

Internet Electronic Journal*

Nanociencia et Moletrónica

Diciembre 2010, Vol. 8, N°2, pp. 1571 -1584

Caracterización eléctrica de una celda solar de silicio monocristalino

**J. E. Flores-Mena^{1,a} L. A. Juárez Moran¹, J. Díaz Reyes^{2,b} y
H. Coyotecatl Azucena¹.**

¹FCE-BUAP. CU Edif. No. 182 Col. Sn. Manuel. 72570. Puebla, Pue. **México**;

²CIBA-IPN, Ex –Hacienda de San Juan Molino Km. 1.5. Tepetitla, Tlaxcala. 90700. **México**
Email: ^aeflores@ece.buap.mx, ^bjdiazr2001@yahoo.com.

recibido: 22.10.2010

revisado: 15.11.2010

publicado: 31.12.2010

Citation of the article;

J. E. Flores-Mena, L. A. Juárez Moran, J. Díaz Reyes y H. Coyotecatl Azucena, Caracterización eléctrica de una celda solar de silicio monocristalino, Internet Electron J. Nanoc. Moletrón, 2010, Vol. 8, N°2, pp 1571-1584

Copyright © BUAP 2010

<http://www.revista-nanociencia.ece.buap.mx>

Caracterización eléctrica de una celda solar de silicio monocristalino

J. E. Flores-Mena^{1,a} L. A. Juárez Moran¹, J. Díaz Reyes^{2,b} y
H. Coyotecatl Azucena¹.

¹FCE-BUAP. CU Edif. No. 182 Col. Sn. Manuel. 72570. Puebla, Pue. **México**;

²CIBA-IPN, Ex –Hacienda de San Juan Molino Km. 1.5. Tepetitla, Tlaxcala. 90700. **México**
Email: ^aeflores@ece.buap.mx, ^bjdiazr2001@yahoo.com.

recibido: 16.10.09

revisado: 15.04.10

publicado: 31.07.10

Internet Electron. J. Nanoc. Moletrón., 2010, Vol.8, N° 2, pp 1571-1584

RESUMEN

En este trabajo presentamos las propiedades eléctricas de una celda solar de silicio monocristalino, el sustrato tipo p que se obtuvo está impurificado con fósforo empleando la técnica de difusión térmica a una temperatura de 850 a 900 °C durante 10 minutos, mientras que, el silicio tipo n de fabrica está impurificado con Boro. Por medio de mediciones de absorción a temperatura ambiente son obtenidas las bandas prohibidas, 1.061 y 1.019 eV de las muestras tipo p y n, respectivamente. Estos datos indican valores altos de impurificación por difusión térmica de las muestras, las cuales fueron usadas para la formación de la unión p-n en el dispositivo optoelectrónico. La señal de fotoluminiscencia a baja temperatura es muy débil, como se esperaba. Las resistividades eléctricas son 0.01 y 0.08-0.015 cm para tipo p y n, respectivamente. En las mediciones eléctricas se encontró una eficiencia de $\eta = 11.27\%$ siendo la intensidad de iluminación $100\text{mW}/\text{cm}^2$ y una resistencia de la celda de $R_s = 0.358\ \Omega$, esta celda la llamamos CS-1. El procedimiento para determinar la eficiencia de la celda solar construida se aplico a una celda solar comercial (CS-2) cuya eficiencia resulto ser 4.77%. Finalmente, haciendo mediciones de I-V variando la resistencia de carga se obtiene la curva típica, para una celda solar convencional que llamamos CS-3, la cual fue ajustada a un polinomio de orden 6 usando mínimos cuadrados por simplicidad para obtener los parámetros de la celda.

