

論文99-36D-4-10

Punchthrough 원통형 접합의 항복전압에 대한 해석적 모델

(An Analytic Model for Punchthrough Limited Breakdown Voltage of Cylindrical Junctions)

裴東健* , 鄭相九**

(Dong-Gun Bae and Sang-Koo Chung)

요약

Punchthrough 원통형 접합의 항복전압에 대한 해석적 모델을 에피층의 두께와 nonpunchthrough 원통형 접합의 항복시 임계공핍영역폭의 함수로 제안하였다. 이 해석적 모델에서는 모든 거리변수와 전계 및 전위식을 정규화된 형태로 사용하므로써 항복전압을 소자의 물리적 parameter에 관계없이 쉽게 결정할 수 있게 하였다. 제안된 모델의 계산결과를 2차원 소자 Simulation Program인 MEDICI를 사용하여 얻은 결과와 비교하여 매우 잘 일치함을 보였다.

Abstract

Analytic model for punchthrough limited breakdown voltage of cylindrical junction is presented as a function of the epitaxial layer thickness and the critical depletion width of the cylindrical junction in nonpunchthrough cases. All the expressions for the distances, electric fields and potentials are normalized, allowing quick determination of the corresponding breakdown voltages. The calculated results are in good agreement with the simulations obtained from two dimensional device simulation program MEDICI.

I. 서론

반도체 전력소자에서 항복전압과 ON저항은 소자의 전력정격을 결정하는 가장 중요한 파라미터이다. 이러한 전력소자의 제작시 확산장 가장자리에서는 불순물이 수평방향으로 확산하여 원통형 접합 및 구형접합이 생기며 이로 인하여 항복전압이 평면형 접합의 이상적인 값보다 매우 낮아진다. 또한 전력소자의 설계시 직렬저항을 최소화하기 위하여 에피층의 두께가 얇은 punchthrough(PT)구조를 사용하게 되는데 에피층의

두께가 얇아질수록 항복전압값이 낮아지게 된다. 그러므로 PT구조에서 원통형 접합부의 항복전압을 알 수 있어야만 하는데 이를 해석적으로 구하기 위해서는 2차원 Poisson방정식의 해를 구해야 하므로 불가능하며 2차원 수치해석적 방법에 의해서만 구할 수 있다. 그러나 2차원 소자 simulation은 많은 시간이 소요되며 에피층의 두께와 농도, 접합깊이등이 바뀌면 매번 다시 계산을 해야하므로 항복전압값을 쉽게 계산할 수 있는 근사해석적 모델이 필요하다. 이는 항복전압을 높이기 위한 여러 가지 junction termination technology^[1~7] 기법들의 해석적 모델을 개발하는데 기초 모델이 될 수 있다.

PT구조에서 원통형 접합부의 항복전압에 대한 해석적 모델은 Anantharam등이 보고한 바가 있으나^[8] 그 표현식이 매우 복잡할 뿐만 아니라 전력반도체에서 주로 사용되는 접합깊이가 큰 경우에는 계산결과가 잘

* 正會員, 巨濟大學 電子科

(Dept. of Electronics, Kojje College)

** 正會員, 亞洲大學校 電子工學科

(Dept. of Elect. Eng., Ajou University)

接受日字:1998年7月24日, 수정완료일:1999年3月23日

맞지 않는다는 단점이 있다. 본 논문에서는 접합깊이가 큰 경우 평면형 punchthrough전압의 2배가 인가될 때 원통형 접합부에서도 punchthrough가 일어난다고 가정하여 MEDICI를 사용한 2차원 소자 simulation결과와 극히 잘 일치하는 해석적 모델을 제안하였다.

PT 원통형 접합의 항복전압을 해석적으로 모델링하기 위해서는 PT 평면형 접합부의 항복전압과 non-punchthrough(NPT)원통형 접합부의 항복전압에 대한 해석적 모델이 필요하다. PT 평면형접합의 경우 에피층의 두께에 따라 두가지 근사해석적 모델로 구분하여 사용되던 것을 본 논문에서는 하나의 근사해석적 모델로 제안하였으며 NPT 원통형 접합의 해석적 모델에서는 전개분포함수를 기존의 알려진 모델^[9]과 다르게 가정하여 오차가 극히 적은 근사해석적 모델을 제안하였다.

