

論文94-31A-7-11

# Field Limiting Ring 구조의 해석적 모델

## (An Analytic Model of Field Limiting Ring Structure)

羅庚晚\*, 鄭相九\*\*, 崔然益\*\*, 金相培\*\*

(Kyeong-Man Ra, Sang-Koo Chung, Yearn-Ik Choi and Sang-Bae Kim)

### 要約

새로운 개념의 해석적 모델을 사용하여 하나의 Field Limiting Ring(FLR)을 갖는 p-n 접합 다이오드의 전위분포에 대한 규정화된 해석식을 제시하였다. 영상전하법을 사용하여 동일한 두개의 원통으로 가정한 주접합과 링접합의 접합 가장자리가 두개의 다른 등전위면이 되도록 하였다. 주접합과 링접합 사이의 전위관계를 2차원 소자 시뮬레이션 프로그램인 MEDICI와 비교하였는데, 두 결과가 매우 잘 일치 하였다. 또한, FLR 구조에서 최적 링 간격과 항복전압 개선에 대하여 보고된 실험 결과와 비교하여 새로운 해석방법이 타당함을 나타내었다. 규정화된 표현식을 사용함으로써 기판의 불순물 농도나 접합 깊이에 무관하게 범용적으로 응용될 수 있도록 하였다.

### Abstract

A novel concept for the analysis of planar devices with a field limiting ring(FLR) is presented, which allows analytic expressions in a normalized form for the potential distributions of FLR structure. Based on the method of image charges, the main and ring junctions with identical, cylindrical edges are kept to be two different equipotential surfaces. The potential relations between main and ring junction of the FLR structure are compared with 2-dimensional device simulation program, MEDICI. A good accordance is found. Comparisons with experimental data reported for the optimum ring spacing and the relative improvement of the breakdown voltages in the FLR structure show the validity of the concept. The normalized expressions allow a universal application regardless to the junction depths and background doping levels.

### 1. 서론

\*正會員, 金星 일렉트론

(GoldStar Electron)

\*\*正會員, 亞洲大學校 工科大學 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Ajou Univ.)

※ 이 논문은 한국 과학재단 지원(Grant No.

90-0100-10)에 의하여 이루어 졌음.

接受日字 : 1993年 11月 19日

전력용 반도체 소자의 항복전압을 높이기 위한 여러 가지 기법들 중 Field Limiting Ring(FLR) 구조는 부가 적인 마스크의 제작이 필요 없고 또한 소자 제조 공정 중에 ring을 만들 수 있기 때문에 많이 사용되는 Junction termination 기법 중 하나이다. 그러나 최적 ring 간격을 결정하기 힘들어 설계하기

어렵고 순방향 특성에 영향을 미치지 못하는 불필요한 면적이 증가한다는 단점이 있다.

이 구조에 대한 해석은 1967년 Kao 와 Wolley<sup>[1]</sup>에 의해 처음 시작되었고, 1977년 Adler<sup>[2]</sup>는 2차원 수치해석 기법을 사용하여 최적 ring 간격을 설계하는 방법을 제시하였다. 그러나 이러한 컴퓨터를 이용한 수치해석 방법<sup>[2,3]</sup>은 많은 계산 시간을 필요로 하면서도 구조에 대한 물리적인 이해를 얻기 어려울 뿐 아니라 기판의 농도나 접합 깊이의 변화에 따라 매번 계산을 다시 해야 한다는 단점이 있다.

FLR 구조에 대한 해석적인 접근은 1990년 Baliga<sup>[4]</sup>와 서강덕<sup>[5]</sup>에 의해 처음 이루어 졌는데, 전자의 경우 2차원 원통형 접합에 대한 해석을 확장하여 적용하면서 주접합과 링접합의 상관관계를 고려하지 않았고 후자의 경우는 주접합과 링접합 사이의 전압관계만을 유도하였다. 그리고 두 경우 모두 항복 전압이 일어날 때의 최대전계와 공핍층 폭을 사용함으로써 FLR구조 내의 임의의 점에 대한 전위 및 전계 분포를 알 수 없다.

이 연구에서는 하나의 ring을 갖는 non-punchthrough type FLR 구조에 대해 접합 가장자리가 각각 다른 등전위면이 되는 두 개의 동일한 원통형 접합 문제로 파악하여 image charge를 도입, FLR 구조내의 임의의 점에 대한 전계 분포를 구할 수 있는 완전히 새로운 해석방법을 제시하였다. 따라서 주접합과 링접합의 전계 세기가 가장 큰 영역으로 이온화 적분을 하여 그 값이 같아지는 최적 링 간격을 계산할 수 있으며, 특히 모든 수식 표현에 규정화된 전압 및 전계를 사용함으로써 접합 깊이나 기판 농도에 무관하게 응용될 수 있도록 하였다. 마지막으로 이 새로운 해석 방법의 결과를 지금까지 발표된 실험결과와 비교하여 그 타당성을 제시 하였다.

