



**INDAOE**

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y  
Electrónica.**

**TESIS**

**ANALISIS DE LAS CARACTERISTICAS  
DE CELDAS SOLARES BASADAS EN  
HETEROESTRUCTURAS ITO/n-Si**

**PRESENTADA POR:**

**GUILLERMO RUIZ TABOADA**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN  
ELECTRONICA.**

**DIRIGIDA POR:**

**DR. OLEKSANDR MALIK  
DR. CARLOS ZUÑIGA ISLAS**

**©INAOE 2008**

**Derechos Reservados**

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes.



# Dedicatoria

---

*Quiero dedicar este trabajo a las personas que más amo en este mundo, por las cuales daría mi vida sin dudarlo, ellos son: mi madre, la Sra. Huga Taboada González; mi padre, el Lic. Alfonso Nahum Ruiz Cruz; mis tres hijos, Ángel Guillermo, Diego Alfonso y Hugo Daniel; y mi esposa, la Sra. Emma Carrillo Ibáñez.*

*Todos ellos son el motivo por el cual permanecí de pie en esta difícil pero muy interesante aventura.*

*También dedico este esfuerzo a mis seres queridos que ya no están físicamente a mi lado, pero que continúan impulsándome de una forma muy especial... mis abuelos.*

# Agradecimientos

---

*En primer lugar quiero agradecerle a Dios, por todo lo que en lo personal me ha permitido experimentar como ser humano: nacer, morir, volver a nacer, amar y perdonar. Le agradezco a mis padres, esposa e hijos por su apoyo, y confianza incondicionales.*

*Gracias especialmente a todos aquellos que me han enseñado algo en la vida, tanto profesores, amigos y compañeros, pues cada uno de ellos contribuyó de manera significativa en mi formación. A todos ellos, muchísimas gracias por su tiempo y paciencia.*

*Gracias a las personas que forman parte de mi nación, que luchan por apoyar a la ciencia y que la consideran la mejor herramienta para mejorar la calidad de vida de un pueblo.*

*Entre estas personas se encuentran todas las que forman parte del INAOE y del CONACYT, gracias por todo su apoyo.*

# Prefacio

---

El descubrimiento de la manera de transformar, almacenar y emplear la energía en cualquiera de sus formas en beneficio de la humanidad ha sido considerado un punto crítico en la historia del desarrollo de la ciencia y la tecnología.

El uso de combustibles como la madera y el carbón fue una de las primeras alternativas para la producción de calor y luz en sus formas más simples. Seguido del uso de combustibles fósiles como el petróleo y el gas, que surgieron como una alternativa aparentemente interminable y económica, y que a pesar de tener un impacto ambiental negativo, fueron adoptados en todas las regiones del planeta. Sin embargo, la industrialización y el incremento poblacional han ocasionado que la demanda en el uso de estos combustibles se convierta en una amenaza tal, que la calidad de vida del mismo ser humano se ha puesto en riesgo. Temas controversiales como el efecto invernadero, la destrucción de la capa de ozono, el incremento en el nivel de los océanos y el cambio climático, son algunas de las consecuencias que aunque algunos todavía se atreven a exonerar a la humanidad de su aparición, son reales y de una manera u otra estamos contribuyendo a su desarrollo.

A lo anterior se suman estudios recientes que indican que las reservas de estos combustibles son finitas, y que con un incremento en el consumo como el que ha venido dándose en los últimos años, en pocas décadas careceremos por completo de ellos.

La búsqueda de sistemas alternativos de transformación de energía no es más que un intento por aligerar y posiblemente remplazar el uso de estos combustibles como fuente de energía. Existen muchas alternativas, entre las

cuales se pueden mencionar la energía eólica, la energía nuclear, la geotérmica, la biomasa y la energía solar, entre otras.

Entre esas posibilidades, la energía solar se presenta como un fuerte candidato, pues es una energía limpia, que podría considerarse como infinita y disponible en prácticamente todo el planeta con suficiente intensidad como para cubrir las demandas energéticas de la población mundial. En este campo existen todavía algunas variantes para la conversión de la energía solar en energía útil para el desempeño de las actividades humanas, como lo son los sistemas termo solares y los fotovoltaicos. Estos últimos realizan una conversión de energía solar directamente en energía eléctrica y es a una variante particular de ellos a la que se le dedica un estudio detallado en este trabajo.

Los principales inconvenientes para la adopción de los sistemas de energía fotovoltaica como una opción viable para la generación de energía son: el costo de producción, su eficiencia, el tiempo de vida y la necesidad de almacenamiento de la energía para uso posterior.

El estudio y mejoramiento de las características que se presentan como puntos débiles de los sistemas fotovoltaicos, son las llaves que pueden abrir las puertas a estos sistemas en la industria de la transformación energética, y lograr que sean tomados en cuenta como una alternativa factible para la generación de energía para uso masivo.

# Resumen

---

En este trabajo se realiza el estudio teórico de una celda solar experimental basada en la heteroestructura ITO-Si fabricada en un substrato de silicio cristalino con resistividad de 10  $\Omega$ -cm.

Se realiza un análisis teórico de las principales características de los modelos físicos *p-n* y de *barrera Schottky*, definiendo claramente los límites de aplicación de cada uno.

Con base en esto, se encuentra que la celda experimental puede ser considerada como una unión  $p^+-n$  por inversión superficial del substrato y se desarrolla un modelo físico y matemático capaz de describir de manera precisa el comportamiento de esta estructura experimental.

Se presentan cálculos teóricos con resultados que muestran una concordancia excelente con los valores experimentales, lo cual permite visualizar una mejora en las figuras de mérito de la estructura mediante el empleo de substratos con resistividad menor a los 10  $\Omega$ -cm. Se encuentra que para el caso de substratos con resistividad menor a 1  $\Omega$ -cm, el modelo *p-n* por inversión superficial del substrato ya no será aplicable.

En un esfuerzo por obtener estructuras *p-n* similares a las logradas con las celdas ITO-Si, se fabricaron celdas solares en substratos de silicio cristalino basadas en estructuras *p-n* mediante el uso de una fuente sólida SOD (*spin on dopant* por su siglas en inglés) y un proceso térmico rápido de difusión (RTP *rapid thermal process* por sus siglas en inglés), en base al conocimiento previo de la formación de uniones poco profundas (menores a 0.4 $\mu$ m) y de baja resistividad mediante el empleo de esta técnica.

Las mejores características de las estructuras fabricadas con esta técnica presentaron valores menores a los cálculos teóricos proporcionados por el modelo *p-n*. Como trabajo futuro se propone una mejora a este proceso.

# Abstract

---

This work is focused on a theoretical study of an experimental solar cell, fabricated on a tin-doped indium oxide-silicon (ITO-Si) heterostructure. A 10  $\Omega$ -cm resistivity silicon substrate was used.

The main characteristics of the  $p$ - $n$  and *Schottky barrier* physical models were analyzed. The application limits of each model were clearly defined.

Based on the previous analysis, It was found that the experimental structure can be considered as a surface inversion  $p^+$ - $n$  junction and a theoretical model for inversion  $p$ - $n$  ITO- $n$ Si solar cells has been developed. This model is able to describe the behavior of such structure in an accurate way.

Based on a  $p^+$ - $n$  model, theoretical calculations are presented. They show an excellent agreement with the experimental results. Such agreement gave us the possibility to calculate the photovoltaic characteristics of hypothetical ITO- $n$ Si solar cells. It was found that the use of silicon substrates with resistivities lower than 10  $\Omega$ -cm improves the cell efficiency. Moreover, it is shown that using substrates with resistivities lower than 1  $\Omega$ -cm, the  $p$ - $n$  model is not applicable.

With the purpose of obtaining similar  $p$ - $n$  structures as those obtained with ITO-Si, and based on the knowledge of the shallow and low resistive junctions formed by rapid thermal processes (RTP);  $p$ - $n$  solar cells were fabricated by using this technique and a solid dopant source (spin on dopant SOD).

The best characteristics achieved by these cells were below the theoretical values predicted by  $p$ - $n$  model. A fabrication process depuration is proposed as a future work.