또한 본 논문에서 제안하는 모든 해석적 모델에서 거리변수와 전계 및 전위식을 정규화된 형태로 사용하여 항복전압에 대한 해석적인 표현식이 매우 간단하도록 하였으며 접합깊이나 불순물 농도와 관계없는 일반식이 되게 하였다.

II. 평면형 punchthrough 접합의 항복전압

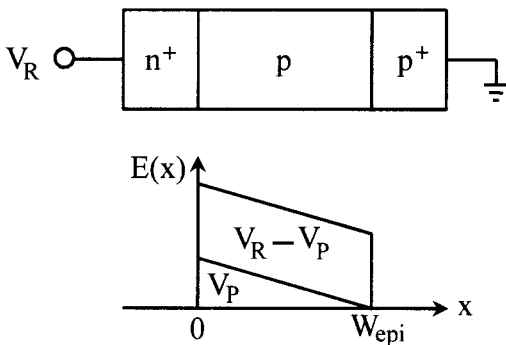


그림 1. 평면형 PT접합의 구조 및 전계분포
Fig. 1. The structure of parallel plane punchthrough junction and electric field distribution.

그림 1 과 같은 평면형 punchthrough diode에 큰 역전압이 인가되면 공핍영역내 전계분포는 그림에 보인바와 같이 되며 Poisson방정식의 해를 구하면 전계식은 다음과 같이 된다.

$$E(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s}(W_{epi}-2x) + \frac{V_R}{W_{epi}} \quad (1)$$

여기서 N_A 는 p형영역의 불순물 농도, ϵ_s 는 반도체의 유전율, q 는 전자전하 및 V_R 는 인가전압, W_{epi} 는 p형영역의 길이이다.

접합 다이오드에서 항복이 일어나는 조건은 공핍영역의 이온화 적분값이 1이 될 때로 정의되므로 다음과 같다

$$\int_0^{W_{epi}} \alpha_0 E^7(x) dx = 1 \quad (2)$$

여기서 α_0 는 Si의 경우 1.8×10^{-35} 이다.^[10] 따라서 이온화 적분을 행하면 다음의 조건이 된다.

$$BV_{PT}^7 + 7 BV_{PT}^5 V_P^2 + 7 BV_{PT}^3 V_P^4 + BV_{PT} V_P^6 = \frac{W_{epi}^6}{\alpha_0} \quad (3)$$

여기서 BV_{PT} 는 punchthrough다이오드의 항복전압, V_P 는 에피층이 완전히 공핍화 될 때의 인가전압, 즉 punchthrough전압으로 $V_P = qN_A W_{epi}^2 / 2\epsilon_s$ 로 주어진다. 여기서 W_{epi} 가 non-punchthrough경우의 항복시 공핍영역 폭 W_{cnp} 와 같다면 non-punchthrough 평면형 접합이 되는 것이며 이때의 항복전압은 곧 punchthrough전압과 같게 된다. 즉 $BV_{PP} = BV_{PT} = V_P$ 이다. 따라서 이때의 항복전압은 식 (3)으로부터 $BV_{PP} = \sqrt[7]{W_{cnp}^6 / 16\alpha_0} = qN_A W_{cnp}^2 / 2\epsilon_s$ 가 되며 식 (3)을 정규화 형태로 표시하기 위하여 BV_{pp}^7 으로 나누면

$$b_{PT}^7 + 7 l_{PT}^4 b_{PT}^5 + 7 l_{PT}^8 b_{PT}^3 + l_{PT}^{12} b_{PT} = 16 l_{PT}^6 \quad (4)$$

가 된다. 여기서 $b_{PT} = BV_{PT} / BV_{PP}$, $l_{PT} = W_{epi} / W_{cnp}$ 이다. l_{PT} 값이 주어질 때 식 (4)를 만족하는 b_{PT} 값은 수치적으로 구해야 하기 때문에 오차가 크지 않은 근사식을 사용해야 한다. W_{epi} 가 W_{cnp} 보다 매우 짧은 경우에는 근사적으로 $b_{PT} = \sqrt[7]{16 l_{PT}^6}$ 이 되는데 이 식은 W_{epi} 가 짧은 경우에는 식 (4)의 정확한 수치적 해와 잘 맞으나 W_{epi} 가 $W_{cnp}/2$ 보다 큰 경우에는 10% 이상의 오차가 나게 된다. 한편 에피층의 두께가 큰 경우에는 항복이 일어날 때 식 (1)에서 주어지는 접합점에서의 최대전계값과 non-punchthrough경우의 최대전계값이 임계전계값과 같다는 가정으로부터 $b_{PT} = l_{PT}(2 - l_{PT})$ 의 관계식을 얻을 수 있다. 그러나 이 식

