

광전 주파수 변조방법에 의한 태양전지의 소수 반송자 수명 측정

(Determination of Minority Carrier Lifetime in Solar Cells by the Method of Photoelectric Frequency Modulation)

朴 愚 祥*, 鄭 鎬 宣*
(Woo Sang Park and Ho Sun Chung)

要 約

태양전지에 변조된 빛을 쬐일 경우 단락전류에 발생하는 위상차가 태양전지의 여러 가지 파라미터에 대하여 계산되었다. 위상차를 실험적으로 측정하여 계산 결과와 비교함으로써 소수 반송자수명이 추정되었다.

본 방법으로 측정된 결과와 비교하기 위하여 일반적으로 사용되어온 개방전압 감쇠방법으로 소수 반송자 수명을 측정하였다.

Abstract

Numerical calculations have been made about the phase differences of the short circuit current in a solar cell according to the variation of the modulation frequency. The phase differences in short circuit current of the solar cell exposed to the modulated light source is measured experimentally. From the above two results, the minority carrier lifetime has been determined.

Also, minority carrier lifetime has been determined from the observed photo-induced open circuit voltage decay wave form that follows termination of the excitation.

I. 序 論

오늘날 대체 에너지 개발의 필요성이 증가함에 따라 태양 에너지를 직접 전기 에너지로 변환시키는 태양전지에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 태양전지에서 베이스 영역의 소수 반송자 수명은 태양전지의 개방전압과 단락전류에 영향을 미침으로써 반송자 수집 효율 및 에너지 변환 효율을 결정하는 중요한 파라미터이다. 최근 태양전지에 관한 관심이 증가함에 따라 소수 반송자 수명을 측정하기 위하여 여러 가지

방법이 시도되고 있다.^[1,2,3]

본 논문에서는 태양전지의 소수 반송자 수명을 측정하기 위하여 광전 주파수 변조방법은 태양전지에 빛을 쬐었을 때 태양전지의 단락전류와 발전기 출력으로부터 유입되는 전류와의 위상차를 측정하고 또한 수식적으로 컴퓨터 시뮬레이션한 위상차와 비교하여 소수 반송자 수명을 추정하는 것이다.

II. 理 論

1. 광전류 발생

그림 1에서 실리콘의 에너지갭보다 큰 에너지를 갖는 빛이 태양전지 표면에 입사되면 일부는 반사되고 일부는 흡수되어 거리에 따라 지수 함수적으로 감소되면서 전자-정공쌍을 생성시킨다. 즉 전자-정공쌍의

*正會員, 경북대학교 공과대학 전자공학과
(Dept. of Elec. Eng., Kyung-pook National Univ.)
接受日字: 1983年 4月 27日

생성율은 파장과 거리의 함수이며 다음과 같이 표시된다.^[4]

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda) F_0(\lambda) \{ 1 - R(\lambda) \} \exp[-\alpha(\lambda)x] \quad (1)$$

여기서 α 는 흡수계수, F_0 는 입사된 광량자의 수, R 은 표면에서의 반사율이다.

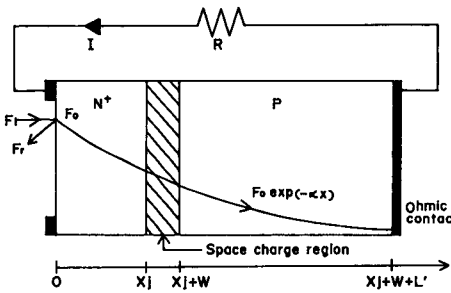


그림 1. N+/P접합형 태양전지에서의 광전류 발생
Fig. 1. Photocurrent generation in N+/P junction solar cells.