II. 영상전하와 전위분포식

한개의 FLR을 갖는 p'n 다이오드 구조에서 주 접합과 FLR 가장자리는 모두 곡률 반경이  $r_j$  인 원통형이라 가정하고 모든 거리를  $r_j$  로 규정화한 다음 주 접합과 링이 규정화된 거리  $t$  만큼 떨어져 있다고 가정하자. 주 접합에  $-V_A$  크기의 역방향 전압을 인가하면 주 접합 주위에서 퍼져나가는 폭  $r_d$  의 공핍층이 링을 통과하게 되고 이 공핍층은 링에  $-V_R$  의 전위가 유기되게 하여 이 전압이 또한 링 접합을 역방향 바이어스 시켜 이번에는 FLR 주위에 폭  $r_d'$  의 공핍층 영역을 이루게 된다. 접합 깊이  $r_j$  로 규정화한 주 접합과 링의 공핍층 폭을 각각  $z_u$  와  $z_l$  이라 하고, 주

접합과 링의 원통 중심에서 공핍층 내의 임의의 점까지의 규정화한 거리를 각각  $z_1$  과  $z_2$  라 하면, 그림 1에 나타낸 것과 같이 주접합과 FLR은 반경 1인 원통으로 각각  $-V_A$  및  $-V_R$ 의 등전위면이 되어야 한다.

한개의 독립적인 원통형 p'n 접합에서 원통중심으로부터 공핍층 폭  $z_u$  내의 임의의 점  $z_1$ 의 전위는 Poisson 방정식을 풀어 얻을 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$y_a(z_1) = F\left(\frac{z_u}{z_1}\right) = \begin{cases} -\frac{z_u^2}{2} \left( \ln \frac{z_u}{z_1} - \frac{1}{2} \right) + \frac{z_1^2}{2} & \text{for } z_u > z_1 \geq 1 \\ 0 & \text{for } z_u \leq z_1 \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $y_a(z_1) = |V(z_1)| / (qN_D r_j^2 / 2\epsilon_s)$ 로써 규정화한 전위이며  $q$ 는 전자의 전하량,  $r_j$ 는 접합 깊이,  $N_D$ 는 n형 기판의 불순물 농도이고  $\epsilon_s$ 는 실리콘의 유전상수이다. 따라서 독립적인 원통형 접합이나 FLR의 규정화한 전위는 각각  $F(z_u)$  및  $F(z_l)$ 로 주어지며 오직 각각의 공핍층 폭  $z_u$  및  $z_l$ 로 결정된다.

그러나 주접합과 링접합이 서로 독립이 아닌 구조에서는 두 접합간의 상호 영향을 고려하지 않을 수 없으며 이를 해결하는 방안으로 전기 영상법을 도입하였다. 즉 독립한 주접합과 FLR 접합의 전위는 그 공핍층 폭  $z_u$  및  $z_l$ 에 의하여 결정되므로 두 원통접합의 중심에  $z_u$  및  $z_l$ 에 비례하는 선전하가 존재하고 이 전하에 의한 공핍층 내의 전위분포는 각각  $F(z_u/z_1)$  및  $F(z_l/z_2)$ 로 주어진다고 생각하면 각 접합의 전위는 상대편 선전하의 영향을 받게 된다.

예를들면 링접합의 전위는 주접합 선전하  $z_u$ 의 영향을 상쇄시킬 영상전하  $z_u'$ 가 링접합 원통 중심으로부터 영상점  $d_u'$ 에 존재해야 한다. 이 영상전하에 의하여 이번에는 주접합의 전위가 영향을 받으므로 이를 상쇄시킬 영상전하  $z_u''$ 를 주접합 내의 영상점  $d_u''$ 에 고려해야 하며 이와같이 반복하면 무한히 많은 영상전하를 고려해야 한다. 한편, 똑같은 논리로 주접합의 전위를 일정하게 유지 하려면  $z_l$ 의 영상전하  $z_l'$ 를 그리고 이것의 영상전하  $z_l''$  등으로 무한히 많은 영상전하를 고려해야 한다. 영상전하 해법의 타당성은 이들 영상전하들에 의하여 주접합 및 FLR 접합면이 일정한 등전위면이 됨을 다음에 밝힘으로써 나타낼 것이다.

