

論文95-32A-1-13

Non-reachthrough 평면 접합의 항복전압에 대한 3 차원 효과의 해석

(Analysis of the Three-Dimensional Effects on the Breakdown Voltage in Non-reachthrough Planar Junctions)

金成東*, 金逸中*, 崔然益**, 韓民九*

(Seong-Dong Kim, Il-Jung Kim, Yearn-Ik Choi, and Min-Koo Han)

요 약

확산층에서 수평 곡률반경을 갖는 non-reachthrough 평면접합의 항복전압에 관한 3 차원 효과를 해석적으로 분석하였다. 임계전계와 항복전압은 평행면 접합으로 정규화시켜서 각각 일반화된 식으로 표현된다. 해석적 결과는 background 기판농도 및 접합 깊이가 다른 평면 접합의 실험 결과 및 MEDICI를 이용한 quasi-3D 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다. 항복전압에 대한 해석적 결과는 전력반도체 소자의 3차원항복전압 예측에 적용될 수 있다.

Abstract

The three-dimensional effects on the breakdown voltage of non-reachthrough planar junctions which have the finite lateral radius of window curvature are analytically investigated. The critical electric fields at breakdown and the breakdown voltages are expressed successfully in a form which is normalized to the parallel plane case. The analytical results are in excellent agreement with the published results of experiment and the quasi-three-dimensional device simulation by MEDICI for non-reachthrough plane junctions having different background doping and junction depth. The results may be applicable to the estimations of breakdown voltages in many practical power devices.

I. 서 론

* 正會員, 서울대학교 電氣工學科
(Dept. of Elec. Eng., Seoul Nat'l Univ.)

** 正會員, 亞州대학교 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Ajou Univ.)

接受日字 : 1994年 4月 2日

전력 반도체 소자는 순방향 및 스위칭 특성과 더불어 원하는 내압을 달성하기 위한 항복전압에 관한 최적 설계가 이루어져야 한다. 항복전압의 주된 결정 요인으로는 저농도 영역의 농도 및 두께, 접합의 형태, 곡률 반경등이 있으며 평행면(parallel plane) 접합의 이상적

인 항복전압을 달성하기 위해서 junction term-in-ation 기술 등을 통하여 공핍층 영역의 최대 전계를 약화시키는데 중점을 두고 있다.

전력반도체 소자에서 확산 공정에 의한 평면접합(planar junction)은 확산창(diffusion window)가 장자리에서 원통형 곡선경계(cylindrically curved boundary)를 갖거나 직사각형 확산창의 모서리 부분에서 구형 곡선경계(spherically curved boundary)를 갖게된다. 이러한 원통형이나 구형 abrupt 접합의 항복전압은 이미 Baliga와 Gandhi^[1]에 의해서 해석적으로 표현되어 있다. 그밖에 접합의 공핍층 두께가 저농도 기판의 두께보다 큰 경우인 reachthrough 평면접합^[2]과 junction termination 기술의 한 방법인 field limiting ring을 갖는 평면접합^[3]에 관한 항복전압의 해석적인 연구도 진행되어 왔다.

이와같은 평면접합의 항복전압은 원통형 및 구형 접합의 중간값을 갖으리라 예상되며 확산창의 곡률반경에 의해 지배를 받게 된다. 항복전압에서의 접합의 공핍층 두께가 저농도 기판의 두께보다 작은 nonreachthrough 평면접합에 있어서 확산창의 수평 곡률반경이 항복전압에 미치는 영향은 이미 수치해석 방법에 의해서 분석되어 있고 실험 결과와도 일치하였다^[4]. 그러나 수치해석적 방법에 의한 해석은 컴퓨터를 이용하여 이온화 적분에 관한 복잡한 수치해석적 계산을 해야하므로 컴퓨터 시간과 노력이 많이 들 뿐만아니라 항복전압에 대한 해석적인 표현식이 없으므로 각 파라미터들이 항복전압에 미치는 영향 및 물리적인 개념을 분석하기가 쉽지 않고 설계에 직접 활용하기가 어렵다. 따라서 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서는 항복전압에 관한 해석적인 표현이 요구된다.

