

## Analytic breakdown voltage as a function of temperature for GaAs p<sup>+</sup>n junction

鄭 龍 成\*  
(Yong-Sung Chung)

**Abstract** - Temperature dependence of effective ionization coefficients in GaAs is formulated as a single polynomial function of temperature, which allows analytical expressions for breakdown voltage of GaAs p<sup>+</sup>n junctions as a function of temperature. At 300 K, extracted effective ionization coefficient of GaAs p<sup>+</sup>n junction especially agrees well with the published result of <111> oriented GaAs. The analytic results agree with the simulation as well as the experimental ones reported within 10 % in error for the doping concentrations in the range of 10<sup>14</sup> cm<sup>-3</sup>~10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> at 100 K, 300 K and 500 K.

**Key Words** : Temperature dependent, Effective ionization coefficient, Analytical expression, Breakdown voltage, Gallium Arsenide

### 1. 서 론

현재 여러 분야의 전자 제품의 전원(power supply) 회로에 사용되는 다이오드를 비롯하여 BJT(Bipolar Junction Transistor), IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), 다이리스터(thyristor) 등은 pn 접합으로 구성되며, 이러한 전력 소자에 있어서 항복 전압(breakdown voltage)은 높을수록, 순방향 전압 강하는 낮을수록 좋다. 높은 항복 전압 특성을 나타내는 다이오드로는 Silicon p<sup>+</sup>n 접합 다이오드 및 쇼트키 다이오드(Schottky diode) 등이 이용되고 있고, GaAs를 이용한 다이오드의 사용도 점차 늘어나고 있는 실정이다.

GaAs는 높은 스위칭 속도에 따른 고속 동작, 낮은 ON 저항으로 인한 적은 전력 손실 및 고온에서의 안정된 동작과 큰 이동도, 넓은 밴드 갭 등의 장점으로 인해 전력 반도체 소자로서 매우 우수한 특성을 지니고 있다[1]. 최근에는 항복 전압이 600 V인 GaAs 정류 소자가 개발되는 등 GaAs 전력 소자 분야의 상업적인 개발에 관심이 집중되고 있다[2].

일반적으로 항복 전압은 온도에 따라 변화하게 되는데, 이것은 다이오드가 기준 전압이나 정전압 전원으로 사용될 경우, 시스템 성능에 영향을 미칠 수 있는 요인이 된다. 또한, 온도에 따른 항복 전압의 변화는 2차 항복(second breakdown)의 발생에 크게 영향을 미칠 수 있기 때문에 매우 중요하다[3]. 한편, GaAs 전력 소자는 자기 부상 열차에 응용될 경우, 액체 질소 온도인 77 K에서, 전력 응용 분야

인 경우, 500 K 정도에서 사용되는 등, 사용 온도 범위가 점차 넓어지고 있다.

GaAs 전력 소자의 최적 설계를 위해서는 주어진 항복 전압과 ON 저항을 만족시키면서 가능한 한 칩 면적을 작게 해야 하는데, 소자의 구조와 온도 및 농도 등의 변수가 주어질 경우, 그에 따른 항복 전압의 예측이 가능해야 한다. 이를 위해서 GaAs p<sup>+</sup>n 접합의 온도에 따른 항복 전압에 대한 해석적인 식의 필요성이 증대되고 있다.

본 논문에서는 근사적 방법을 통해 GaAs의 유효 이온화 계수를 온도 함수로 추출하여, 이것을 이온화 적분을 수행함으로써 항복 전압을 위한 해석적 표현식을 온도 함수로 유도하고자 한다. 해석적 결과는 100 K, 300 K 및 500 K일 때 기존의 실험 결과 및 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 해석적 항복 전압식의 타당성을 검증하였다.