Keywords: Celda solar, silicio monocristalino, eficiencia, impurificación.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las fuentes de contaminación están provocando el fenómeno de calentamiento global, perjudicial para todos. Por ello, se debe enfatizar en la fabricación de dispositivos que nos ayuden a aprovechar la energía alternativa que tenemos hoy en día, reduciendo costos y aumentando la eficiencia para así poder tener acceso a esta tecnología y no contaminar más al medio ambiente. Las celdas solares hoy en día son una de las pocas fuentes de energía no contaminante, estas desempeñan un rol muy importante en los paneles fotovoltaicos, los cuales están formados por arreglos de celdas solares, que están conectadas en serie. Las celdas constituyen la unidad básica del panel, y la potencia eléctrica deseada determina la cantidad de paneles, según las diversas aplicaciones, para ello se realizan en laboratorios varias pruebas de diferentes tipos de semiconductores para la manufactura de estos dispositivos, algunos son caros y no muy accesibles, o se requiere de más tecnología costosa, por eso se estudia más el silicio el cual comparado con otros es más accesible y barato, estudiando más este material se podría obtener una celda solar de alta eficiencia.

La conversión directa de energía solar a electricidad por medio de celdas fotovoltaicas en sistemas de potencia solar concentrados está surgiendo como uno de los principales contendientes para la producción de potencia verde de la siguiente generación. La área fotovoltaica está rápidamente desarrollándose basada en nuevos materiales y enfoques de deposición. En la actualidad, los sistemas fotovoltaicos predominantemente están basados en silicio cristalino y policristalino y está creciendo más allá de 40% por año con producción rápidamente acercándose a 3 GW por año con sistemas fotovoltaicos proporcionando menos del 1% de energía usada en el mundo. Incrementando la eficiencia de la celda y reduciendo el costo de fabricación son parámetros críticos para alcanzar costos razonables de sistemas fotovoltaicos. Celdas solares de películas de CdTe han reportado un costo de fabricación de \$1.25 por watt. Hay también la promesa de incrementar la eficiencia al usar celdas multiuniones o dispositivos híbridos organizados en la nanoescala. Esto puede llevar a eficiencias de conversión mayores a 50%. La conversión de energía solar en constante aumento representa uno de los negocios nuevos más grandes que van emergiendo en cualquier sector de la economía. Los dispositivos basados en obleas de silicio, simple o policristalino, han sido nombrados tecnología fotovoltaica de "primera generación". Estos son dispositivos simples de una unión que están limitados por consideraciones termodinámicas a una eficiencia de conversión de potencia máxima de aproximadamente 31% bajo luz solar directa AM1.5. Celdas y módulos solares son usualmente caracterizados de acuerdo a la norma IEC bajo condiciones de prueba estándar, lo cual corresponde a 100 mW/cm² de irradiación directa perpendicular bajo un espectro global de 0 AM1.5 a 25 °C de temperatura de la celda. Esto significa que una celda solar de silicio ideal operando bajo luz solar directa convierte aproximadamente 30% de la radiación solar en potencia eléctrica, aunque las celdas actuales sufren de pérdidas parasitas ^[1,2,3].

El proceso tecnológico de fabricación de celdas solares en obleas de silicio, está compuesto por procesos químicos, térmicos y fotolitográficos. Una de las etapas fundamentales de la tecnología de obtención de las celdas solares, es el proceso de difusión de impurezas de fósforo en el silicio en hornos de alta temperatura, y tiene como objetivo formar la unión p-n, donde se produce la transformación de la energía fotovoltaica en energía eléctrica ^[2].

En este trabajo se estudia una celda solar de silicio monocristalino, tratamos tres celdas solares una fabricada (CD-1) en el Cinvestav, una comercial (CS-2) y una convencional (CS-3). El estudio consiste en caracterizar las celdas, en particular se presentan las características eléctricas de estas celdas.

2. Experimento

2.1 Difusión de Fósforo a alta temperatura

El proceso de formación de la unión p-n en la fabricación de las celdas solares, se realiza mediante la introducción de las impurezas de fósforo en el silicio a través del proceso térmico denominado difusión. Este proceso tecnológico, se efectúa a partir de una fuente de impurezas que garantice una concentración superficial constante en la superficie del semiconductor.