본 논문에서는 non-reachthrough 평면접합의 항복전압에 있어서 확산창의 수평 곡률반경에 따른 3차원 항복전압을 해석적으로 유도하고 MEDICI를 이용한 quasi-3D 시뮬레이션과 보고된 실험결과와 비교함으로써 타당성을 검증하고자 한다.

II. 해석적 표현식의 유도

그림 1은 해석하고자하는 non-reachthrough 평면 접합 다이오드를 나타낸 것으로 확산창 곡면의 수평 반경을 R_m , 접합 곡면의 반경을 r_j , 공핍층 경계 반경을 r_d 로 표시하였다. Abrupt $p^+ - n$ 접합의 곡면 부분에 대한 전계의 일반적인 식, $E(r)$,는 Gauss 법칙으로부터 $r \geq r_j$ 에 대해서 다음과 같이 표현된다^[4].

$$E(r)_x = -\frac{qNB}{2\epsilon\epsilon_0} \frac{\frac{2}{3}(r_d^3 - r^3) + \frac{\pi}{2}R_m(r_d^2 - r^2)}{r\left(r + \frac{\pi}{2}R_m\right)} \quad (1)$$

여기서 q 는 단위 전하량이고 NB 는 background 기판 불순물 농도이며 ϵ 와 ϵ_0 는 각각 실리콘과 자유공간의 유전상수를 나타낸다.

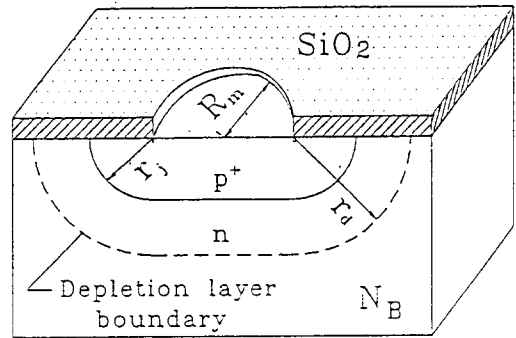


그림 1. 해석적 유도를 위한 non-reachthrough 평면접합 다이오드.

Fig. 1. Structure of the non-reachthrough planar $p^+ - n$ junction diode under investigation.

식 (1)은 $R_m = \infty$ 와 $R_m = 0$ 일때 각각 널리 알려진 원통형 접합과 구형 접합의 전계식이 된다^[1]. 확산창 곡면의 수평 반경, R_m 의 효과는 그림 2에서와 같이 원통형 접합에서 구형 접합으로의 최대 전계와 최대 공핍층의 변화로부터 명확하게 알 수 있다. 여기서 기판 농도와 금속성(metallurgical) 접합 깊이는 각각 $1 \times 10^{14} cm^{-3}$ 과 $5 \mu m$ 이며 인가된 전압은 140 V 이다. R_m 이 구형 접합에 가까운 $1 \mu m$ 로 부터 원통형 접합에 가까운 $30 \mu m$ 로 증가함에 따라 최대전계는 감소하고 공핍층의 폭은 증가하게 된다.

항복전압은 다음과 같은 이온화 적분에 의해서 구할 수 있다.

$$A \int_{r_j}^{r_d} |E(r)|^2 dr = 1 \quad (2)$$

여기서 $A = 1.8 \times 10^{-35}$ ^[5] 이다. 식 (1)과 같은 복잡한 형태의 전계식을 식 (2)의 이온화 적분에 대입하여 해석적인 해를 구하기는 거의 불가능하다. 따라서 항복전압을 해석적으로 구하기 위해서는 식 (1)의 전계식

을 보다 단순한 모양으로 바꾸어야 한다.

확산창의 수평 곡률반경 효과와 원통형 및 구형 접합의 전계식으로부터 다음과 같은 간단한 형태의 수정된 전계식, $E(r)_{x1}$ 을 이끌어 낼 수 있다.

$$E(r)_{x1} = \frac{qN_B}{(x+1)\epsilon\epsilon_0} \frac{r_d^{x+1} - r^{x+1}}{r^x}, \quad 1 \leq x \leq 2 \quad (3)$$

이 식은 원통형과 구형 전계의 혼합된 효과를 나타내며 $x = 1$ 과 $x = 2$ 일때 각각 원통형과 구형 접합의 전계식으로 유도된다.

