

논문 2007-44IE-1-3

# InP 다이오드에서 항복전압의 해석적 모델

(Analytical Model for Breakdown Voltages of InP Diodes)

정용성\*

(Yongsung Chung)

## 요약

InP의 전자와 정공의 이온화계수로부터 추출한 유효이온화계수를 이용하여 InP 다이오드의 항복전압을 위한 해석적 표현식을 유도하였다. 해석적 항복전압 결과를  $N_D = 6 \times 10^{14} \text{cm}^{-3} \sim 3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 의 도핑 농도에서 수치적 결과 및 실험 결과와 비교하였다. 각 농도에 따른 해석적 항복전압은 수치 해석적 결과와 매우 잘 일치하였고, 실험 결과와는 10% 이내의 오차로 잘 일치하였다.

## Abstract

Analytical expression for breakdown voltages of InP diodes is induced by employing the effective ionization coefficient extracted from ionization coefficients for electron and hole in InP. The analytical results for breakdown voltage are compared with numerical and experimental results for the doping concentration,  $N_D = 6 \times 10^{14} \text{cm}^{-3} \sim 3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ . The analytical results show good agreement with the numerical data. Good fits with the experimental results are found for the breakdown voltages within 10% in error at each doping concentration.

**Keywords :** InP, Effective ionization coefficient, Depletion width, Critical electric field, Breakdown voltages.

## I. 서론

인듐인(Indium Phosphide, InP)은 적당하게 높은 전자 이동도뿐 아니라 III-V족 화합물 반도체 중 가장 높은 포화 속도<sup>[1]</sup>와 항복 전계 및 높은 항복전압 특성을 갖는 물질로서 고성능 마이크로파 전력 소자에 적합하다<sup>[2]</sup>. 또한, InP는 높은 전계에 잘 견딜 만큼 GaAs보다 높은 열전도도를 갖는다<sup>[3]</sup>.

한편, 여러 분야의 전자 제품의 전원에는 정류 소자가 많이 쓰이고 있는데, 전원 회로에 사용되는 다이오드를 비롯하여 BJT, IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), 다이리스터 등은 pn 접합으로 구성되며, 이러한 전력 소자에 있어서 항복전압은 높을수록, 순방향 전압 강하는 낮을수록 좋다.

높은 항복전압 특성을 나타내는 다이오드로는 Si p<sup>+</sup>n

접합 다이오드 및 쇼트키 다이오드 등이 이용되고 있고, InP를 이용한 다이오드의 사용도 늘어나고 있다<sup>[4]</sup>.

InP에서 전자와 정공의 아발란치 이온화계수  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 IMPATT(impact ionization avalanche transit time) 다이오드, MESFETs, APD(avalanche photodiodes)와 같은 InP 소자 설계시에 기본적인 요소로 사용되며, InP의 전자와 정공에 따른 이온화계수를 전계 E의 함수로 측정된 결과가 다수 발표되었다<sup>[4-8]</sup>. 이와 같은 이온화계수를 통해 수치적 이온화 적분을 이용하여 아발란치 항복전압을 계산할 경우에는 매우 복잡할 뿐 아니라 소자 설계시 즉시 적용할 수 없는 문제가 있다. Umebu<sup>[4]</sup>와 Armiento<sup>[5]</sup> 및 Kao<sup>[6]</sup>는 InP 계단형 접합의 항복전압을 수치 해석적 방법에 의해 구한바 있으나, 해석적인 모형이 아니기 때문에 설계에 적용하기 위해서는 불편한 점이 많다.

본 논문에서는 InP에 대한 전자와 정공의 이온화계수,  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 근사화시킨 유효 이온화 계수를  $\gamma = CE^m$ 의 형태로 추출함으로써 계단형 접합의 항복전압을 위

\* 정희원, 서라벌대학 팬시완구디자인과  
(Dept. of Fancy Toy Design, Sorabol College)  
접수일자: 2007년1월17일, 수정완료일: 2007년2월28일

한 해석적인 공식을 유도하고, 이를 이미 발표된 수치 해석 결과 및 실험 결과와 비교함으로써, 본 논문에서 제시한 항복전압 모델의 타당성을 검증하고자 한다.