La variante tecnológica utilizada para la obtención del proceso de difusión, se realiza a partir de una fuente de impurificación líquida de oxiclورو de fósforo (POCl_3) en un horno de difusión a altas temperaturas. Este proceso consiste de dos pasos fundamentales: saturación de la instalación y realización de la difusión. La saturación del tubo y del soporte de cuarzo de la instalación consiste en la realización de un proceso térmico en vacío, con la temperatura y los flujos de trabajo durante 10 minutos, con el objetivo de lograr una deposición de óxido de silicio impurificado con fósforo en el interior de la cámara, lo cual garantiza un mejor aprovechamiento de la fuente de impurificación durante la difusión y una mayor uniformidad de la resistencia laminar en las muestras. Para la realización del proceso de difusión se requiere mantener la temperatura de la fuente de impurificación constante en un valor de $25\text{ }^\circ\text{C}$ mediante un termostato, con el objetivo de mantener sin variación la presión de vapor de la especie de impurificación y por tanto su contenido en el flujo gaseoso. El número de muestras a procesar simultáneamente, su disposición geométrica en el interior del tubo de cuarzo y la selección del soporte de cuarzo, influyen en la velocidad y la uniformidad de la composición del flujo gaseoso que transporta la especie de impurificación, desde la fuente hasta las muestras. En este procedimiento experimental se utilizan soportes de tipo transversal, donde las muestras son colocadas de forma perpendicular a la dirección del flujo, a una separación de 2mm entre cada una de ellas. Durante el proceso de difusión, las impurezas son arrastradas hacia el interior del horno por un flujo de gas inerte, donde reacciona con el oxígeno presente en la mezcla gaseosa, formándose el óxido de fósforo (P_2O_5), el cual se deposita sobre la superficie del silicio, reacciona con este, y forma los átomos de fósforo que se difunden hacia el volumen del semiconductor, este proceso se muestra en la Fig. 1 y en la tabla 1 se describe las operaciones del proceso térmico

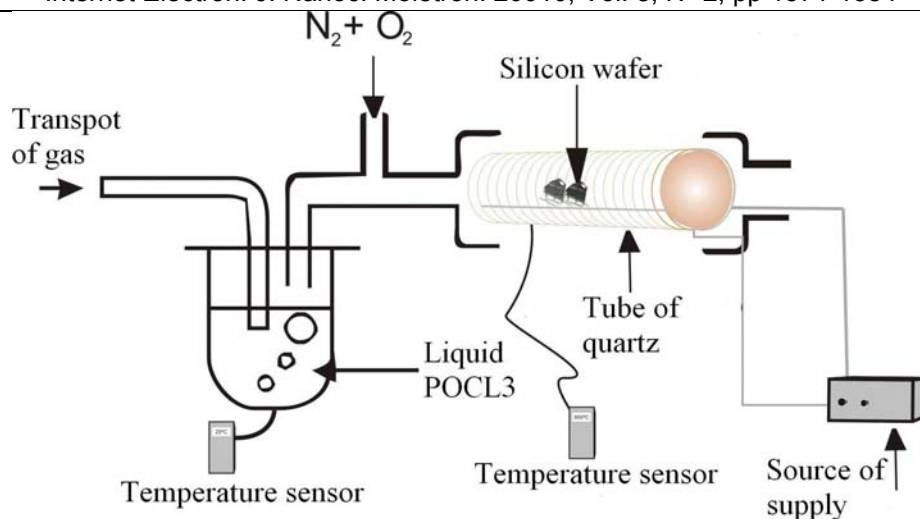


Fig.1 Equipo empleado para la difusión de fósforo

En la Tabla 1 se describe las operaciones del proceso térmico. Durante el tiempo $t_1 = 1$ min, se realiza la purga del horno para eliminar los restos de impurezas que quedan en el interior del tubo, durante el tiempo $t_2 = 3-5$ min, ocurre la carga de las muestras al horno; durante $t_3 = 10$ min, ocurre la estabilización de la temperatura del horno y las muestras. En el tiempo $t_4 = 10$ min, las impurezas de fósforo son transportadas hacia la superficie de las muestras de silicio, ejecutándose la difusión de las mismas. Adicionalmente ocurre un proceso de difusión, pues aun queda un flujo residual de fósforo en el interior del tubo de cuarzo. Durante el tiempo $t_5 = 5$ min, las muestras son extraídas del horno, la temperatura debe descender gradualmente para evitar deformaciones en la red cristalina, concluyendo así el proceso. Previo al proceso de difusión de impurezas, estas muestras deben ser sometidas a una limpieza química inicial que incluye un desengrase y eliminación total del oxido de silicio.

