

비정질 실리콘 태양전지의 Fill Factor 에 관한 연구

A Study on Fill Factor of Amorphous Silicon Solar Cell

이 준 호** 한 민 구* 이 정 한**
 June Ho Lee Min Koo Han Chung Han Lee

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive computer simulation of hydrogenated amorphous p-i-n silicon solar cells. The physical mechanism governing solar cell operation has been modeled and solved numerically by Runge-Kutta-Gill method. Effects of gap state density, dopant impurity, diffusion length and interface recombination velocity on solar cell performance are investigated. Numerical results show that the electric field in i-region is not uniform but depends strongly on voltage and position. A rather poor fill factor may be due to the electric field variation and short diffusion length. It is found out that the life time should be improved in order to increase a fill factor and a conversion efficiency.

〈 기 호 설 명 〉

- E : 전계 (電界)
- p : 정공 (正孔) 밀도
- n : 전자 (電子) 밀도
- N_d^+ : donor 이온밀도
- N_a^- : acceptor 이온밀도
- ϵ : 유전체율, 유전체 상수
- G : 생성율
- R : 재 결합율
- J_n : 전자 전류 밀도
- J_p : 정공 전류 밀도
- μ_n : 전자 이동도
- μ_p : 정공 이동도
- k : 볼츠만 상수
- q : 전하
- T : 절대온도
- d_p : P층 두께
- α : 흡수계수
- I_n : 전자 생존 시간

- I_p : 정공 생존 시간
- F : 입사광자속 밀도
- E : 위치 에너지
- P_i : 입력 전력

1. 서 론

태양전지는 태양광을 중간과정이 없이 직접 직류전기로 변환시키는 대체 에너지원이다. 태양전지의 실용화를 위해서는 변환효율의 증가를 통하여 경제성을 향상시켜야 하는데 변환 효율은 단락 전류 (I_{sc}), 개방전압 (V_{oc}) 및 fill factor 에 의하여 결정된다.

변환 효율을 결정하는 이 세가지 변수들을 이론적으로 정확히 추출하기 위해서는 태양전지 내부의 전도 방정식을 풀어서 전계, 전위, 자유 반송자 분포등을 알아야 한다. 반도체의 전도 방정식은 coupled 된 비선형 미분 방정식으로 해석적인 해를 구하기 어려우므로 컴퓨터를 이용한 수치해석을 행하여야 한다.

본 논문은 태양전지중에서 가장 최근에 개발되고 경제성이 우수하여 많은 사람들의 관심을 끌고 있는 수소화된 비정질 실리콘 (hydrogenated

* 正會員 : 서울大 電氣工學科
 ** 서울大 電氣工學科

amorphous silicon) 태양전지에 대한 수치해석을 수행했다. 비정질 실리콘 태양전지에 관한 수치해석은 지금까지 Chen 과 Lee¹⁾, Kuwano²⁾, Cradall³⁾, Hamakawa⁴⁾ 등에 의해 행해졌는데, 대부분 기본 수식의 간략화 및 많은 가정을 도입함으로써 문제점이 발생하고 있다.

이 논문은 비정질 실리콘 (a-Si) 태양전지에서 전자 및 hole 의 전도 방정식 해를 동시에 구하기 위해 Poisson 방정식에 gap state 를 포함한 해를 구하고 확산, bulk recombination, interface recombination 을 고려한 전자 및 hole 의 연속 방정식을 풀었는데, 수치해석은 Gummel algorithm⁵⁾ 을 적용한 Runge-Kutta-Gill 방법을 사용했다.

II. Model 및 수치해석

태양전지는 반도체이므로 그 상태를 결정하는 기본 수식은 Poisson 방정식, 연속방정식, 전류 방정식 (current equation) 으로 이루어진다.

Poisson 방정식은 태양전지의 전계와 carrier 분포와의 관계를 나타내는데 식(1)과 같다.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon} (p-n+N_D^+ - N_A^-) \quad (1)$$

연속 방정식은 carrier 의 발생과 재결합을 포함하는 식(2)로 표현된다.

$$\frac{dn}{dt} = G-R + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} \quad (2.a)$$

$$\frac{dp}{dt} = G-R - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} \quad (2.b)$$

전류 방정식은 식(3)과 같이 반송자 수집에 있어 확산과 편류의 연관성을 나타낸다.

$$J_n = nq\mu_n E + kT\mu_n \frac{dn}{dx} \quad (3.a)$$

$$J_p = pq\mu_p E - kT\mu_p \frac{dp}{dx} \quad (3.b)$$

비정질 실리콘 태양전지는 초박막 (0.5 μm 정도) 구조로써 Fig.1 은 본 논문에서 사용된 구조이고, Fig.2 는 수치해석에 있어 전체 흐름도 (flow

chart) 이다.