그림 1에 나타낸 주접합에 대한 영상전하의 크기와 위치는 주 접합 원통중심과 링 원통중심 사이의 거리의 함수로 다음의 표 1과 같이 나타나며<sup>[6]</sup>, 링접합의 영상전하에 대한 크기와 위치는 표1의 첨자를  $a \rightarrow r$ 로 바꾸어 얻을 수 있다. 여기서 영상전하의 크기는  $\alpha$ 에 반비례하여 급격히 감소함을 알 수 있다.

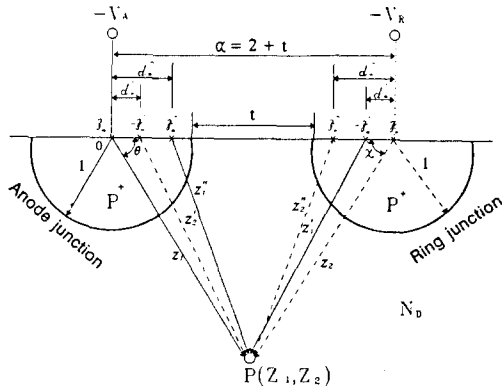


그림 1. 규격화된 FLR 구조 내의 영상전하 분포  
Fig. 1. Image charge distribution in the normalized FLR structure.

표 1. 영상전하의 크기와 위치  
Table 1. Location and magnitude of image junctions

$z_a'$	$\frac{z_a}{a}$	$d_a'$	$\frac{1}{a}$
$z_a''$	$\frac{z_a}{a^2-1}$	$d_a''$	$\frac{a}{a^2-1}$
$z_a'''$	$\frac{z_a}{a(a^2-2)}$	$d_a'''$	$\frac{a^2-1}{a(a^2-2)}$

임의의 점  $P(x, y)$  에서의 전위분포는 주접합과 FLR의 선전하  $z_a$ 와  $z_r$  및 이들의 영상전하에 의한 전위에 의하여 다음의 식으로 표현된다고 가정하자.

$$y_a(z_1) = K_a \left[ F\left(\frac{z_1}{z_a}\right) - \alpha^2 F\left(\frac{z_1}{z_a}\right) + (\alpha^2 - 1)^2 F\left(\frac{z_1}{z_a}\right) - \dots \right] \quad (2)$$

$$y_r(z_2) = K_r \left[ F\left(\frac{z_2}{z_r}\right) - \alpha^2 F\left(\frac{z_2}{z_r}\right) + (\alpha^2 - 1)^2 F\left(\frac{z_2}{z_r}\right) - \dots \right] \quad (3)$$

위 식들에서 둘째항은 첫번째 영상전하에 의한 전위의  $\alpha^2$  배를, 셋째항은 두번째 영상전하에 의한 전위의  $(\alpha^2 - 1)^2$  배를 곱한 값으로 이는 주접합 및 링접합이 각각 등전위면이 되어야 한다는 경계조건을 만족시키기 위한 것이다. 또한 가중치(Weighting factor)  $K_a$ 와  $K_r$ 은 이들 영상전하에 의한 전체 전위가 Poisson 방정식을 만족 하도록 도입된 것으로 P점의 전위는

$$y_p(z_1, z_2) = y_a(z_1) + y_r(z_2) \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다.  $y_p$ 가 Poisson 방정식을 만족시키기 위해서는  $K_a + K_r = 1$ 이 되어야 하므로  $K_a$ 와  $K_r$ 가 주접합과 FLR의 공핍층의 단면적에 비례한다고 가정하면

$$K_a = \frac{z_r^2}{z_a^2 + z_r^2}, K_r = \frac{z_a^2}{z_a^2 + z_r^2} \quad (5)$$

로 주어진다. (5)식의 타당성은 주접합과 링접합 전위간의 관계에 대한 해석적 결과를 기존 시뮬레이션과 비교하므로써 III장에서 밝힐 것이다.

(2) 및 (3) 식은 각각 많은 차수의 영상전하에 의한 전위의 무한급수로 표현되고 있지만 실제로는 (1) 식에 나타난 함수 F의 특성 및 영상전하의 크기가  $\alpha^{-1}$ 로 감소하는 성질을 고려하면 소수의 영상전하만 고려하면 충분함을 알 수 있다.

각 영상전하에서 임의의 P 점까지의 거리는 주 접합의 전하  $z_a$ 에서 P까지의 거리  $z_1$ 과 주 접합 원통중심과 링 원통중심 사이의 거리  $a$ , 그리고 각도  $\theta$ 의 함수로 모두 나타낼 수 있으며 결과는 다음의 표2와 같다.

