

Determinación de Parámetros Fotoeléctricos de Películas de Silicio Amorfo Hidrogenado utilizando las Técnicas de Fotocorriente Modulada y Foto-FEM en Estado no Estacionario

Mario Espinosa Tlaxcaltecatl^{1,2}, Svetlana Mansurova³, Carlos Muñoz Mónico^{1,2}, Luis A. Sánchez Gaspariano^{1,2}, Alfonso Goches Sánchez²

1UPPue-CA-3, ²Ingeniería en Sistemas Automotrices Universidad Politécnica de Puebla, 3er Carril del Ejido "Serrano" S/N, San Mateo Cuanalá, Juan C. Bonilla, Puebla, México. C.P. 72640.

³ Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)
Coordinación de Óptica
Tonanzintla, Puebla, 72000 México
mario.espinosa@uppuebla.edu.mx

Abstract

Reportamos los resultados de caracterización de películas de silicio amorfo hidrogenado a-Si:H aplicando la técnica de Fuerza Foto-Electromotriz (foto-FEM) en estado no estacionario. La longitud de difusión de los electrones L_{De} se determinó variando la escala espacial del experimento a partir de la medición de la dependencia en frecuencia espacial de la señal de la foto-FEM y a partir de las dependencias en frecuencia de modulación se determina el tiempo característico de respuesta de fotoconductividad y el tiempo de relajación dieléctrica.

1. Introducción

Actualmente, las películas de silicio amorfo y micro cristalino se utilizan ampliamente en dispositivos de área grande, tales como celdas solares o transistores de película delgada [1]. Para su realización, algunos autores proponen utilizar el método de deposición por descarga de plasma a baja frecuencia (PECVD, por sus siglas en inglés "Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition"), el cual permite depositar películas uniformes en un área considerable [2]. Desafortunadamente, este tipo de películas han sido poco estudiadas en la literatura [3-8], por lo que sus características electrónicas y su relación con las condiciones del depósito son poco conocidas. Dado que los procesos de transporte a los que están sujetos los portadores mayoritarios y minoritarios son las figuras importantes que

determinan las características electrónicas de los dispositivos basadas en estas películas, en este trabajo proponemos determinar longitudes de transporte de los portadores de carga, midiendo una corriente alterna inducida producto de un patrón de interferencia oscilante, el cuál induce una rejilla de fotoconductividad que interactúa con el campo espacial de carga, la técnica de foto-FEM no estacionaria [3,9-11]. Por otro lado, se determina tiempos característicos haciendo uso de la respuesta foto conductiva a una iluminación monocromática modulada, la técnica de fotocorriente modulada J_{ph}. Estas técnicas de caracterización surgidas en las últimas dos décadas compiten con otras técnicas también basadas en rejillas de foto portadores, entre las principales tenemos: técnica de rejilla estacionaria de foto portadores (SSPG), técnica de rejilla de foto portadores desplazada (MG), y técnica basada en mezcla de dos ondas (TWM) [5,7]. La técnica de foto-FEM ha sido utilizada para caracterizar silicio amorfo, al determinar longitud de difusión de portadores mayoritarios y minoritarios [3]. Desafortunadamente, todas estas técnicas solamente permiten determinar un solo parámetro de transporte en las películas. Por lo tanto, en este trabajo proponemos el uso conjunto de técnicas para determinar el tiempo de vida y las longitudes de transporte de los portadores de carga. El tiempo de vida es el periodo temporal de una carga antes de ser recombinada y la longitud de transporte está relacionada con la distancia en que contribuye una carga en el proceso de conductividad, por lo tanto, una

longitud de transporte mayor indica mejores propiedades eléctricas en un semiconductor.

Este trabajo se organiza de la siguiente forma. En la Sección 2 se describe la expresión de corriente foto-FEM no estacionaria en un fotoconductor bipolar en distintos regímenes. En la Sección 3 se describe el arreglo experimental para la medición de fotocorriente y corriente inducida del efecto foto-FEM, mientras que en la Sección 4 se describen los resultados obtenidos. Finalmente, en la Sección 5 se enuncian las conclusiones obtenidas.