N+/P 접합형 태양전지에서 생성되는 반송자는 에미터 영역에서 정공이, 베이스 영역에서는 전자가 각각 소수 반송자로서 접합면으로 확산되어 통과한다. 따라서 광전류는 베이스 영역에서 에미터 영역으로 흐르게 된다. 태양전지에 적외선의 단색광을 쬐일경우 적외선에 대한 흡수계수는 $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-1}$ 이하로서 표면에 입사한 광량자중 약 63% 정도는 $5 \mu\text{m}$ 이상 투과하여 벌크에서 흡수되기 때문에 $0.3 \mu\text{m}$ 정도의 두께를 갖는 에미터 영역에서의 광흡수는 무시할 수 있다. 따라서 전체 광전류는 베이스 영역과 공간전하 영역의 광전류의 합으로 구할 수 있다.

베이스 영역에서 발생하는 광전류를 구하기 위한 소수 반송자 연속방정식은 다음과 같다.^[4]

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} + G - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = 0 \quad (2)$$

단, n_p : 베이스 영역에서 전자밀도
 n_{p0} : 베이스 영역에서 열평형 상태의 전자밀도
 τ_n : 전자의 수명

식 (2)에서 J_n 은 전자에 의한 전류밀도로서 다음과 같다.

$$J_n = qD_n \frac{dn_p}{dx} + q\mu_n E n_p \quad (3)$$

단, D_n : 전자의 확산계수
 μ_n : 전자의 이동도
 E : 베이스 영역에서의 전장

식 (2)와 식 (3)에서 전자밀도 연속방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{d^2(n_p - n_{p0})}{dx^2} + \frac{\mu_n E}{D_n} \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} + \frac{G}{D_n} - \frac{n_p - n_{p0}}{L_n^2} = 0 \quad (4)$$

여기서 $L_n^2 = D_n \tau_n$ 이다. 식 (4)를 풀기 위한 접합면 ($x = x_j + W$)과 뒷면 ($x = XL$)에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\text{접합면} : n_p - n_{p0} = 0 \quad (5)$$

$$\text{뒷면} : D_n \frac{dn_p}{dx} + \mu_n E n_p = -S_n (n_p - n_{p0}) \quad (6)$$

여기서 S_n 은 표면 재결합 속도이다. 식 (5)와 식 (6)을 식 (4)에 대입하여 반송자 밀도를 구하고 이것을 식 (3)에 대입하여 접합면에서 전류 밀도를 구하면 아래와 같다.

$$J_n = \frac{q\alpha F_0 (1-R) L_{nn}^2}{(\alpha - E_{nn})^2 L_{nn}^2 - 1} \times \left[\frac{-\alpha + 2E_{nn} + S_n/D_n}{\cos h(L'/L_{nn}) + L_{nn}(E_{nn} + S_n/D_n) \text{ Sinh}(L'/L_{nn})} \times \frac{\exp[-XL(\alpha - E_{nn}) \exp\{-E_{nn}(x_j + W)\} - (E_{nn} + S_n/D_n)}{\cos h(L'/L_{nn}) + \sinh(L'/L_{nn})/L_{nn}} \{ \exp[-\alpha(x_j + W)] + (\alpha - E_{nn}) \exp[-\alpha(x_j + W)] \} \right] \quad (7)$$

단, $E_{nn} = \mu_n E / 2D_n$
 $L_{nn} = 1 / \sqrt{E_{nn}^2 + 1/L_n^2}$
 x_j : 접합깊이
 W : 공간전하 영역의 폭
 L' : 베이스 영역의 폭
 XL : 태양전지의 전체 두께

공간전하 영역에서는 강한 전장의 영향으로 생성된 전자-정공쌍은 재결합이 무시되어 모두 전류에 기여하게 됨으로 공간전하 영역의 광전류는 생성율을 공간전하 영역에서 적분하여 구할 수 있다.