은 또한 l_{PT} 가 0.08보다 작은 경우에는 10% 이상의 오차가 나게된다. 그러므로 본 논문에서는 식 (4)를 만족하는 근사식을 다음과 같이 제안하였다.

$$b_{PT} = \frac{BV_{PT}}{BV_{PP}} = (1-f) \cdot \sqrt[7]{16 l_{PT}^6} + f \cdot l_{PT}(2-l_{PT}) \quad (5)$$

여기서 weighting 함수 f 를 $f = \frac{1}{2}[1 + \tanh 2.65(4l_{PT}-1)]$ 로 택하면 그림 2에서 보는 바와 같이 l_{PT} 의 전 영역에 걸쳐 식 (4)의 이온화 적분의 수치적인 해와 최대 0.2%이하의 오차를 갖는 거의 정확한 근사식이 된다.

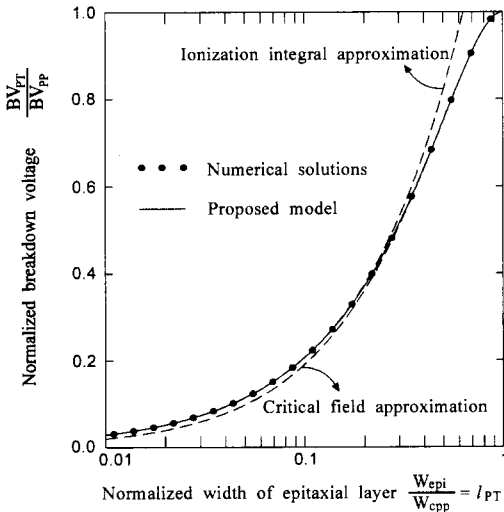


그림 2. 평면형 PT접합의 항복전압에 대한 수치해와 해석적 계산의 비교

Fig. 2. Comparison of numerical and analytic solutions of normalized breakdown voltage of parallel plane punchthrough junction.

III. Non-punchthrough 원통형 접합의 항복전압

그림 3과 같은 non-punchthrough 원통형 $n^+ - p$ 접합에서 원통좌표계를 사용하여 Poisson방정식의 해를 구할 수 있다. 본 논문에서는 사용하는 수식의 복잡성을 피하기 위하여 모든 거리 r 은 접합깊이 r_1 로 정규화하여 $z = r / r_1$ 로 표시하며 전계 $E(r)$ 은 $qN_{Arj}/2\epsilon_s$ 로 정규화하여 $e(z)$ 로 표시하고 전위 $V(r)$ 은 $qN_{Arj}^2/2\epsilon_s$ 로 정규화하여 $y(z)$ 로 표시한다.

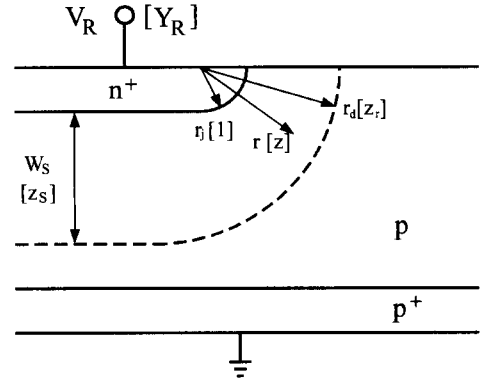


그림 3. 역바이어스된 NPT원통형 접합 및 각 변수의 정의. []의 값은 정규화 변수

Fig. 3. Non-punchthrough cylindrical junctions and definition of normalized variables. The variables in brackets are normalized variables.

따라서 원통형접합의 공핍영역에서 정규화 전계 및 전위는 다음과 같이 표현된다.^[6,7]

$$e_r(z) = \frac{z_r^2 - z^2}{z},$$

$$y_r(z) = \frac{1}{2} [z_r^2 (\ln(\frac{z_r}{z})^2 - 1) + z^2] \quad (6)$$

여기서 z_r 은 정규화 공핍영역폭이다. 정규화 인가전압 Y_R 은 식 (6)에서 $z=1$ 일때의 값이므로

$$Y_R = \frac{1}{2} [z_r^2 (\ln z_r^2 - 1) + 1] \quad (7)$$

로 주어진다. 평면형 접합과 원통형 접합의 항복전압을 비교하기 위하여 각각의 공핍영역에서 식 (2)의 이온화 적분을 행하면 다음과 같이 된다.