### II. InP 다이오드의 해석적 항복 전압

역방향 바이어스된 pn 접합에서는 그림 1과 같이 n 영역으로부터 접합의 공간 전하 영역(space charge layer)으로 들어온 초기의 정공이 p 영역으로 가기 위해 전계로부터 운동 에너지를 얻게 된다.

전계로부터 얻은 높은 에너지를 가진 정공은 결정격자와 충돌하게 되고, n 영역 접합에서  $x_1$  만큼 떨어진 곳에서 전자-정공 쌍을 생성하기 위해 원자를 이온화시키게 되는데, 이것을 충돌 이온화(impact ionization)라고 한다. 이온화 과정은 그림 2에 나타났다.

$x_1$ 에서는 정공으로 초기화된 충돌 이온화에 의해 전자-정공 쌍이 형성되며, 이때 전자는 전도대(conduction band)로 여기(excited)되면서 전위 장벽을 타고 내려가 n 영역으로 흐르고, 정공은 가전자대(valance band)에 남아 초기의 정공을 따라 p 영역으로 가게 된다.

이 정공들은 계속하여 운동 에너지를 얻게 되며,  $x_2$ ,  $x_3$ 에서 이어지는 격자와의 충돌로 인해 이에 따른 추가 전자를 발생시키게 된다. 따라서 그림 2의 경우 처음 한 개의 정공으로 시작한 이후 네 개의 정공과 세 개의 전자가 공핍층(depletion layer)을 서로 통과함으

로써 전도가 이루어지게 된다. 이와 같은 증배 과정(multiplication process)을 거쳐 반송자가 발생되는데, 이것을 아발란치 증배(avalanche multiplication)라고 한다.

아발란치 항복전압은 충돌 이온화 과정과 관계가 있는데, 이것은 반송자가 전계 방향을 따라 공핍층을 통해 1cm를 횡단할 때 발생하는 전자와 정공 쌍의 수로 정의되는 충돌 이온화계수에 의해 결정된다. InP의 경우에도 Si에서와 마찬가지로 전자와 정공의 이온화계수는 다음 식 (1)로 표현된다<sup>[4-8]</sup>.

$$\alpha, \beta = A_{n,p} \exp\left(\frac{b_{n,p}}{E}\right) cm^{-1} \quad (1)$$

여기서,  $E$ 는 전계이고,  $A_{n,p}$  및  $b_{n,p}$ 는 Chynoweth 계수로서 전자와 정공에 따라 각각 다른 값을 갖는다.

아발란치 항복은 충돌 이온화가 무한대에 도달하는 조건하에서 발생되는데, 만일 아발란치 증배 과정이 정공에 의해 초기화된 경우, 이 조건은 식 (2)의 이온화 적분식을 통해 구해진다<sup>[9]</sup>.

$$\int_0^W \left[ \beta \exp\left\{ \int_0^x (\alpha - \beta) dx' \right\} \right] dx = 1 \quad (2)$$

여기서,  $W$ 는 항복시 공핍층 폭이고,  $x$ 는 n 접합으로부터의 거리이며,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 전자와 정공의 이온화 계수이다. 한편, 계단형 접합의 항복 전압은 다음 식 (3)과 같이 구해진다.

$$V_{br} = \frac{qN_D W_{br}^2}{2\epsilon_s} \quad V \quad (3)$$

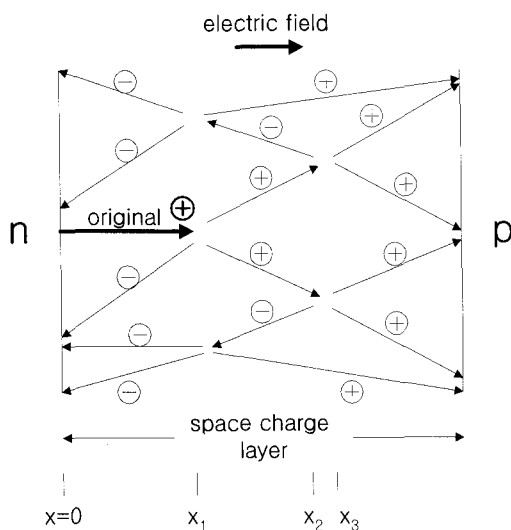


그림 1. n형 측에서 주입된 정공에 의해 초기화된 공간 전하 영역에서의 아발란치 증배

Fig. 1. Avalanche multiplication in the space charge region initiated by a hole injection from the n side.