표 2. 영상전하에서 임의의 점 P까지의 거리  
Table 2. The normalized distances of the field point P measured from the images.

$z_1$	$\sqrt{z_1^2 + \left(a - \frac{1}{a}\right)^2 - 2z_1 \left(a - \frac{1}{a}\right) \cos \theta}$
$z_1''$	$\sqrt{z_1^2 + \frac{1}{\left(a - \frac{1}{a}\right)^2} - 2z_1 \frac{\cos \theta}{\left(a - \frac{1}{a}\right)}}$
$z_2$	$\sqrt{a^2 + z_1^2 - 2az_1 \cos \theta}$
$z_2'$	$\sqrt{\frac{1}{a^2} + z_1^2 - 2z_1 \frac{\cos \theta}{a}}$
$z_2''$	$\sqrt{z_1^2 + \left(a - \frac{a}{a^2-1}\right)^2 - 2z_1 \left(a - \frac{a}{a^2-1}\right) \cos \theta}$

따라서 임의의 P 점에 대한 전위는  $z_1$ 과  $\theta$ 의 함수로 표현할 수 있다.

(2) 및 (3)식에 표 2의 관계식을 대입하면 주접합 부근의 정규화된 전위는 다음 두 항의 합으로 나타낼 수 있다.

$$y_a(z_1, \theta) = K_a \left[ F\left(\frac{z_1}{z_a}\right) + \frac{z_a^2}{z_1} \ln \frac{\alpha^2 z_1^2 + (\alpha^2 - 1)^2 - 2z_1 \alpha (\alpha^2 - 1) \cos \theta}{(\alpha^2 - 1)^2 - 2z_1^2 + \alpha^2 - 2z_1 \alpha (\alpha^2 - 1) \cos \theta} + \frac{1}{2} [(\alpha^2 - 1)^2 - \alpha^2 (z_1^2 - 1)] \right] \quad (6)$$

$$y_r(z_i, \theta) = \frac{K_r}{2} \left[ z_i^3 \ln \frac{1 + \alpha^2 z_i^2 - 2z_i \alpha \cos \theta}{\alpha^2 + z_i^2 - 2z_i \alpha \cos \theta} - (z_i^2 - 1)(\alpha^2 - 1) \right] \quad (7)$$

위 식들은 (2)식에서는 3째항 까지 (3)식에서는 2째항 까지만 고려한 결과이다. 따라서  $z_i = 1$  즉 주접합면에서는 (6) 및 (7)식에서  $y_a(1, \theta) = K_a F(z_a)$  및  $y_r(1, \theta) = 0$ 로 나타나 주접합면이 일정한 전위를 갖는 등전위면이 됨을 알 수 있다. 한편 영상전하에서 P점까지의 거리를 링접합을 중심으로 나타내면 P점에 대한 전위  $y_p$ 는 표 2에서 첨자를 1→2와  $\theta \rightarrow x$ 로 바꾸어야 하고 그 결과는 (6) 및 (7)식에서  $z_i \rightarrow z_2$ ,  $\theta \rightarrow x$  및  $a \rightarrow r$ 로 바꾸었을 때 얻을 수 있는  $y_a(z_2, x)$  및  $y_r(z_2, x)$  식이 된다. 따라서  $z_2 = 1$ 인 FLR 접합면의 전위는  $y_r(1, x) = K_r F(z_r)$  및  $y_a(1, x) = 0$ 로써 FLR 접합면은 일정한 등전위면이 됨을 알 수 있다. 식 (2)와 (3)으로 주어진 전위분포의 식 및 전기 영상법의 타당성은 이것으로써 증명된다.

### III. 주접합 전위와 링접합 전위와의 관계 및 전위분포

주접합의 전위를 증가시켜 공핍층 폭이 링을 통과하게 되면, 링접합 전위는 주접합 전위의 영향을 받게 된다. 링 전위는 주접합 전위보다 작기 때문에 링접합의 가장자리와 같은 전위를 갖는 등전위면이 주접합의 평면 접합 영역에도 존재하게 된다. 따라서 주접합과 링접합 전위 관계를 알기 위해 주접합 공핍층이 링에 닿을 때의 주접합 전압을  $V_{RT}$ 라 하고 주접합에 대한 Poisson방정식을 풀면  $\sqrt{V_R} = \sqrt{V_A} - \sqrt{V_{RT}}$ 인 관계식을 얻을 수 있으며, 이 관계식을 규정화된 전위로 표현하면 다음과 같다.

$$\sqrt{V_R} = \sqrt{V_A} - \sqrt{V_{RT}} \quad (8)$$

여기서  $y_A$ 와  $y_R$ 은 각각 식(2), (3)에  $z_i=1$  및  $z_2=1$ 을 대입하여 얻을 수 있고 reach-through 전압  $\sqrt{y_{RT}}$ 는 식(2)에  $z_i = 1 + t = \alpha - 1$ 을 대입하여 얻을 수 있으며 그 결과는  $y_A = K_a F(z_a)$ ,  $y_r = K_r F(z_r)$ ,  $y_{RT} = K_a F(1+t)$ 로 간단히 표현된다.