# Índice

DEDICATORIA .....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
PREFACIO .....	4
RESUMEN .....	6
ABSTRACT .....	7
ÍNDICE.....	8
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1 DESARROLLO DE LA CELDA SOLAR.....	10
1.2 MOTIVACIÓN.....	11
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	12
<b>2 LA RADIACIÓN SOLAR Y LA CELDA FOTOVOLTAICA .....</b>	<b>14</b>
2.1 LA FUENTE DE LA ENERGÍA SOLAR.....	14
2.2 EL ESPECTRO SOLAR.....	15
2.3 LA RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO.....	18
2.4 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LA CELDA FOTOVOLTAICA.....	19
2.5 PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y ÓPTICAS DE LOS SEMICONDUCTORES.....	20
2.5.1 RESISTIVIDAD Y DOPADO.....	20
2.5.2 INTERACCIÓN DE LA LUZ CON LOS SEMICONDUCTORES.....	22
2.5.2.1 GENERACIÓN.....	24
2.5.2.2 RECOMBINACIÓN.....	25
<b>3 DIFERENTES CELDAS SOLARES .....</b>	<b>29</b>
3.1 CELDA SOLAR BASADA EN UNIÓN P-N.....	29
3.1.1 Formación de la barrera de potencial.....	29
3.1.2 Características I-V de la unión p-n en oscuridad.....	31
3.1.2.1 Corriente de saturación o corriente de oscuridad.....	32
3.1.3 Características I-V de la unión p-n bajo iluminación.....	36
3.1.3.1 Foto-corriente $I_L$ .....	38
3.1.3.2 Voltaje de circuito abierto.....	46
3.1.3.3 Figuras de mérito.....	46
3.1.3.3.1 Factor de llenado (fill factor).....	47
3.1.3.3.2 Eficiencia.....	49
3.2 CELDA SOLAR BASADA EN CONTACTOS METAL SEMICONDUCTOR (M-S).....	49
3.3 CELDA SOLAR BASADA EN ESTRUCTURAS METAL, AISLANTE, SEMICONDUCTOR (MIS).....	54
3.4 CELDA SOLAR BASADA EN SEMICONDUCTOR, AISLANTE, SEMICONDUCTOR (SIS).....	56
<b>4 ANÁLISIS TEÓRICO DE LA CELDA SOLAR CON ESTRUCTURA ITO/SI-N.....</b>	<b>59</b>
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA ESTUDIADA.....	59
4.2 MODELO FÍSICO EMPLEADO.....	61
4.3 CÁLCULOS REALIZADOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	65
4.3.1 Cálculos empleando el modelo de unión p-n.....	66
4.3.2 Cálculos del factor de llenado (F.F.) empleando el método empírico.....	75
4.4 MEJORAS PRONOSTICADAS CON EL MODELO EMPLEADO.....	79



<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>84</b>
5.1    CONCLUSIONES GENERALES.....	84
5.2    PROYECTO A FUTURO.....	85
<b>APÉNDICE I.....</b>	<b>88</b>
<b>ECUACIONES CONTENIDAS EN LA TESIS.....</b>	<b>89</b>
<b>FIGURAS CONTENIDAS EN LA TESIS .....</b>	<b>95</b>
<b>TABLAS CONTENIDAS EN LA TESIS .....</b>	<b>97</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>98</b>

# 1 Introducción

---

## **1.1 Desarrollo de la celda solar.**

Las celdas solares son dispositivos que operan mediante la conversión directa de energía solar en energía eléctrica. En este trabajo se estudian las celdas solares de estado sólido fabricadas explotando las propiedades electrónicas de los substratos de silicio cristalino.

Las celdas solares basan su operación en el efecto fotovoltaico. Este efecto fue reportado inicialmente por Becquerel en 1839, quien observó un voltaje dependiente de la iluminación entre dos electrodos inmersos en un electrolito.

La celda solar en silicio, precursora de las celdas actuales fue reportada en 1954. Este dispositivo representó un desarrollo importante porque fue la primera estructura fotovoltaica que convirtió luz en electricidad con una eficiencia razonable. Estas celdas fueron después empleadas principalmente como fuente de energía en satélites y naves espaciales. En los años 70's ocurrió un incremento notable en el interés por estos dispositivos para usos terrestres. Desafortunadamente, enfrentaron una dura competencia con otras fuentes de energía como los combustibles fósiles.

En la actualidad, al igual que a lo largo de la historia del hombre, un ciclo más en el desarrollo de la misma está por cumplirse, en este caso nos referimos a la fuente de energía que hace posible el avance y sustento de

nuestras vidas productivas, pues los combustibles fósiles se encarecen y escasean día a día.

Adicionalmente, los problemas ambientales obligan tanto a gobiernos como a científicos, a buscar alternativas energéticas no sólo eficientes, sino también amigables con el medio ambiente. Estas son algunas de las principales razones del resurgimiento del interés en la energía fotovoltaica para usos terrestres en los últimos años. En este ámbito se vislumbran tres principales temas de estudio y optimización de las celdas solares: costos de producción, eficiencia de conversión y tiempo de vida útil.

## **1.2 Motivación.**

Los procesos convencionales para la fabricación de estructuras fotovoltaicas basadas en sustratos de silicio cristalino involucran, por lo general, el uso de temperaturas muy elevadas para la formación de las uniones metalúrgicas de los materiales. Los esquemas de fabricación requieren de un considerable número de procesos; algunos de ellos son los procesos de fotolitografía para la definición de contactos, además de oxidaciones y difusiones con tiempos prolongados y que para fabricar industrialmente, se requieren fuertes inversiones y grandes instalaciones. Todo lo anterior adiciona costos y tiempo al proceso de fabricación de un sistema fotovoltaico.

La adopción masiva de sistemas fotovoltaicos como fuente de energía es altamente dependiente de su costo. En este afán, muchos intentos por simplificar la estructura y equipo empleado para su fabricación han sido propuestos [1-3], la mayoría de ellos enfocados a modificar los materiales con los cuales se fabrica el dispositivo.

Este trabajo se enfoca principalmente al análisis de procesos simples para la fabricación de estructuras fotovoltaicas magnificando su eficiencia de conversión, ya que la reducción en el costo de un sistema de este tipo, será en gran parte, consecuencia de la simplificación del proceso de fabricación del dispositivo. Este objetivo se intenta conseguir mediante el empleo de técnicas simples y baratas, como el rocío pirolítico, o mediante la reducción del presupuesto energético para la formación de una celda de unión  $p-n$  superficial con el uso de hornos de procesos térmicos rápidos (RTP).

### **1.3 Organización de la tesis.**

De manera sintetizada se presenta el contenido de cada capítulo en este trabajo:

Capítulo 1.- Se introduce el tema de la transformación de energía, así como las razones y necesidad de fuentes alternativas. Se tratan las tendencias que guían las investigaciones para lograr la pronta adopción de nuevos sistemas.

Capítulo 2.- Características del espectro solar. Principios de operación de los dispositivos fotovoltaicos. Propiedades de los materiales que forman a la celda y que determinan la eficiencia con la cual el proceso fotovoltaico puede llevarse a cabo.

Capítulo 3.- Se exponen las principales figuras de mérito de un dispositivo fotovoltaico y se presentan las características principales de diferentes estructuras que pueden llegar a formar a estos dispositivos. Entre estas estructuras se incluyen uniones de Silicio tipo p con Silicio tipo n, metal-semiconductor, metal-aislante-semiconductor y semiconductor-aislante-semiconductor.

Capítulo 4.- Se realiza una descripción detallada del análisis teórico realizado sobre la heteroestructura ITO-Si. Se justifica el empleo del modelo de unión  $p-n$  para el análisis, se presentan los resultados obtenidos, límites de aplicación del modelo y las predicciones para diferentes características de sustrato.

Capítulo 5.- Se plantean las conclusiones del trabajo realizado. Se presenta el análisis de las curvas I-V de las celdas solares fabricadas mediante un proceso de difusión RTP con el empleo de una fuente dopante SOD. Finalmente se propone el proyecto a futuro.

# 2 La radiación solar y la celda fotovoltaica

---

## 2.1 *La fuente de la energía solar.*

El Sol es esencialmente una esfera de gas calentada por fusiones nucleares que se generan en su centro.

Los cuerpos calientes como el Sol, emiten radiación electromagnética con una longitud de onda o distribución espectral determinada por la temperatura del cuerpo.

La ley de radiación de Planck determina la distribución espectral de la radiación emitida por un cuerpo completamente absorbente o cuerpo negro [4]. Esta ley indica que cuando se incrementa la temperatura del cuerpo, el pico de la radiación emitida se incrementa y la longitud de onda de este valor pico disminuye. Un ejemplo de este fenómeno son los metales, que cuando se calientan emiten en color rojo y después en amarillo conforme se incrementa su temperatura.

La temperatura que alcanza el centro del Sol se estimada en 20,000,000 K. Sin embargo, esta no es la temperatura que determina la característica de la radiación electromagnética emitida por el Sol.

La mayoría de la radiación intensa proveniente del interior profundo, es absorbida por una capa de iones negativos de hidrógeno cerca de la superficie solar. Estos iones actúan como absorbentes continuos sobre un amplio rango de longitudes de onda. La acumulación de calor en esta capa

establece una corriente que conduce el calor y transporta el exceso de energía a través de la barrera óptica (Figura 2-1).