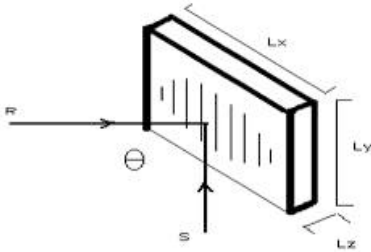


Figura 1. Fotoconductor iluminado por un patrón de interferencia sinusoidal

2. Caracterización por foto-FEM

En la Figura 1 se muestra un material fotoconductor iluminado por un patrón de intensidad de luz que oscila a una frecuencia Ω . El cambio periódico de fase entre el campo eléctrico de carga espacial E_{sc} -formado por carga atrapada en estados localizados- y la rejilla de portador móvil que sigue el patrón de intensidad de luz produce una corriente alterna $i\Omega$. A este efecto se le denomina foto-FEM no estacionario.

En el silicio amorfo iluminado por luz con longitud de onda en la región de absorción intrínseca ($\lambda < 0.73 \mu\text{m}$) tiene lugar la transición banda a banda. Por lo tanto, ambos portadores -huecos y electrones- contribuyen a la fotoconductividad, por lo que el modelo teórico correspondiente puede obtenerse a partir de los resultados teóricos reportados en [3,9], donde se describe el efecto de foto-FEM en estado no estacionario en un fotoconductor bipolar en distintos regímenes. Así, de la ecuación de densidad de corriente para el caso bipolar [9,10] se pueden encontrar los parámetros del fotoconductor, tales como: signo de portador dominante, la contribución relativa de ambos portadores, longitud de difusión de huecos y de electrones $L_{De,h}$, tiempo de recombinación de huecos o electrones τ y de relajación dieléctrica τ_{di} . Este proceso se realiza por medio del análisis de dependencias experimentales de la corriente del efecto foto-FEM en

función de frecuencias espaciales, y frecuencias temporales, entre las principales.

Efecto Foto-FEM sin campo

A partir de la dependencia de corriente de foto-FEM ($j\Omega$) en frecuencia espacial K (Figura 2) es posible obtener las longitudes características $L_{D1,2}$ del material mediante:

$$j^\Omega = \frac{K}{(1 + K^2 L_{D1}^2)(1 + K^2 L_{D2}^2)} \quad (1)$$

donde el significado de las longitudes características $L_{D1,2}$ depende del régimen de frecuencia en el que se

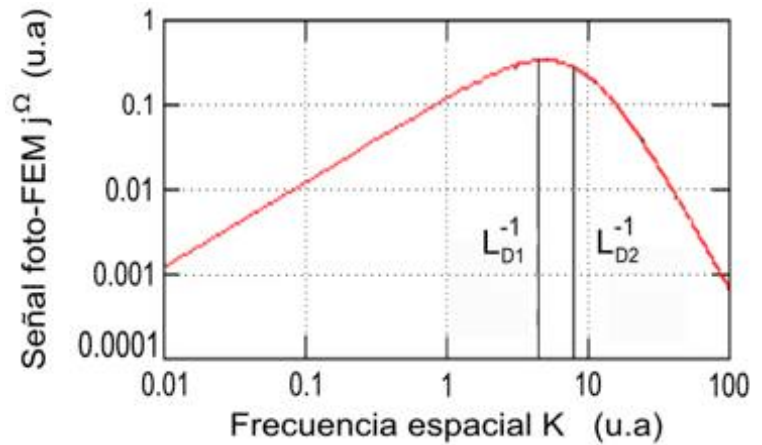


Figura 2. Señal de foto-FEM en dependencia de frecuencia espacial sin campo eléctrico externo para fotoconductor bipolar en el régimen de altas frecuencias.

- Régimen de “relajación dieléctrica”:

$$\tau_{di}^{-1} \ll \Omega \ll \tau^{-1}, L_{D1} = L_{De}, L_{D2} = L_{Dh}$$

- Régimen de “tiempo de vida”:

$$\tau^{-1} \ll \Omega \ll \tau_{di}^{-1}, L_{D1} = \sqrt{2}L_{DA}, L_{D2} = L_{DA}$$