즉

$$\begin{aligned}
 J_a &= q \int_{x_j}^{x_j+W} G(x) dx \\
 &= q \int_{x_j}^{x_j+W} \alpha F_0 \{ (1-R) \exp(-\alpha x) dx \quad (8) \\
 &= q F_0 (1-R) \exp(-\alpha x_j) \{ 1 - \exp(-\alpha \cdot W) \}
 \end{aligned}$$

2. 정현파적인 주입 (Sinusoidal Injection)

태양전지에 변조된 빛을 쬐이면 소수 반송자인 전자에 대한 시간 종속 일차원적 확산방정식은 다음 식으로 표현된다.^[5]

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \bar{n}(x,t)}{\partial t} &= D_n \frac{\partial^2 \tilde{n}(x,t)}{\partial x^2} \\
 + \tilde{G}(x,t) - \frac{\bar{n}(x,t)}{\tau_n} \quad (9)
 \end{aligned}$$

단, $\bar{n}(x,t)$: 정현적으로 생성된 전자밀도

$G(x,t)$: 정현적인 생성율

여기서 생성율은 DC 성분과 AC 성분의 합으로 표시할 수 있다. 즉

$$\tilde{G}(x,t) = \bar{G}(x) + \tilde{G}(x) \exp(j\omega t) \quad (10)$$

ω : 변조주파수

단색광의 광원에 대하여 생성율의 DC 성분과 AC 성분은 각각 다음과 같다.

$$\bar{G}(x) = \bar{G}(0) \exp(-\alpha x) \quad (11)$$

$$\tilde{G}(x) = \tilde{G}(0) \exp(-\alpha x) \quad (12)$$

단, $\bar{G}(0)$: 표면에서 생성율의 DC 성분

$\tilde{G}(0)$: 표면에서 생성율의 AC 성분

이때 주입되는 전자 밀도는 다음과 같다.

$$\bar{n}(x,t) = \bar{n}(x) + \tilde{n}(x) \exp(j\omega t) \quad (13)$$

단, $\bar{n}(x)$: 전자 밀도의 DC 성분

$\tilde{n}(x)$: 전자 밀도의 AC 성분

식 (10)과 식 (13)을 식 (9)에 대입하여 다음의 관계식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 D_n \frac{d^2 \bar{n}(x)}{dx^2} + \bar{G}(x) - \frac{\bar{n}(x)}{\tau_n} \\
 = 0 \quad \text{(DC part)} \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_n \frac{d^2 \tilde{n}(x)}{dx^2} + \tilde{G}(x) - \frac{\tilde{n}(x)}{\tilde{\tau}_n} \\
 = 0 \quad \text{(AC part)} \quad (15)
 \end{aligned}$$

단, $\tilde{\tau}_n = \frac{\tau_n}{1 + j\omega \tau_n}$ 이다.

AC 전자밀도에 대한 식 (15)의 확산방정식은 식 (14)와 형태가 유사하며 식 (14)의 해에 간단한 변환을 하여 식 (15)의 해를 구할 수 있다. 즉

$$\bar{n}(x) \longrightarrow \tilde{n}(x) \quad (16)$$

$$\tau_n \longrightarrow \tilde{\tau}_n = \frac{\tau_n}{1 + j\omega \tau_n} \quad (17)$$

$$D_n \longrightarrow D_n \quad (18)$$

$$L_n \longrightarrow \tilde{L}_n = \frac{L_n}{\sqrt{1 + j\omega \tau_n}} \quad (19)$$

3. 태양전지의 AC 모델

태양전지에 적외선의 변조된 단색광을 쬐었을 경우 에미터 영역에서는 광흡수가 무시될 수 있으므로 전체 광전류는 공간전하 영역에서 발생하는 광전류와 베이스 영역에서 발생하는 광전류와 베이스 영역에서 발생하는 광전류의 합으로 표시되며, 이때 태양전지에 대한 전기적 등가회로를 그림과 같이 나타낼 수 있다.^[6]

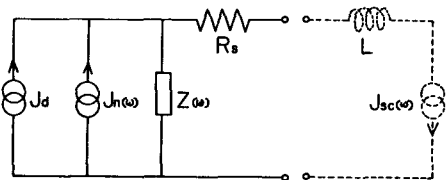


그림 2. 태양전지의 AC 모델
Fig. 2. AC model of a solar cells.