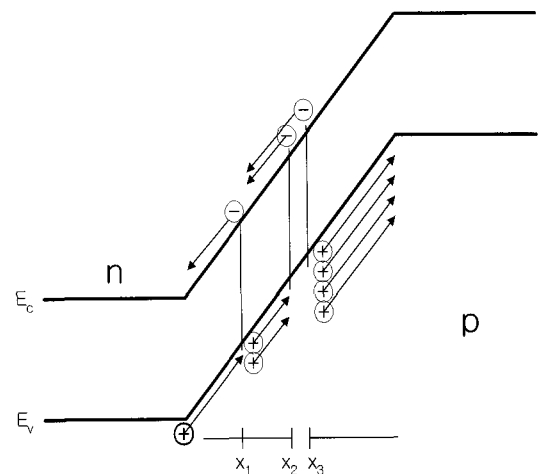


그림 2. 에너지대

Fig. 2. Energy band.

이때,  $q$ 는 전자 전하량,  $N_D$ 는 드리프트 영역의 도핑 농도,  $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$ 는 인듐인의 유전율,  $W_b$ 는 항복시 공핍층 폭이다.

항복전압을 구하기 위해서는 먼저 전자와 정공의 이온화계수를 식 (2)에 대입하여 농도 함수의 공핍층 폭을 구해야 한다. InP의 이온화계수는 다수 발표되었지만 정확한 아발란치 증배층 두께와 집적화된 면적 전하 밀도를 구하기 위해서는 이온화계수를 최적으로 선택하는 것이 매우 중요하다<sup>[10]</sup>. Umebu<sup>[4]</sup> 및 Cook<sup>[7]</sup>이 제시한 이온화계수를 이용하여 구한 증배층 두께와 면적 전하 밀도의 경우에는 각각 기준값과 비교하여 증가하거나 감소하는 등 서로 상반된 특징을 나타냈다<sup>[10]</sup>. 한편, Armiento<sup>[8]</sup>나 Osaka<sup>[11]</sup>에 의해 제시된 전자와 정공의 이온화계수는 서로 유사한 값을 갖고 있지만, Armiento<sup>[8]</sup>의 정공 이온화계수는 Osaka<sup>[11]</sup>에 의해 제시된 정공 이온화계수와 다소 차이를 나타내는 것으로 알려져 있다<sup>[10]</sup>. 따라서, 최근에는 Osaka<sup>[11]</sup>에 의해 제시된 전자와 정공의 이온화계수를 사용하고 있으며, 그 전자와 정공의 이온화계수는 각각 다음 식 (4) 및 식 (5)와 같다.

$$\alpha = 5.55 \times 10^6 \exp\left[-\frac{3.10 \times 10^6}{E}\right] \text{cm}^{-1} \quad (4)$$

$$\beta = 1.98 \times 10^6 \exp\left[-\frac{2.29 \times 10^6}{E}\right] \text{cm}^{-1} \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 전자와 정공의 이온화계수이고,  $E$ 는 전계이다. 한편, 실리콘의 경우 Fulop<sup>[12]</sup>에 의해 처음 제안된 유효이온화계수 식은 실리콘 소자 설계시 계산에 매우 유용하게 사용되어지고 있다. 즉, 인듐인에 대한 아발란치 항복 현상도 Fulop<sup>[12]</sup>에 의해 제시된 식 (6)의 유효이온화계수 모델을 이용하여 해석할 수 있다.

$$\gamma = C \cdot E^m \text{cm}^{-1} \quad (6)$$

이때,  $C$ 는 상수이고,  $m$ 은 지수이다. 본 논문에서는 식 (4)와 식 (5)의 이온화계수로부터 유효이온화계수를 식 (6)의 형태로 추출함으로써 이것을 이용하여 항복전압 모델을 제안하였다. 이 경우,  $C$ 와  $m$ 의 값을 구하기 위해 경험적인 방법이 사용되었고, 본 논문에서 제시한 유효이온화계수 모델은 식 (7)과 같다.