식(8)에 식(5)의 관계를 이용하면 링 공핍층 폭  $z_r$ 은 주접합 공핍층 폭  $z_a$ 와 주접합과 링 사이의 거리  $t$ 의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_r \sqrt{F(z_r)} = z_a [\sqrt{F(z_a)} - \sqrt{F(1+t)}] \quad (9)$$

따라서 규정화된 전압  $y_A$ 와  $y_R$ 은 주접합과 링 사이의

거리  $t$ 를 매개변수로 할 때  $z_a$ 만의 함수로 나타낼 수 있으므로,  $y_A$ 와  $y_R$  사이의 관계를 얻을 수 있다.  $N_d = 2 \times 10^{14}/\text{cm}^3$  이고  $r_j = 5\mu\text{m}$ 인 경우 규정화된 전압  $y_A$ 와  $y_R$ 에  $qN_d r_j^2 / 2\epsilon_s = 3.863$ 을 곱하여 얻어진 전압  $V_A$ 와  $V_R$ 을 2차원 소자 시뮬레이션 프로그램인 MEDICI의 결과와 비교하여 그림 2에 나타내었는데 두 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 2에 나타난 MEDICI에 의한 것과 여기서 제안한 해석적 모델 결과와의 작은 차이는 일면접합 및 양면접합에 관한 문제로, 본 논문에서는 식을 간략하게 하기 위해 주접합과 링접합의 가장자리는 등전위면이고 또한 모든 공핍층은 농도가 낮은 n영역으로만 형성되고 농도가 높은 p'쪽은 전혀 생기지 않는 일면접합으로 가정했으나, MEDICI는 그러한 가정 없이 양면접합으로 수치해석을 통해 직접 계산하였기 때문에 생긴 오차라 생각된다.

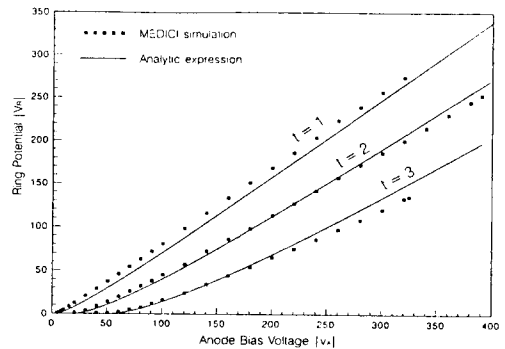


그림 2. 주접합 전위와 링접합 전위와의 관계  
Fig. 2. The relation between main and ring junction potential.

### IV. FLR구조 내의 전기장 분포

FLR구조의 목적이 원통형 접합의 곡률 부분에 집중된 전계 과밀 효과를 최소화 시켜 항복전압을 증가시키는데 있으므로 임의의 점에서의 전계 분포를 결정하는 것은 매우 중요하다. 이 구조의 전계 세기는 식(2)와 (3)을 미분하여 얻을 수 있으며, 임의의 점  $P(z_1, z_2)$ 에서 전계의 세기를  $qN_d r_j / 2\epsilon_s$ 로 규정화하면 다음과 같이 주접합 중심으로부터의 거리  $z_i$ 과 각도  $\theta$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\text{주 접합 : } E_r(z_i, \theta) = E_a(z_i, \theta) + E_r(z_i, \theta) \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned}
 E_z(z_1, \theta) &= -\frac{\partial y_a(z_1, \theta)}{\partial z_1} \\
 &= K_a \left\{ \left[ \left( \frac{z_a}{z_1} \right)^2 - 1 \right] z_1 - \alpha^2 \left[ \left( \frac{z_a}{\alpha z_1} \right)^2 - 1 \right] \left[ z_1 - \left( \alpha - \frac{1}{\alpha} \right) \cos \theta \right] \right. \\
 &\quad \left. + (\alpha^2 - 1)^2 \left[ \left( \frac{z_a}{(\alpha^2 - 1) z_2} \right)^2 - 1 \right] \left[ z_1 - \frac{\alpha \cos \theta}{\alpha^2 - 1} \right] \right\} \quad (11)
 \end{aligned}$$

이며

$$\begin{aligned}
 E_r(z_1, \theta) &= -\frac{\partial y_r(z_1, \theta)}{\partial z_1} \\
 &= K_r \left\{ \left[ \left( \frac{z_r}{z_2} \right)^2 - 1 \right] \left[ z_1 - \alpha \cos \theta \right] \right. \\
 &\quad \left. - \alpha^2 \left[ \left( \frac{z_r}{\alpha z_2} \right)^2 - 1 \right] \left[ z_1 - \frac{\cos \theta}{\alpha} \right] \right\} \quad (12)
 \end{aligned}$$

로 주어진다.