- Frecuencias de operación altas:

$$\Omega \gg \tau_{di}^{-1}, \tau^{-1}, L_{D1} = \sqrt{2}L_{DA}, L_{D2} = L_{Dh}$$

donde L_{DA} es longitud de difusión ambipolar. Z

$$\frac{1}{L_{DA}^2} = \frac{1}{L_{De}^2} + \frac{1}{L_{Dh}^2} \quad (2)$$

La dependencia teórica de foto-FEM en función de la frecuencia espacial K se muestra en la Figura 2. El comportamiento es válido en los regímenes de relajación dieléctrica, tiempo de vida y alta frecuencia. Por otra parte considerando que el semiconductor se

encuentra en equilibrio, esto permite asumir la validez de la relación de Einstein, como se describe en [9].

$$\frac{D}{\mu} = \frac{k_B T}{e} \quad (3)$$

donde D es el coeficiente de difusión, k_B la constante de Boltzmann, T la temperatura y e la carga fundamental. Por lo tanto, a partir de las dependencias de fotocorriente modulada, la expresión de foto-FEM no estacionaria, y la relación de Einstein podemos estimar las longitudes de difusión, tal y como se describe en la siguiente sección.

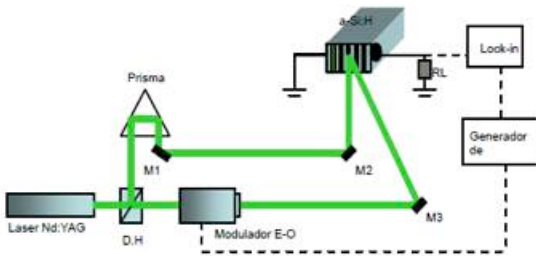


Figura 3. Arreglo experimental para medir la corriente de foto-FEM no estacionaria.

3. Arreglo experimental

Para realizar las mediciones de foto-FEM en la placa de a-Si:H se utilizó un arreglo interferométrico, el cual es una variación del interferómetro de Mach-Zender, como se muestra en Figura 3. La muestra de silicio amorfo fue crecida mediante la técnica de depósito químico de fase vapor asistido por plasma (PECVD), en el sistema de depósito por plasma de placas paralelas modelo AMP 3300. Este sistema de caracterización trabaja a baja frecuencia en el intervalo de 10kHz a 100kHz. En el arreglo experimental el haz es dividido a través de un divisor de haz (70/30), la parte más intensa pasa a través del modulador electro-óptico donde es modulado en fase. El modulador es manejado por un generador de funciones que controla la frecuencia de modulación y su amplitud. Este haz lo referimos como haz de señal. En el segundo haz, el haz de referencia tiene una trayectoria a través de un prisma y espejos que permiten controlar el ángulo de incidencia. El prisma tiene la finalidad de compensar la diferencia de camino óptico que aparece debido a variaciones del ángulo en el experimento. Al incidir ambos haces sobre la muestra se crea un patrón de interferencia oscilante. La señal de corriente es medida por medio de un amplificador Lock-in como caída de voltaje en una resistencia de carga $U \Omega$. Las principales

características a medir fueron dependencias en frecuencia y en el ángulo. Para mediciones en frecuencia se asegura el ángulo de incidencia pequeño para cumplir la condición $KLD \ll 1$ de nuestro modelo.

4. Resultados

La longitud de onda utilizada en nuestro experimento $\lambda=632.8\text{nm}$ implica que tiene lugar el proceso de absorción intrínseca ($E_{\text{fotón}} \approx 1.96\text{eV} > E_{\text{gap Si-a}} \approx 1.7\text{eV}$). Esto significa que ambos portadores están presentes en nuestra muestra y sus razones de generación son iguales $g_e = g_h$. Para medir la respuesta de fotocorriente se utilizó solamente un haz en el esquema de la Fig. 3.

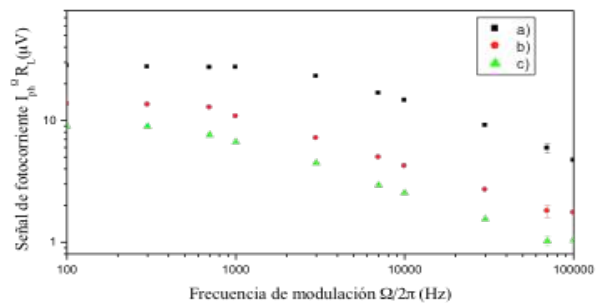


Figura 4. Magnitud de la señal de fotocorriente Vs frecuencia de modulación. $\lambda = 632.8\text{nm}$, $RL = 10\text{K}\Omega$, Modulador electro-óptico $U_0 = 250\text{V}$, $\text{mpm} = 0.5$, I: a) $I_0 = 0.32\text{W/cm}^2$, b) $I_0 = 0.16\text{W/cm}^2$, c) $I_0 = 0.08\text{W/cm}^2$.