Tabla 1. Descripción del proceso de difusión

Gases	Flow (%)	Stages of the process				
N ₂	86.0	x	x	x	x	x
O ₂	5.4	x	x	x	x	x
N ₂ + POCL ₃	8.6			x		
	Times	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅

2.2 Caracterización eléctrica de la celda solar

Una vez concluido el proceso de fabricación de la celda solar se procede a obtener sus parámetros de salida, como son el voltaje de circuito abierto, corriente de corto circuito, factor de llenado así como su eficiencia; obteniéndolos de la curva característica I-V de

la celda solar, ver Fig. 2. El proceso de obtención de la curva I-V se realiza con un equipo de medición, el cual consta de una computadora, una fuente de voltaje, una tarjeta de adquisición de datos, una fuente de iluminación y un programa de computadora para calcular dichos parámetros. La celda solar CS-1 que fue fabricada en el Cinvestav se sometió al espectro solar estándar AM1.5, después se vario en dos ocasiones la potencia de la luz, la cual fue medida con un fotómetro marca Melles Griot (Electro Optics), este dispositivo mostró que las potencias incidentes fueron de: 120 mW/cm², 112 mW/cm² y 95 mW/cm². Los parámetros obtenidos, ver Tabla2, para la celda son a una potencia de incidencia de 120 mW/cm² son:

Tabla 2. Parámetros de la celda construida y la optimizada

	I _{sc} (mA)	I _L (mA)	I ₀ (nA)	I _m (mA)	V _m (mV)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω)	R _p (Ω)	FF	η(%)	P _{max} (mW)
Exp	31.06	31.09	94.8	28.002	483.25	593.25	0.358	2323.24	0.734	11.27	13.0
Teo	31.08	31.09 [*]	94.8 [*]	28.063	467.33	588.43	0.358 [*]	2325.00 [*]	0.717	10.93	13.1

En la Tabla 2, Exp significa que son los parámetros de la celda que se obtuvieron en el experimento y donde Teo se refiere a los parámetros de la celda que son obtenidos empelando el modelo de celda Ecuación (1) y el proceso de optimización descrito en la sección 5, donde como parámetros de entrada consideramos los que tienen asterisco en la Tabla 2.

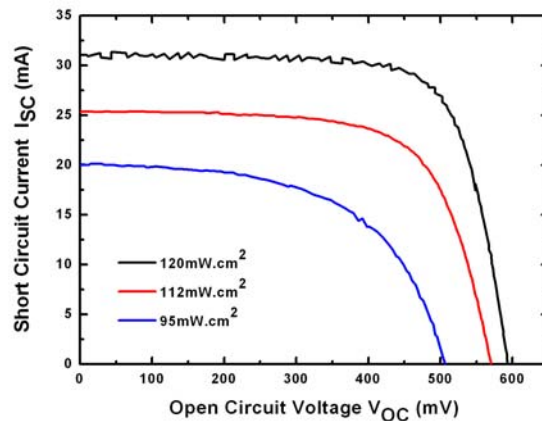


Fig.2 Curva I-V de la celda solar fabricada, para diferentes potencias de luz incidente