한편 동일한 점 P의 전계를 링접합 중심으로 부터의 거리 z<sub>2</sub> 및 각도 x 로도 나타낼 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$\text{링 접합 : } E_l(z_2, x) = E_a(z_2, x) + E_r(z_2, x) \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned}
 E_r(z_1, \theta) &= -\frac{\partial y_r(z_2, \chi)}{\partial z_2} \\
 &= K_a \left\{ \left[ \left( \frac{z_a}{z_1} \right)^2 - 1 \right] \left[ z_2 - \alpha \cos \chi \right] \right. \\
 &\quad \left. - \alpha^2 \left[ \left( \frac{z_a}{\alpha z_1} \right)^2 - 1 \right] \left[ z_2 - \frac{\cos \chi}{\alpha} \right] \right\} \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_z(z_2, \chi) &= -\frac{\partial y_a(z_2, \chi)}{\partial z_2} \\
 &= K_r \left\{ \left[ \left( \frac{z_r}{z_2} \right)^2 - 1 \right] z_2 - \alpha^2 \left[ \left( \frac{z_r}{\alpha z_2} \right)^2 - 1 \right] \left[ z_2 - \left( \alpha - \frac{1}{\alpha} \right) \cos \chi \right] \right. \\
 &\quad \left. + (\alpha^2 - 1)^2 \left[ \left( \frac{z_r}{(\alpha^2 - 1) z_1} \right)^2 - 1 \right] \left[ z_2 - \frac{\alpha \cos \chi}{\alpha^2 - 1} \right] \right\} \quad (15)
 \end{aligned}$$

이다

z<sub>a</sub> = 5, t = 1인 경우 규정화된 전계 E의 변화를 주접합 원통 중심으로부터의 거리 z<sub>1</sub>의 함수로 그림 3에 나타내었는데 표면전계의 분포와 내부 전계의 분포를 명확히 알 수 있다. 주접합의 전계가 가장 강한

곳은 수직방향(θ = π/2)이고, 링접합의 전계가 가장 강한곳은 표면방향(x = π)이며, 주접합의 표면전계가 영이 되는 점은 링접합의 왼쪽 가장자리(x = 0, z<sub>2</sub> = 1)에서 주접합 쪽으로 약간 이동한 곳에 위치함을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 링접합의 최대 전계 값은 주접합의 수직방향 전계 및 표면 전계보다는 크기 때문에 주접합과 링접합의 최대전계가 같아지는 최적 링간격을 결정 한다면 t가 1보다 커질 것임을 예상할 수 있다.

주접합과 링접합의 최대 전계가 같아지는 t값을 알아보기 위해 그림 4에 규정화된 전계 E를 주접합과 링사이의 거리 t의 함수로 나타내었는데 그림 3에서 예상하였듯이 최대전계 즉 E<sub>Ml</sub>(θ = π/2) 및 E<sub>Rl</sub>(x = 0)가 같은 값을 갖는 t는 1.35이고 표면전계 즉 E<sub>Ml</sub>(θ = 0) 및 E<sub>Rl</sub>(x = π)가 같은 값을 갖는 t는 1.61이다.

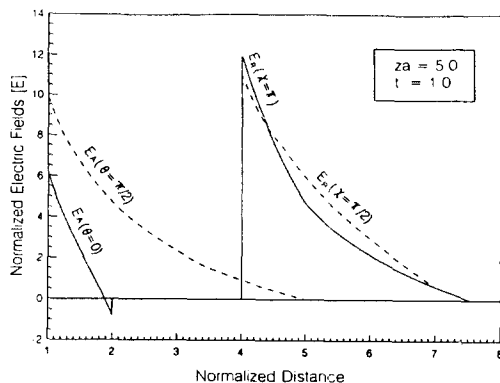


그림 3. FLR구조 내의 전기장 분포  
Fig. 3. Electric field distribution in the FLR structure.