여기서 J_a 는 공간전하영역의 광전류 밀도로서 식 (7)이 식 (16~19)에 의하여 치환된 형태이다. R_s 는 태양전지의 직렬저항이며, $Z(\omega)$ 는 태양전지를 역방향 바이어스한 경우 접합용량(junction capacitance)이 된다.

즉, $Z(\omega) = \frac{W}{j\omega \epsilon}$ 이다.

여기서 ϵ 은 실리콘의 유전율이다. L 은 측정하기 위한 외부 회로의 인덕턴스 성분이다. $J_{sc}(\omega)$ 는 단락전류 밀도이다.

$$J_{sc}(\omega) = |J_n(\omega) + J_a| \frac{W}{R_s + j\omega L + \frac{W}{j\omega \epsilon}} \quad (20)$$

식 (20)에서 단락전류에 발생하는 위상차를 계산할 수 있다.

III. 실험

그림 3은 태양전지의 단락전류의 위상변화를 측정하기 위한 실험장치이다.^[6]

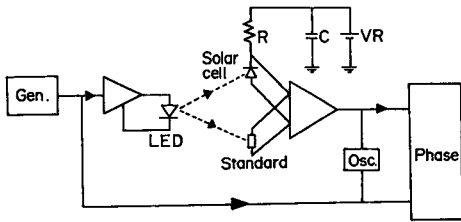


그림 3. 단락전류의 위상변화 측정장치
Fig. 3. Phase differences in short circuit measuring system.

LED에서 출력되는 변조된 빛을 태양전지에 쬐었을 때 발생하는 태양전지 단락전류의 제네레이터 출력에 대한 위상차에서 같은 방법으로 기준 소자를 통하여 측정된 위상차를 감산하고 기준 소자의 위상지연을 고려하면 측정회로에서의 위상지연은 무시할 수 있고 태양전지 자체의 위상지연을 측정할 수 있다

광원으로는 940nm의 파장을 갖는 적외선 발광 다이오드(RCA, SG 1009F)를 사용하였으며, 위상측정은 vector voltmeter (Hewlett Packard, 8405A)로 하였다. 또한 기준 소자로는 광증배관(photomultiplier tube, RCA 7102)이 사용되었으며 광증배관의 위상 지연은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$y = 2\pi ft, \quad (21)$$

여기서 y는 광증배관의 위상지연, f는 광원의 변조 주파수, t_a 는 dynode를 통과하는 전체 지연시간이다. 광원의 변조주파수가 1MHz일 때 광증배관(RCA, 7102)의 위상차는 15°로 알려져 있다.

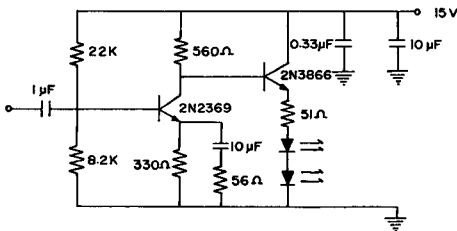


그림 4. 적외선 발광 다이오드 구동회로
Fig. 4. Infrared emitting diode driving circuit.

그림 4는 적외선 발광 다이오드의 구동회로를 보이고 있다.

IV. 結果 및 考察

1. 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험결과

그림 5는 베이스 영역의 불순물 농도의 변화에 따른 단락전류의 위상차를 컴퓨터 시뮬레이션한 결과이다.

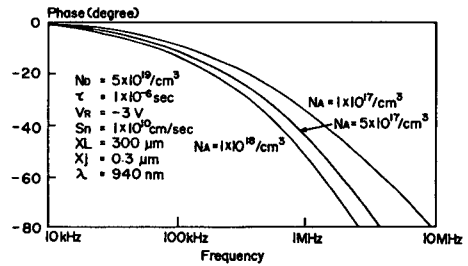


그림 5. 베이스 영역의 불순물 농도의 변화에 따른 위상변화

Fig. 5. Phase differences for the variation of the impurity concentration in base region.

횡축은 광원의 변조 주파수를 나타내고, 종축은 단락전류의 위상차를 나타낸다. 주파수가 높을수록 불순물 농도에 따른 위상 변화가 크음을 알 수 있다.

