

비정질 태양전지에서의 전계 및 전위 분포
(Electrical Field and Potential Distribution
in a-Si:H P-i-n Solar Cell)

이 준 호* 서울대 전기공학과
한 민 구 서울대 전기공학과

1. 서 론

수소화된 비정질 실리콘(Hydrogenated Amorphous Silicon)은 물성면에서 광흡수율이 우수하여 가시광선의 Penetration Depth 가 0.5 um 이하이기 때문에 초박막(0.5 um미만) 소자가 가능하고, photosensitivity가 크기 때문에 광센서, 복사기 드럼, 태양전지등 응용분야가 확대되고 있다.(1),(2)

그러나 비정질 반도체는 많은 결함(Defects 및 Dangling Bonds)이 존재하므로 Band gap 이 결정질처럼 명확히 정의되지 않고, Optical Band gap안에 국부 준위가 존재하여 그 해석이 결정질에 비해 매우 어렵다. 이러한 국부준위의 존재는 소자의 설계 및 해석에 큰 영향을 미치게 된다.

본 논문은 비정질 실리콘 p-i-n 태양전지에서 국부준위를 고려한 Poisson 방정식을 수치해석적으로 풀어, 1 층에서의 전계 및 전위 분포를 계산하고, 외부인가전압과의 관계를 파악함으로써, 빛에 의해 발생한 Carrier 에 미치는 영향을 분석했다. 본

연구의 중요성은 비정질 반도체내의 전계 및 전위를 국부준위를 고려하여 해석함으로써 공핍층(Depletion Region)에서 Effective Collection Width Xc를 구하는데 있다.

2. 국부준위의 Modeling

비정질 반도체의 가장 큰 특징은, 전기적 특성과 국부준위밀도가 밀접한 관계를 갖는다는 것이다.(3) 따라서 국부준위를 Modeling 하는 것은 소자 해석의 기초가 되므로 매우 중요하다.

그림 1은 국부준위밀도의 실속치와(4),(5) 그것을 몇 개의 Model 로 근사화 한것인데, 대칭 V형과 비대칭형은 Band 중앙부근에서 실속치와 잘 맞지 않으므로, 본 논문에서는 U형 Model 을 채택하고 준위밀도 g(E) 는 식(1)로 표현된다.

$$g(E) = g_{m1}/2(\exp(E/E_1) + \exp(-E/E_1)) + g_{m2}/2(\exp(E/E_2) + \exp(-E/E_2)) \dots\dots\dots(1)$$

본 논문에서는 Band gap = 1.7(eV), $g_{\min} = 1.17 \times 10^{17} (\text{cm}^{-3})$ $g(\pm 0.85) = 3 \times 10^{20} (\text{cm}^{-3})$ 으로 하여 실속치와 수치근사식, 다음 값들을 사용했다.

$$g_{m1} = 1.17 \times 10^{17}, \quad g_{m2} = 1.3 \times 10^{14}$$

$$E_1 = 0.3 \quad E_2 = 0.0554$$

3. Poisson 방정식

그림 2는 비정질 실리콘 태양전지의 Energy Band Diagram 이다. 비정질 실리콘에 빛이 들어오면, Band 중앙에 있던 Fermi 준위가 E_c 에서 0.65 eV 아래로 이동하는데(3) 이때 Fermi 준위를 E_{fo} 라 하면 Doping 되지 않은 반도체 Bulk안의 전하밀도는 식(2)가 된다.

$$P^+ - n^- = -(g_{m1} E_1 \sinh(\frac{E_{fo}}{E_1}) + g_{m2} E_2 \sinh(\frac{E_{fo}}{E_2})) \dots \dots \dots (2)$$

Fermi 준위의 이동은 Donor 첨가현상과 유사하게 해석되어, Bulk안에는 정전하 (Positive Charge)Nd가 존재하는 효과가 나타나는데, 전하 중성이 유지되기 위한 Nd는 다음과 같다.

$$Nd = g_{m1} E_1 \sinh(E_{fo}/E_1) + g_{m2} E_2 \sinh(E_{fo}/E_2)$$

그리고 공핍층에서 Fermi 준위를 E_f , $E = E_{fo} - E_f$ 라하여 공핍층안의 Poisson 방정식을 세워서 전개하면 식(3)이 된다.