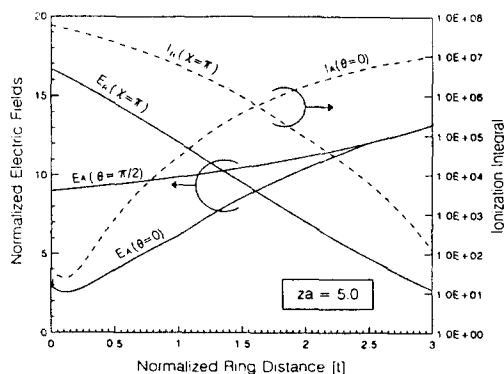


그림 4. 규정화된 링간격 t에 따른 전계 및 이온화 적분값  
Fig. 4. Electric field and ionization integral of normalized ring distance t.

한편 그림 4의 점선은 이온화 적분값을  $t$ 의 함수로 나타낸 것인데, 주접합은 표면을 따라  $z_1 = 1$ 에서  $z_1 = 1+t$  까지  $|E(z)|^7$  적분을 하였고, 링접합은  $z_2 = 1$ 에서  $z_2 = z_1$  까지 적분하였다. 실선으로 나타낸 전기장 처럼 두 이온화 적분값이 교차하는 것을 볼 수 있으며 그 위치는 표면전계가 같은 점 근처( $t = 1.64$ )임을 알 수 있다.

V. 실험과의 비교

동일한 불순물 농도  $N_D$ 에서 단순 평면형 접합(plane junction)과 FLR 구조의 항복전압을 비교하기 위해 이온화 적분을 구하면 다음과 같다.

$$1 - \frac{1}{M} = \left\{ \begin{array}{l} A \frac{W_p}{8} \left[ \frac{qN_D W_p}{\epsilon_s} \right]^7 \\ A r_j \left[ \frac{qN_D r_j}{2\epsilon_s} \right]^7 I_i \end{array} \right. \quad (16)$$

여기서  $A = 1.8 \times 10^{-35}$ 이며  $W_p$ 는 항복이 일어날 때 평면형 접합의 공핍층 폭이고 이온화 적분은

$$I_i = \int_1^{z_m} |E(z, t_{op})|^7 dz \quad (17)$$

이다.  $z_m$ 은  $E(z_m) = 0$ 을 나타내는  $z_1$  혹은  $z_2$ 이며 최적간격  $t_{op}$ 는 주접합 및 링접합의 이온화 적분값이 같은 값을 갖는 FLR 간격을 나타낸다.

한편 항복전압은 각각 다음식으로 주어진다.

$$BV_{pp} = \frac{qN_D W_p^2}{2\epsilon_s} \quad (18)$$

$$BV_{FLR} = \frac{qN_D r_j^2 y_a(z_a, t_{op})}{2\epsilon_s} \quad (19)$$

식 (16)으로부터 항복시 평면형 접합의 공핍층 폭  $W_p$ 로 규정화된 접합 곡률반경은 다음의 조건을 만족시켜야 함을 알 수 있다.

$$x = \frac{r_j}{W_p} = \frac{\sqrt{2}}{I_i^{1/8}} \quad (20)$$

식 (18), (19) 및 (20)으로부터 다음과 같이 단순 평면형 접합의 항복전압으로 규정화된 FLR 구조의 항복전압을 규정화된 접합 곡률반경과 전위로 표현할 수 있다.

$$\frac{BV_{FER}}{BV_{pp}} = x^2 y_a(z_a, t_{op}) \quad (21)$$

규정화된 접합 곡률반경  $x$ 에 대한 규정화된 항복

전압  $BV_{FLR} / BV_{pp}$ 을 그림 5에 나타냈으며, 실험결과와 [2]와 잘 일치함을 보여준다. 주 접합과 링 접합의 정확한 최적 거리는 항복전압이 일어나는 경로를 따라 적분한 주접합과 링접합의 이온화 적분값이 같을 때이다. 그러나 항복이 일어나는 적분 경로를 찾기가 매우 어렵기 때문에 링접합의 경우  $x = \pi$ 인 연장선을 따라 수행 하였으며, 주접합의 경우  $\theta = 0$ 와  $\theta = \pi/2$ 인 연장선을 따라 각각 따로 적분을 하였다. 그림 5에 나타낸 결과를 보면, 주접합과 링의 전계가 가장 강한곳( $\theta = \pi/2, x = \pi$ )을 따라 적분한 값이 같아지는  $t$ 가 최적 간격이 아니라 주접합과 링의 표면( $\theta = 0, x = \pi$ )을 따라 적분한 값이 같아지는  $t$ 가 기존의 최적 간격 및 항복전압에 대한 실험결과와 가장 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 실제 소자에서는 주접합과 링접합 모두 실리콘 표면쪽을 따라 항복이 일어나는 것으로 믿어진다.