$$\int_w a_o E^7 dx = a_o \left(\frac{qN_A}{2\epsilon_s} \right)^7 16 W_{cpp}^8 = 1 \quad (\text{평면형접합}) \quad (8)$$

$$\int_w a_o E^7 dr = a_o \left(\frac{qN_A}{2\epsilon_s} \right)^7 r_j^8 \int_1^{z_r} e_r^7(z) dz = 1 \quad (\text{원통형접합})$$

따라서 원통형 접합의 항복조건은 다음과 같이 된다.

$$\int_1^{z_r} \left(\frac{z_r^2 - z^2}{z} \right)^7 dz = 16 z_{cpp}^8 \quad (9)$$

여기서 $z_{cpp} = W_{cpp} / r_j$ 이다. 식 (9)를 만족하는 z_r 값을 z_{cycl} 이라 하면 이 값은 원통형 접합의 항복시 정규화 공핍영역의 폭이 된다. 이 z_{cycl} 값의 해석적인 해는

구할 수 없다. 그러나 z_{cyl} 값은 보통 1보다 크므로 식 (6)의 정규화 전계함수를 근사적으로 $e_r(z) = (z_r^2 - 1)/z^n$ 으로 사용할 수 있다. 여기서 n 은 농도와 접합깊이에 따라 전계의 7제곱 적분이 오차가 크게 나타날 수 있는데 이를 보완하기 위해 도입하였다. 따라서 이 근사전계함수로 식 (9)를 계산하면 n 은 다음과 같이 주어진다.

$$n = \frac{1}{7} \left\{ \frac{(z_{cyl}^2 - 1)^7}{16 z_{cpp}^8} + 1 \right\} \quad (10)$$

임의의 z_{cpp} 값에 대해 식 (9)의 해를 수치적 계산으로 구할 수 있는데 이 값을 식 (10)에 대입하여 n 값을 계산하면 $1/z_{cpp}$ 에 대하여 거의 1차원 함수가 된다. 이 1차원 함수의 오차가 거의 없는 식을 구하면 다음과 같이 주어진다.

$$n = \frac{8}{7} \frac{1}{z_{cpp}} + 1 \quad (11)$$

따라서 식 (10)과 식 (11)로부터 원통형 접합에서 항복이 일어날때의 임계 공핍영역의 폭은

$$z_{cyl} = \sqrt{1 + 2 z_{cpp} (1 + 0.75 z_{cpp})}^{\frac{1}{7}} \quad (12)$$

이 된다. 이 근사식은 그림 4에서 보는바와 같이 고려하는 전영역에서 식 (9)의 정확한 수치적인 해와 최대 0.1% 이하의 오차를 갖는 거의 정확한 근사식이 됨을 알 수 있다. 따라서 평면형 접합의 항복전압으로 정규화 한 원통형 접합의 항복전압은

$$b_{cyl} = \frac{BV_{cyl}}{BV_{pp}} = \frac{Y_R}{z_{cpp}^2} = \frac{z_{cyl}^2 (\ln z_{cyl}^2 - 1) + 1}{2 z_{cpp}^2} \quad (13)$$

로 주어진다. 원통형 non-punchthrough 접합의 항복 전압에 대한 해석적 모델은 Baliga에 의해 처음으로 제안되었다.^[9] 그의 모델에서 사용한 근사 전계함수는 본 논문에서와 같이 표현하면 e_m / z 이다. 따라서 $1 / z_{cpp}$ 가 커질수록 즉 깊은 접합이 될수록 오차가 크게 발생하게 된다. 그림 4에서 보듯이 Baliga의 항복전압식으로 계산한 결과는 큰 오차를 보이고 있으나 본 논문에서 제안하는 식 (13)에 의한 계산결과는 최대 0.2% 이하의 오차를 갖는 매우 정확한 근사식이 됨을 알 수 있다. 또한 Temple등은 2차원 수치해석법의 결과로부터 다음과 같은 실험식을 만들었다.^[11]