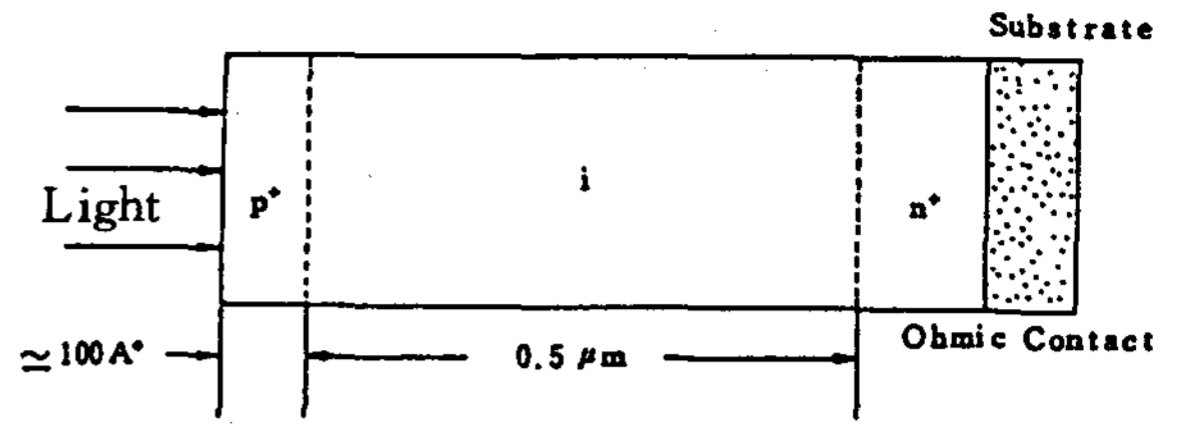


Fig. 1 Structure of p-i-n Solar Cell

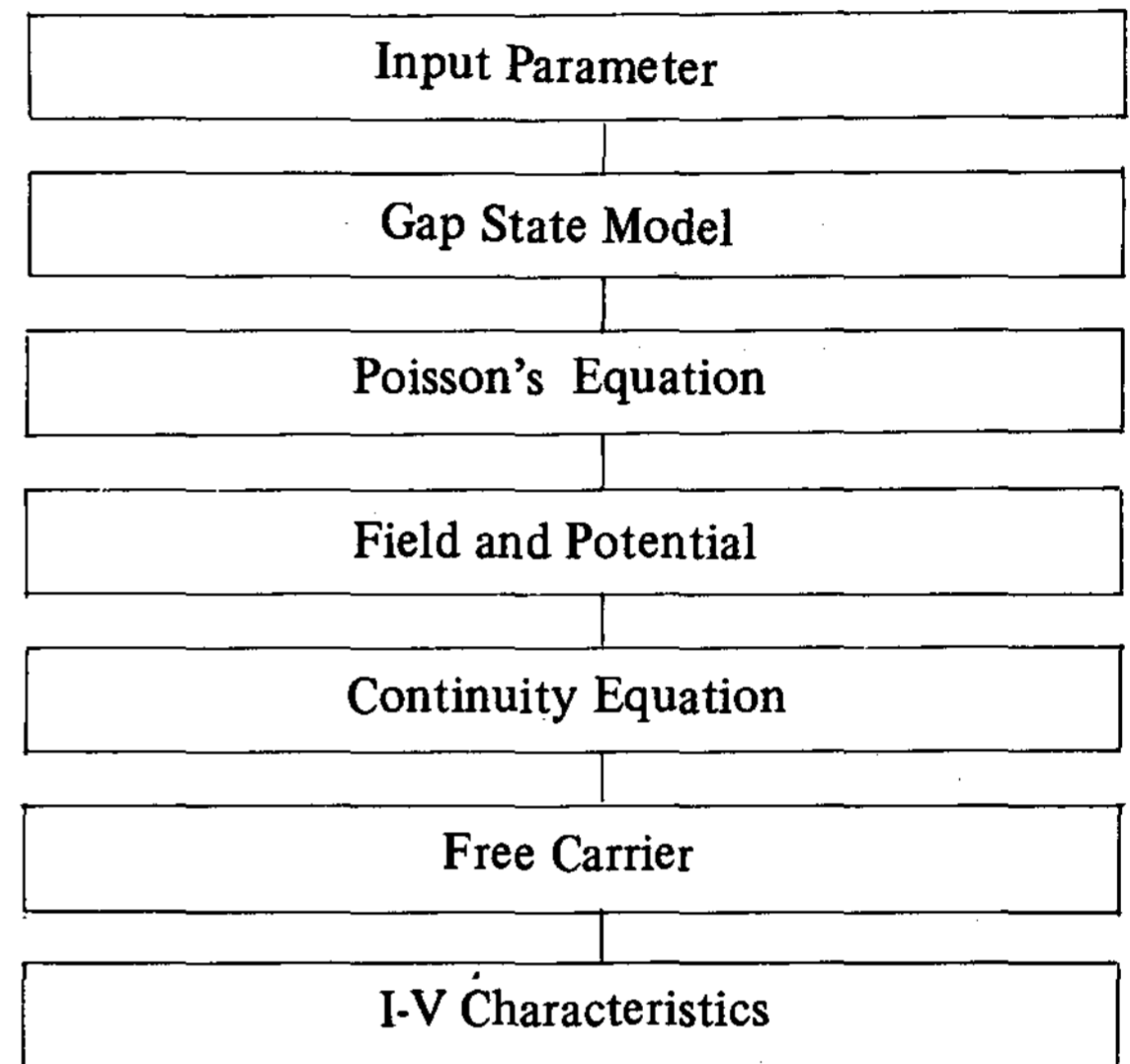


Fig. 2 Flow Chart

비정질 반도체의 확산 길이는 0.2 μm 정도로 매우 짧아서 빛에 의해 발생한 자유 반송자의 collection 은 주로 drift process 에 의존하며, heavily doped 된 p 층, n 층은 i 층에 비해 그 두께가 매우 얇고 불순물 첨가로 인해 확산 길이가 매우 짧아 이 층에서 발생한 자유 반송자는 거의 전류로 collection 되지 못하므로 이 논문에서는 i 층에 대한 해석만 한다.

1. Gap State Model

비정질 반도체의 가장 큰 특징은 결정질과는 달리 bandgap 이 명확히 정의되지 않고 bandgap 내부에도 state 가 존재⁷⁾ (gap state 또는 localized state) 한다는 것으로, 비정질 소자의 전기적 성질은 gap state 의 분포에 크게 좌우된다. 그러므로 Poisson 방정식에 반드시 gap state 분포를 고려하여야 한다.

Fig. 3은 Spear와 LeComber에 의해 측정된 gap state 분포와 그것을 몇개의 model로 근사화한 것이다.⁸⁾ 일반적으로 doped된 a-Si에서 n-type은 activation energy $E_a (E_a = E_c - E_f)$ 가 0.2[eV] 정도이고, p-type은 1.2[eV] 정도이므로⁹⁾ p-i-n의 i층의 quasi-Fermi level은 E_c (conduction band edge)로부터 0.2-1.2[eV] 떨어진 범위에 존재하게 된다. 그러므로 이 논문에서는 위 범위에서 실측치와 가까운 U형 model을 사용하였다.