### 2. 해석적인 모델링

일반적으로 온도를 고려한 GaAs의 이온화계수,  $\alpha_T$  와  $\beta_T$ 는 다음 식 (1)과 같이 표시된다[4].

$$\alpha_T, \beta_T = (0.22 + 2.5 \times 10^{-4} T) \cdot E \cdot \exp\left\{-\left(\frac{4.6 \times 10^5 + 4.2 \times 10^2 T}{E}\right)^2\right\} \quad (1)$$

여기서, T는 온도이고, E는 전계를 나타내며, p<sup>+</sup>n 접합의 경우 다음 식 (2)와 같다.

$$E(x) = \frac{qN_D W}{\epsilon_s} \left[1 - \frac{x}{W}\right] \quad (2)$$

\* 正 會 員 : 徐羅伐大學 電氣電子電算系列 專任講師 · 工博  
接受日字 : 1998年 8月 28日  
最終完了 : 1999年 2月 24日

$q$ 는 전자 전하,  $N_D$ 는 기판의 농도,  $\epsilon_s$ 는 GaAs의 유전율 (permittivity)이다. 그림 1에 GaAs  $p^+n$  접합의 전계 분포를 나타냈다.

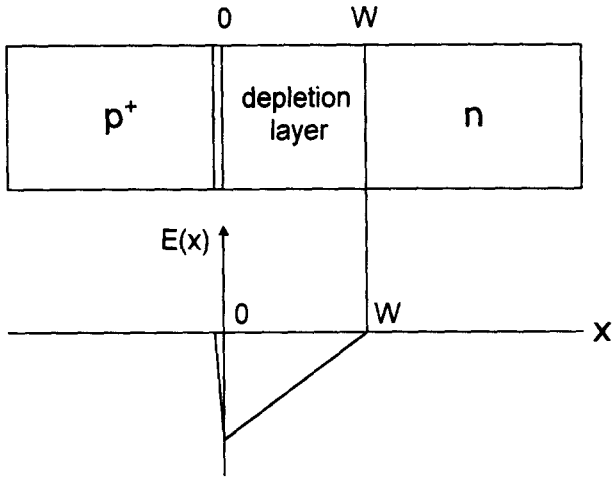


그림 1 GaAs  $p^+n$  접합의 전계 분포

Fig. 1 Electric field distribution for GaAs  $p^+n$  junction.

식 (1)로부터 근사 시킨 유효 이온화계수를 추출하기 위해 먼저, 각 온도에서의 이온화계수를 그리고, 이것을 이용하여 임의의 두 교차점을 선택하여  $\gamma_T = a \cdot E^m$  형태의 유효 이온화계수를 추출한다.  $\gamma_T$ 에 대한 근사식은 경험적인 것이며, 이 함수에 대한 확실한 이론적인 배경은 없다. 다음, 온도에 따라 각각 추출된 유효 이온화계수로부터 최소 자승법을 이용하여 온도 함수의 근사 유효 이온화계수,  $\Gamma$ 를 추출한다.

각 온도에 따른 유효 이온화계수,  $\gamma_T$ 로부터 구한 온도 함수의 근사 유효 이온화계수,  $\Gamma$ 는 다음 식 (3)과 같다.

$$\Gamma = a(T)E^{6.41} \text{ cm}^{-1} \quad (3)$$

여기서,

$a(T) = (8.02 \times 10^{-38} \cdot T^2 - 8.44 \times 10^{-35} \cdot T + 2.82 \times 10^{-32})$ 이다. 특히, 300 K의 경우에 추출된  $\gamma_{300} = 1.01 \times 10^{-32} \cdot E^{6.41}$ 는 발표된 <111> 방향 GaAs의 유효 이온화계수[5]와 거의 일치하는 결과를 나타냈다. 100 K, 300 K 및 500 K에서 추출한 유효 이온화계수,  $\gamma_T = aE^m$ 의 계수를 표 1에 나타냈다.