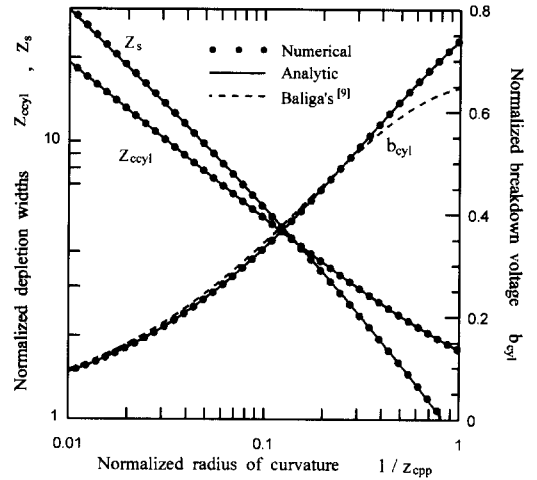


그림 4. NPT 원통형 접합의 항복시 정규화 공핍영역 폭과 항복전압의 수치해와 해석적 계산의 비교

Fig. 4. Comparison of analytic results and numerical solutions of normalized depletion widths and normalized breakdown voltage in NPT cylindrical junction.

$$b_{cyl} = (0.871 - 0.125 \ln(z_{cpp}))^2 \quad (14)$$

이 식의 계산결과는 식 (13)의 계산결과와 거의 일치함을 알 수 있었다.

한편 원통형 접합에서 정규화 공핍영역의 폭이 z_{cyl} 일 때 이 다이오드의 평면형 접합부에서는 정규화 공핍영역의 폭은 z_s 가 될 것이며 정규화 인가전압 $Y_R = z_s^2$ 은 식 (7)의 값과 같은 값이므로 이로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$z_s^2 = \frac{1}{2} [z_{cyl}^2 (\ln z_{cyl}^2 - 1) + 1] \quad (15)$$

Punchthrough 원통형 접합을 해석적으로 다루기 위해서는 식 (15)의 역함수가 필요한데 이는 해석적으로 구할 수가 없다. 본 논문에서는 원통형 공핍영역폭은 평면형 공핍영역폭의 어떤 지수함에 비례할 것으로 가정하고 식 (15)의 수치적 해와 가장 오차가 적은 지수 값을 찾아 다음의 근사식을 제안한다.

$$z_s = [1.1(z_{cyl} - 1)]^{1.131} \quad (16)$$

식 (16)을 사용하면 그림 4에서 보는 바와 같이 z_{cpp} 의 전영역에 걸쳐 식 (15)의 정확한 값과 1.5%이하의 오차를 갖는 적절한 근사식이 된다. 그림 4에서 $1/z_{cpp}$ 가 0.16이상에서는 z_s 가 z_{cyl} 보다 작은 값으로 나타나

는데 원통형 접합의 공핍영역폭은 $Z_{cyl} - 1$ 이므로 항상 평면형 접합부의 공핍영역의 폭이 더 크다는 것을 알 수 있다. 이 식은 또한 항복이 아닌 경우에도 적용될 수 있는데 이 때는 Z_{cyl} 을 Z_r 로 사용하면 된다.

IV. Punchthrough 원통형 접합의 항복전압

그림 5 (a)는 이상적인 $n^+ - p - p^+$ 원통형 접합에서 punchthrough된 이후의 전계분포를 나타낸다.

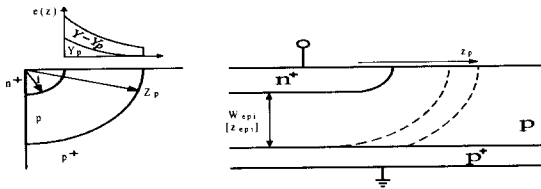


그림 5. (a) 이상적인 원통형 punchthrough접합 및 전계분포 (b) planar 원통형 punchthrough접합의 항복시 정규화 공핍영역의 폭

Fig. 5. (a) Electric field distribution of ideal punched through cylindrical junction (b) Normalized depletion width of planar punched through cylindrical junction in breakdown.

