_{N_d}^{BV_{cy}} = -0.78$ 이다. 이때 원통형 항복전압의 편차를 10% 이내로 설계를 할 경우, 농도의 편차가 12.8%인 웨이퍼가 필요하다.



원통형 접합에 대한 Baliga의 항복전압 식으로부터 근사식을 구하였으며 이를 이용하여 농도 변화에 대한 항복전압의 민감도 식을 유도하였다. 종래의 Baliga 식으로 유도된 민감도는 폐쇄형이 아니기 때문에 설계에 부적절하였으나 새로 구한 민감도 식은 설계에 유용하게 사용될 수 있으리라 기대된다.

<그림 3> 원통형 접합의 근사된 항복전압.

Υ 에 대한 V_{app} 의 민감도를 다음식 (6)에 나타냈다.

[참고 문헌]

$$S_{\gamma}^{V_{app}} = \frac{1.406 + 0.98 \ln \gamma}{0.307 + 1.143 \ln \gamma} \quad (6)$$

[1] B.J. Baliga, Modern Power Device, John Wiley, Inc., 1987
 [2] Seong-Kyu Hwang, Yeam-Ik Choi, Sang-Koo Chung, Kwiro Lee, Choong-Ki Kim. "A Power MOSFET Design Methodology Considering Epi Parameter Variations", IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, Vol.6, No.4, pp 377-380, 1993.
 [3] Sedra and Smith, Microelectronic Circuits, Oxford University Press., 1998

식 (5)에 평면형 접합에서 에피층 농도(N_d)와 공핍층의 두께(W_{pp}), 항복전압, BV_{pp} 와의 관계식을 대입하면, 다음 식 (7)이 된다.

$$BV_{cy} = -6.17 \times 10^4 r_j^{6/7} (\ln N_d + 1.143 \ln r_j - 27.14) \quad (7)$$

식 (7)로부터 농도 변화에 대한 항복전압, BV_{cy} 의 민감도 식을 구하면 다음과 같다.