그림 2에는 100 K, 300 K 및 500 K일 경우, 식 (1)과 온도 함수의 근사 유효 이온화계수 식 (3)의 결과를 비교하여 나타냈다. 각 온도에서 유효 이온화계수가 이온화계수와 차이를 나타낸 것은  $\gamma_T$  추출시 경험적 방법을 이용함으로써 나타난 결과로서, 근사 시킨 유효 이온화계수를 이용하더라도 Si[6]과 InP[7]의 경우, 항복 전압 결과가 실험 결과와 큰 오차를 나타내지 않는 것으로 알려져 있다. 또한, 그림 2에서 온도가 증가함에 따라 이온화계수가 점차 감소하였는

표 1 온도에 따른 GaAs 유효 이온화계수

Table 1 Temperature dependent effective ionization coefficient of GaAs.

| 계수<br>T | a                      | m    |
|---------|------------------------|------|
| 100 K   | $2.06 \times 10^{-32}$ | 6.41 |
| 300 K   | $1.01 \times 10^{-32}$ | 6.41 |
| 500 K   | $6.05 \times 10^{-33}$ | 6.41 |

데, 이것은 수정체 격자의 온도가 증가함에 따라 전자의 평균 자유 행정 길이가 감소함으로써, 일정한 전계 하에서는 주어진 거리에 대해 반응자가 더 많은 에너지를 수정 격자에 잃기 때문이다.

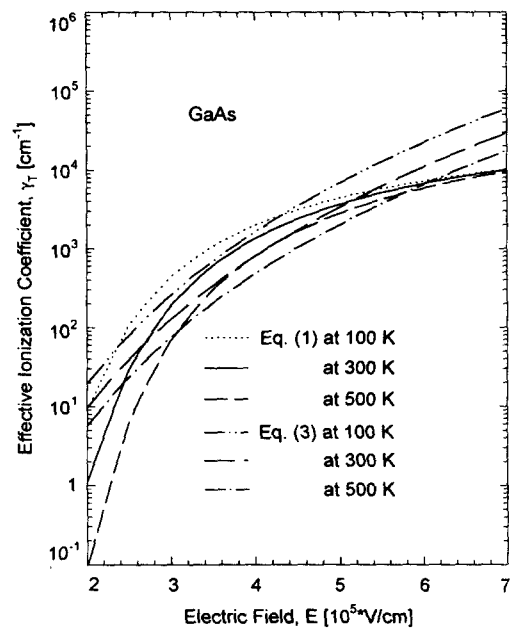


그림 2 온도에 따른 GaAs의 유효 이온화계수.

Fig. 2 Temperature dependent effective ionization coefficients for GaAs.

일반적으로 온도 함수의 근사 유효 이온화계수,  $\Gamma$ 를 사용하면 항복 조건은 다음 식 (4)와 같이 간단해진다[8].

$$\int_0^W \Gamma dx = 1 \quad (4)$$

한편, 식 (3)에 식 (2)를 대입하면 근사 유효 이온화계수는 식 (5)가 된다.

$$\Gamma = a(T) \left\{ \frac{q \cdot N_D}{\epsilon_s} (W-x) \right\}^{6.41} \quad (5)$$

$$= a(T) \{ 1.37 \times 10^{-7} N_D (W-x) \}^{6.41}$$

따라서 식 (5)를 식 (4)에 대입하여 풀면 항복시 공핍층 폭,  $W_{pp}$ 는 식 (6)과 같이 구해진다.

$$W_{pp} = \frac{1.13 \times 10^6 \cdot N_D^{-0.87}}{a(T)^{0.13}} \quad (6)$$

또한, 아발란치 항복시 임계 전계,  $E_c$ 는 확산 길이,  $x=0$ 인 경우, 식 (7)이 되고, 식(7)에 식 (6)을 대입하면 식 (8)이 구해진다.