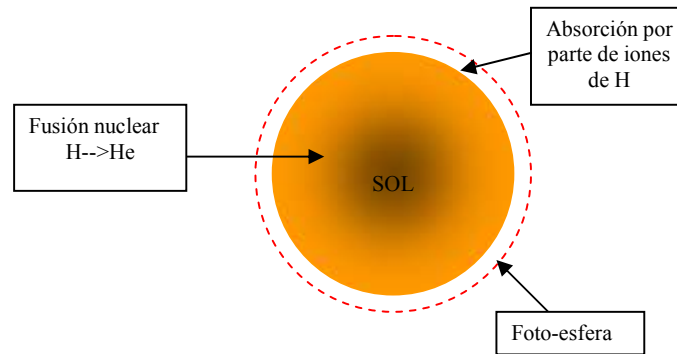


Figura 2-1. Características de la esfera solar.

Una vez en esta capa, la energía es radiada nuevamente, siendo ésta la característica de una temperatura menor, aproximadamente de 6000K. La foto-esfera emite prácticamente la radiación correspondiente a un cuerpo negro a dicha temperatura.

## 2.2 *El espectro solar.*

La aplicación práctica de la energía solar involucra necesariamente el conocimiento del tipo y magnitud de radiación con la que se está tratando. Para ello es necesario conocer los acuerdos y estándares con los que se cuenta en la actualidad, ya que la radiación solar es diferente en cada zona del planeta. En este sentido, la radiación solar que incide sobre la tierra ha sido clasificada dependiendo de la trayectoria o distancia que la luz recorre antes de hacer contacto con la superficie terrestre. Con la finalidad de contar con un punto de referencia, entre otras aplicaciones, se ha estudiado la radiación solar existente fuera de la atmósfera y se ha considerado un promedio de distancia de acuerdo a las diferentes posiciones que el planeta

pueda tener respecto al Sol en su movimiento de traslación, llegando a establecerse una constante estándar conocida como constante solar o radiación con masa óptica de aire cero AM0 (por sus siglas en inglés), siendo ésta de  $1360\text{W/m}^2$  [5].

El espectro AM0 es el más relevante para las aplicaciones en satélites y vehículos espaciales.

La radiación solar es atenuada debido a diferentes factores al estar en contacto con la atmósfera [6], entre estos mecanismos se encuentran la dispersión por colisiones con diferentes moléculas en la atmósfera, (dispersión Rayleigh), la dispersión debida a polvos y la atenuación debida a la absorción por gases como el ozono, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua, etc.

La nomenclatura empleada para clasificar el tipo de radiación, toma en cuenta la razón de la distancia que recorre la energía al atravesar la atmósfera y el ángulo de incidencia. Se define como masa óptica de aire 1 (AM1), a la masa de aire que tiene que atravesar la radiación solar cuando el Sol se encuentra justo encima del objetivo, como lo muestra la figura 2-2.

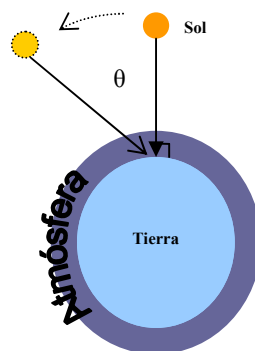


Figura 2-2.- Posición del Sol respecto al objetivo en la Tierra para la cual se considera la masa óptica de aire uno AM1.

El espectro AM1 representa la luz solar en la superficie de la tierra cuando el Sol está en su apogeo (cenit); la potencia incidente es de aproximadamente



925W/m<sup>2</sup>. El espectro AM1.5 con una potencia de aproximadamente 844W/m<sup>2</sup> se emplea como un estándar para la medición de efectividad o eficiencia dentro del ámbito de fabricación de celdas solares para aplicaciones terrestres. El espectro AM2 corresponde a  $\theta=60^\circ$  y tiene una potencia incidente de cerca de 691 W/m<sup>2</sup>.

Cuando la posición del Sol se encuentra a cualquier ángulo  $\theta$  respecto a la vertical mostrada en la figura 2-2, la masa óptica de aire puede calcularse mediante [7]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.1)$$

Existe una posibilidad práctica de conocer la masa óptica de aire [7] mediante la relación que guardan la longitud de la sombra proyectada  $s$  en la horizontal y la altura del objeto que la proyecta dada por  $h$ . Esta relación se expresa como:

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \quad (2.2)$$

En la figura 2-3 se muestra el espectro solar para las diferentes masas ópticas de aire AM0 y AM1.5

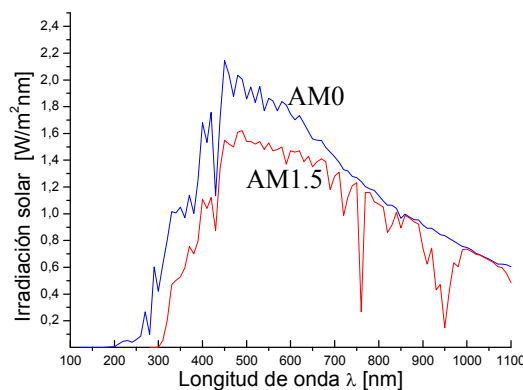


Figura 2-3. Espectro solar para AM0 y AM1.5

### 2.3 La radiación del cuerpo negro.

Un dato importante que ha sido determinado por los científicos, es que el espectro irradiado por el Sol, es comparable con aquél que genera un cuerpo negro a una temperatura de 6000K. Realizando un ajuste al espectro del cuerpo negro, éste puede acercarse lo suficiente al estándar AM1.5.

La intensidad (energía por unidad de área y unidad de tiempo) por unidad de longitud de onda para la longitud de onda  $\lambda$ , de un cuerpo negro a la temperatura absoluta  $T$ , viene dada por la expresión [4]:

$$\frac{dW_\lambda}{d\lambda} = \frac{c}{4} \frac{dE_\lambda}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (2.3)$$

Las unidades que se obtienen son  $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]\cdot\text{m}^{-1}$ .

En la figura 2-4 se ilustra la comparación de la aproximación de la irradiación del cuerpo negro empleando la ecuación (2.3) con la irradiación del Sol para el estándar AM1.5.

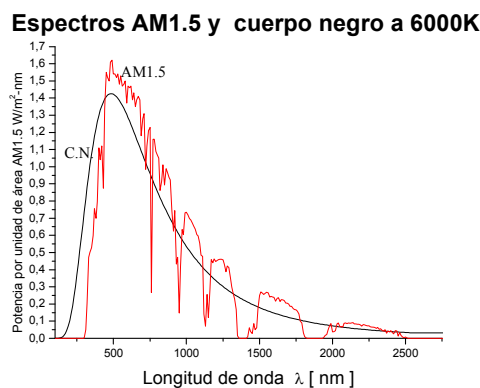


Figura 2-4. Comparación de los espectros AM1.5 y de un cuerpo negro a 6000K.

El factor de ajuste de la magnitud de la irradiación del cuerpo negro empleado es  $\left(\frac{1 \times 10^{-13}}{7}\right)$ , con el cual se obtiene una potencia de  $790 \text{ W/m}^2$  en el rango de  $280 \text{ nm}$  a  $1100 \text{ nm}$ , mientras que para el espectro solar se tiene  $795 \text{ W/m}^2$ .

## **2.4 Principios de operación de la celda fotovoltaica.**

En las celdas fotovoltaicas la radiación es convertida directamente en energía eléctrica. Éstas son las de principal interés en esta investigación, y serán referidas en lo sucesivo como celdas fotovoltaicas o celdas solares de manera indistinta.

Una celda fotovoltaica es un dispositivo que puede ser fabricado con diversos materiales, entre ellos se encuentran los materiales semiconductores.

El funcionamiento de una celda solar se centra en el efecto fotovoltaico, mediante el cual se excitan portadores de carga (electrones y huecos) por absorción de radiación. El aprovechamiento de estos portadores es altamente dependiente de la existencia de un campo eléctrico en las proximidades de la zona en donde los portadores son generados. Suponiendo que su generación se lleve a cabo lo suficientemente cerca del campo eléctrico, éste ejercerá una fuerza sobre estos portadores, haciendo que se trasladen en direcciones opuestas, reduciendo la probabilidad de recombinación, y logrando que contribuyan a la foto-corriente de la celda.

Por el contrario, si los portadores foto-generados no son arrastrados por el campo eléctrico, su movimiento caótico los conducirá a recombinarse tras haber transcurrido un determinado tiempo.

Para comprender la formación del campo eléctrico mencionado, se requiere un estudio de las propiedades de los materiales que forman la estructura de la celda. Estos conceptos se revisan en la siguiente sección.