3. CARACTERIZACIÓN ÓPTICA

Para la caracterización óptica se utilizaron muestras de silicio de conductividad tipo p, con un espesor de 525 μm con orientación cristalográfica [100] y tipo n con una orientación cristalográfica [100], espesor de 25 μm, con una concentración de impurezas de 10²⁰ cm⁻³, las muestras tienen resistividades eléctricas de 0.01 y 0.08-0.015/cm respectivamente. Se tomaron medidas de fotoluminiscencia, pero la grafica obtenida nos dio ninguna información de las muestras, debido a que las muestras fueron altamente impurificadas, la señal obtenida fue ruido Fig. 2. Por ese motivo se opto por tomar medidas de absorción, con las cuales se encontraron los valores de las anchuras de la bandas prohibidas de las muestras, el valor de las anchuras de la bandas se redujeron a 1.060 eV para la muestra tipo p y 1.018eV para la muestra tipo n, ver Fig. 3.

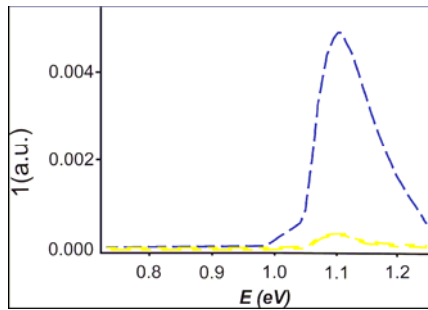


Fig. 2 Espectro de fotoluminiscencia, SC-1.

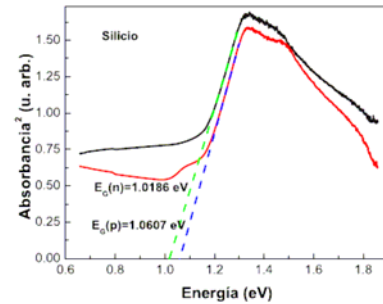


Fig. 3 Espectro de absorción, SC-1.

4. MODELO MATEMÁTICO

Una herramienta importante en el diseño y construcción de cualquier dispositivo es tener un modelo matemático del sistema, ya que, esto nos permite tener en cuenta los parámetros que determinan el funcionamiento sistema. La celda solar puede modelarse por medio del circuito equivalente mostrado en la figura 3, empleando las leyes de teoría de circuitos se obtiene el siguiente modelo matemático para la celda solar [4]:

$$I = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{A_0 k_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

Los parámetros en esta ecuación están descritos en el circuito eléctrico de la Fig.3 y se describen mas detalladamente en la referencia [4], debe notarse que aparece un parámetro de ajuste A_0 lo cual es indicativo de que este modelo aun es incompleto. En esta sección empleamos la expresión (1) para obtener la potencia máxima que adquiere la celda solar, es decir, buscamos el potencial que hace que la corriente tenga un valor máximo. Aplicando el procedimiento normal para encontrar un extremo y empleando el método de diferenciación explícita, encontramos la expresión siguiente:

$$-\frac{qI_0}{A_0 k_B T} \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{A_0 k_B T} \right] + \frac{V}{R_p} + I \left\{ 1 + \frac{R_s}{R_p} + \frac{qI_0 R_s}{A_0 k_B T} \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{A_0 k_B T} \right] \right\} = 0 \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2), se resuelven simultáneamente para encontrar I_m , V_m , con ayuda del programa Mathematica encontramos los siguientes parámetros: Para la celda fabricada en el Cinvestav, con los valores que nos fueron proporcionados e introducidos en el programa obtenemos que: $I_m = 28.04$ mA, $V_m = 482.7$ mV, comparándolos con los valores reales de $I_m = 28.002$ mA y $V_m = 483.25$ mV, podemos deducir que nuestro modelo matemático no esta tan lejos de lo real, con $A_0 = 1.85$, haciendo uso de la ecuación $\eta = (V_m I_m / P_{in}) 100 \%$, obtenemos el siguientes valor teórico de eficiencia

para la celda, $\eta = 11.33\%$, este cálculo fue realizado en condiciones de iluminación AM1.5 y los parámetros Exp de la tabla 2.