그림 6은 역방향 바이어스 전압의 변화에 따른 단락전류의 위상 변화를 나타낸 것이다.

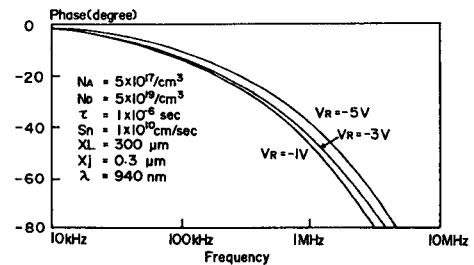


그림 6. 바이어스 전압의 변화에 따른 위상변화
Fig. 6. Phase differences for the variation of the bias voltage.

낮은 역방향 전압(-1V ~ -3V)에서는 역방향 전압에 따른 서로간의 위상차는 크지 않았다.

그림 7은 광원의 파장의 변화에 따른 위상차를 나타낸다.

그림 8 베이스 영역의 소수 반송자 수명의 변화에 따른 단락전류의 위상변화를 나타낸 것이다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 단락전류에 영향을 미치지 않는 에미

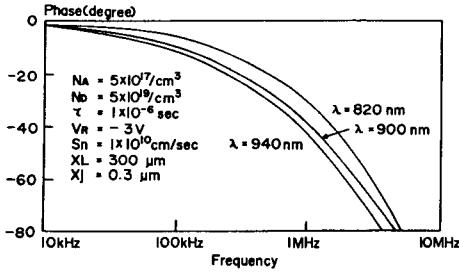


그림 7. 광원의 파장의 변화에 따른 위상변화
 Fig. 7. Phase differences for the variation of the wavelength.

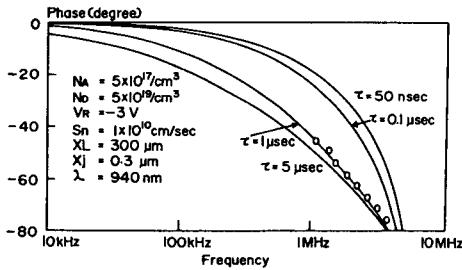


그림 8. 소수 반송자 수명의 변화에 따른 위상변화
 Fig. 8. Phase differences for the variation of the minority carrier lifetime.

터 영역의 불순물 농도, 태양전지의 전체두께, 접합깊이 등은 각각 $5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$, $300 \mu\text{m}$, $0.3 \mu\text{m}$ 로 계산되었다. 또한 단락전류에 영향을 미치는 파라미터는 실제로 실험 사용된 값들로 베이스 영역의 불순물 농도는 $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$, 역방향 영역의 불순물 농도는 $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$, 역방향 바이어스 전압은 -3 V , 광원의 파장은 940 nm 로 계산되었다.

실선은 계산치이며 점들은 측정치로서 이 두 값이 비교되어 본 실험에서 사용된 태양전지(kodenshi 개방전압 0.57 V , 단락전류 30 A/cm^2)의 소수 반송자 수명은 약 $1 \mu\text{sec}$ 로 추정되었다.

2. 개방전압 감쇠방법에 의한 소수 반송자 수명 측정
 광전 주파수 변조방법으로 소수 반송자 수명을 측정된 결과와 비교하기 위하여 일반적으로 사용되어온 개방전압 감쇠방법을 사용하였다. 개방전압 감쇠방법은 광유도 개방전압이 시간에 따라 감쇠하는 현상을 이용하여 베이스 영역의 소수 반송자 수명을 측정하는 것이다. 측정회로는 그림 9와 같으며 stroboscope의 주파수는 11 KHz 이다.

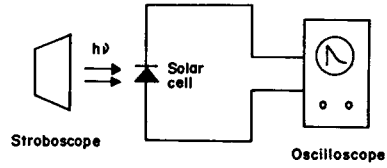


그림 9. 광유도 개방전압 감쇠 측정 회로도
 Fig. 9. Phase-induced open circuit voltage decay measuring circuit.