$$E_c = \frac{q N_D W_{pp}}{\epsilon_s} \quad (7)$$

$$= 1.37 \times 10^{-7} N_D \cdot W_{pp}$$

$$E_c = \frac{1.55 \times 10^{-1} \cdot N_D^{0.13}}{a(T)^{0.13}} \quad (8)$$

그림 3에는 100 K, 300 K 및 500 K일 경우에 대한 식 (8)의 결과를 각각 나타냈고, 300 K일 때의 실험 결과[9]와 비교하였다. 그림 3에서 농도가 같을 경우, 온도가 증가함에 따라 항복 전계가 증가하였고, 각 온도의 경우 낮은 전계와 높은 전계에서 이온화계수와 유효 이온화계수가 크게 차이를 나타내었다. 일반적으로 상온에서는 그림 3과 같이 기판의 도핑 농도를  $10^{14} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 로 할 때, 임계 전계가 약  $2.5 \times 10^5 \sim 6.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 를 나타내게 되는데, 대부분 GaAs는  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 의 농도에서 이용되므로, 이에 따른 전계값은 약  $4 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 가 된다. 따라서, 낮은 전계 ( $2 \times 10^5 \text{ V/cm}$ )와 높은 전계 ( $7 \times 10^5 \text{ V/cm}$ )에서 차이를 나타내어도 실제 이용되는 항복 전압에는 크게 영향을 주지 않는다. 또한, 온도 증가에 따라 전계가 증가하므로, 같은 농도일 경우, 온도가 증가하면 항복 전압이 감소하게 된다.

GaAs  $p^+n$  접합의 해석적인 항복전압은  $BV_{pp}(T) = qN_D \cdot W_{pp}^2 / (2\epsilon_s)$ 의 식을 이용하면 다음 식 (9)가 된다.

$$BV_{pp}(T) = \frac{8.80 \times 10^4 \cdot N_D^{0.73}}{a(T)^{0.27}} \quad (9)$$

표 2에는 100 K, 300 K 및 500 K일 경우, 농도 변화에 따른 GaAs의 해석적 항복 전압을 나타냈다.

그림 4에는 100 K, 300 K 및 500 K에 대한 해석적 항복 전압을 GaAs module이 내장된 ATLAS 시뮬레이션 결과와 비교하였고, 300 K의 경우에는 해석적 결과를 시뮬레이션 결과와 수치 해석적 결과[4] 및 실험 결과[10]와 비교하여 매우 잘 일치하였다.

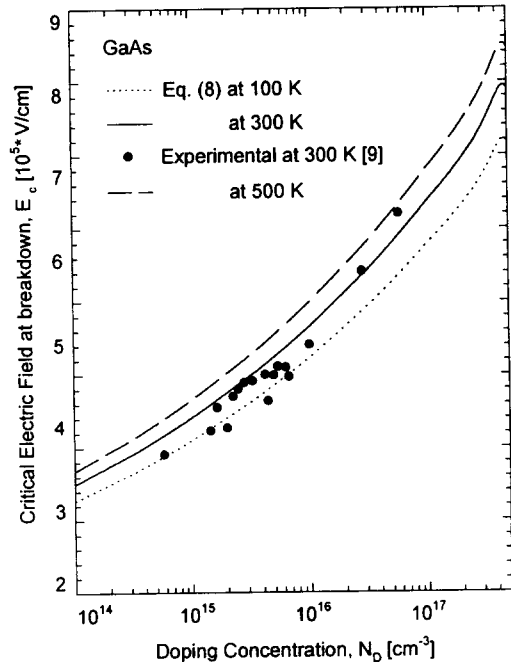


그림 3 온도에 따른 임계 항복 전계.

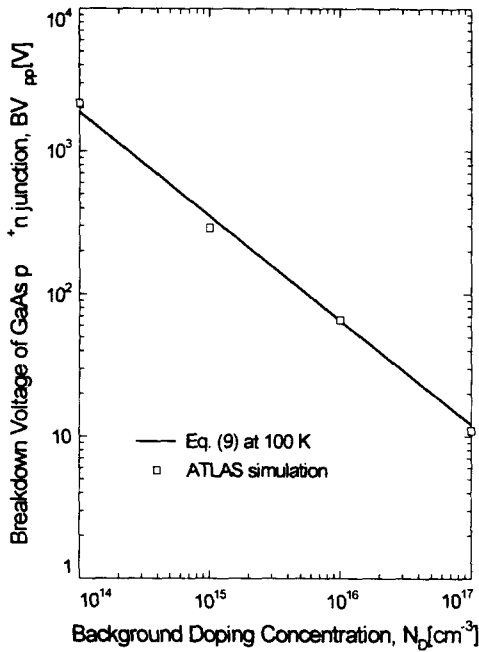
Fig. 3 Critical breakdown electric field as a function of temperature.