5 SIMULACION

En la sección anterior hemos empleado la expresión del modelo matemático de la celda solar para encontrar la potencia máxima y la eficiencia de la celda, pero para esto hemos empleado los parámetros experimentales que aparecen en la Tabla 2, en la primera fila. Para avanzar en el diseño de la celda solar se plantea el problema siguiente: dados algunos parámetros de la celda solar y el modelo matemático, como calculamos los restantes parámetros de la celda solar. Para resolver este problema hemos usado un método de optimización [5]. Este método sirve para ver la influencia de los parámetros en el modelo matemático y esto ayuda en el diseño de la celda solar. Primero se muestra de manera breve que en base a suponer que la celda solar es equivalente al circuito mostrado en la Figura 4, es posible obtener el modelo matemático de la celda solar expresión (1). El circuito equivalente a la celda solar en términos de cinco parámetros fijos es el siguiente,

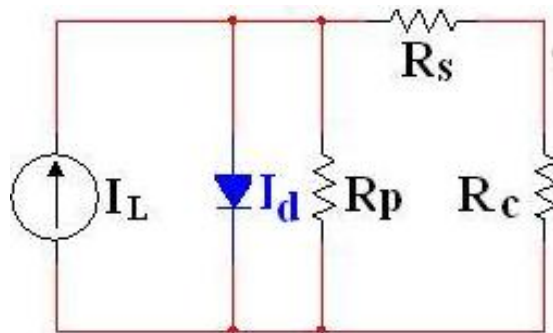


Fig.4 Circuito electrónico equivalente a la celda solar.

La aplicación de las leyes de voltajes y corrientes de Kirchhoff para el circuito (Fig. 4) son las siguientes:

$$I_{sal} = I_{sc} - I_d - I_p \quad (3)$$

donde

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V_{sal} + R_s I_{sal}}{R_p} \quad (4)$$

Mientras que, la ecuación del diodo es la siguiente:

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V_d}{A_0 V_{th}} \right] - 1 \right\} \quad (5)$$

donde $V_{th} = k_B T/q$ que es el voltaje térmico y A_0 es el coeficiente de idealidad. Sustituyendo la ecuación (4) en la ecuación (5) obtenemos:

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V_{sal} + R_s I_{sal}}{A_0 V_{th}} \right] - 1 \right\} \quad (6)$$

Ahora introducimos la expresión de I_d e I_p en la ecuación (3), nos lleva a la ecuación característica de la celda solar:

$$I_{sal} = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{(V_{sal} + R_s I_{sal})}{A_0 V_{th}} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{sal} + R_s I_{sal}}{R_p} \quad (7)$$

La ecuación (7) es una ecuación trascendental dada por la corriente de salida $I_{sal} = I$ de la celda solar como una función del voltaje de salida $V_{sal} = V$, esta ecuación (7) coincide con la expresión (1). Con ayuda del software MAPLE que viene en la referencia [5], hemos empleado como parámetros de entrada los siguientes parámetros experimentales de la celda solar CS-1: $I_L = 0.031A$, $I_0 = 9.48 \times 10^{-8}$, $R_p = 2325\Omega$ y $R_s = 0.358\Omega$, ver Tabla 2 marcados con asterisco, con estos hemos determinado los restantes parámetros de la celda solar segunda fila en la Tabla2.

6. MÉTODO ELÉCTRICO PARA OBTENER LA CURVA I-V

En esta sección mostramos un método experimental simple para construir la curva característica de la celda solar, el cual llamamos método eléctrico, que consiste en ir variado la resistencia de carga. Para el caso de una celda solar convencional de 0.7V/0.5A se evaluó su desempeño por medio de un potenciómetro que vario la resistencia de carga de 333K a 1 Ω , midiendo la corriente y el voltaje. Para verificar los resultados se utilizó un trazador de curvas; estos datos se graficaron directamente por medio de un osciloscopio. Con los datos obtenidos se obtuvo una función teórica que representa el comportamiento I-V de la celda; esto se obtuvo por medio del método de mínimos cuadrados [6], este procedimiento lo realizamos para una celda solar convencional que llamaremos CS-3, la curva de ajuste es la siguiente,

$$I = 204.86 + 0.153V - 0.0046V^2 + 4.7 \times 10^{-5}V^3 - 2.2 \times 10^{-7}V^4 + 4.78 \times 10^{-10}V^5 - 4.04 \times 10^{-13}V^6 \quad (8)$$