Punchthrough가 될 때 정규화 전계 및 전위는 앞에서와 같이 $e_p(z) = (z_p^2 - z^2)/z$, $Y_p = 0.5(z_p^2 (\ln z_p^2 - 1) + 1)$ 로 주어진다. 인가전압이 Y_p 보다 크게 인가되면 그림과 같이 전계가 $e(z) = e_p(z) + e_m(z)$ 로 증가한다. 여기서 $e_m(z)$ 는 $e(z)$ 가 원통형접합에서의 정규화 Poisson방정식 $\frac{1}{z} \frac{d}{dz} [z e(z)] = -2$ 를 만족하여야 하므로 $e_m(z) = e_m(1)/z$ 가 되어야 하며 $e_m(1)$ 은 $Y - Y_p = \int_1^{z_p} e_m(z) dz = e_m(1) \ln z_p$ 의 관계로부터 구할 수 있다. 따라서 punchthrough이후의 전계는 다음식으로 주어진다.

$$e(z) = \frac{z_p^2 + (Y - Y_p) / \ln z_p - z^2}{z} = \frac{z_r^2 - z^2}{z} \quad (17)$$

여기서 $z_r^2 = z_p^2 + (Y - Y_p) / \ln z_p$ 로 놓으면 non-punchthrough경우와 유사한 식이 되며 항복전압을 구하기 위한 이온화 적분을 행하면 식(9)와 같이 다음의 조건이 성립한다.

$$\int_1^{z_r} \left(\frac{z_r^2 - z^2}{z} \right)^2 dz = 16 z_p^8 \quad (18)$$

식 (18)을 만족하는 z_r 를 수치적으로 구해보면 $z_p \geq 2$ 인 경우 z_p , Z_{cyl} 의 어떤 값에서도 Z_{cyl} 과 0.1% 이내의 오차를 갖는 거의 같은 값이 된다. $z_p < 2$ 인 경우는 에피층의 두께가 매우 작은 경우이므로 평면형 접합부에서 먼저 항복이 일어나게 된다. 따라서 2 이하의 z_p 값은 고려하지 않았다. 그러므로 punch-through경우든 non-punch-through경우이든 원통형 접합에서 항복이 일어날 때 접합에서의 최대전계는 거의 같다는 것을 알 수 있다. 따라서 non-punch-through 원통형접합의 항복전압으로 정규화한 항복전압은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{BV_{PTCyl}}{BV_{Cyl}} = \frac{z_{cyl}^2 \ln z_p^2 - z_p^2 + 1}{z_{cyl}^2 \ln z_{cyl}^2 - z_{cyl}^2 + 1} \quad (19)$$

그림 5(b)의 planar접합에서는 평면형 접합과 원통형 접합이 같이 존재하므로 평면형 접합의 punch-through이후 원통형 접합의 항복시 공핍영역의 폭 z_p 를 결정해야 한다. Anantharam등은 이 문제를 단순화하기 위하여 평면형 접합부가 punchthrough되고난 후에는 원통형 접합부에서는 그 때의 공핍영역에서 더 이상 증가하지 않는다고 가정하였다.^[8] 따라서 이 경우에는 식 (16)에서 z_s 및 Z_{cyl} 을 각각 Z_{epi} 및 z_p 로 대체하면

$$z_p = 1 + 0.909 z_{epi}^{0.8843} \quad (20)$$

을 얻을 수 있다. 그러나 이 가정은 평면형 접합이 non-punch-through때의 최대 공핍층 폭 W_{cp} 에 비해 원통형 접합의 곡률반경 r_j 가 매우 작을 경우 즉 $Z_{cp} = W_{cp} / r_j$ 가 매우 큰 값인 경우 따라서 Z_{cyl} 이 큰 값인 경우에만 유효하다.

한편 Z_{cyl} 이 작은 값일 경우 즉 원통형 접합의 곡률반경 r_j 가 상대적으로 큰 값인 경우에는 원통형 접합은 평면형 접합에 가까워진다. 따라서 평면형 접합이 punchthrough가 될 때에 원통형 접합에서 항복이 일어난다고 하면 이때 공핍층 폭 Z_{cyl} 과 평면형 접합의 에피층 두께 Z_{epi} 간에는 $Z_{epi} = Z_{cyl} - 1$ 의 관계가 성립한다. 즉 평면형 접합에서 non-punch-through의 경우에 에피층의 두께 Z_{epi} 가 최대값 z_s 에서 $Z_{cyl} - 1$ 까지 줄어들어도 원통형 접합의 항복시 공핍층 폭은 Z_{cyl} 이며 같은 값으로 남게 된다. 따라서 이 경우 평

면형 접합의 punchthrough 전압 Y_p 와 원통형 접합의 항복전압 Y 와의 비는

$$k = \frac{Y}{Y_p} = \frac{z_{cyl}^2(\ln z_{cyl}^2 - 1) + 1}{2(z_{cyl} - 1)^2} \quad (21)$$