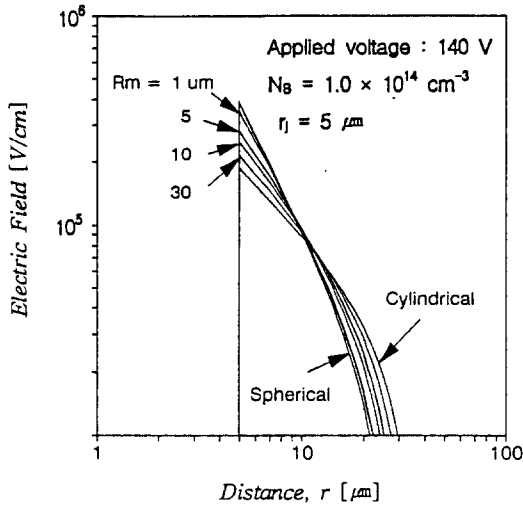


그림 2. 원통형 접합과 구형 접합의 최대 전계와 공핍층의 변화. Background 농도와 접합 깊이는 각각 $1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 와 $5 \mu\text{m}$ 이다.

Fig. 2. Transitions of the peak electric fields and the maximum depletion widths from cylindrical junction to spherical junction. The background doping concentration and the junction depth are $1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ and $5 \mu\text{m}$, respectively.

식 (1)의 전계식과 같이 식 (3)의 수정된 전계식에 확산창 곡률의 수평 반경 효과를 표현하기 위해서는 x 가 파라미터 R_m 의 함수로 나타낼 수 있어야 한다. 임의의 확산창의 수평 곡률반경을 갖는 평면접합의 항복 전압을 해석적인 방법으로 표현하기 위해서 $x = 1$ 과 $x = 2$ 일때 각각 원통형($R_m = \infty$)과 구형($R_m = 0$) 곡률에 해당하는 두 제한조건을 만족하는 것으로 R_m 에 대한 x 의 관계를 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$x = \frac{\frac{R_m}{r_j} + 2}{\frac{R_m}{r_j} + 1}, \quad 1 \leq x \leq 2 \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)의 타당성을 보이기 위해서 정확한 전계 $E(r)_x$ 와 수정된 전계 $E(r)_{x1}$ 을 R_m 이 $1 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ 일 경우에 대해서 그림 3에 비교하였다. 사용된 파라미터들은 그림 2와 같다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 $E(r)_x$ 와 $E(r)_{x1}$ 사이의 오차는 3% 이내로 비교적 잘 일치한다. 또한 Baliga와 Ghandhi가 이미 사용하였던^[1] 가정을 도입하면 식 (3)은 다음과 같이 이온화 적분이 용이한 형태로 간단해진다.

$$E(r)_{x2} = \frac{K}{r^x}, \quad 1 \leq x \leq 2 \quad (5)$$

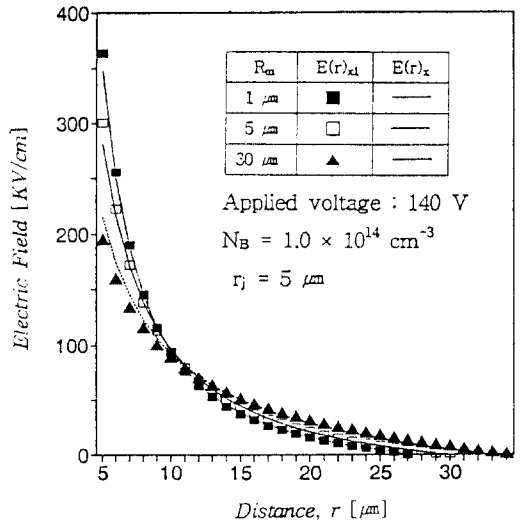


그림 3. 확산창의 수평 곡률반경, R_m 에 따른 정확한 전계, $E(r)_x$ 와 수정된 전계, $E(r)_{x1}$ 의 비교

Fig. 3. The comparison of the exact electric field, $E(r)_x$ and the modified electric field, $E(r)_{x1}$ as a function of the lateral radius of window curvature, R_m .