## **2.5 Propiedades eléctricas y ópticas de los semiconductores.**

Para entender mejor el funcionamiento de la celda solar, es necesario primero conocer las principales propiedades eléctricas y ópticas de los semiconductores y cómo éstas influyen en el funcionamiento del dispositivo.

### **2.5.1 Resistividad y dopado.**

La resistividad eléctrica de un material está definida como la oposición que ofrece el material al flujo de corriente eléctrica y está dada por la expresión:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\mu n} \quad (2.4)$$

En donde  $\sigma$  es la conductividad,  $q$  la carga del electrón,  $n$  la densidad de portadores de carga y  $\mu$  la movilidad.

Hablando específicamente del silicio, en la estructura atómica de un semiconductor como éste, los enlaces interatómicos son creados por los electrones encontrados en los últimos niveles energéticos y se conocen como electrones de valencia. Los semiconductores son materiales caracterizados por tener una resistividad sumamente sensible a la presencia de impurezas, este hecho es una de las principales razones por las cuales

los semiconductores ocupan un lugar tan importante en la industria electrónica moderna. El proceso de agregar impurezas deliberadamente a un semiconductor para cambiar sus propiedades eléctricas se conoce como dopado.

En el silicio, por ejemplo, al doparlo con fósforo, un elemento que cuenta con cinco electrones de valencia, se forman los respectivos enlaces covalentes entre el fósforo sustitucional y cuatro átomos de silicio; dado que esta impureza cuenta con un electrón más en su última capa, éste quedará débilmente enlazado, y a temperatura ambiente se encontrará en la banda de conducción, es decir, podrá participar en el transporte de carga. En un diagrama de bandas esto se puede visualizar como la introducción de un estado energético dentro de la banda prohibida, y cerca de la banda de conducción, de esta manera se crean los semiconductores conocidos como tipo N (en los cuales el transporte de carga se realiza por medio de electrones). A las impurezas de este tipo se les conoce como impurezas donadoras.

Otro tipo de conductividad puede lograrse al dopar el silicio con boro, el cual tiene sólo tres electrones de valencia, con lo que al integrarse en la estructura de la red del silicio, un enlace quedará con la ausencia de un electrón para completarlo, dando origen a lo que se conoce como hueco; los semiconductores dopados de esta forma se conocen como de tipo P. En un diagrama de bandas de energía se puede visualizar como la introducción de un estado discreto de energía dentro de la banda prohibida cerca de la banda de valencia. A las impurezas de este tipo se les conoce como impurezas aceptoras.

## 2.5.2 Interacción de la luz con los semiconductores.

Cuando una radiación electromagnética incide sobre un sólido, puede ser reflejada, absorbida o incluso atravesar al sólido.

Si la radiación es reflejada antes de generar un par electrón-hueco o, si el material es transparente a la radiación, el desempeño del dispositivo fotovoltaico será muy pobre. En dispositivos fotovoltaicos se requiere reducir al mínimo la cantidad de radiación reflejada.

Cuando la luz es reflejada, la relación  $R = \frac{I_R}{I_0}$  indica el porcentaje de

intensidad de la luz incidente que es reflejada, mientras que  $A = \frac{I_A}{I_0}$  denota

el porcentaje de intensidad de luz absorbida. Finalmente se tiene la relación

$T = \frac{I_T}{I_0}$  para conocer el porcentaje de intensidad de luz incidente que no es

absorbida ni reflejada. La conservación de la energía nos indica que  $I_0 = I_T + I_R + I_A$  con lo que se tiene que  $1 = T + A + R$  [9].

Con el fin de describir la respuesta de los materiales ante su exposición a diferentes radiaciones electromagnéticas, se emplean los valores del índice de refracción complejo, el coeficiente de absorción, la transmitancia y la reflectancia entre otras. El índice de refracción complejo es [10]:

$$n^* = n + ik \quad (2.5)$$

$$n^* = \sqrt{\varepsilon^* \mu} = \sqrt{\varepsilon^*} \quad (2.6)$$

$$n + ik = \sqrt{\varepsilon_1 + i\varepsilon_2} \quad (2.7)$$

En donde  $\mu$  es la permeabilidad magnética y por lo general es igual a la unidad para las frecuencias ópticas, mientras que  $\varepsilon^*$  es la permitividad compleja.

La intensidad de una onda electromagnética  $I_0$  se atenúa conforme se propagada en un medio de acuerdo a la profundidad de penetración conforme a la ecuación siguiente [10]:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (2.8)$$

Siendo

$$\alpha(\lambda) = \frac{2\omega k}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.9)$$

En la ecuación anterior  $\lambda$  es la longitud de onda y  $\alpha$  es el coeficiente de absorción. El coeficiente de absorción de un material es un valor que permite conocer a qué distancia de la superficie, una radiación electromagnética incidente será absorbida en su totalidad. Como lo expresan las ecuaciones anteriores, el coeficiente de absorción será dependiente de la longitud de onda o frecuencia de la onda incidente en el material.

La forma gráfica del coeficiente de extinción y del índice de refracción del Silicio [11] se muestran en la figura 2-5:

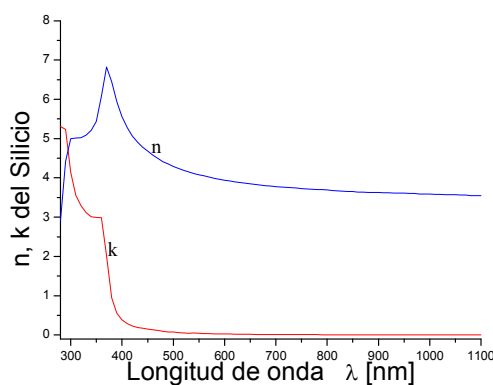


Figura 2-5. Índice de refracción y coeficiente de extinción del Silicio.

La dependencia del coeficiente de absorción del Silicio con respecto a la longitud de onda se observa claramente en la figura 2-6:

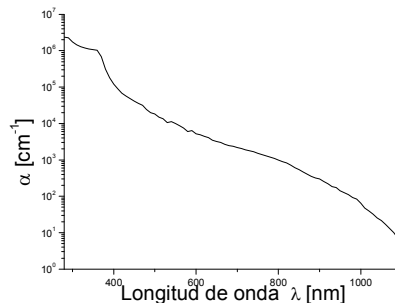


Figura 2-6. Coeficiente de absorción del silicio

La reflectancia (R) y la transmitancia (T) pueden ser calculadas mediante las ecuaciones de Fresnel [9]:

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2.10)$$

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{(1-R)^2 e^{-2\alpha d}} \quad (2.11)$$

En donde  $d$  representa el grosor del sólido en donde incide la radiación.

### 2.5.2.1 Generación.

Los materiales semiconductores tienen la característica de contar con un ancho de banda prohibido con valores tales que existen posibilidades para que, con la energía absorbida proveniente de una onda electromagnética (espectro de radiación solar), un electrón adquiera la energía suficiente como para romper un enlace covalente, originando un par electrón-hueco, con



capacidad para transportar carga. Esta generación de portadores de carga también puede llevarse a cabo por efecto de la temperatura.

### **2.5.2.2 Recombinación.**

La absorción de energía luminosa por el material puede producir una cierta cantidad de pares electrón-hueco, pero la formación de estos pares no es suficiente para contar con una celda fotovoltaica eficiente, pues los portadores de carga al tener un movimiento aleatorio (además de que también son creados por vibraciones térmicas), también tienen una alta probabilidad de encontrarse con su contraparte, dando lugar a la aniquilación del par, proceso que se conoce como recombinación. La energía perdida por el par durante un proceso de recombinación puede ser cedida a la red en forma de calor o mediante la emisión de un fotón. Cuando la energía es cedida a la red en forma de calor se le conoce como recombinación indirecta. Cuando durante la recombinación, la energía adicional es liberada mediante la emisión de un fotón se le llama recombinación directa. Otro tipo de recombinación ocurre cuando la energía adicional es cedida a una tercera partícula (un electrón en la banda de conducción ó un hueco en la banda de valencia), y es conocida como recombinación Auger. Finalmente, es pertinente mencionar la existencia de la recombinación en las regiones superficiales del material, en donde debido a la natural terminación del material, los enlaces de los átomos superficiales quedan incompletos, con lo cual se incrementa la probabilidad de recombinación indirecta a través de estados de energía cercanos a la mitad de la banda prohibida.

Para obtener un buen funcionamiento de la celda fotovoltaica es importante que se maximice la colección de los portadores de carga creados por la

absorción de la radiación antes de que ocurra cualquiera de los procesos de recombinación mencionados.

Una característica asociada a los portadores de carga y su capacidad de movimiento por medio de la difusión es conocida como longitud de difusión. La longitud de difusión está determinada principalmente por el tipo de semiconductor, la densidad de defectos y la densidad de dopantes, y se define como la distancia promedio que puede viajar un portador de carga en exceso antes de recombinarse.