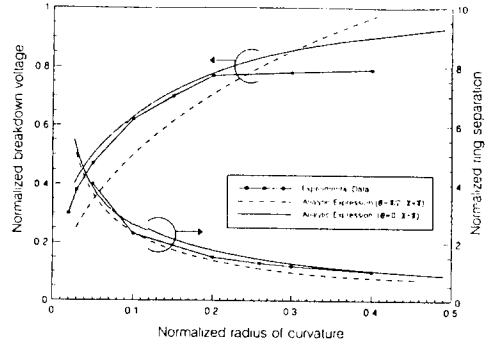


그림 5. 실험값과 비교한 주접합과 링접합의 이온화 적분값이 같은 경우의 규정화된 최적 링 간격과 항복전압

Fig. 5. Normalized breakdown voltage and optimum ring distance that ionization integral of main equals to that of ring is compared with experimental values.

VI. 결론

하나의 링을 갖는 non-punchthrough type FLR 구조를 접합 가장자리가 등전위면인 동일한 두 개의 원통으로 파악한 후, 영상전하를 도입하여 임의의 점에서의 전계세기 및 전위분포를 알 수 있게 하였다. 따라서 종래의 복잡한 수치해석법을 사용하지 않고도 FLR 구조를 간편하게 해석 할 수 있게 되었으며, 또한 규정화된 표현식을 사용함으로써 기관의

불순물 농도나 접합 깊이에 무관하게 범용적으로 응용될 수 있도록 하여 FLR 구조에 대한 근본적인 문제 해결을 가능하게 하였다. 주접합과 링접합의 전위 관계는 2차원 소자 시뮬레이션 프로그램인 MEDICI의 결과와 비교하였는데, 두 결과가 잘 일치하므로써 이 새로운 해석방법의 타당성이 증명되었다.

FLR 구조 내부의 임의의 점의 전계 세기를 알 수 있기 때문에 주접합과 링접합의 전계가 가장 센 부분을 알 수 있고, 따라서 이들 전계가 같아지는 링 간격을 찾을 수 있었다. 그러나 최적 링 간격은 가장 큰 전계를 따라가는 경로가 아니라 표면을 따라 계산한 이온화 적분이 같은 값을 갖는 링 간격으로 최적 링 간격 및 항복전압에 대한 기존의 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 이는 실제 소자에서 항복은 소자의 내부에서가 아니라 소자표면에서 일어나기 때문이라고 믿어진다 여기서 제안한 영상전하법을 확장하면 하나 이상의 링을 갖는 FLR구조에 대한 해석적인 식을 얻을 수 있을 것이며, epi 영역이 항복시에 완전히 공핍화 되는 punchthrough type 다이오드에 대하여도 유사한 해석적인 식을 유도할 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

[1] Y. C. Kao and E. D. Wolley, "High

voltage planar p-n junctions," *Proc. IEEE*, vol. 55, p. 1409, 1967.

[2] M. S. Adler, V. A. K. Temple, A. P. Ferro and R. C. Rusty, "Theory and breakdown voltage for planar devices with a single field limiting ring," *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. ED-24, No. 2, pp. 107-112, 1977.

[3] S. Yasuda and T. Yonezawa, "High-voltage planar junction with a field-limiting ring," *Solid-State Electronics*, vol. 25, No. 5, pp. 423-427, 1982.

[4] B. J. Baliga, "Closed-form analytical solutions for the breakdown voltage of planar junctions terminated with a single floating field ring," *Solid-State Electronics*, vol. 33, No. 5, pp. 485-488, 1990.

[5] K. D. Suh, S. W. Hong, K. R. Lee and C. K. Kim, "An analysis for the potential of floating guard rings," *Solid-State Electronics*, vol. 33, No. 9, pp. 1125-1129, 1990.

[6] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, Wiley, 1962.

著 者 紹 介



羅 庚 晚(準會員)  
1966年 4月 1日生. 1988年 2月  
아주대학교 전자공학과 졸업.  
1994年 2月 아주대 대학원 전자공  
학과 졸업(석사). 현재 금성일렉트  
론 중앙연구소 근무. 주관심 분야  
는 전력반도체소자 및 Flash  
Memory 등임.

鄭 相 九(正會員) 第 29卷 A編 第 12號 參照  
현재 아주대학교 전자공학과 교수

金 相 培(正會員) 第 29卷 A編 第 12號 參照  
현재 아주대학교 전자공학과 조교수

崔 然 益(正會員) 第 31卷 A編 第 1號 參照  
현재 아주대학교 전자공학과 교수