그림 4는 도입한 가정의 타당성을 입증하기 위해서 최대 전계로 정규화(normalized) 시킨 정확한 전계, $E(r)_x$ 와 수정된 전계, $E(r)_{x1}$ 및 근사된 전계, $E(r)_{x2}$ 를 R_m/r_j 가 1과 1000 일 경우에 대해서 비교한 것이

다.

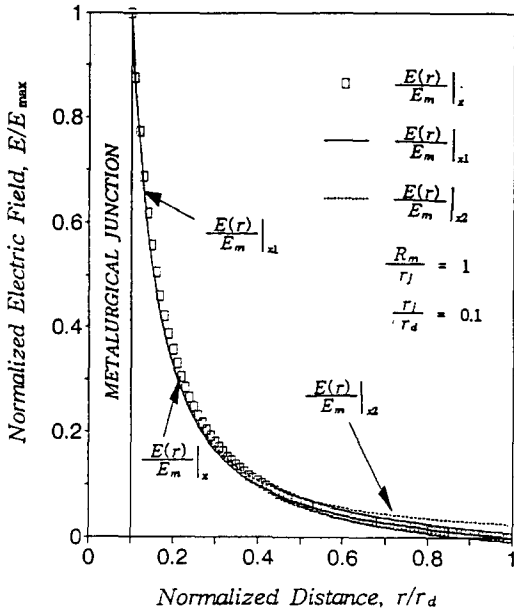


그림 4. R_m/r_j 가 1과 1000일 경우 E_{cPP} 로 정규화(normalized)시킨 $E(r)_x$ 와 $E(r)_{x1}$ 및 $E(r)_{x2}$. (a) $R_m/r_j = 1$ (b) $R_m/r_j = 1000$

Fig 4. Normalized electric field distributions of the exact ($E(r)_x$), the modified ($E(r)_{x1}$) and the approximated ($E(r)_{x2}$) fields, respectively. (a) $R_m/r_j = 1$ (b) $R_m/r_j = 1000$

수정된 전계는 정확한 전계에 잘 일치됨을 볼 수 있는데 이것은 식 (3)과 식 (4)의 타당성을 다시 한번 입증한 것이다. 또한 근사된 전계는 금속성 접합 부근에서는 아주 잘 일치하고 있지만 접합에서 멀어질수록 조금씩 오차가 증가하고 있다. 하지만 오차가 발생한 부분은 최대 전계의 10 ~ 20% 이하에 있고 항복을 유발하는 충돌 이온화 현상은 전계의 최대치가 존재하는 금속성 접합 부근이 지배적이므로 접합 부근에서 정확한 전계 및 수정된 전계에 잘 일치하고 있는 근사된 전계식을 이온화 적분에 적용할 수 있다. 이와같은 결과는 R_m/r_j 가 0.001에서 1000 사이의 모든 값에서도 확인할 수 있다. 따라서 앞으로의 항복전압 해석에 정확한 전계식 대신 식 (4)의 x 와 R_m 의 관계식과 식 (3)의 수정된 전계식 및 식 (5)의 근사된 전계식을 적용하고자 한다. 식 (5)를 식(2)에 대입하면 이온화 적분에

의해서 임의의 확산장의 수평 곡률반경을 갖는 평면 접합의 임계전계, E_c 를 해석적으로 구할 수 있다. 이 임계전계를 이상적인 항복전압에 해당하는 평행면 접합의 임계전계, E_{cPP} 로 정규화시키면

$$\frac{E_c}{E_{cPP}} = \left(\frac{(7x-1)W_c}{8r_j} \right)^{1/7} \quad (6)$$

와 같이 표현된다. 여기서 W_c 는 평행면 접합의 최대 공핍층 폭을 나타내며, background 기판 농도에 의존한다. 식 (6)은 임의의 R_m 을 갖는 nonreachthrough 평면 접합의 임계전계를 표현한 것이다. 이 정규화된 임계전계를 R_m/r_j 의 변화에 따라서 r_j/W_c 의 함수로 나타내면 그림 5와 같다.