$$(dE/dx)^2 = 2 \int (d^2E/dx^2) dE + C$$

$$= 2q^2/r (g_{m1} E_1^2 \cosh(E_{fo}-E/E_1) + g_{m2} E_2^2 \cosh(E_{fo}-E/E_2) + N_d E) + C \dots \dots \dots (3)$$

여기서 C는 적분상수, r는 유전율이고 식(3)을 적분하여 공핍층의 두께 W를 구하면 식(4)가 된다.

$$W = r/2q^2 \int_{E_{fp}}^{E_{fn}} (g_{m1} E_1^2 \cosh(E_{fo}-E/E_1) + g_{m2} E_2^2 \cosh(E_{fo}-E/E_2) + N_d E + C)^{1/2} dE \dots \dots \dots (4)$$

식(4)에서 E_{fp}, E_{fn} 은 $P/i, i/n$ 경계에서 E_{fo} 와 E_f 의 차이이고, 이때 W와 i층의 두께가 같다고 가정하여 적분상수 C를 구한 후, 이 C를 이용하여 거리에 따른 전계 및 전위분포를 구한다. 본 논문에서 식(4)의 수치적분은 Romberg Quadrature를 적용시켰고, 전계 분포는 Piecewise Linear Interpolation을 썼다.

4. 결과 및 검토

일반적으로 태양전지의 Carrier Collection은 확산에 의한 이동과, 전계에 의한 이동(Drift)로 구분되는데, 비정질의 경우 Carrier의 확산거리 L(Diffusion Length)이 0.1 um이하로(6)i층이 0.5 um 정도이면 Carrier가 확산도중 재결합하여 소멸되므로 전계에 의한 Collection이 더 중요하다.

전계에 의해 Collection되려면 transit time

이 때 임계 전계 E_{crit} 는 식(5)로 정해지고, 상온에서 $W = 0.5(\mu m)$, $L = 0.1(\mu m)$ 이면 $1.29 \times 10^4 (V/cm)$ 가 된다.

$$T_t = \frac{W}{ue}, \quad T_l = \frac{L^2}{D}$$

$$E_{crit} = W/L^2 \times kT/q (V/cm) \dots (5)$$

즉 전계가 E_{crit} 이하인 영역은 발생된 carrier 가 collection 안되어 dead layer (d)로 (8), E_{crit} 보다 큰 영역은 effective collection width(X_c)로 볼수 있고 이때

$W = d + X_c$ 이다. X_c 와 d 는 인가전압과 관계되어 비정질 태양전지의 전류는 식(6)으로 표현되는데, J_{sc} 는 X_c 가 증가, 또는 d 가 감소하면 증가하는 값이다.

$$J_{sc} = f_1(X_c(V)) - f_2(d(V)) \dots \dots (6)$$

그림 3, 4는 P와 n층의 Activation Energy가 각각 1.3eV, 0.3eV인 P-i-n 태양전지의 인가전압 V에 따른 전계 및 전위 분포이다.

$V = -0.3, 0, 0.6, 0.8(V)$ 일때 X_c 는 각각 0.26, 0.24, 0.08, 0.02 (μm) 이므로 손방향 전압시 X_c 가 줄어들어 Fill Factor 감소의 원인이 된다.

또한 P-i-n(또는 n-i-p) 태양전지의 Carrier Collection은 대부분 빛이 들어오는 쪽의 P/i(또는 n/i)경계 부근에서 일어나므로 (7) 태양전지의 빛의 방향 결정에도 전계 분포를 고려하여 경계에서 E_{crit} 까지의 거리가 큰 쪽으로 향해야 효율을 높일 수 있다.

5. 결 론

비정질 실리콘 태양전지의 해석에는 국부 준위를 고려해야 한다.

i층안의 전계 및 전위 분포는 균일하지 않고, 인가전압에 따라 Carrier Collection Width가 크게 변하므로 J_{sc} 계산과 빛의 방향 결정에 반드시 국부준위에 의한 전계 분포를 적용하여 최적 parameter 들을 찾아내는 것이 소자해석과 설계의 핵심이 된다.