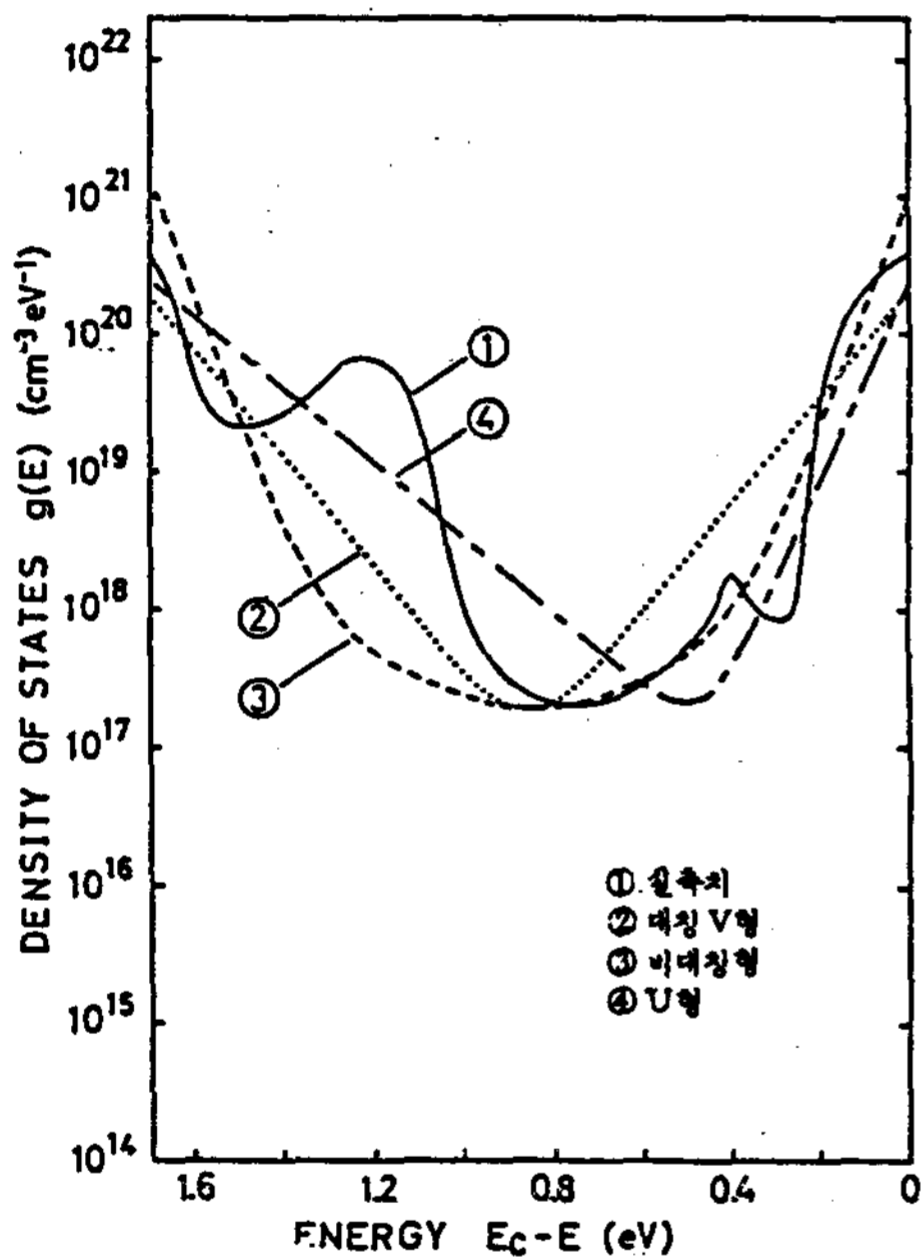


Fig. 3 Gap State Models and Measured Data

U형 분포를 energy 함수로 나타내면 식(4)와 같다.

$$g(E) = \frac{g_{m2}}{2} \left(\exp\left(\frac{E}{E_1}\right) + \exp\left(\frac{-E}{E_1}\right) \right) + \frac{g_{m1}}{2} \left(\exp\left(\frac{E}{E_2}\right) + \exp\left(\frac{-E}{E_2}\right) \right) \quad (4)$$

여기서 optical bandgap을 1.7[eV], minimum state density를 $1.17 \times 10^{17} [cm^{-3}]$ 으로 하면 식(4)의 상수 값들이 정해진다.

$$g_{m1} = 1.17 \times 10^{17} [cm^{-3} eV^{-1}]$$

$$g_{m2} = 1.3 \times 10^4 [cm^{-3} eV^{-1}]$$

$$E_1 = 0.3$$

$$E_2 = 0.054$$

2. Poisson 방정식

Poisson 방정식의 해를 구하기 위해서는 공간 전하분포를 알아야 하는데 a-Si의 경우는 gap state 분포로부터 공간전하를 구하게 된다.

임의의 Fermi level E_f 가 있을때 E_f 아래의 acceptor like state는 negative charge(n^-), E_f 위의 donor like state는 positive charge(p^+)¹⁰⁾를 띠게 되면 그 정량적 값은 식(4)를 적분하여 구한다.

$$p^+ = \frac{g_{m1}}{2} E_1 \exp\left(\frac{-E_f}{E_1}\right) + \frac{g_{m2}}{2} E_2 \exp\left(\frac{-E_f}{E_2}\right) \quad (5)$$

$$n^- = \frac{g_{m1}}{2} E_1 \exp\left(\frac{E_f}{E_1}\right) + \frac{g_{m2}}{2} E_2 \exp\left(\frac{E_f}{E_2}\right)$$

식(5)를 이용하여 Poisson 방정식을 세우면

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{-q^2}{\epsilon} \left(g_{m1} E_1 \sinh\left(\frac{E_{f0} - E}{E_1}\right) + g_{m2} E_2 \sinh\left(\frac{E_{f0} - E}{E_2}\right) - N_c \right) \quad (6)$$

$$N_c = -(p^+ - n^-)$$

이때 E_{f0} 는 intrinsic a-Si의 Fermi level이다. 식(6)을 전개하면

$$dx = \left(2 \int \left(\frac{d^2 E}{dx^2} \right) dE + C \right)^{-1/2} dE \quad (7)$$

결국 식(7)을 i층의 미소구간 만큼씩 적분하여 각 점의 전위 및 전계를 구하게 되는데 이 논문에서 수치적분은 Romberg Quadrature를 사용했다.

3. 연속 방정식

Poisson 방정식으로부터 구해진 전계를 이용, 연속방정식을 풀면 전자 및 hole의 밀도 $n(x)$, $p(x)$ 를 구하게 된다.