항복전압은 임계전계와 식 (3)을 적분하여 얻은 임의의 반경에서의 전압 분포의 관계를 이용하여 구할 수 있다. 임의의 R_m 을 갖는 평면 접합의 항복전압, BV_x 를 표현하기 위해서 평행면 접합의 항복전압으로 정규화시키면

$$\begin{aligned} \frac{BV_x}{BV_{PP}} = & \frac{1}{x-1} \left[\left(\frac{r_j}{W_c} \right)^2 + 2 \left(\frac{7x-1}{8} \right)^{1/7} \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} \right. \\ & - \left. \left\{ \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{x-1} + (x+1) \left(\frac{7x-1}{8} \right)^{1/7} \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{x-1/7} \right\}^{2/(x+1)} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다.

여기서 BVPP는 각각 평행면 접합의 최대 항복전압의 크기를 나타낸다. 식 (7)의 x 에 2를 대입하면 이미 Baliga와 Ghandhi에 의해서 유도된^[1] 구형 접합의 항복전압식이 된다. 그림 6은 식 (7)을 R_m/r_j 의 변화에 따라서 r_j/W_c 의 함수로 나타낸 것으로서 $x = 1$ 인 원통형 접합의 항복전압은 Baliga와 Ghandhi^[1]의 식을 이용하였다. 식 (7)과 그림 6으로부터 non-reachthrough 평면 접합에서 background 농도와 접합 깊이가 주어졌을 때 확산장 곡률의 수평 반경에 의한 항복전압을 쉽게 예측할 수가 있다.

III. 해석적 표현식의 검증 및 논의

Non-reachthrough 평면 접합의 항복전압에 관한 확산장 곡률의 수평 반경 효과의 해석적 표현을 검증하기 위해서 기존의 수치해석 방법에 의한 결과 및 접합 깊이와 확산장 곡률의 수평 반경이 다른 평면접합에 대

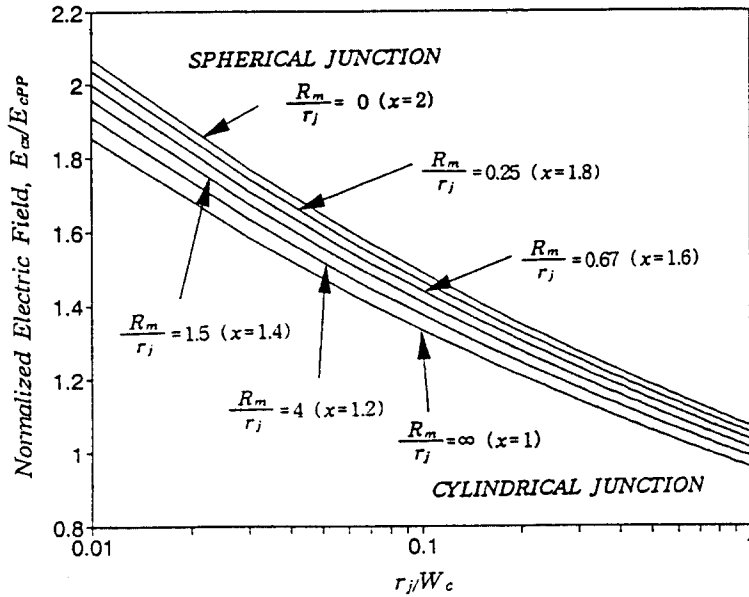


그림 5. Non-reachthrough 평면 접합에서 R_m/r_j , r_j/W_c 에 따른 정규화된 임계전계
 Fig. 5. Normalized electric field as a function of R_m/r_j , r_j/W_c in the non-reachthrough planar junction.