표 2 온도 함수의 해석적 항복 전압

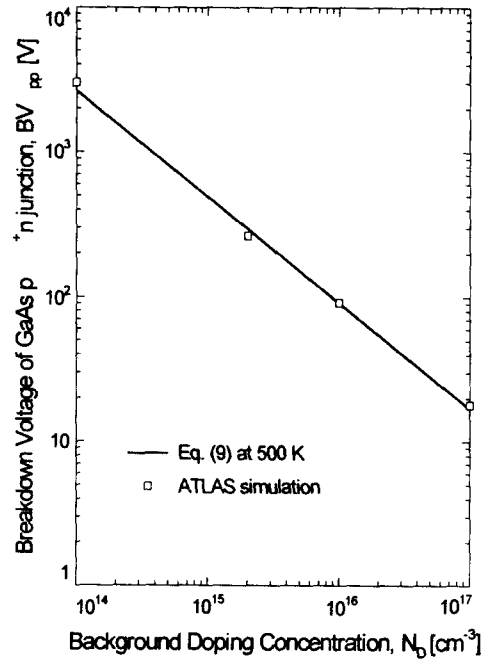
Table 2 Analytical breakdown voltage as a function of temperature.

| 온도 \ 농도   | 100 K   | 300 K   | 500 K   |
|-----------|---------|---------|---------|
| $10^{14}$ | 1886.80 | 2287.04 | 2626.30 |
| $10^{15}$ | 351.26  | 425.77  | 488.93  |
| $10^{16}$ | 65.39   | 79.27   | 91.02   |
| $10^{17}$ | 12.17   | 14.76   | 16.95   |

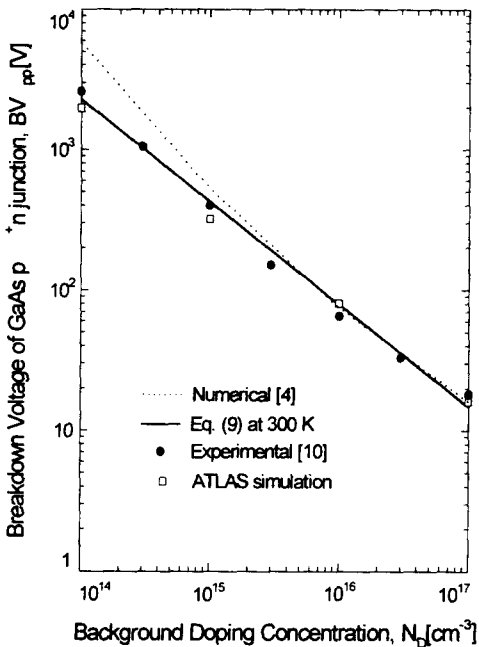
100 K, 300 K 및 500 K일 경우 모두, 해석적 결과는 선으로 나타냈고, 시뮬레이션 결과는 □로 나타냈으며, 300 K일 경우, 수치 해석적 결과는 점선으로, 실험 결과는 ●로 나타냈다.



(a) at 100 K



(c) at 500 K



(b) at 300 K

100 K와 500 K의 경우에는 해석적 결과를 ATLAS 시뮬레이션 결과와 만 비교하였는데, 시뮬레이션 결과의 타당성을 입증하기 위해 300 K일 경우의 시뮬레이션 결과를 실험 결과와 비교한 바  $10^{14} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  도핑 농도 범위에서 평균 약 7 % 정도의 오차를 나타냈다. 100 K와 500 K의 경우에

그림 4 GaAs p-n 접합의 농도에 따른 항복 전압

Fig. 4 Concentration dependent breakdown voltages of GaAs p-n junction.