En la Figura 5 se muestra la comparación de los resultados experimentales y la curva de ajuste expresión (8),

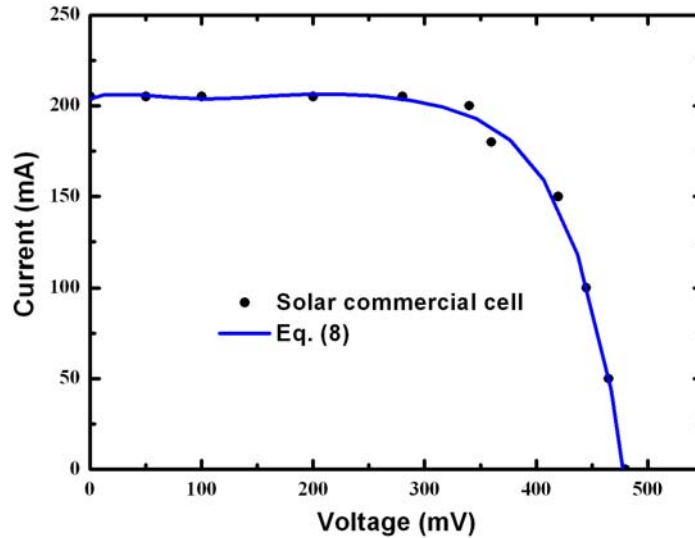


Fig. 5 Ajuste de curva y curva característica de la celda solar, CS-3.

Para obtener la curva de P-V se procesaron los datos experimentales empleando también el método de mínimos cuadrados, se utilizó el mismo método para la curva de potencia contra voltaje, la expresión correspondiente al ajuste de curva, está dada por la ecuación siguiente,

$$P = -1.45 + 0.409V - 0.0036V^2 + 1.35 \times 10^{-5}V^3 - 1.86 \times 10^{-8}V^4 \quad (9)$$

Derivando la ecuación (8) e igualándola a cero, se obtiene el valor del voltaje máximo de $V_m = 363.84mV$, con esta dato encontramos la potencia máxima cuyo valor es $P_{max} = 74.14mW$. Posteriormente se derivó la ecuación (9) para obtener la pendiente de la curva en diferentes puntos, sustituyendo el valor de V_m en esta expresión se encontró una pendiente $m = 0.268$. La resistencia de la celda se expresa como $R = 1/m$, obteniendo un valor de 3.73Ω , en la Figura 6, se muestra los resultados experimentales de la potencia en función del voltaje de salida y la curva de ajuste expresión (9).

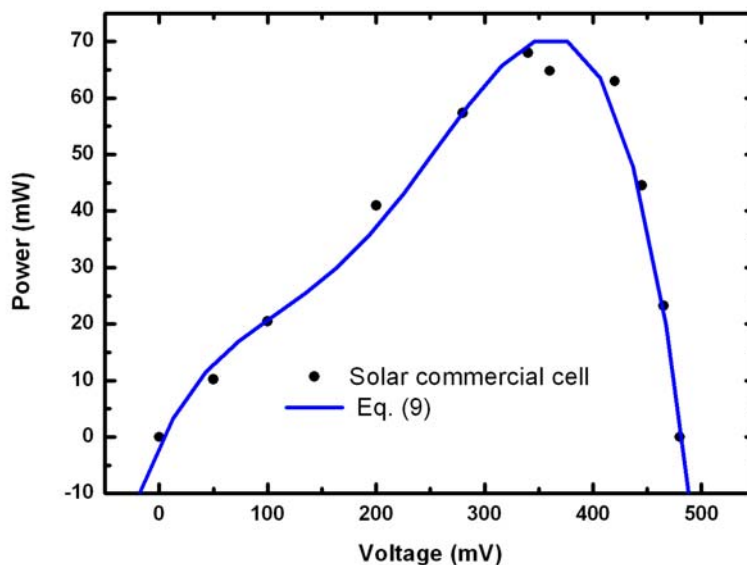


Fig. 6 Curva P-V y su ajuste de curva para la celda solar CS-3.