으로 주어진다. 따라서 r_j 가 상대적으로 큰 경우에 원통형 접합의 최대 공핍층 폭 z_p 는 평면형 접합의 punchthrough 전압의 k 배가 인가될 때로 생각할 수 있다. 즉 $Y = (\sqrt{k} z_{epi})^2 = [z_p^2(\ln z_p^2 - 1) + 1] / 2$ 과 식 (18)을 이용하면

$$z_p = 1 + 0.909(\sqrt{k} z_{epi})^{0.8843} = 1 + a z_{epi}^{0.8843} \quad (22)$$

의 관계를 얻을 수 있다. 여기서 $a = 0.909 k^{0.4421}$ 이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 거의 대부분의 접합에서 z_{cyl} 은 약 2에서 20까지 변화한다. 따라서 k 값은 1.272에서 2.766으로 변화하고 a 값은 1.01에서 1.425로 변화한다. a 값의 변화폭이 크지 않으며 식 (19)의 정규화 항복전압은 더욱 변화폭이 적기 때문에 전 영역에서 a 값을 중간정도의 값 1.235, 즉 k 값을 2라고 가정할 수 있으므로 다음 식을 얻는다.

$$z_p = 1 + 1.235 z_{epi}^{0.8843} \quad (23)$$

식 (23)의 z_p 는 주어진 z_{epi} 값에서 얻을 수 있는 최대값을 나타내며 평면형 접합의 punchthrough 전압의 2배가 인가될 때 원통형 접합의 공핍층 폭이다. 식 (20) 및 (23)으로부터 z_p 의 일반식은

$$z_p = 1 + a(z_{cyl}) \cdot z_{epi}^{0.8843} \quad (24)$$

으로 나타낼 수 있고 z_{cyl} 이 큰 값인 경우($z_{cyl} \geq 19$)에는 $a(z_{cyl}) = 0.909$, z_{cyl} 이 작은 값인 경우($z_{cyl} \leq 11$)에는 $a(z_{cyl}) = 1.235$ 이며 $11 \leq z_{cyl} \leq 19$ 에서는 그 중간값을 선형화한 값 $a = 1.235 - 0.041(z_{cyl} - 11)$ 을 택하였다. 그러나 $z_{cyl} = 11$ 이면 $z_{cpp} = 37.3$, 즉 $1 / z_{cpp} = 0.027$ 이며 $z_{cyl} = 19$ 이면 $z_{cpp} = 98$, 즉 $1 / z_{cpp} = 0.01$ 로 계산된다. 따라서 이 중간영역은 그림 4의 왼쪽 끝부분으로 전력소자로는 사용하기 어려운 얇은 접합이며 Anantharam의 가정이 맞는 영역은 이 그래프의 왼쪽 끝부분을 넘어서 매우 얇은 접합에 해당한다. 그러므로 대부분의 전력소자에서 원통형 접합의 punchthrough 공핍영역폭 계산에서는 본 논문에서 제안하는 $k = 2$, 즉 $a = 1.235$ 로

계산하는 것이 타당함을 알 수 있다.

이상의 논의를 확인하기 위하여 2차원 소자 simulation 프로그램인 MEDICI를 사용하여 해석적 계산과 비교하였다. MEDICI simulation은 에피층의 농도가 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 이고 접합깊이가 $5 \mu\text{m}$ 인 경우에 대하여 에피층의 두께를 $10 \mu\text{m}$ 에서 $50 \mu\text{m}$ 까지 변화시키며 항복전압을 구하였다. 또한 에피층의 농도가 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 인 경우 접합깊이는 $5 \mu\text{m}$, $2.5 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$ 인 세가지 경우에 대하여 에피층의 두께를 접합깊이의 약 2배에서 40배 정도까지 변화시키며 항복전압을 구하였다. MEDICI simulation 결과는 에피층의 두께가 가장 긴 경우 즉 non-punchthrough 경우의 항복전압으로 나누어 정규화 항복전압을 계산하여 그림 6에 표시하였다. 해석적 계산은 식 (19), 식 (24)에 따라 계산하여 그림 6에 실선으로 나타냈으며 아울러 Anantharam의 해석적 모델에 의한 계산결과는 점선으로 나타내었다.