도 해석적 결과는 시뮬레이션 결과와 10 % 이내의 오차를 나타냈다. 이와 같은 오차는 해석식을 구하기 위해 온도 함수의 유효 이온화계수를 근사적으로 추출하여 생긴 오차로 판단된다.

각 온도에서 해석적인 항복 전압을 비교한 결과, 임의의 농도에 대해 온도가 증가함에 따라 항복 전압이 증가함을 나타냈는데, 이것은 GaAs 계단형 접합 다이오드가 아발란치 증배로 인해 항복 현상이 발생할 때는 항복 전압이 양 (+)의 온도 계수를 나타내게 되므로 에너지 갭이 온도가 증가함에 따라 증가하게 됨으로써 온도 증가에 따라 아발란치 항복 전압이 증가하기 때문이다[3]. 100 K에서 300 K로의 온도 증가에 따른 항복 전압의 증가폭은 약 1.15 배로 나타났고, 300 K에서 500 K로 증가할 때의 항복 전압의 증가폭은 약 1.21 배 정도로 나타났다. 시뮬레이션을 위해서는 온

도에 따라  $\alpha, \beta = A \exp\left\{-\left(\frac{b}{E}\right)^m\right\}$  형태의 전자와 정공의 이온화계수를 각각 parameter로 입력해야 하는데, 이를 위해서 먼저 300 K일 경우에는 해석적인 결과가 시뮬레이션 결과 및 <111> 방향 GaAs의 실험 결과와 거의 일치하고 있어, Sze의 <111> 방향 GaAs에서의  $\alpha$ 와  $\beta$ [11]를 이용하였고, 100 K와 500 K에 대한  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 구하기 위해 A와 b에 대한 온도 계수[3]를 이용하였다. A와 b의 온도 계수를 표 3에 나타냈다.

온도 계수를 이용하여 얻은  $\alpha, \beta$ 에 대한 계수 A와 b를

표 4에 각 온도별로 나타냈다.

표 5에는 표 4의 온도에 따른 GaAs의  $\alpha$ ,  $\beta$ 에 대한 A와 b를 이용하여 구한  $10^{14} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  농도 범위에서의 100 K, 300 K 및 500 K일 경우, 항복 전압 시뮬레이션 결과를 나타냈다.

표 3 GaAs의  $\alpha$ ,  $\beta$ 에 대한 A와 b의 온도 계수[3]  
**Table 3** Temperature coefficients of factors A and b of GaAs's  $\alpha$ ,  $\beta$ [3].

|               |        |   |   |
|---------------|--------|---|---|
| semiconductor | $A, b$ | $\frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dT}$<br>[ $10^4 \text{ K}$ ] <sup>-1</sup> | $\frac{1}{b} \cdot \frac{db}{dT}$<br>[ $10^4 \text{ K}$ ] <sup>-1</sup> |
|               | GaAs   | 17.1  | 11.4  |

표 4 온도에 따른 GaAs의  $\alpha$ ,  $\beta$ 에 대한 A와 b  
**Table 4** Temperature dependent factors A and b of GaAs's  $\alpha$ ,  $\beta$ .

|                 |   |                                      |      |   |                                      |      |
|-----------------|---|--------------------------------------|------|---|--------------------------------------|------|
| $\alpha, \beta$ | $\alpha$                                |                                      |      | $\beta$                                 |                                      |      |
|                 | $A \times 10^5$<br>[ $\text{cm}^{-1}$ ] | $b \times 10^5$<br>[ $\text{V/cm}$ ] | m    | $A \times 10^6$<br>[ $\text{cm}^{-1}$ ] | $b \times 10^6$<br>[ $\text{V/cm}$ ] | m    |
| 온도              |   |                                      |      |   |                                      |      |
| 100 K           | 0.551                                   | 3.54                                 | 6.91 | 4.48                                    | 1.84                                 | 1.00 |
| 300 K           | 0.776                                   | 4.45                                 |      | 6.31                                    | 2.31                                 |      |
| 500 K           | 1.092                                   | 5.59                                 |      | 8.88                                    | 2.90                                 |      |