$$\gamma = 3.67 \times 10^{-25} \cdot E^5 \text{cm}^{-1} \quad (7)$$

그림 3에는 식 (4) 및 식 (5)의 이온화계수  $\alpha$  및  $\beta$ 와

본 논문에서 추출된 근사 유효이온화계수  $\gamma$  식 (7)의 결과를 전계 함수로 비교하여 나타냈다. 그림 3에서 유효이온화계수가 전자 및 정공 이온화계수와 차이를 나타낸 것은  $\gamma$  추출시 경험적 방법, 즉  $\alpha \approx \beta \approx \gamma$ 로 하여 추출한 결과로서, 근사화시킨 유효이온화계수를 이용하더라도 항복전압 결과가 실험 결과와 큰 오차를 나타내지 않는 것으로 알려져 있다<sup>[12]</sup>.

유효이온화계수를 이용할 경우에 항복 조건은 다음의 이온화 적분 식 (8)과 같이 단순화된다.

$$\int_0^W \gamma dx = 1 \quad (8)$$

이때,  $W$ 는 기판에서의 공핍층 폭이고,  $\gamma$ 는 본 논문에서 추출한 유효이온화계수이다. 식 (8)을 통해 Poisson 방정식을 풀면 공핍층에서의 전계 분포는 다음 식 (9)와 같다.

$$E(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_r \epsilon_0} (W-x) \quad \text{V/cm} \quad (9)$$

여기서,  $q$ 는 전자 전하,  $N_D$ 는 기판의 도핑 농도,  $\epsilon_r$ 과  $\epsilon_0$ 는 각각 인듐인의 비 유전율과 유전 상수이고,  $x$ 는 n 접합으로부터의 거리이다. 식 (7)과 식 (9)를 식 (8)에 대입하면 항복시 공핍층 폭은 다음 식 (10)과 같이 구해진다.

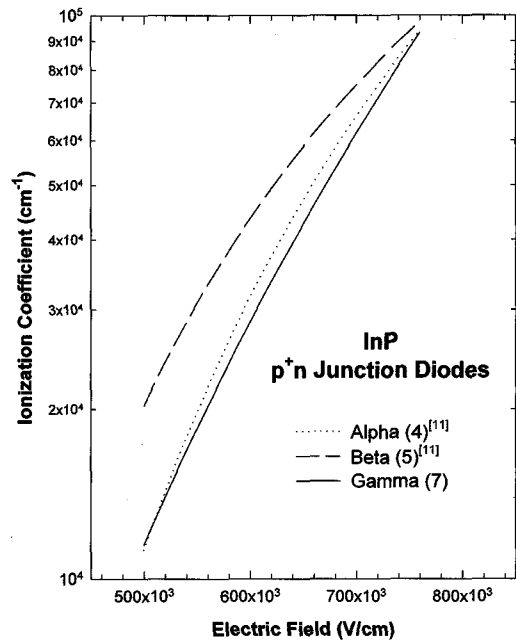


그림 3. 전계 함수의 이온화계수와 유효이온화계수  
Fig. 3. Ionization coefficients and effective ionization coefficient as a function of electric field.

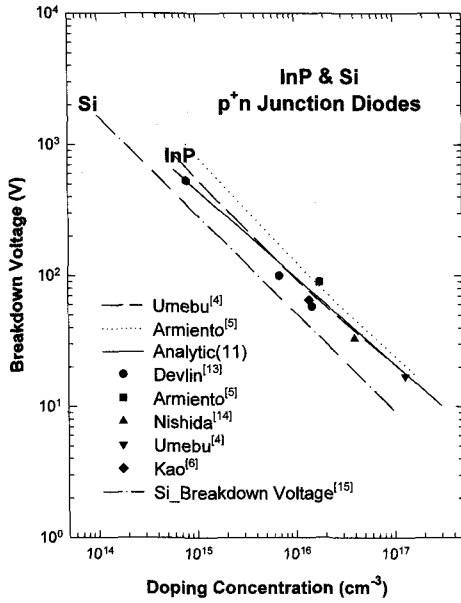


그림 4.  $N_D = 6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \sim 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 도핑 농도에서의 항복전압