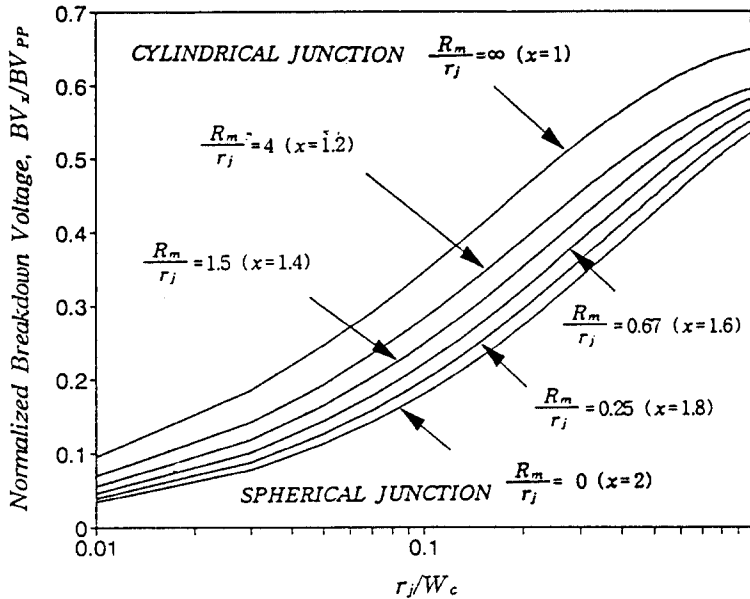


그림 6. Non-reachthrough 평면 접합에서 R_m/r_j , r_j/W_c 에 따른 정규화된 항복전압
 Fig. 6. Normalized breakdown voltage as a function of R_m/r_j , r_j/W_c in the non-reachthrough planar junction.

해서 보고된 실험 결과와 MEDICI를 이용한 quasi-3D 시뮬레이션 결과와 비교하여 검증하였다.

그림 7은 기존의 수치해석 방법에 의한 결과^[4]와 비교하기 위해서 해석적 표현식을 R_m/W_c 의 변화에 따라서 나타낸 것이다. r_j/W_c 가 0.5 이하 부분에서 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. r_j/W_c 가 0.5 이상인 부분은 접합 깊이가 매우 깊거나 고농도의 기판일 경우에 해당하는 것으로 매우 드문 경우이다. 즉 저농도 기판일 경우, W_c 의 1/2 이상의 접합 깊이는 구형하기 어렵고 고농도 기판에서는 기판의 농도가 $2 \times 10^{15} cm^{-3}$ 에서 $1 \times 10^{16} cm^{-3}$ 으로 증가함에 따라 W_c 는 $10 \mu m$ 에서 $2.5 \mu m$ 으로 감소하므로 접합 깊이가 W_c 의 1/2 이하이면 해석적 표현식을 적용할 수가 있다. 이것은 대부분의 최근 전력용 반도체 소자에서 타당하다.

본 논문의 해석에 의해 계산된 항복전압과 접합 깊이와 확산장 곡률의 수평 반경이 다른 평면접합의 실험 결과^[4] 및 수치해석적 결과^[4]를 표 1에 나타내었다. 표 1의 결과는 기판의 농도가 매우 낮은 경우에 해당하는 것으로 r_j 및 R_m 이 다른 경우에서 제한한 해석

적 표현이 수치 해석적 결과보다 실험 결과에 더욱 접근하고 있음을 확인할 수 있다.

표 1. 실험 결과^[4] 및 수치해석적 방법^[4]과 해석적 표현에 의한 항복전압의 비교.

Table 1. Comparison of the breakdown voltage obtained by experiment^[4], numerical method^[4] and analytical expression.

r_j (μm)	R_m (μm)	항복전압(V)		
		실험[4]	수치해석적 방법 ^[4]	해석적 표현
12	130	722	718	764
26	75	1015	988	1033
26	200	1200	1146	1190

NB = $1.3 \times 10^{13} cm^{-3}$, BVPP=7800V, $W_c=895 \mu m$

그림 8은 R_m 의 효과를 관찰하기 위해서 최근에 Yabuta 등^[6]이 발표한 바 있는 실험 결과와 MEDICI를 이용한 quasi-3D 시뮬레이션 결과를 해석적 결과와 비교한 것이다. 기판 농도는 각각 $1.4 \times 10^{14} cm^{-3}$ 이고 접합 깊이는 $5 \mu m$ 인 non-reach-