La longitud de difusión se define en función de un coeficiente de difusión, y un tiempo de vida de recombinación:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (2.12)$$

En donde el subíndice  $p$  hace referencia a los huecos, mientras que  $n$  será empleado para los electrones.

$D_p$  es el coeficiente de difusión y se relaciona con la movilidad  $\mu_p$  mediante:

$$D_p = \left( \frac{kT}{q} \right) \mu_p \quad (2.13)$$

Conocida como la relación de Einstein, siendo  $k$  la constante de Boltzmann,  $T$  la temperatura y  $q$  la carga del electrón.

Mediante el uso de las siguientes expresiones empíricas puede calcularse la movilidad en relación con el nivel de dopantes en Silicio [8]:

$$\mu_e = 65 + \frac{1265}{1 + \left( \frac{N}{8.5 \times 10^{16}} \right)^{0.72}} \text{ cm}^2 / \text{V} - \text{s} \quad (2.14)$$

$$\mu_h = 47.7 + \frac{447.3}{1 + \left( \frac{N}{6.3 \times 10^{16}} \right)^{0.76}} \text{ cm}^2 / \text{V} - \text{s} \quad (2.15)$$

Las ecuaciones anteriores son útiles, pues mediante ellas y el uso de la relación de Einstein es posible calcular también el valor del coeficiente de difusión para diferentes concentraciones de impurezas. Observándose de acuerdo con las ecuaciones (2.14 y 2.15), que la movilidad y la longitud de difusión disminuyen cuando la concentración de impurezas aumenta. En dispositivos fotovoltaicos se requiere contar con baja resistividad para minimizar pérdidas. Por otra parte, se prefieren grandes valores de longitud de difusión para maximizar la colección de portadores foto-generados. Es evidente que existe un compromiso entre ambas características del material, pues al reducir la resistividad, debe aumentarse el dopado, con lo que la longitud de difusión disminuye.

La formación de una unión metalúrgica entre un semiconductor tipo N y uno tipo P se conoce como unión *p-n*. Al momento de colocar en contacto íntimo estos materiales se produce un movimiento de portadores de carga de un lado al otro debido a un proceso natural conocido como difusión, en donde las partículas se mueven de lugares de alta concentración hacia lugares de baja concentración. Es decir, los electrones provenientes del lado N se moverán al lado P, dejando iones cargados positivamente (donadores ionizados) en el lado N. En el lado P, ocurre algo similar, los huecos que pasan al lado N dejan iones cargados negativamente (aceptores ionizados); de esta manera se forma un campo eléctrico que impide que se continúen moviendo cargas de un lado a otro de la unión indefinidamente. Este campo eléctrico es aprovechado en una celda fotovoltaica para facilitar la separación de los portadores de carga generados, evitando su recombinación, e incrementando su colección.

Es importante entender que los procesos de recombinación siempre estarán en competencia con la colección de portadores generados por el efecto fotovoltaico, por lo que *no todos los portadores de carga generados serán colectados*; sólo aquellos que sean generados dentro de la región de

empobrecimiento de la unión, y afuera de ella a una distancia menor o igual a la longitud de difusión. Al generarse pares electrón-hueco en un semiconductor tipo N, los electrones generados no representan un gran incremento en la población de electrones que es de antemano muy elevada (condición conocida como de baja inyección), pero los huecos generados si representan una cantidad considerable en el número de portadores minoritarios. De igual forma sucede en un semiconductor tipo P. Entonces, la cantidad de portadores minoritarios generados y colectados determinará la cantidad la corriente que una celda fotovoltaica será capaz de suministrar a una carga externa.

Una vez conocidas las principales propiedades eléctricas y ópticas de los semiconductores, en el siguiente capítulo se analizan las diferentes estructuras básicas empleadas para la obtención de dispositivos fotovoltaicos.

## **3. Diferentes celdas solares**

### ***3.1 Celda solar basada en unión p-n.***

Como punto de partida en el estudio de las celdas solares se analizan primeramente las celdas basadas en uniones  $p-n$ ; éstas servirán como referencia para poder abordar posteriormente otro tipo de estructuras y efectuar una comparación entre ellas.

Conociendo las propiedades de los semiconductores y su capacidad para modificar su conductividad en base al tipo de impureza introducida en su estructura, es de suma importancia el estudio y análisis de la unión entre un semiconductor tipo P y uno tipo N, (conocida también como unión  $p-n$ ).

Esta estructura es el fundamento de la electrónica de estado sólido, así como el bloque básico de una celda solar.

#### ***3.1.1 Formación de la barrera de potencial.***

El resultado más importante, consecuencia de la formación de una unión  $p-n$  es el establecimiento de una barrera de potencial denotada como  $\varphi_{pn}$ .

Esta barrera de potencial es formada justamente en la zona en que los dos tipos de semiconductores entran en contacto.

La figura 3-1 muestra el diagrama de bandas de energía de la unión *p-n*.

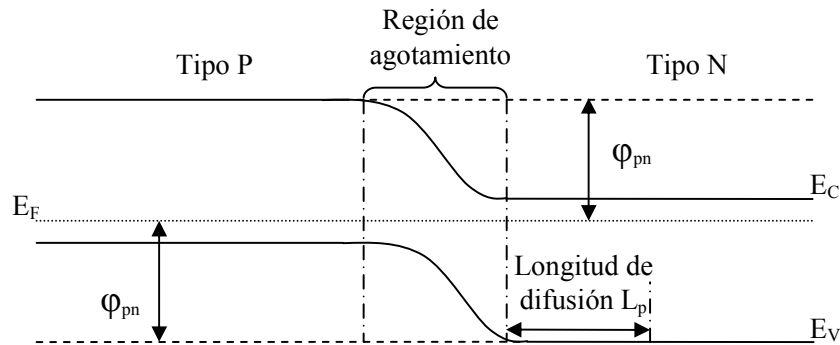


Figura 3-1. Diagrama de bandas de una unión *p-n*.

La formación de la barrera de potencial se debe a la difusión de portadores mayoritarios, huecos del lado P hacia el lado N y electrones del lado N hacia el lado P. Este movimiento de cargas causa que se formen dos capas de cargas opuestas en la unión, con lo cual un campo eléctrico será establecido. Una vez alcanzada esta condición, el movimiento de portadores mayoritarios de un lado a otro de la unión se detiene, y la difusión de portadores mayoritarios ahora tendrá que superar la barrera de potencial formada por este campo para que los portadores alcancen el otro lado de la unión. Dentro de esta región será muy difícil encontrar portadores libres y se considera un agotamiento total de los mismos, por ello es que también se le conoce como región de agotamiento o de carga espacial. Los portadores minoritarios en cada tipo de semiconductor (huecos en el tipo N y electrones en el tipo P), tienden a recombinarse con facilidad al estar inmersos en un mar de portadores mayoritarios opuestos. Aún así logran permanecer libres en el semiconductor y, de manera aleatoria, pueden moverse una distancia conocida como longitud de difusión ( $L_p$  para huecos en el lado N y  $L_n$  para electrones del lado P) antes de recombinarse. Cuando estos portadores minoritarios se encuentren a una distancia igual o menor a la longitud de difusión con respecto al borde de la región de agotamiento, sufrirán el efecto

del campo eléctrico existente, siendo atraídos hacia el lado opuesto de la unión. Este movimiento de carga da origen a la corriente de saturación  $I_s$ , y debido a la cantidad tan pequeña de portadores minoritarios cercanos a la unión, la corriente producida será igualmente muy pequeña, pero de considerable importancia para determinar las características y el desempeño de la unión  $p-n$  y por consiguiente de una celda solar. Al mismo tiempo, existen portadores mayoritarios en ambos lados de la unión con la suficiente energía como para superar la barrera de potencial. Este número de portadores mayoritarios cruzando la barrera iguala al número de portadores minoritarios que son alcanzados por la fuerza del campo eléctrico existente en la unión, con lo que se establece un equilibrio.

### **3.1.2 Características I-V de la unión p-n en oscuridad.**

Cuando se emplea la expresión de la corriente bajo condiciones de oscuridad, la generación de portadores de carga debida a la absorción de energía lumínica es nula.

Sin la existencia de una foto-corriente, el dispositivo se comportará como un simple diodo rectificador, sin tomar en cuenta los efectos resistivos del sustrato, sus características de manera ideal están dadas por:

$$I = I_s(e^{qV/kT} - 1) \quad (3.1)$$

En donde  $I_s$  representa la corriente de saturación o corriente de oscuridad,  $k$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura.