그림10은 오실루스코프에 나타난 개방전압의 시간에 대한 감쇠응답이다.

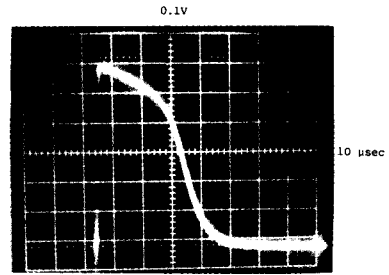


그림10. 광유도 개방전압 감쇠 곡선
 Fig. 10. Phase-induced open circuit voltage decay curve.

그림10에서 보인 곡선의 기울기는 저주입 상태의 경우이며, 이때 과잉 소수 반송자의 평균 수명은 다음과 같이 주어진다.^[1]

$$\tau = \frac{kT}{q} \left| \frac{1}{dV_{oc}/dt} \right| \quad (22)$$

여기서 V_{oc} 는 태양전지의 개방전압, dV_{oc}/dt 는 선형영역에서의 기울기이고, k 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도 q 는 일렉트론 차아지인데 이 값을 대입하여 계산하면 본 실험에서 사용될 태양전지의 소수 반송자 수명은 약 $1.1 \mu\text{sec}$ 이었다. 광전 주파수 변조방법으로 측정한 소수반송자 수명은 약 $1 \mu\text{sec}$ 로서 개방전압 감쇠방법과 비슷한 값을 얻었다.

V. 結 論

본 실험에서는 광원의 변조 주파수에 따른 단락전류의 위상변화를 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. 측정은 기준소자로서 광증배관이 사용되었으며, 측정된 위상차와 계산된 위상차가 비교되어 본 실험에서 사용된 태양전지의 소수 반송자 수명은 약 $1 \mu\text{sec}$ 로 추정되었다.

또한 개방전압 감쇠방법으로 측정한 결과 약 1.1 μsec 로 비슷한 결과를 얻었다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과 광전 주파수 변조방법은 약 50nsec까지의 상당히 짧은 소수 반송자 수명을 측정하는 좋은 방법임을 알 수 있었다.

광전 주파수 변조방법은 광에 감응할 수 있는 MIS, 쇼트키 태양전지나 기타 광전소자의 소수 반송자 수명 측정에도 폭 넓게 적용할 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

- [1] J.E. Mahan, T.W. Ekstedt, and R.I. Frank, "Measurement of minority carrier lifetime in solar cells from Photo-induced open-circuit voltage decay," *IEEE Trans. Electron Divices*, vol. ED-26, pp. 733-739, 1979.
- [2] J.H. Reynolds and A. Meulenberg Jr., "Measurement of diffusion length in solar cells", *J. of Applied Physics*, vol. 45, no. 6, June 1974.
- [3] A. Neugroschel, P.J. Chen, S.C. Pao, and F.A. Lindholm, "Diffusion length and lifetime determination in p-n junction solar cells and diodes by forward-biased capacitance measurements", *IEEE. Trans. Electron Devices*, vol. ED-25, no. 4, Apr. 1978.
- [4] H.J. Hovel, *Semiconductors and Semimetals*. vol. 11, Solar Cells: Academic Press, New York, pp. 15-23, 1975.
- [5] H.C. Gay, *Étude et Détermination des Paramètres Physiques dans les Semi-conducteurs par Absorption Infra-rouge en Régime Sinusoïdale*. These de Doctorat d'Etat, ENSEEIHT, pp. 43-50, 1977.
- [6] H.S. Chung, *Contribution a L'étude des Cellules Solarises au Silicium Polycristallin* These de Docteur Ingenieur, ENSEEIHT, pp. 116-118, 1980.
- [7] K.D. Kwack, *Determination de la Cinétique des Porteurs en Exces Dans une Plaquette Silicium par une Technique D'injection Photonique et Realisation d'une Structure Microbande*, These de Docteur Ingenieur, ENSEEIHT, pp. 103, 1980.