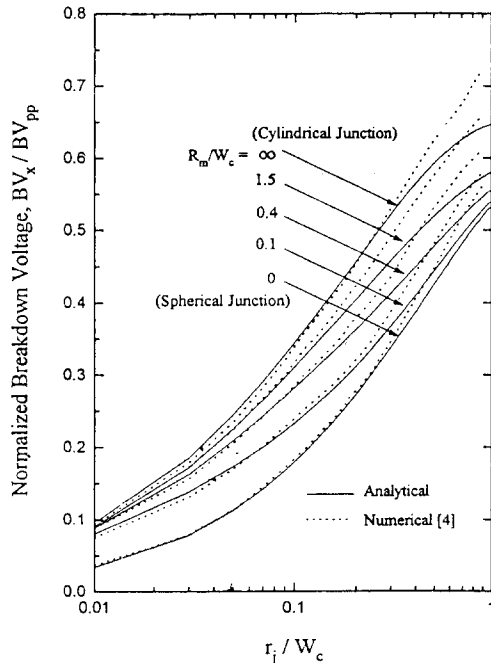


그림 7. Non-reachthrough 평면 접합에서 R_m/r_j , r_j/W_c 에 따른 정규화된 항복전압의 해석적 결과와 수치해석적 결과^[4]의 비교

Fig. 7. Comprison of the normalized break-down voltages between analytical and numerical method^[4] as a function of R_m/r_j , r_j/W_c in the non-reachthrough planar junction.

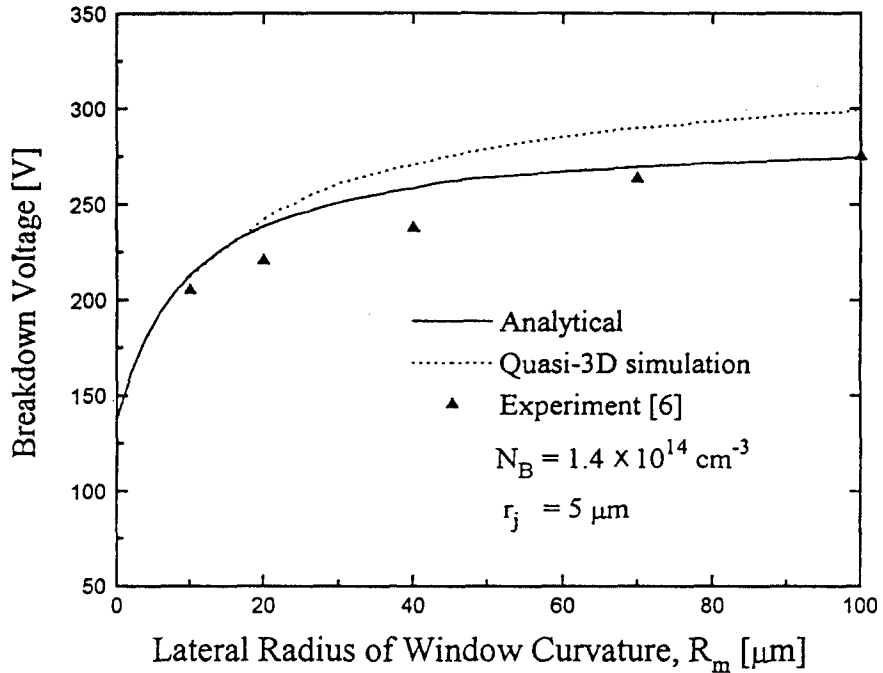


그림 8. R_m 의 변화에 따른 항복전압의 해석적 결과와 quasi-3D 시뮬레이션 결과 및 Yabuta의 실험 결과^[6]의 비교. 기판 농도와 접합 깊이는 각각 $1.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 와 $5 \mu\text{m}$ 이다.