식(3)을 식(2)에 대입하여 연속방정식을 전개하면,

$$D_n \frac{d^2 n(x)}{dx^2} + \mu_n E \frac{dn(x)}{dx} + \mu_n n(x) \frac{dE(x)}{dx} - R(x) + G(x) = 0 \quad (8)$$

$$D_p \frac{d^2 p(x)}{dx^2} - \mu_p E \frac{dp(x)}{dx} - \mu_p p(x) \frac{dE(x)}{dx} - R(x) + G(x) = 0$$

이때 $R(x)$ 는 recombination rate인데 Schokley-Read-Hall Model¹¹⁾을 사용했고, $G(x)$ 는

생성율로, 소자 표면에서 빛의 반사는 무시했다.

$$R(x) = \frac{n(x)p(x) - N_i^2}{\tau_p(n(x) + N_i) + \tau_n(p(x) + N_i)} \quad (9)$$

$$G(x) = \int (1 - R_f(\lambda)) F(\lambda) \exp(-\alpha_p dp) \alpha_i(\lambda) \exp(-\alpha_i x) d\lambda \quad (10)$$

또한, 경계 조건으로는 p-i(x=0) 나 i-n(x=d)

경계면의 interface 재결합 속도 S_n, S_p 를 고려하였고, 각 경계면에서 다수 반송자 밀도는 이온화된 donor 및 acceptor 의 밀도와 같다고 보았다.

Table 1 과 Table 2 는 이 논문에서 이용한 파장별 입사광속 및 각 변수들의 값이다.

Table 1 Incident Photon Flux Density under AM1

Wave length [nm]	Incident photon flux density [$cm^{-2} S^{-1} 20 nm^{-1}$]	Wave length [nm]	Incident photon flux density [$cm^{-2} S^{-1} 20 nm^{-1}$]
280	2.15×10^{14}	500	8.15×10^{15}
300	5.58×10^{14}	520	8.17×10^{15}
320	1.09×10^{15}	540	8.41×10^{15}
340	2.13×10^{15}	560	8.69×10^{15}
360	2.93×10^{15}	580	8.95×10^{15}
380	3.70×10^{15}	600	9.2×10^{15}
400	4.42×10^{15}	620	9.44×10^{15}
420	5.03×10^{15}	640	9.59×10^{15}
440	5.74×10^{15}	660	9.73×10^{15}
460	6.87×10^{15}	680	9.83×10^{15}
480	7.71×10^{15}	600	9.88×10^{15}

Table 2 Parameters of a-Si:H

optical bandgap (E_{opt})	1.7eV
electron mobility (μ_n)	$4.6 \times 10^{-2} cm^2/v sec$
hole mobility (μ_p)	$9.2 \times 10^{-3} cm^2/v sec$
intrinsic carrier density (N_i)	$5 \times 10^7 cm^{-3}$
dielectric constant (ϵ)	$1.06 \times 10^{-10} F/m$
thickness of p layer (d_p)	100 Å
thickness of i layer (d_i)	0.5 μm
interface recombination velocity (s)	$10^3 cm/sec$
electron life time (τ_n)	$1.7 \times 10^{-6} sec$
hole life time (τ_p)	$3.4 \times 10^{-7} sec$
ionized donor in n layer	$10^{18} cm^{-3}$
ionized acceptor in p layer	$10^{17} cm^{-3}$
absorption coefficient of p layer	$\sqrt{\alpha h\nu} = A^* (h\nu - E_{opt}) A^* = 800$
absorption coefficient of i layer	$A^* = 650$
temperature (T)	300 K
activation energy in p layer (E_{fp})	1.2 eV
activation energy in n layer (E_{fn})	0.2 eV

III. 결과 및 검토

1. 전계 분포

비정질 소자의 carrier collection 은 전계에 의한 편류에 의존도가 매우 크기 때문에 i 층에서의 전계분포는 비정질 태양전지의 특성에 많은 영향을 미친다.

Fig. 4 에서 보는 바와 같이, Poisson 방정식으로부터 구해진 출력 전압에 따른 i 층의 전계 분포는 위치에 따라 매우 불균일하며 출력전압에도 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다.

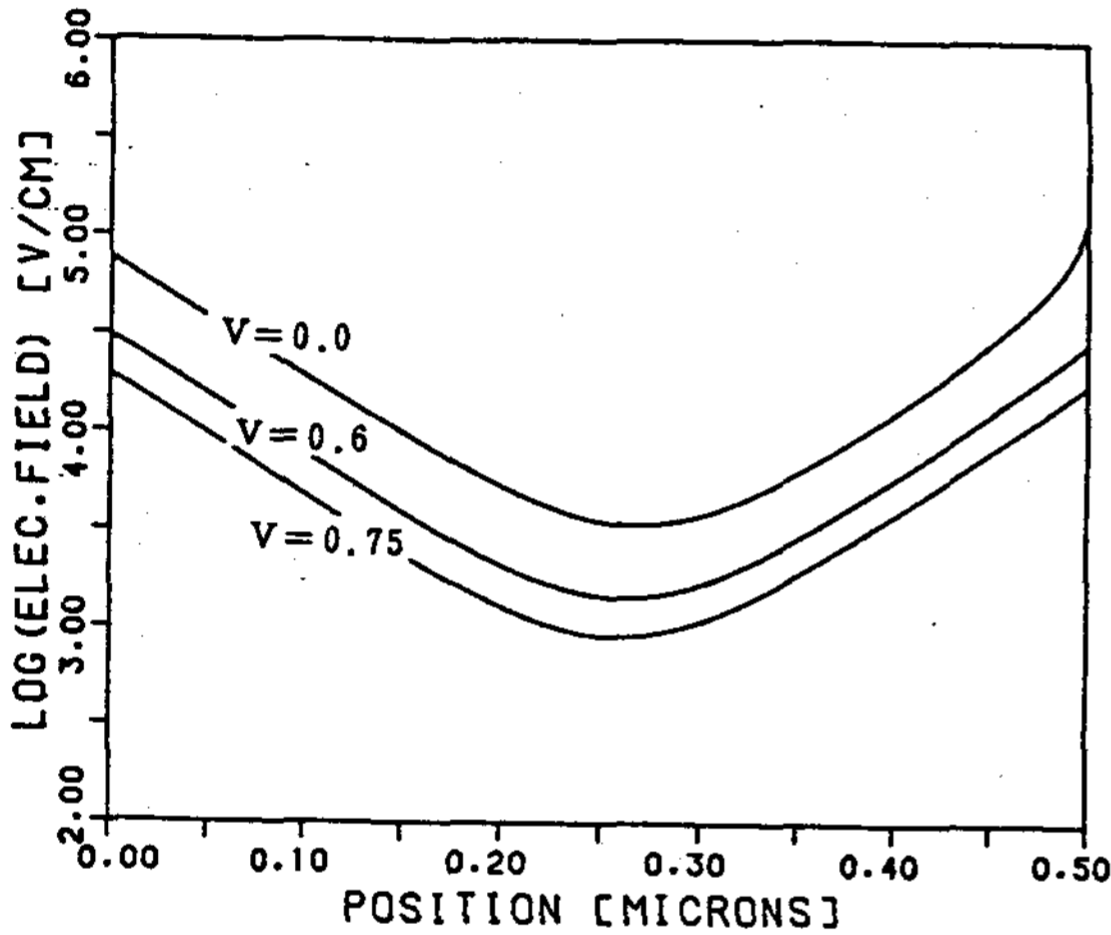


Fig. 4 Electric Field Distributions Under Various Applied Bias

특히 p-i/i-n 경계부근에서 매우 큰 값을 나타내는데 이것은 heavily doped 된 p,n 층의 space charge 및 자유 반송자가 많기 때문이다.