Tomando en consideración la resistencia del sustrato y de los contactos, es necesario incluir un término en la ecuación anterior que permita tomar en

cuenta estos efectos en el dispositivo; para ello se introduce la caída de potencial  $IR_s$ , resultando la ecuación (3.2):

$$I = I_s \left\{ e^{q/kT(V-IR_s)} - 1 \right\} \quad (3.2)$$

Finalmente, considerando que existen corrientes de fuga debidas a recombinación en defectos de la estructura y recombinación en la superficie, la ecuación característica debe incluir un término adicional en donde una corriente de fuga circula por una resistencia  $R_{SH}$ , siendo la corriente circulante en esa resistencia  $V/R_{SH}$ , quedando:

$$I = I_s \left\{ e^{q/kT(V-IR_s)} - 1 \right\} + \frac{V}{R_{SH}} \quad (3.3)$$

### 3.1.2.1 Corriente de saturación o corriente de oscuridad.

La Fig. 3-2 presenta un esquema mostrando los límites geométricos de una unión  $p-n$  relevantes para la siguiente discusión.

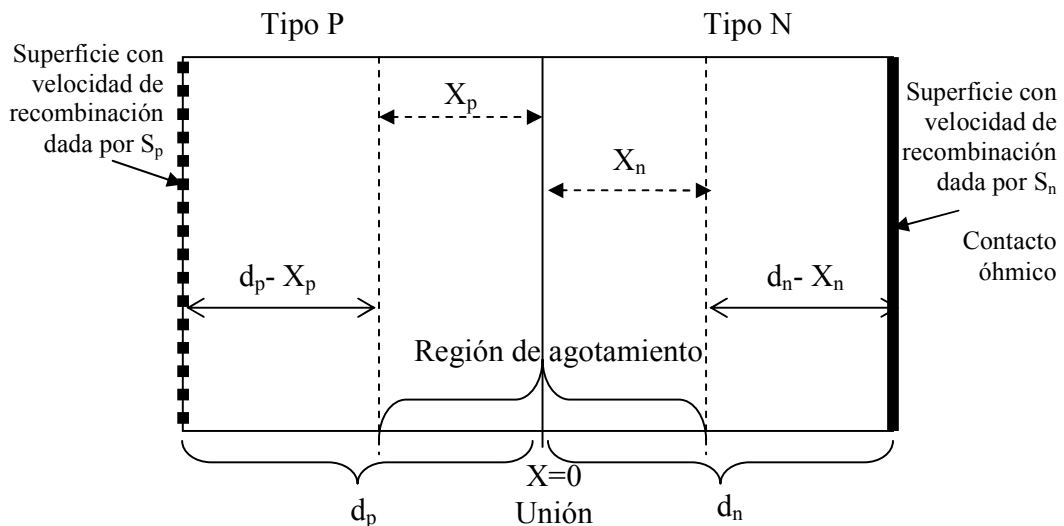


Figura 3-2 Geometría de una celda solar de unión P-N



Para comprender el movimiento de cargas que puede ocurrir en una unión  $p-n$ , es necesario plantear la ecuación de continuidad unidimensional [12]:

$$D_p \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} - \mu_p E \frac{\partial(\delta p)}{\partial x} + g' - \frac{\partial(\delta p)}{\tau_{p0}} = \frac{\partial(\delta p)}{\partial t} \quad (3.4)$$

En donde  $D_p$  es el coeficiente de difusión de huecos minoritarios y guarda la relación  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ , con la longitud de difusión y el tiempo de recombinación  $\tau_p$ .

Utilizando las ecuaciones para la densidad de corriente:

$$J_n = q\mu_n n_p E + qD_n \frac{dn_p}{dx} \quad (3.5)$$

$$J_p = q\mu_p p_n E - qD_p \frac{dp_n}{dx} \quad (3.6)$$

Suponiendo que la unión se encuentra en estado estacionario, es decir  $\frac{\partial(\delta p)}{\partial t} = 0$ , además de aproximar la inexistencia de campos eléctricos fuera de la región de agotamiento, ( $E = 0$ ), y con generación nula en la región de agotamiento ( $g' = 0$ ), la ecuación de continuidad unidimensional se reduce a:

$$D_p \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} - \frac{\partial(\delta p)}{\tau_{p0}} = 0 \quad \text{ó} \quad \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} - \frac{\partial(\delta p)}{L_p^2} = 0 \quad (3.7)$$

Las soluciones generales de esta ecuación pueden escribirse como [13]:

$$n_p - n_{p0} = A \cosh(x + X_p / L_n) + B \sinh(x + X_p / L_n) \quad (\text{lado P}) \quad (3.8)$$

$$p_n - p_{n0} = C \cosh(x - X_n / L_p) + D \sinh(x - X_n / L_p) \quad (\text{lado N}) \quad (3.9)$$

Empleando las condiciones de frontera  $p_n - p_{no} \approx 0$  para  $x = X_p$  mientras que  $n_p - n_{po} \approx 0$  para  $x = X_n$ , además de las condiciones de frontera en la superficie:

Para  $x = -d_p$ :

$$D_n \left( \frac{\partial n_p}{\partial x} \right) = S_p (n_p(-d_p) - n_{p0}) \quad (3.10)$$

Mientras que para  $x = d_n$

$$-D_p \left( \frac{\partial p_n}{\partial x} \right) = S_n (p_n(d_n) - p_{n0}) \quad (3.11)$$

Resolviendo las ecuaciones de continuidad con las condiciones de frontera establecidas se pueden obtener las ecuaciones para la corriente total que fluye por la unión, dando como resultado para el lado P:

$$n_p - n_{po} = n_{po} (e^{qV/kT} - 1) \left[ \cosh(x + X_p / L_n) + \zeta_p \sinh(x + X_p / L_n) \right] \quad (3.12)$$

Y para el lado N:

$$p_n - p_{no} = p_{no} (e^{qV/kT} - 1) \left[ \cosh(x - X_n / L_p) - \zeta_n \sinh(x - X_n / L_p) \right] \quad (3.13)$$

Siendo:

$$\zeta_n = \frac{S_n \cosh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) + \frac{D_p}{L_p} \sinh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right)}{\frac{D_p}{L_p} \cosh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) + S_n \sinh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right)} \quad (3.14)$$

$$\zeta_p = \frac{S_p \cosh\left(\frac{d_p - X_p}{L_n}\right) + \frac{D_n}{L_n} \sinh\left(\frac{d_p - X_p}{L_n}\right)}{\frac{D_n}{L_n} \cosh\left(\frac{d_p - X_p}{L_n}\right) + S_p \sinh\left(\frac{d_p - X_p}{L_n}\right)} \quad (3.15)$$

Recordando que la ecuación de la corriente [13] es  $I = I_s (e^{qV/kT} - 1)$ , donde:

$$I_s = q \left( \frac{n_{p0} D_n}{L_n} \zeta_p + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \zeta_n \right) \quad (3.16)$$

En el caso en el que el argumento de las funciones hiperbólicas del factor  $\zeta_p$

$\left(\frac{d_p - x_p}{L_n}\right) \ll 1$ , es posible tomar como primera aproximación el valor de

$\zeta_p = \frac{S_p L_n}{D_n}$ , y tomando en cuenta que  $n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}}$  entonces la ecuación de la

corriente puede escribirse como:

$$I_s = q \left( \frac{n_{p0} D_n}{L_n} \frac{S_p L_n}{D_n} + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \zeta_n \right) = q \left( \frac{n_i^2}{p_{p0}} S_p + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \zeta_n \right) \quad (3.17)$$

Como segunda aproximación, considerando que la velocidad de recombinación en la superficie corresponde a un contacto puramente óhmico, se tendría  $S_n \approx \infty$ , y entonces el valor de  $\zeta_n$  puede ser aproximado

por:

$$\zeta_n = \frac{\cosh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right)} = \coth\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) \quad (3.18)$$

Y tomando en consideración que  $p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}}$  y que  $n_{n0} \approx N_D$  entonces se tiene que la ecuación de la corriente de saturación es:

$$I_s = q \left[ \frac{n_i^2}{p_{p0}} S_p + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \coth \left( \frac{d_n - X_n}{L_p} \right) \right] = q \left[ \frac{n_i^2}{p_{p0}} S_p + \frac{n_i^2 D_p}{N_D L_p} \coth \left( \frac{d_n - X_n}{L_p} \right) \right] \quad (3.19)$$

La aproximación final es  $d_n - X_n \approx d_n$ , y es válida para cuando  $d_n \gg X_n$  entonces:

$$I_s = q \left[ \frac{n_i^2}{p_{p0}} S_p + \frac{n_i^2 D_p}{N_D L_p} \coth \left( \frac{d_n}{L_p} \right) \right] \quad (3.20)$$

### 3.1.3 Características I-V de la unión p-n bajo iluminación.

Cuando la unión p-n se expone a una iluminación de diferentes longitudes de onda (figura 3-3), la generación de portadores debe ser tomada en consideración para obtener una ecuación que nos permita conocer la foto-respuesta.