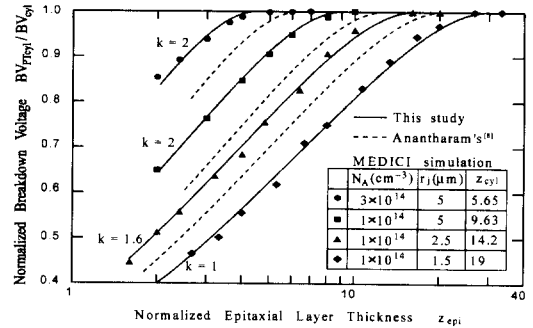


그림 6. PT접합의 에피층 두께에 따른 정규화 항복전압의 비교

Fig. 6. Comparison of normalized cylindrical breakdown voltage of punchthrough junctions with MEDICI simulation results.

그림 6에서 거의 모든 에피두께에서 본 논문에서 제안한 해석적인 결과와 MEDICI simulation의 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있으나 Anantharam 등의 해석적 모델은 깊은 접합의 경우에는 오차가 매우 커서 적용할 수 없으며 해석적 모델 자체도 매우 복잡하여 사용하기에도 어려운 모델임을 알 수 있다.

V. 결론

평면형 punchthrough 접합 및 원통형 non-punch-through 접합의 항복전압에 대하여 이온화 적분에 의

한 이론적인 항복전압의 수치적 해와 0.2%이내의 오차를 갖는 근사해석적 모델을 제안하였다. Punch-through 원통형 접합에 대해서는 평면형 접합부와 원통형 접합부가 punchthrough되는 인가전압이 다르다고 가정하고 2차원 simulation 결과와 잘 일치하는 근사 해석적 모델을 제안하였다. 모든 거리변수와 전계 및 전위식을 정규화된 형태로 표현하여 접합깊이와 불순물 농도에 관계없는 일반식이 되었으며 극히 간단한 표현식이 되었다. 이 해석적 모델을 바탕으로 항복전압을 높이기 위해 사용되는 여러 기법들의 해석적 모델을 개발하는데 확장, 적용될 수 있을것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Y. C. Kao and E. D. Wolley, "High Voltage Planar p-n Junctions," Proc. IEEE, vol.55, pp 1409, 1967.
- [2] M. S. Adler et al, "Theory and Breakdown Voltage for Planar Devices with a Single Field Limiting Ring," IEEE Trans. Elect. on Devices, vol. ED-24, pp 107-112, 1977.
- [3] F. Conti and M. Conti, "Surface Breakdown in Silicon Planar Diodes Equipped with Field Plate," Solid State Electronics, vol. 15, pp 93-105, 1972.
- [4] W. Fieler, E. Flack and W. Gerlach, "Multistep Field Plate for High Voltage Planar p-n Junctions," IEEE Trans. Elect. on Devices, vol. 39, pp 1514-1520, 1991.
- [5] V. A. K. Temple and W. Tantraporn, "Junction Termination Extension for Near-ideal Breakdown Voltage in pn Junctions," IEEE Trans. on Elect. Devices, vol. ED-33, pp 1601-1608, 1986.
- [6] 배동건, 정상구 "다수의 전계제한링을 갖는 Planar소자의 해석적 모델," 전자공학회 논문지 제 33권 A편 제 6호, pp1086 - 1093, 1996
- [7] D. Bae and S. K. Chung, "An Analytic Model of Planar Junctions with Multiple Floating Field Limiting Rings," Solid State Electronics, vol. 45, pp349 - 354, 1998.
- [8] V. Anantharam and K. N. Bhat, "Analytical Solutions for the Breakdown Voltages of Punched-Through Diodes Having Curved Junction Boundaries at the Edges," IEEE Trans. on Elect. Devices, vol. ED-27, pp 939-945, 1980.
- [9] B. J. Baliga and S. K. Ghandi, "Analytical Solutions for the Breakdown Voltage of Abrupt Cylindrical and Spherical Junctions," Solid-State Electronics, vol. 19, pp. 739-744, 1976.
- [10] W. Fulop, "Calculation of Avalanche Breakdown Voltages of Silicon p-n Junctions," Solid-State Electronics, vol. 10, pp. 39-43, 1966.
- [11] V. A. K. Temple and M. S. Adler, "Calculation of the Diffusion Curvature Related Avalanche Breakdown in High Voltage Planar p-n Junctions," IEEE Trans. on Elect. Dev., vol. ED-22, pp. 910-916, 1975.

저 자 소 개

裴東健(正會員) 第33卷 第6號 參照
현재 거제대학 전자과 부교수

鄭相九(正會員) 第33卷 第6號 參照
현재 아주대학교 공과대학 전자공학부 교수