출력 전압에 따른 전계 감소는 반송자 수집도중 재결합 가능성을 높임으로써 출력 전류의 감소 및 fill factor 의 감소를 수반한다.

위 결과는 일반적으로 널리 쓰이는 균등 전계 (uniform field) 를 가정한 태양전지 해석은 출력 전류와 fill factor 에 많은 오차를 가져옴을 나타낸다. 본 논문에서 검토한 태양전지의 경우 i 층 전계가 균일하여 발생한 반송자가 모두 전류로 collection 된다고 가정하면 단락 전류 밀도 J_{sc} 는 13.244 [mA/cm²] 이 되겠지만, 실제 해석된 값은 그보다 작은 12.542 [mA/cm²] 가 되므로 i 층

전체를 collection region 으로 볼 수 없음을 알았다.

2. 전자 및 hole 의 밀도

Free carrier 분포는 재결합과 확산전류에 큰 영향을 미친다.

Fig. 5, 6, 7 은 각각 단락, 최대 출력, 개방 상태에서 i 층의 carrier 분포를 구한 것으로, 전계의 경우와 같이 위치에 따라 매우 불균일하다.

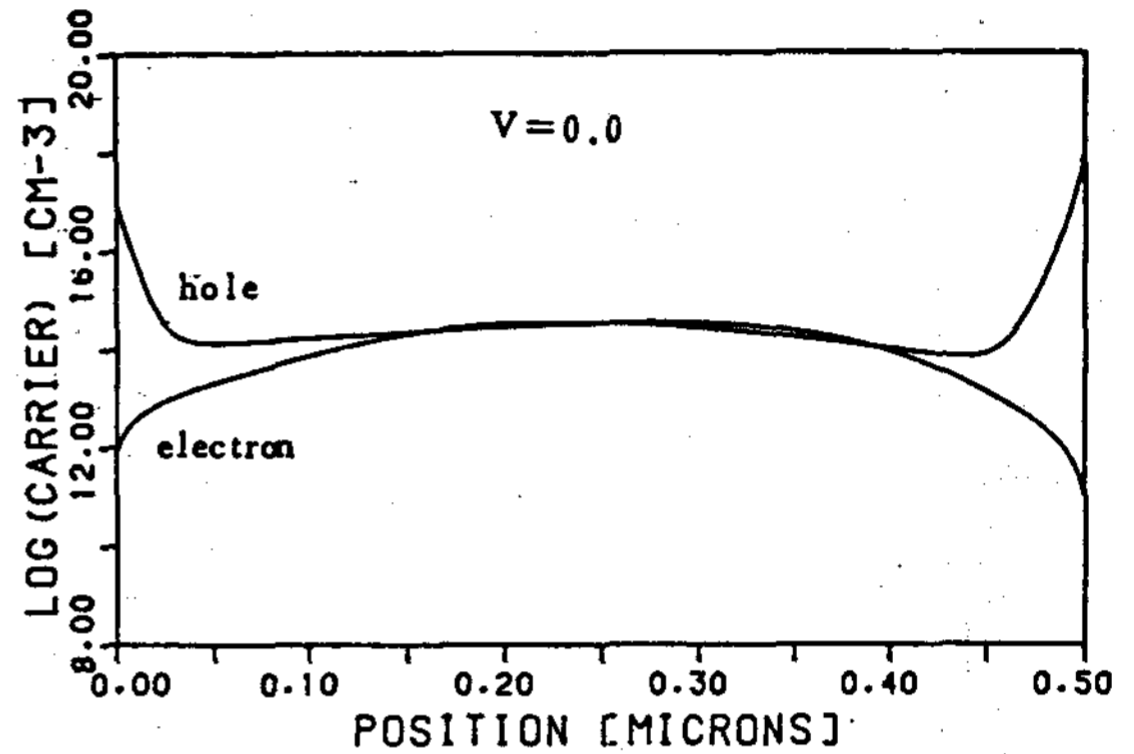