표 5 온도에 따른 ATLAS 시뮬레이션 항복 전압  
**Table 5** ATLAS simulation breakdown voltage as a function of temperature.

|           |       |       |                                   |
|-----------|-------|-------|-----------------------------------|
| 온도        | 100 K | 300 K | 500 K                             |
| 농도        |       |       |                                   |
| $10^{14}$ | 2155  | 1978  | 2990                              |
| $10^{15}$ | 290   | 320   | 263<br>( $2 \times 10^{15}$ 일 경우) |
| $10^{16}$ | 66    | 80    | 92                                |
| $10^{17}$ | 11    | 16    | 18                                |

### 3. 결 론

본 논문에서는 GaAs 평면형 p-n 접합의 온도 함수의 유효 이온화계수를 근사적으로 추출하여 아발란치 항복 전압을 위한 해석적인 표현식을 온도 함수로 유도하였다. 항복 전압을 위한 해석식의 결과, 300 K의 경우에는 실험 결과 및 시뮬레이션 결과와 10 % 이내의 오차로 잘 일치하였고, 100 K 및 500 K에서도 ATLAS 시뮬레이션 결과와 매우 잘 일치하였다. 해석적인 식은 GaAs p-n 접합의 온도에 따른 항복 전압을 예측하여 설계하는데 유용하게 쓰여질 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] B. J. Baliga, "Power Semiconductor Device Figure of Merit for High-Frequency Applications," *IEEE Electron Device Letters*, Vol.10, No.10, pp.455-457, 1989.
- [2] Ali S. M. Salih et al., "High Voltage GaAs Power Rectifiers with Low Switching and Conduction Losses", *Proc. PEDS'95*, pp.259-263, Singapore, Feb.21-24, 1995.
- [3] P. Mars, "Temperature Dependence of Avalanche Breakdown Voltage in p-n Junctions," *Int. J. Electronics*, Vol.32, No.1, pp.23-37, 1971.
- [4] Y. Okuto et al., "Threshold Energy Effect on Avalanche Breakdown Voltage in Semiconductor Junctions," *Solid State Electron.*, Vol.18, pp.161-168, 1975.
- [5] Y. S. Chung et al., "Closed-Form Analytical Expressions for the Breakdown Voltage of GaAs Parallel-Plane p-n Junction in <100>, <110>, and <111> Orientations," *Solid State Electron.*, Vol.39, No.11, pp.1678-1680, 1996.
- [6] W. Fulop, "Calculation of Avalanche Breakdown of Silicon p-n Junctions," *Solid State Electronics*, Vol. 10, pp. 39-43, 1967.
- [7] T. H. Moon et al., "Calculation of Avalanche Breakdown Voltage of the InP p+n Junction," *Solid-State Electronics*, Vol. 37, No. 1, pp. 187-188, 1994.
- [8] B. J. Baliga, *Modern Power Devices*, Wiley, New York, pp.62-92, 1987.
- [9] B. J. Baliga, R. Ehle, J. R. Shealy, and W. Garwacki, "Breakdown Characteristics of Gallium Arsenide," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. EDL-2, No. 11, pp. 302-304, 1981.
- [10] S. M. Sze and G. Gibbons, "Avalanche Breakdown Voltages of Abrupt and Lineary Graded p-n Junctions in Ge, Si, GaAs, and Gap," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.8, pp.111-113, 1966.
- [11] M. H. Lee and S. M. Sze, "Orientation Dependence of Breakdown Voltage in GaAs," *Solid-State Electron.*, Vol.23, pp.1007-1009, 1980.

---

저 자 소 개



정 용 성(鄭 龍 成)

1955년 5월 8일 생. 1988년 8월~1995년 12월 서일대학 전자계산과 및 전자통신과 시간강사. 1996년 3월~현재 서라벌대학 전기전자전산계열 전임강사. 관심분야는 반도체 설계 및 시뮬레이션

Tel : (0561) 770-3692

E-mail : jysung@sorabol.ac.kr