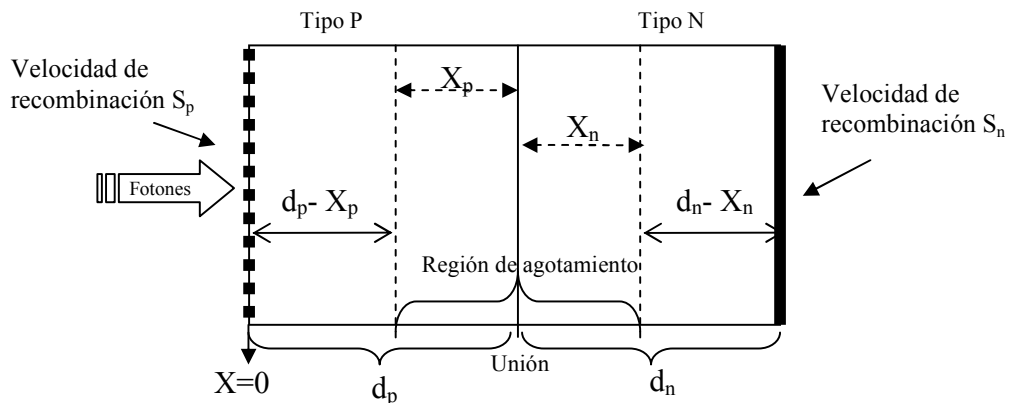


Figura 3-3 Geometría de la unión p-n bajo condiciones de iluminación.

En la figura 3-3 se muestra el caso en que la unión  $p-n$  es iluminada por la cara tipo P de la estructura. Se indican las dimensiones correspondientes a la región de agotamiento en cada lado de la unión ( $X_p$ ,  $X_n$ ), así como el grosor de la capa de cada tipo de semiconductor ( $d_p$ ,  $d_n$ ).

Debido a que la generación de portadores será función de la distancia a la superficie de incidencia, se elige como punto de referencia ( $x=0$ ) la superficie del dispositivo donde la luz incide.

Cuando una unión  $p-n$  es iluminada, la colección de portadores fotogenerados por el campo eléctrico provocará una corriente de huecos provenientes del lado N hacia el lado P y viceversa.

Esta corriente se representa como una fuente de corriente  $I_L$  en paralelo con la unión y con dirección contraria a la corriente del diodo en polarización directa  $I_S[e^{qV/kT}-1]$ .

En el circuito equivalente de la figura 3-4 se muestra el voltaje  $V$  que presentará la celda, incluyendo las resistencias en serie  $R_S$  y en paralelo,  $R_{SH}$ ; la corriente  $I$  se define para simplificar la ecuación característica, pues en realidad la corriente que fluye en caso de conectar una carga a la celda es en sentido opuesto ( $-I$ ).

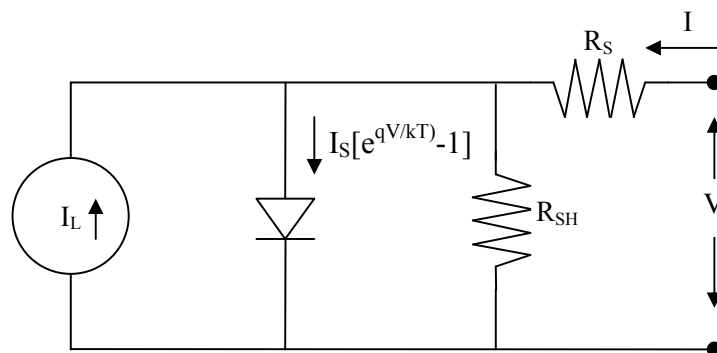


Figura 3-4. Circuito equivalente de la celda solar bajo condiciones de iluminación.

Con el circuito equivalente anterior (figura 3-4), y bajo las condiciones de iluminación, la ecuación característica es [14]:

$$\ln\left(\frac{I + I_L}{I_S} - \frac{V - IR_S}{R_{SH} I_S} + 1\right) = \frac{q}{kT}(V - IR_S) \quad (3.21)$$

En la figura 3-5 se comparan las características I-V de una unión *p-n* bajo condiciones de iluminación y las respectivas características en oscuridad.

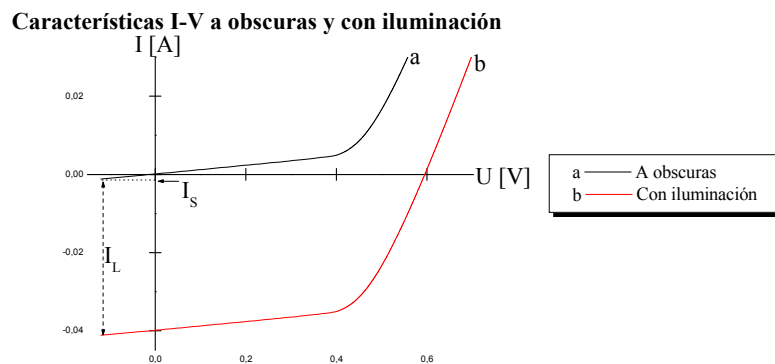


Figura 3-5. Gráfica I-V de la unión P-N en oscuridad y bajo iluminación.

Las características más relevantes de la unión *p-n* bajo condiciones de iluminación se encuentran en el cuarto cuadrante, lo cual sugiere que el dispositivo está entregando potencia.

### 3.1.3.1 Foto-corriente $I_L$ .

Para calcular la corriente foto-generada o foto-corriente en una unión *p-n* es necesario entender primeramente que, al incidir un haz luminoso sobre la unión como lo muestra la figura 3-3, existirá una generación de portadores

tanto en la región de carga espacial como en las regiones cuasi-neutras N ó P del dispositivo. Los portadores de carga libres generados en las regiones cuasi-neutras formarán parte de la foto-corriente sólo cuando éstos sean generados a una distancia no mayor de la longitud de difusión ( $L_p$  en el lado N y  $L_n$  en el lado P). Por otra parte, para el caso de los portadores generados en la región de carga espacial, éstos serán expuestos a un campo eléctrico que los arrastrará (electrones en sentido opuesto y huecos en el mismo sentido del campo), creando así una tercera contribución a la corriente foto-generada.

Con la finalidad de realizar un análisis general, se emplean ecuaciones para densidad de corriente y no ecuaciones de corriente, siendo la densidad de foto-corriente  $J_L = I_L/A$ .

La densidad de foto-corriente estará dada entonces por dos corrientes de difusión y una corriente de arrastre:

$$J_L = J_{DIF} + J_{Drift} = J_N + J_P + J_{Drift} \quad (3.22)$$

En donde  $J_N$  es la densidad de corriente de difusión de huecos en el lado P,  $J_P$  es la densidad de corriente de difusión en el lado N y  $J_{Drift}$  es la densidad de corriente de arrastre de portadores generados en la región de carga espacial.

Debido a la dependencia que guarda el coeficiente de absorción de los materiales con la longitud de onda incidente, en este trabajo se analiza el caso en el cual una luz monocromática de una longitud de onda  $\lambda$  incide en la unión *p-n*.

Cuando luz monocromática de una longitud de onda específica  $\lambda$  incide en la superficie frontal, el número de portadores generados, (pares electrón-

huevo) por cada fotón incidente, a una distancia  $x$  de la superficie del semiconductor está dada por [15]:

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)F(\lambda)[1 - R(\lambda)]\exp[-\alpha(\lambda)x] \quad (3.23)$$

En donde  $\alpha(\lambda)$  es el coeficiente de absorción del material,  $F(\lambda)$  es el número de fotones incidentes por centímetro cuadrado por segundo por unidad de ancho de banda y  $R(\lambda)$  es la fracción de estos fotones que es reflejada en la superficie. En la figura 3-6 se presenta la generación en función de la profundidad del material para longitudes de onda cortas y largas; en ella se aprecia que la mayor generación tendrá lugar en la superficie, decayendo a una razón diferente conforme se adentra en el material para cada longitud de onda.