Fig. 5 Carrier Distribution at 0 Volt

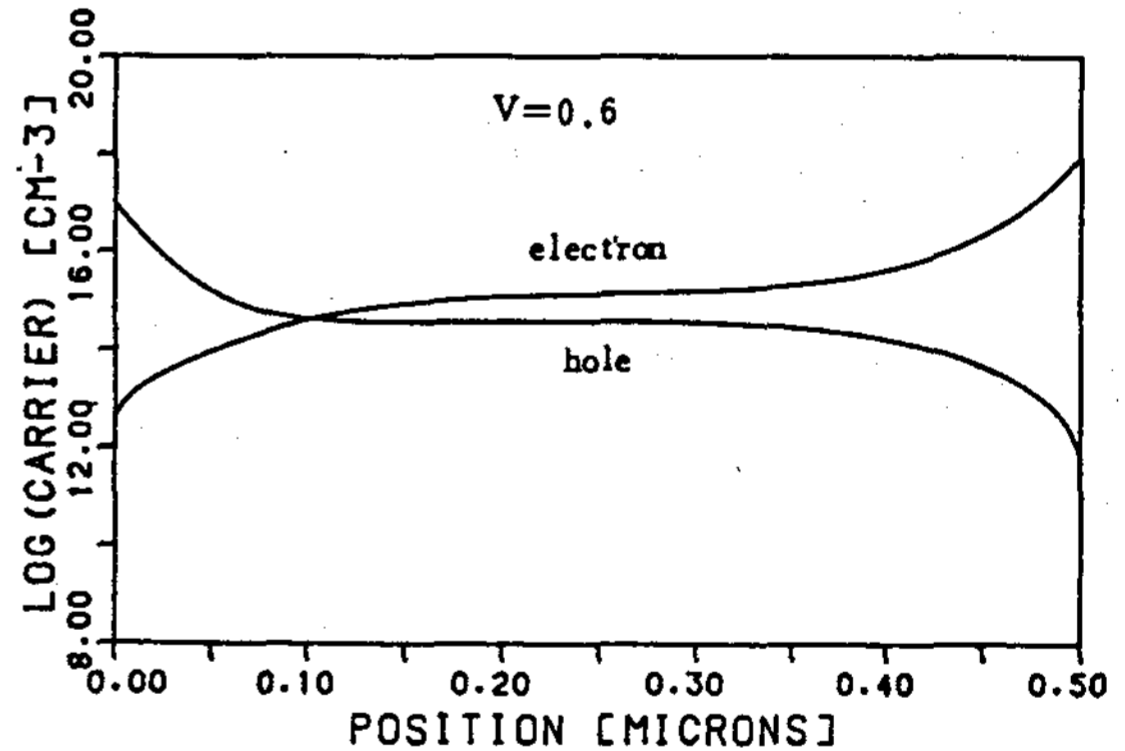


Fig. 6 Carrier Distributions at 0.6 Volt

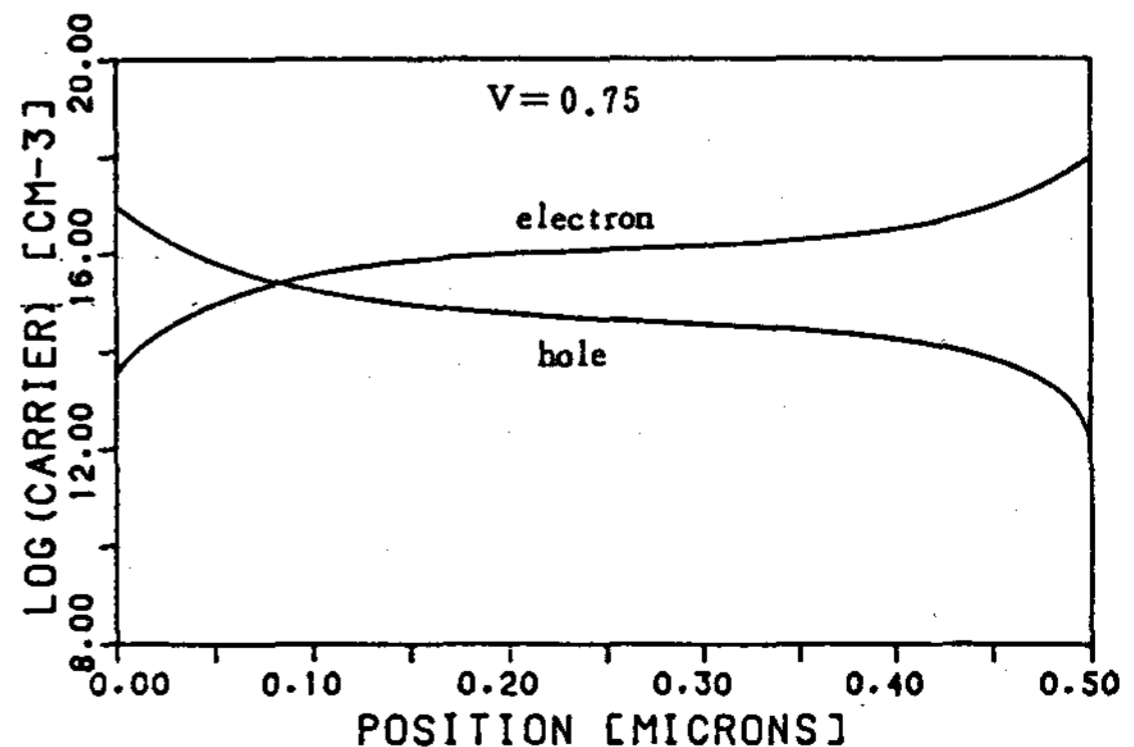


Fig. 7 Carrier Distributions at 0.75 Volt

p-i/i-n 경계부근의 높은 반송자 밀도는 이 영역에서 carrier gradient를 크게 하여 확산 전류를 증가시키는데, 이 전류는 경계부근의 높은 전계에 의한 편류 전류와 균형을 이루어 전체적으로 일정한 전류를 유지하게 된다.

출력전압이 증가하면 p-i 경계에서는 전자가, i-n 경계에서는 hole이 증가하고, 이에 따라 재결합도 증가하여 출력전류를 감소시키게 된다.

3. 생성 및 재결합

비정질 반도체는 이동도와 생존시간이 매우 작은 값을 가지므로 재결합이 device performance에 미치는 영향은 크다.

Fig. 8은 AM1 입사광이 p층을 통해 들어올 때 i층에서의 생성 및 재결합율이다.