Fig. 4. Breakdown voltages for the doping concentrations  $N_D = 6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \sim 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

$$W_{br} = 7.92 \times 10^9 \cdot N_D^{-0.833} \text{ cm} \quad (10)$$

항복시 공핍층 폭을 위한 식 (10)을 이용하면 계단형 접합의 해석적인 항복전압은 다음 식 (11)과 같아진다.

$$V_{br} = 4.58 \times 10^{12} \cdot N_D^{-0.667} \text{ V} \quad (11)$$

그림 4에는  $N_D = 6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \sim 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 범위에서 식 (11)로부터 구한 InP 다이오드의 해석적 항복전압을 실험 데이터<sup>[4-6, 13-14]</sup> 및 수치 해석적 결과<sup>[4-5]</sup>와 비교하여 나타냈다. 그림 4에서 식 (11)의 해석적 항복전압은  $N_D = 6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \sim 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 농도 범위에서 Umebu<sup>[4]</sup>의 수치 해석적 결과와는 거의 일치하였고, Armiento<sup>[5]</sup>의 수치 해석적 결과보다는 실험 결과와 더 잘 일치하였다.

특히,  $N_D = 8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 와  $N_D = 1.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 경우에는 해석적 결과가 Devlin<sup>[13]</sup>와 Umebu<sup>[4]</sup>의 실험 결과와 매우 잘 일치하였고,  $N_D = 7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \sim 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 의 농도 범위에서는 해석적 결과는 실험 결과와 비교해 10% 이내의 오차를 나타냈다.

또한, 그림 4에는 InP와 Si 다이오드의 해석적 항복전압을 비교하여 나타냈는데,  $N_D = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 의 경우, Si<sup>[15]</sup>은 52.6V를 나타냈고, InP는 98.7V를 나타내어 InP가 Si에 비해 거의 1.88배 큰 항복 전압을 가짐을 알

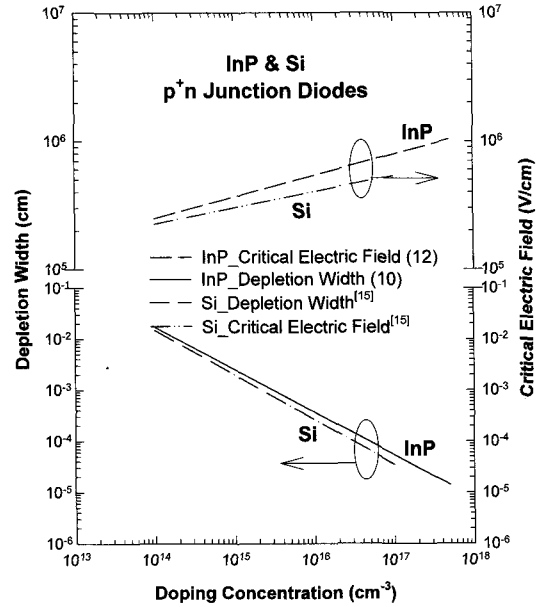


그림 5. 도핑 농도 함수의 공핍층 폭과 임계 항복 전계  
Fig. 5. Depletion width and critical electric field as a function of doping concentration.

수 있다.

$x=0$ 인 경우, 식 (10)을 식 (9)에 대입하면 항복 전계는 다음 식 (12)와 같이 구해진다.

$$E_{br} = 1.16 \times 10^3 \cdot N_D^{0.167} \text{ V/cm} \quad (12)$$

그림 5에는 항복시 공핍층 폭과 임계 전계를 도핑 농도 함수로 나타냈다. 그림 5로부터 농도가 증가함에 따라 공핍층 폭은 감소하고, 임계 전계는 증가함을 알 수 있다. 한편, 그림 5에는 InP와 Si 다이오드의 해석적 공핍층 폭과 임계 전계를 농도 함수로 서로 비교하였는데, InP는 Si보다 공핍층 폭과 임계 전계가 모두 크게 나타났다. 특히,  $N_D = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 에서 공핍층의 경우에는 InP는  $3.678 \times 10^{-4} \text{ cm}$ , Si<sup>[15]</sup>은  $2.622 \times 10^{-4} \text{ cm}$ 를 나타냈고, 임계 전계의 경우에는, InP는  $5.367 \times 10^5 \text{ V/cm}$ , Si<sup>[15]</sup>은  $4.012 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 를 나타내어 InP가 Si에 비해 공핍층의 경우에는 거의 1.4배, 임계 전계의 경우에는 약 1.33배 큰 것으로 나타났다.