Fig. 8. Comparison of the breakdown voltages between analytical, quasi-3D device simulation, and experimental results of Yabuta et al.^[6] as a function of the R_m . The background doping concentration and the junction depth are $1.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ and $5 \mu\text{m}$, respectively.

through 평면 접합이다. R_m 이 작아질수록 항복전압은 급격히 감소하고 있으며 $100 \mu\text{m}$ 부근에서 포화하는 경향을 보이고 있다. 이것은 확산창 수평 곡률반경의 3차원 효과에 의해 구형 접합의 항복에서 원통형 접합의 항복으로 증가하는 R_m 의 영향을 반영하는 것이다. 비록 R_m 이 증가할수록 quasi-3D 시뮬레이션 결과는 해석적인 결과보다 조금씩 커지고 있지만 제시한 해석적 결과는 실험 결과에 더욱 가까이 접근함을 볼 수 있으며 quasi-3D 시뮬레이션 및 실험결과의 $\pm 7\%$ 이내의 오차안에서 근접한 항복전압을 예측할 수 있다.

제시한 결과로부터 non-reachthrough 경우의 평면 접합에서 확산창의 수평 곡률반경의 3차원 효과에 따른 항복전압은 적당한 근사를 도입한 해석적 표현식으로 유도될 수 있음을 검증되었다.

IV. 결 론

본 논문에서 확산창의 수평 곡률반경을 갖는 non-

reachthrough 평면 접합의 항복전압에 관한 해석적 표현식을 유도하였다. 항복전압은 확산창의 수평 반경, R_m 과 W_c 로 정규화된 접합깊이, r_j/W_c , 로 표현된다.

기판 농도와 접합 깊이가 다른 여러가지 평면 접합에 대하여 해석적 결과와 실험 결과 및 quasi-3D 시뮬레이션 결과를 비교하였으며 잘 일치함을 확인하였다. 항복전압에 대한 해석적인 식은 확산 창 둥근 모서리에서 수평 곡률반경을 갖는 많은 전력 반도체 소자의 설계에 응용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] B. J. Baliga and S. K. Ghandi, "Analytical solutions for the breakdown voltage of abrupt cylindrical and spherical junctions," Solid-State Electron., vol.19, pp.739-744, 1976.

- [2] 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. Electron Devices, vol.ED-27, pp.939-945, 1980.
- [3] B. J. Baliga, "Closed-form analytical solutions for the breakdown voltage of planar junctions terminated with a single floating field ring," Solid-State Electron., vol.33, pp.485-488, 1990.
- [4] C. Basavanagoud and K. N. Bhat, "Effect of lateral curvature on the breakdown voltage of planar diodes," IEEE Electron Device Lett., vol.EDL-6, pp. 276-278, 1985.
- [5] W. Fulop, "Calculations of avalanche breakdown voltages of silicon pn junctions," Solid-State Electron., vol.10, pp.39-43, 1967.
- [6] A. Yabuta, C. G. Hwang, M. Suzumura, and R. W. Dutton, "Numerical analysis of breakdown voltage using quasi three dimensional device simulation," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-37, pp.1132-1140, 1990.

 저 자 소 개



金成東(正會員)

1967년 3월 15일생. 1990년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 3월 ~ 현재 서울대 대학원 전기공학과 박사과정. 주관심 분야는 전력 반도체 소자 및 IC 등임.

도체 소자 및 IC 등임.

金逸中(正會員)

1964년 2월 22일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년 3월 ~ 현재 일본 NTT 연구원 주관심 분야는 전력 반도체 소자, SOI 소자 및 전력전자회로 등임.

崔然益(正會員)

1953년 11월 23일생. 1976년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1981년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1982년~1984년 UC Berkeley 전기 및 전산공학과 Research Associate. 1984년 ~ 현재 아주대 공대 전자공학과 부교수. 주관심 분야는 전력 반도체 소자 및 비정질 실리콘 및 다결정 실리콘 TFT 등임.

韓民九(正會員)

1948년 7월 21일생. 1971년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 미국 Johns Hopkins Univ. 전기공학과 졸업(박사). 1979년~1984년 미국 뉴욕 주립대 조교수. 1984년 ~ 현재 서울대 공대 전기공학과 교수. 주관심 분야는 전력 반도체 소자, 비정질 실리콘 및 다결정 실리콘 TFT 및 절연 재료 등임.