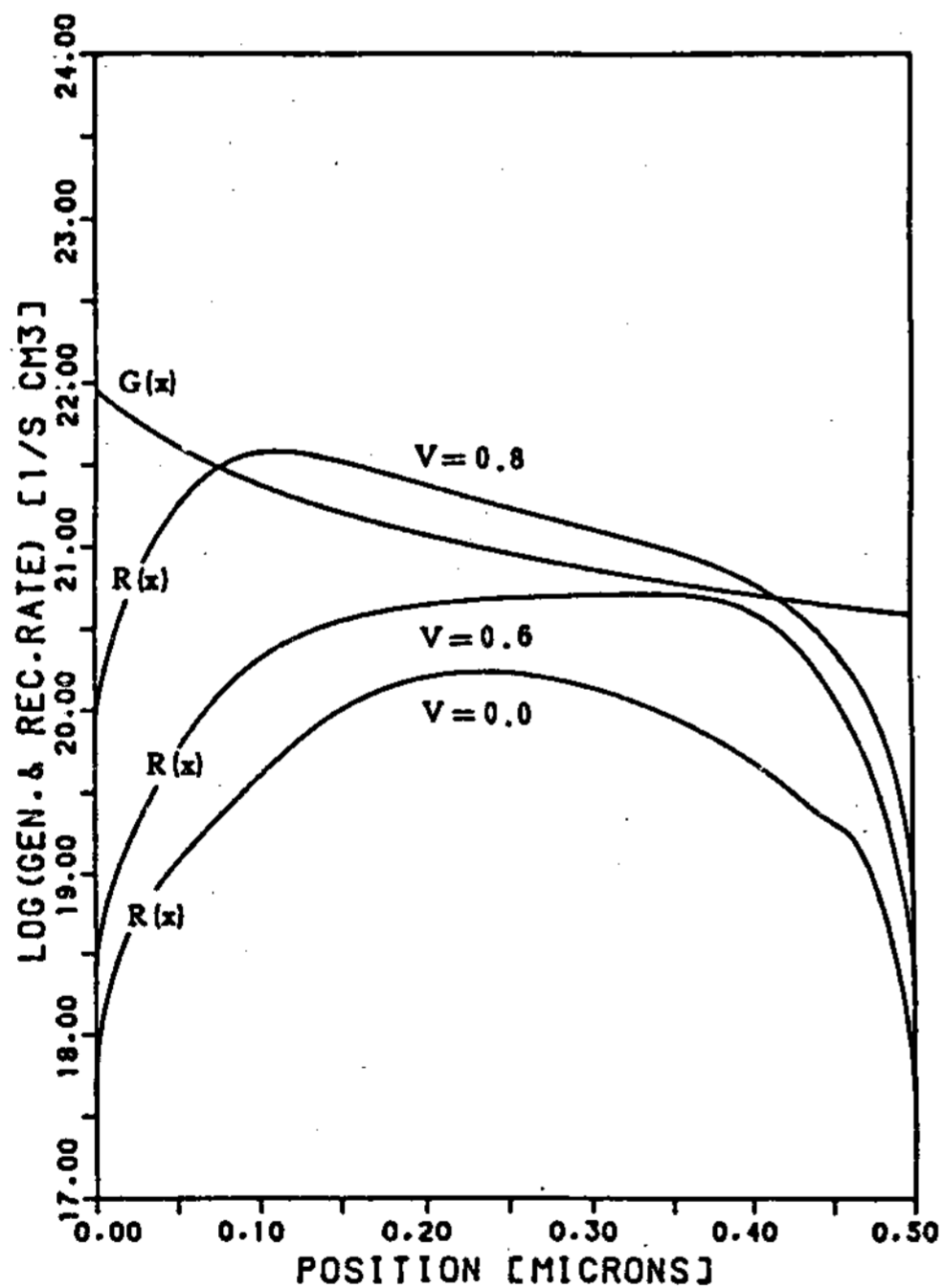


Fig. 8 Generation Rate and Recombination Rate Under Various Applied Voltages

출력 전압에 따른 재결합의 증가는 p-i/i-n 경계부근에서 심하게 나타나는데 이것은 3.2에서 설명했듯이 경계부근에서 소수 반송자가 크게 변화함으로써 생긴 현상이다.

위로부터 carrier collection의 주된 loss mechanism이 재결합임을 알 수 있고, 출력전압증

가에 다른 재결합의 증가가 전류의 감소를 가져옴을 알았다.

4. I-V특성과 Fill Factor

Fig.9는 p층쪽으로 AM1의 빛이 들어올 때 전류-전압 (I-V) 특성 곡선인데 이때 fill factor (FF)는 약 0.65의 값을 나타내었다.

일반적으로 변환효율 (E_{ff})와 fill factor의 관계는 다음과 같이 정의된다.

$$E_{ff} = \frac{V_m J_m}{P_i} = \frac{FF V_{oc} J_{sc}}{P_i} \quad (12)$$

$$FF = \frac{V_m J_m}{V_{oc} J_{sc}} \quad (13)$$

즉, fill factor는 소자의 변환효율을 지배하는 중요한 요소인데 이상적 태양전지의 fill factor는 1이어야 하지만 비정질 태양전지의 경우 앞절의 Fig.4, Fig.8에서 해석하였듯이 출력전압이 증가하면 i층 전계는 감소하는 반면 재결합 정도는 증가하여 출력전류를 감소시키게 된다. 비정질 실리콘의 경우 짧은 확산 길이(약 0.2um 정도)로 인해 fill factor가 0.7 이상의 값을 갖기가 어려운데 효율의 개선을 위해서는 재결합 과정을 지배하는 반송자 생존시간을 증가시켜야 한다.

일반적인 태양전지의 V_{oc} , J_{sc} 관계는 식(14)로 표현되며

$$V_{oc} \cong \frac{n'kT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} \right) \quad (14)$$

입사광속량을 변화하며 V_{oc} 와 J_{sc} 의 관계를 plot 하면 diode quality factor n' 과 포화전류 밀도 J_0 를 구할 수 있다. 이 논문에서는 입사조건이 1000% AM1, 100% AM1, 10% AM1, 1% AM1일 때 각각의 V_{oc} , J_{sc} data를 least square curve fitting한 결과 Fig. 10으로 나타나고 이때 n' , J_0 는

$$n' = 1.1086 \quad J_0 = 4.5 \times 10^{-11} \text{ [mA/cm}^2\text{]}$$

으로, built-in-potential이 1.0[eV]정도일 때 n' 가 1에 가까운 값을 가진다는 실험결과^{9,12)}와 근사한 값이 나왔다.