Se observa que el comportamiento de la señal de fotocorriente es constante en bajas frecuencias y empieza a decaer, alcanzando una caída de 80%. Esto significa que el portador "lento" es, a su vez, el portador mayoritario (Figura 4). Esto se debe a que con frecuencias cada vez más altas el periodo solamente permite excitar a portadores con mayor movilidad. El portador mayoritario en películas de Si-a no dopadas usualmente es el electrón [3]. Para distintas intensidades de iluminación, se observa que la amplitud de la señal es proporcional a la intensidad. Lo mismo ocurre para la frecuencia de corte, misma que encontramos en $\Omega_c/2\pi \approx 4\text{kHz}$ para $I_0 = 0.32\text{W/cm}^2$. Las curvas experimentales de la Figura 4 muestran la respuesta de fotocorriente en frecuencia para distintas intensidades de iluminación. Se observa que la amplitud y la frecuencia de corte de la señal son proporcionales a la intensidad. a) $\Omega_c/2\pi \approx 4\text{kHz}$ para $I_0 = 0.32\text{W/cm}^2$, b) $\Omega_c/2\pi \approx 1.4\text{kHz}$ para $I_0 = 0.16\text{W/cm}^2$ y c) $\Omega_c/2\pi \approx 1.05\text{kHz}$ para $I_0 = 0.08\text{W/cm}^2$. A estas frecuencias de corte corresponden los siguientes tiempos característicos: a) $\tau_{\text{ph}} \approx 0.25\text{ms}$, b) $\tau_{\text{ph}} \approx 0.7\text{ms}$, c) $\tau_{\text{ph}} \approx 0.95\text{ms}$. Así, la frecuencia de corte se desplaza al variar la intensidad de iluminación.

Con la utilización de la configuración experimental mostrada en la Figura 3 hallamos las dependencias de corriente foto-FEM en función de frecuencia de modulación y frecuencia espacial. En la dependencia de foto-FEM en función de frecuencia de modulación encontramos que, a bajas frecuencias de modulación, existe un crecimiento aproximadamente lineal. A partir de aproximadamente 4kHz se observa una saturación de la señal. Posteriormente, la señal crece hasta saturarse nuevamente a partir de la segunda frecuencia característica, aproximadamente 60kHz (Figura 5). La frecuencia más baja coincide con la frecuencia característica en respuesta de fotoconductividad γ , y por

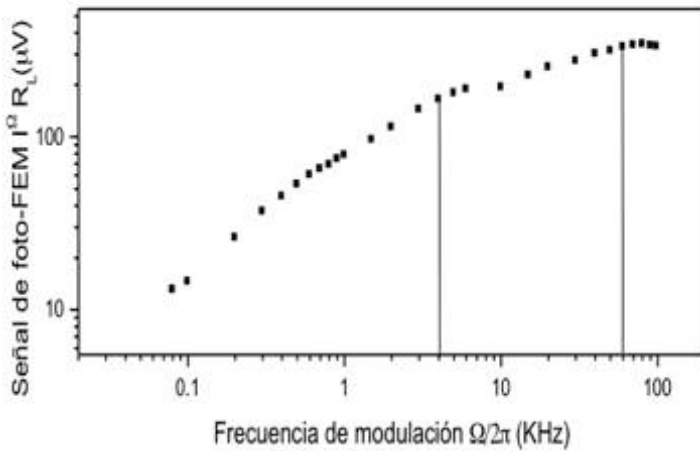


Figura 5. Amplitud de señal Vs frecuencia de modulación. $\lambda=632.8\text{nm}$, $K=2.4\mu\text{m}^{-1}$, $E_0=0$, $I_0=0.32\text{W/cm}^2$ y $\Delta=0.45\text{rad}$.

lo tanto, puede asociarse con el tiempo característico de respuesta de fotoconductividad $\tau_{\text{phe}} \approx 0.25\text{ms}$. La frecuencia más alta se atribuye al tiempo de relajación dieléctrica $\tau_{\text{di}} \approx 17\mu\text{s}$.