7. Resultados z Conclusiones

El sustrato tipo p al impurificarlo con fósforo creó un campo eléctrico de $V_{bi} = 0.931V$ y la anchura de deflexión fue de $W_D = 0.34\mu m$, esto fue resultado por la alta impurificación. Las mediciones eléctricas permitió determinar los parámetros de salida de la celda como son el voltaje de circuito abierto, corriente de corto circuito, el factor de llenado FF y su eficiencia, así como su potencia máxima de la celda y su resistencia serie, con ayuda de algunos cálculos matemáticos se pudo comparar estos datos obtenidos, los cuales no difieren mucho, por lo que podemos decir que los cálculos se aproximaron de una manera considerable.

La experiencia obtenida en la fabricación de la celda solar, permitió obtener información acerca del proceso físico; por ejemplo para la limpieza de la oblea se utilizan sustancias como acetonas y ácidos entre otras sustancias y para otros pasos se utilizan algunos elementos de la tabla periódica como son : oxígeno, fosforo entre otros, por lo cual a cada paso se le debe dar la misma importancia, ya que son fundamentales para mejorarla. Por ejemplo en la limpieza de la oblea de silicio, cuando la mezcla (acido nítrico y acido fluorhídrico) empieza a reaccionar con el oxido de silicio, este se va diluyendo, por esta razón se debe tener en cuenta el tiempo de reacción con la mezcla de las dos sustancias, por lo que al sufrir un cambio en el tiempo o en la mezcla, la reacción puede hacer un decapado más profundo y esto no sería bueno para la celda.

La difusión es un proceso complicado ya que están involucradas muchas variables, entre ellas el tiempo que es crucial para formar la anchura de la región tipo n, otro punto es el material que se utiliza como fuente de impurificación, cada material tiene diferente coeficiente de difusión, el cual suele variar la concentración de impurezas. Al tomar medidas de fotoluminiscencia se encontró que tanto el sustrato como la capa difundida

no pudieron ser caracterizadas por esta técnica debido a que al incidir el laser sobre ellas, los fotones emitidos fueron absorbidos por los defectos de la red cristalina, estos defectos se debieron a que el sustrato y la capa difundida tienen una concentración de impurezas alta, esto fue a propósito para obtener unos mejores contactos óhmicos. Se puede concluir que el procedimiento que se utilizó para fabricar la celda solar en el Cinvestav –IPN fue adecuado debido a que la eficiencia de esta celda es del 11.27 % y comparándola con la celda comercial de 4.77 %, resultó en esta ocasión mejor la tecnología empleada.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto VIEP-BUAP, 3/II/ING/09. Gracias a Gaspar Casados Cruz y Francisco Sánchez por su colaboración en las medidas de las muestras en el laboratorio de fotoluminiscencia del departamento de ingeniería eléctrica del CINVESTAV-IPN México

REFERENCIAS

- [1] D. Ginley, A. A. Green and R. Collins, Solar Energy Conversion Toward 1 Terawatt, M R S, Bulletin, Vol 33 (4), pp.355 (2008)
- [2] Revista Mexicana de Física, A. Morales Acevedo, Diseño óptimo y realización de celdas solares de silicio para producción industrial, (2004).
- [3] Ciencia y Desarrollo, Electricidad en el futuro, (CONACYT, 2008)
- [4] Martin A. Green, Solar Cell, Operating principles, technology, and system applications, (Prentice-Hall).
- [5] <http://www.maplesoft.com/applications/view.aspx?SID=33045>
- [6] Métodos Numéricos Para Ingenieros, Editorial: Mcgraw-hill (2003, 4ª edición)