* 참 고 문 헌

- (1) D.E. Carlson, "Polycrystalline and Amorphous Thin Films and Devices," Ed. by L. Kazmerski, Academic Press (1980).
- (2) D.E. Carlson, C.R. Wronski, "Amorphous Semiconductor," Ed. by M. Brodsky, Springer-Verlag, (1979).
- (3) P.G. LeComber, W.E. Spear, "Amorphous Semiconductor," Ed. by M. Brodsky, Springer-Verlag, (1979).
- (4) W.E. Spear, P.G. LeComber, Non-Cryst, Solids 8-10, 727-738(1972).
- (5) W.E. Spear, P.G. LeComber, Philos. Mag. 33, pp.935-949(1976).
- (6) R.C.A. Laboratory, Quarterly Report No.2, SERI/PR-8254-1-T2, P48, March (1980).

- (7) M.K. Han, et al., Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. pp.685-689(1981).
- (8) Y. Kuwano, Y. Tsuda, M. Ohnishi, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.21, pp.235-241 (1982).

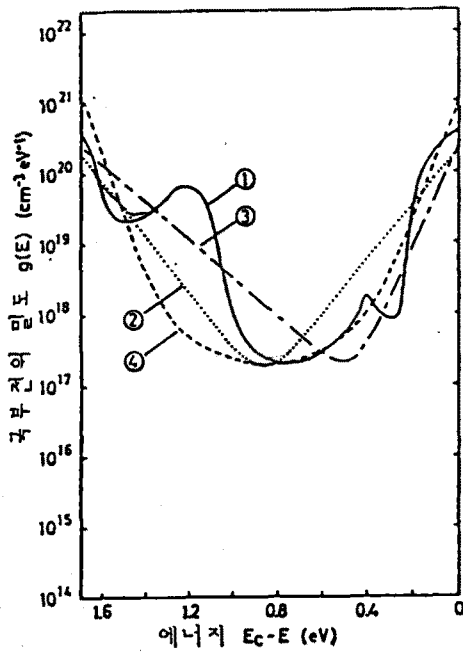


그림 1. 각부 전위 밀도의 Model

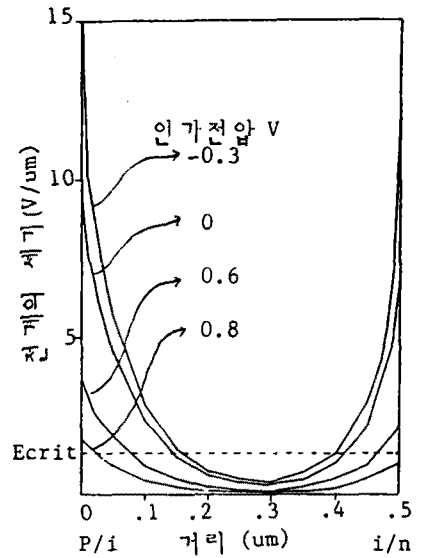


그림 3. 인가전압에 따른 전계 분포

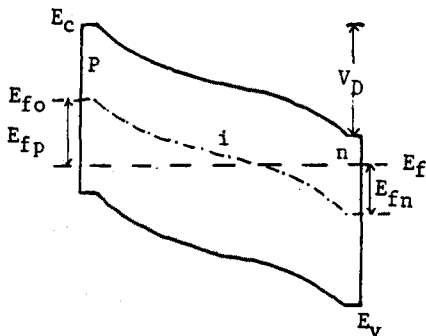


그림 2. a-Si 태양전지의 Energy Band Diagram

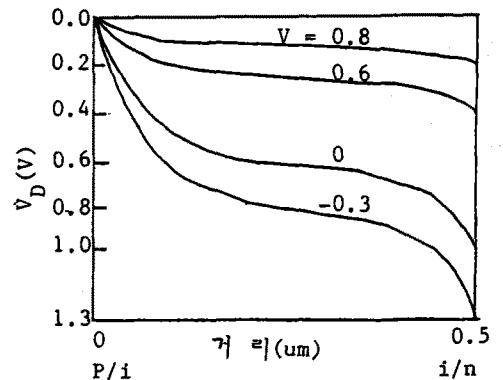


그림 4. 인가전압에 따른 전위 분포