La amplitud de la señal de foto-PMF en función de la frecuencia espacial se muestra en la Figura 6. La línea continua muestra es ajuste numérico realizado.

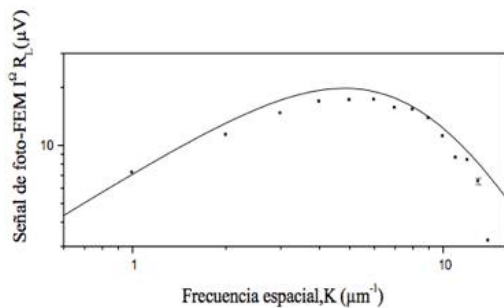


Figura 6. Dependencias de la amplitud de la señal de foto-FEM sobre frecuencias espaciales. Curva teórica (con razones de

generación iguales, $g_e=g_h$) y datos experimentales ($\lambda=632.8\text{nm}$, $\Omega/2\pi=90\text{kHz}$, $RL=33\text{k}\Omega$, $E_0=0$, y $\Delta=0.45\text{rad}$).

A bajas frecuencias un crecimiento lineal, alcanzando un máximo $K_{\text{max}}=5.8\mu\text{m}^{-1}$, después empezó a decaer en $\sim K^{-1}$ y continuando con el crecimiento de frecuencias espaciales existe una caída de $\sim K^{-3}$ después de $K=11.4\mu\text{m}^{-1}$. Al ajustar los parámetros del modelo teórico en altas frecuencias a los resultados experimentales, encontramos que las longitudes de difusión son: $LD_1 = 0.12\mu\text{m} = 1.414\text{LDA}$, y $LD_2 = 0.12\mu\text{m} = LD_h$, con lo que se deduce $L_{De} = 0.18\mu\text{m}$.

En la tabla 1 se muestran un comparativo de los resultados obtenidos por diversos grupos de investigación, incluyendo el reportado por nosotros (Jph y foto-FEM no estacionaria). La tendencia durante el periodo de mayor interés sobre estas películas en la década de los noventa fue utilizar la técnica SSPG[5], aunque también fueron usadas técnicas similares como la técnica de spot de vuelo (FST) [5] o el uso de las ecuaciones de transporte en estado estacionario en pequeña señal (ECT)[4]. Actualmente debido al renovado interés por mejorar sus propiedades para aplicaciones en celdas solares se ha reportado recientes resultados [6-8].

Técnica	τ_{di} (μs)	L_{Dh} (μm)	L_{De} (μm)	L_{DA} (μm)
Jph, FotoFEM	17	0.12	0.18	0.08
ECT [4]	0.10			0.10
FST,SSPG [5]				0.12 - 0.18
SSPG [6,7]				0.21
SSPG [8]				0.06 - 0.10

Tabla 1. Comparación de parámetros de transporte obtenidos en películas de a-Si:H por diversos grupos de investigación.

Actualmente, la tendencia en la investigación está enfocada a determinar los parámetros fotoeléctricos de las películas de silicio amorfo en forma conjunta con la estructura donde es aplicada, por ejemplo en transistores y celdas solares [12-13].

5. Conclusiones

Se ha utilizado el método de medición de longitudes de transporte de los portadores minoritarios utilizando el efecto de la foto-FEM no estacionario. El estudio experimental de las propiedades fotoeléctricas de la película delgada de silicio amorfo hidrogenado demostró que: 1) en la

región espectral de la luz roja, a-Si:H es un fotoconductor bipolar. 2) Los electrones son portadores lentos y mayoritarios. 3) El tiempo de vida de estos portadores determina la dinámica de la fotocorriente (régimen de “tiempo de vida” ($\tau_{ph} \gg \tau_{di}$)). Por otro lado, basándonos en el modelo del fotoconductor bipolar, determinamos los siguientes parámetros de la muestra: el tiempo de respuesta de la componente de fotoconductividad, el cuál normalmente es asociado al tiempo de vida, que corresponde a los electrones $\tau_{ph} \approx 0.25 \text{ms}$, el tiempo de relajación dieléctrica $\tau_{di} \approx 17 \mu\text{s}$, longitud de difusión ambipolar $L_{(DA)} \approx 0.08 \mu\text{m}$, la longitud de difusión de los huecos $L_{Dh} \approx 0.12 \mu\text{m}$ y la longitud de difusión de los electrones $L_{De} \approx 0.18 \mu\text{m}$. Estos parámetros coinciden razonablemente bien con los datos sobre Si-a que se pueden encontrar en literatura.