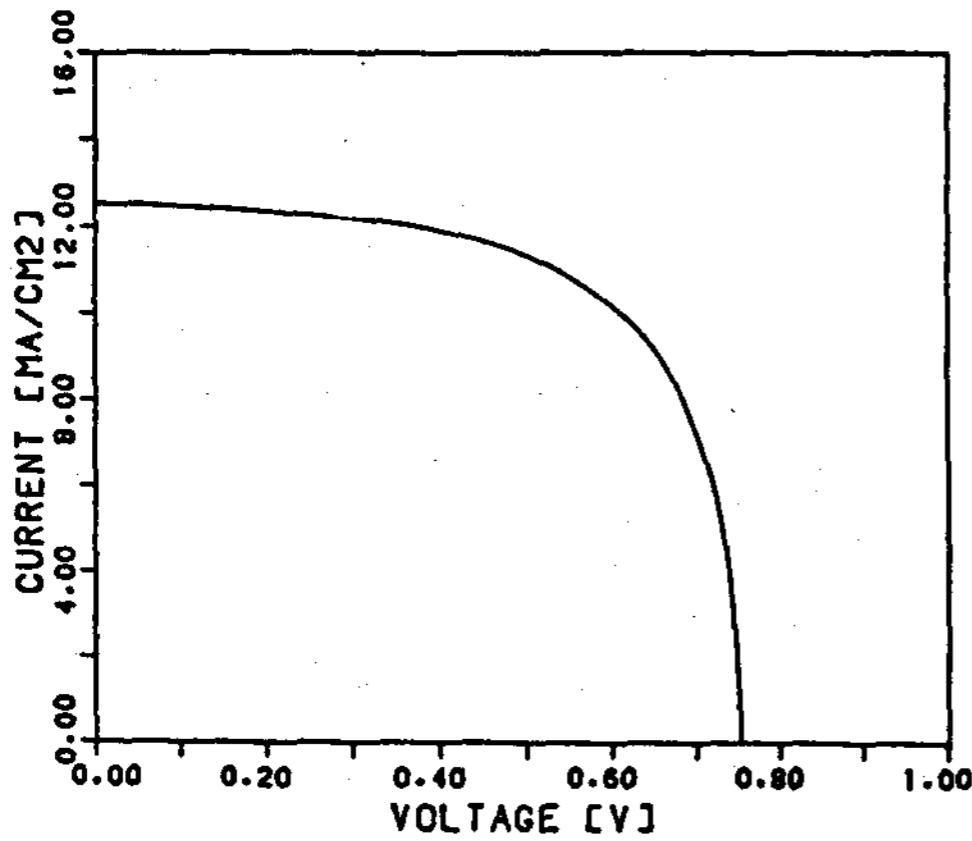


Fig. 9 Characteristics Curve

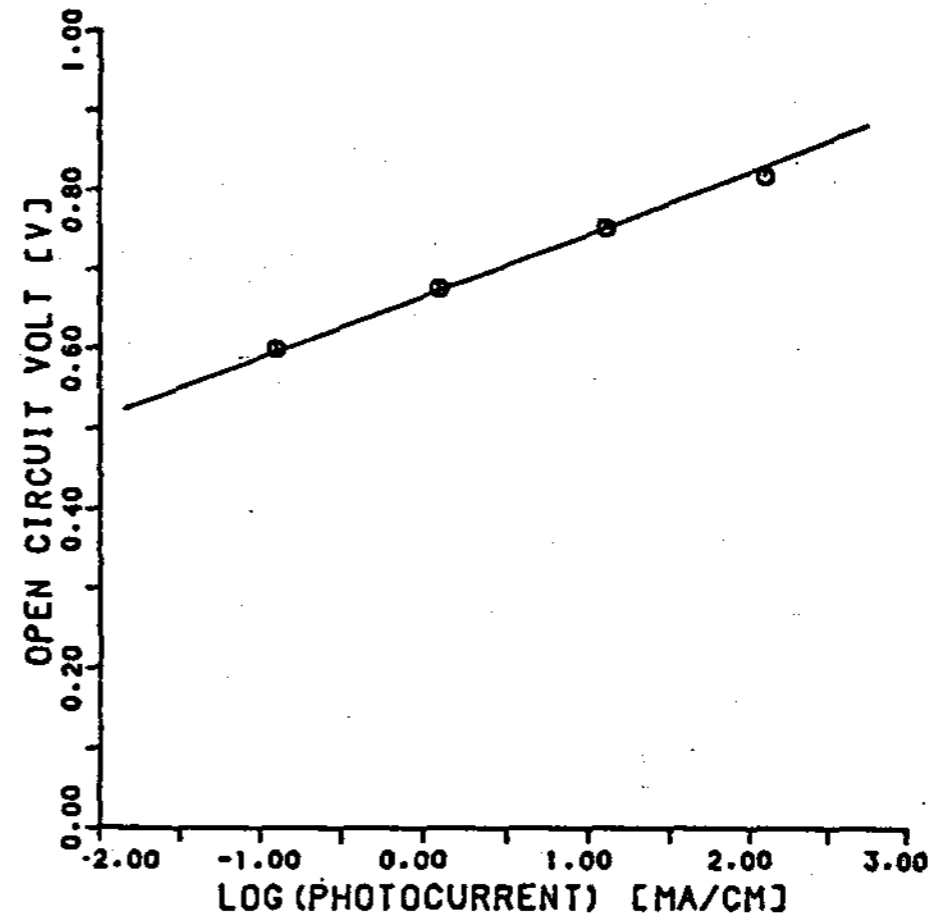


Fig. 10 Voc-Jsc Under Various Illumination Levels.

IV. 결 론

비정질 실리콘 p-i-n 태양전지의 특성을 computer simulation으로 구하였다.

비정질 태양전지의 특성을 결정하는 가장 중요한 i 층에서는 전계와 carrier 분포는 균등 (uniform) 하지 않고 전압과 위치에 따라 크게 변화하므로, 일반적으로 널리 쓰이는 균등전계에 의한 해석으로는 정확한 fill factor와 출력 전류를 구하기 어려운 것이 밝혀졌다.

비정질 실리콘 태양전지에서 전류 손실의 가장

큰 요인은 i 층에서의 재결합으로 출력전압이 증가함에 따라 재결합이 증가하고 i 층의 전계가 전압의 증가에 따라 감소하기 때문에 fill factor가 감소하게 된다.

변환 효율개선을 위해서는 재결합 과정을 지배하는 반송자 생존 시간을 증가시켜 fill factor를 향상시켜야 한다.

후기

본 연구는 1986년도 문교부 학술 연구 조성비 지원에 의하여 수행 되었습니다.

REFERENCE

1. I. Chen, S. Lee: J. Appl. Phys. 53(2), 1045, (1982)
2. Y. Kuwano, S. Tsuda, M. Ohnishi: Jpn. J. Appl. Phys. 29, 1691 (1981)
3. R. Crandall: J. Appl. Phys. 54(12), 7176 (1983)
4. S. Nomura, H. Okada, H. Kida, Y. Hamakawa: Jpn. J. Appl. Phys. 21, suppl. 21-2, 279 (1982)
5. D.L. Sharfetter, H.K. Gummel: IEEE Trans. Electron Devices DE. 16, 64 (1969)
6. R.C.A. Laboratory, Quarterly Report No. 2, SERI/PR-8254-I-T2 P.48, (1980)
7. P.G. LeComber, W.E. Spear: "Amorphous Semiconductor", Ed. by M. Brodsky, Springer-Verlag (1979).
8. H. Miyamoto, et al: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 20, 1691 (1981).
9. D.E. Carlson: "The Physics of Hydrogenated Amorphous Silicon I", Ed. by J.D. Joannopoulos, G. Lucovsky, Springer-Verlag (1984)
10. M.K. Han, R. Lahri, W.A. Anderson: IEEE Photo. Spec. Conf., 15th 685 (1981)
11. W. Shockley, W.T. Read: Phys. Rev. 87, 835 (1952)
12. D.E. Carlson: "Polycrystalline and Amorphous Thin Films Devices," Ed. by L. Kazmerski, Academic Press (1980)