### III. 결 론

InP 다이오드의 해석적 항복전압 모델을 제안하였다. 해석적 항복전압은  $N_D = 6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \sim 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 도핑 농도에서 수치 해석적 결과보다 실험 결과와 더 잘 일치하였다. 추출한 항복전압 모델은 InP 다이오드

의 도핑 농도에 따른 항복전압을 결정짓는 중요한 요소로 사용된다. 본 논문에 제시한 해석식은 InP 전력 소자 설계시 유용하게 쓰일 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. A. Littlejohn, J. R. Hauser, and T. H. Glisson, "Velocity-field characteristics of  $Ga_{1-x}In_xP_{1-y}As_y$  quaternary alloy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 30, pp. 242-244, 1977.
- [2] L. Aina, M. Burgess, M. Mattingly, J. M. O'Connor, A. Meerschaert, M. Tong, A. Ketterson, and I. Adesida, "0.33- $\mu$ m gate-length millimeter-wave InP-channel HEMT's with high  $f_t$  and  $f_{max}$ ," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 483-485, 1991.
- [3] J. D. Woodhouse, J. P. Donnelly, M. J. Manfra, and R. J. Bailey, "P-AllInAs/InP junction FET's by selective molecular beam epitaxy," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 9, no. 11, pp. 601-603, 1988.
- [4] I. Umebu, A. N. M. M. Choudhury, and P. N. Robson, "Ionization coefficients measured in abrupt InP junctions," *Appl. Phys. Lett.*, 36(4), pp. 302-303, 1980.
- [5] C. A. Armiento, S. H. Groves, and C. E. Hurwitz, "Ionization coefficients of electrons and holes in InP," *Appl. Phys. Lett.*, 35(4), pp. 333-335, 1979.
- [6] C. W. Kao and C. R. Crowell, "Impact ionization by electrons and holes in InP," *Solid-State Electron.*, vol. 23, pp. 881-891, 1980.
- [7] L. W. Cook, G. E. Bulman, and G. E. Stillman, "Electron and hole impact ionization coefficients in InP determined by photomultiplication measurements," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, pp. 589-591, 1982.
- [8] C. A. Armiento and S. H. Groves, "Impact ionization in (100)-, (110)-, and (111) oriented InP avalanche photodiodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 43, pp. 198-200, 1983.
- [9] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, New York, 1987.
- [10] C. L. F. Ma, M. J. Deen, and L. E. Tarof, "Device parameters extraction in separate absorption, grading, charge, and multiplication InP/InGaAs avalanche photodiodes," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 42, no. 12, pp. 2070-2079, 1995.
- [11] F. Osaka and T. Mikawa, "Excess noise design of InP/InGaAs/InGaAs avalanche photodiodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, pp. 471-478, 1986.
- [12] W. Fulop, "Calculation of avalanche breakdown voltages of silicon p-n junctions," *Solid-St. Electron.*, vol. 10, pp. 39-43, 1967.
- [13] W. J. Devlin, K. T. Ip, D. P. Leta, L. F. Eastman, G. H. Morrison, and J. Comas, *Proceeding of International Conference on Gallium Arsenide and Related Compounds*, St. Louis, pp. 510, 1978(Institute of Physics, London, 1979).
- [14] K. Nishida, K. Taguchi, and Y. Matsumoto, "InGaAsP hetero-structure avalanche photodiodes with high avalanche gain," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 35, pp. 251, 1979.
- [15] Y. S. Chung, I. Y. Park, Y. I. Choi, S. K. Chung, "Temperature Dependent Effective Ionization Coefficient for Si," *Microelectronic Engineering*, vol. 51-52, pp. 535-540, 2000.

### 저 자 소 개



정 용 성(정회원)

1978년 2월 아주대학교 정보통신대학 전자공학부 공학사

1988년 2월 한양대학교 공학대학원 전기및전자공학과 공학석사

1999년 2월 아주대학교 대학원 정보통신학계열 전자공학과 공학박사

1996년~현재 서라벌대학 팬시완구디자인과 교수

<주관심분야 : Si 및 화합물 반도체 소자 모델링>