Agradecimientos

El primer autor agradece al Programa para el Desarrollo del Profesorado de México (PRODEP) por el soporte financiero a través del proyecto PROMEP-UPPue-PTC-045.

6. Referencias

- [1] Tsybeskov, L.; Lockwood, D.J.; Ichikawa, M., "Silicon Photonics: CMOS Going Optical [Scanning the Issue]," *Proceedings of the IEEE*, vol.97, no.7, pp.1161,1165, July 2009
- [2] Fujimoto, K. ; Nakabeppu, F. ; Sogawa, Y. ; Okayasu, Y. ; Kumagai, K. "Development of thin film silicon solar cells using PCVD process", *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty Third IEEE, 1993*
- [3] G.S. Trofímov, A.I. Kosarev, A.G Kovrov, P.G. LeComber, " Non-Steady State Photo-EMF induced by the Dynamic Grating Technique in a-Si:H Films", *Journal of Non- Crystalline Solid*, (483-486), (1991).
- [4] Jacques Hubin, Eveline Sauvain, and Arvind V. Shah, "Characteristic Lengths for Steady-State Transport in Illuminated, Intrinsic a-Si:H", *IEEE Transactions on Electron Devices. Vol 36, No. 12. December 1989.*
- [5] M. Vieira, A. Fantoni, R. Martins, S. Koynov, F. Wang, S. Grebner, R. Schwarz, "Comparison of Diffusion Length Measurements from the Flying Spot Technique and the Photocarrier Grating Method in Amorphous Thin Films", *Photovoltaic Energy Conversion, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1994.*
- [6] C. Longeaud, F.Ventosinos, J. A.Schmidt, "Determination of hydrogenated amorphous silicon electronic transport parameters and density of states using several photoconductivity techniques", *Journal of Applied Physics 112 (2.) 2011.*
- [7] Federico Ventosino, "Caracterización de Silicio Amorfo Hidrogenado Utilizando Técnicas de Red Fotogenerada", *Tesis doctoral, INTEC, Universidad Nacional del Litoral, 2013.*
- [8] Marian Nowak, Anna Starczewska, "Steady-State Photocarrier Grating Method of Determining Electronic States Parameters in Amorphous Semiconductors", *Journal of Non- Crystalline Solids, Volume 351, pag 1383-1392, June 2005.*
- [9] M.P.Petrov, S.I. Stepanov and C.S.Tromimov. "Time Varying Emf in a Nonuniformly Illuminated Photorefractive Crystal". *Sov. Phys. Solid State 12, 379-381, 1986.*
- [10] S. Mansurova, "Non- Steady-State Photo-EMF in Photorefractive Semiconductors with Photoconductivity Relaxation", *Tesis doctoral, INAOE, 1998.*
- [11] Stepanov, S. ; Pernas, V.C. ; Garcia, R.R. ; Mansurova, S. ; Meerholz, K. ; Gallego, F. ; Mecher, E. ; Bittner, R, "Characterization of PVK-based Photorefractive Polymers by Photo-EMF Technique in Reflectance Configuration", *Lasers and Electro-Optics, 2002. CLEO '02.*
- [12] Hyejeong Jeong; Seongmin Ju; Sang In Song; Seongjae Boo, "Investigation of a-Si:H solar cells with a protocrystalline-like amorphous silicon intrinsic layer", *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 37th IEEE, 2011.*
- [13] Jia Ge, Muzhi Tang, Johnson Wong, Rolf Stangl, Zhenhao Zhang, Torsten Dippell, Manfred Doerr, Oliver Hohn, Marco Huber, Peter Wohlfart, Armin G. Aberle, and Thomas Mueller, "Investigation of Wide Process Temperature Window or Amorphous Silicon Suboxide Thin-Film Passivation Deposited by Inductively Coupled PECVD", *Photovoltaics, IEEE Journal of Volume:5, 2015.*