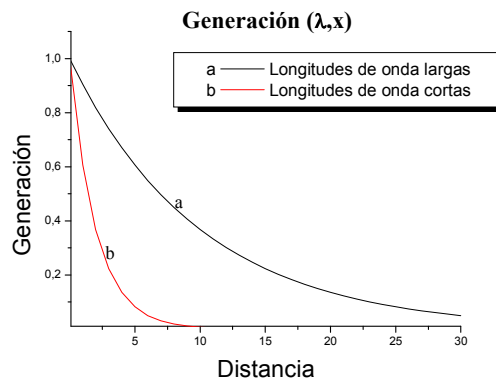


Figura 3-6. Gráfico de la generación en función de la profundidad

Bajo condiciones de baja inyección, la ecuación de continuidad unidimensional para electrones en el lado P es:

$$G_n - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = 0 \quad (3.24)$$

Y para huecos en el lado N:



$$G_p - \frac{P_n - P_{no}}{\tau_p} + \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = 0 \quad (3.25)$$

En donde  $\tau_p$  y  $\tau_n$  representan los tiempos de vida de los portadores minoritarios, es decir una medida del tiempo que tardan en recombinarse.

Ahora, suponiendo el caso de una celda solar con una unión  $p-n$  abrupta con un dopado constante en cada lado de la unión, se puede considerar que no existen campos eléctricos fuera de la región de agotamiento. En el caso de una unión P sobre substrato N, las ecuaciones (3.5), (3.23) y (3.24) pueden emplearse para obtener una expresión útil para la parte superior de la unión, es decir para la parte concerniente al semiconductor tipo P:

$$D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} + \alpha F(1-R) \exp(-\alpha x) - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n} = 0 \quad (3.26)$$

Teniendo como solución general a esta ecuación:

$$n_p - n_{po} = A \cosh(x/L_n) + B \sinh(x/L_n) - \frac{\alpha F(1-R)\tau_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \exp(-\alpha x) \quad (3.27)$$

En donde  $L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$  es la longitud de difusión de los electrones minoritarios del lado P.

Para este caso particular, se toman dos condiciones de frontera. En la superficie del lado P se tiene recombinación con una velocidad dada por  $S_p$ , para  $x=0$ :

$$-D_n \frac{d(n_p - n_{po})}{dx} = S_p (n_p - n_{po}) \quad (3.28)$$

En el borde de la región de agotamiento, el exceso de portadores de carga es pequeño debido al campo eléctrico presente en esta zona, con lo que para  $x=d_p-X_p$ :

$$n_p - n_{po} \approx 0 \quad (3.29)$$

Empleando estas condiciones de frontera en la ecuación (3.27), la densidad de electrones resulta ser:

$$n_p - n_{po} = \left[ -\alpha F(1-R)\tau_n / (\alpha^2 L_n^2 - 1) \right] \left[ \frac{(S_p L_n / D_n + \alpha L_n) \operatorname{senh}\left(\frac{(d_p - X_p) - x}{L_n}\right) + e^{-\alpha(d_p - X_p)} \left( (S_p L_n / D_n) \operatorname{senh}\frac{x}{L_n} + \cosh\frac{x}{L_n} \right)}{(S_p L_n / D_n) \operatorname{senh}\left(\frac{(d_p - X_p)}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{(d_p - X_p)}{L_n}\right)} - e^{-\alpha x} \right] \quad (3.30)$$

Y la densidad de corriente de electrones resultante en el borde de la región de agotamiento del lado P es:

$$J_n = qD_n \left( \frac{dn_p}{dx} \right)_{(d_p - X_p)} = \left[ q\alpha L_n F(1-R) / (\alpha^2 L_n^2 - 1) \right] \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_n}{D_n} + \alpha L_n \right) e^{-\alpha(d_p - X_p)} \left( \frac{S_p L_n}{D_n} \cosh\frac{(d_p - X_p)}{L_n} + \operatorname{senh}\frac{(d_p - X_p)}{L_n} \right)}{\frac{S_p L_n}{D_n} \operatorname{senh}\left(\frac{(d_p - X_p)}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{(d_p - X_p)}{L_n}\right)} - \alpha L_n e^{-\alpha(d_p - X_p)} \right] \quad (3.31)$$

Suponiendo que la parte frontal de una celda solar de unión P sobre substrato N tiene un tiempo de vida, movilidad y nivel de dopado uniformes, esta foto corriente podría ser colectada para una longitud de onda específica.

Las ecuaciones (3.23), (3.25) y (3.6) (generación, continuidad y densidad de corriente) son empleadas para encontrar la foto corriente de huecos

colectada por la base de la celda con las condiciones de frontera siguientes para  $x=d_n+d_p$ :

$$D_p \frac{d(p_n - p_{no})}{dx} = S_n(p_n - p_{no}) \quad (3.32)$$

Una vez más se supone que el exceso de portadores de carga es pequeño debido al campo eléctrico presente en el borde de la región de agotamiento, con lo que para  $x=d_p+X_n$ :

$$p_n - p_{no} \approx 0 \quad (3.33)$$

Con ello se obtiene la distribución de huecos en la base N dada por:

$$p_n - p_{no} = \left[ -\alpha F(1-R)\tau_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1) \right] e^{-\alpha(X_n+d_p)} \left[ \cosh\left(\frac{x-(X_n+d_p)}{L_p}\right) e^{-\alpha(x-(X_n+d_p))} \frac{\left(\frac{S_n L_p}{D_p}\right) \cosh\left(\frac{d_n-X_n}{L_p}\right) - e^{-\alpha(d_n-X_n)} + \sinh\left(\frac{d_n-X_n}{L_p}\right) + \alpha L_p e^{-\alpha(d_n-X_n)}}{\frac{S_n L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{d_n-X_n}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{d_n-X_n}{L_p}\right)} \right] \left[ \sinh\left(\frac{x-(X_n-d_p)}{L_p}\right) \right] \quad (3.34)$$

Mientras que la densidad de corriente debida a huecos en el borde  $x=d_p+X_n$  estará dada por:

$$J_p = -qD_p \left( \frac{dp_n}{dx} \right)_{(d_p+X_n)} = \left[ q\alpha L_p F(1-R) / (\alpha^2 L_p^2 - 1) \right] e^{-\alpha(d_p+X_n)} \left[ \alpha L_p \frac{\left(\frac{S_n L_p}{D_p}\right) \left[ \cosh\left(\frac{d_n-X_n}{L_p}\right) - e^{-\alpha(d_n-X_n)} \right] + \sinh\left(\frac{d_n-X_n}{L_p}\right) + \alpha L_p e^{-\alpha(d_n-X_n)}}{\frac{S_n L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{d_n-X_n}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{d_n-X_n}{L_p}\right)} \right] \quad (3.35)$$

La componente debida a generación en la región de agotamiento es:

$$J_{Drift} = qF(1-R)e^{-\alpha(d_p - X_p)}[1 - e^{-\alpha W}] \quad (3.36)$$

Por lo regular, la energía incidente sobre una unión P-N no está compuesta de una simple longitud de onda, más bien por un espectro de varias longitudes de onda. Al tratarse de un espectro radiando al dispositivo, la densidad de foto-corriente se obtiene mediante la integración de la ecuación de la densidad de corriente foto-generada para una longitud de onda; ésta viene dada por la suma de las ecuaciones (3.31), (3.35) y (3.36), teniendo como límite inferior de integración la longitud de onda mínima del espectro de radiación. El límite superior estará dado por la longitud de onda que posea una energía suficiente como para generar un par electrón hueco en el semiconductor en cuestión, lo cual depende del ancho de la banda prohibida del mismo.

Con lo anterior se tiene entonces que:

$$J_L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_m} [J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{Drift}(\lambda)] d\lambda \quad (3.37)$$

Se pueden realizar algunas simplificaciones a las ecuaciones de la densidad de corriente de huecos y electrones, tomando como aproximaciones que la velocidad de recombinación superficial es  $S_p = 0$  y que la velocidad en el contacto óhmico de la parte posterior es infinita, esto es  $S_n = \infty$ , con lo que se obtiene:

$$J_n = [q\alpha L_n F(1-R)/(\alpha^2 L_n^2 - 1)] \left[ \frac{\alpha L_n - e^{-\alpha(d_p - X_p)} \left( \frac{\sinh\left(\frac{d_p - X_p}{L_n}\right)}{L_n} \right)}{\cosh\left(\frac{d_p - X_p}{L_n}\right)} - \alpha L_n e^{-\alpha(d_p - X_p)} \right] \quad (3.38)$$

Ahora, suponiendo que  $(d_p - X_p) \ll L_n$  se tiene que  $\left(\sinh\left(\frac{(d_p - X_p)}{L_n}\right)\right) \approx 0$  y

además que  $\left(\cosh\left(\frac{(d_p - X_p)}{L_n}\right)\right) \approx 1$  entonces se tiene finalmente del lado P:

$$J_n = qF(1-R) \left[ \frac{\alpha^2 L_n^2}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \right] \left[ 1 - e^{-\alpha(d_p - X_p)} \right] \quad (3.39)$$

Mientras que para el lado del sustrato N se obtiene:

$$J_p = qF(1-R) \left[ \frac{\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} e^{-\alpha(d_p + X_n)} \right] \left[ \alpha L_p - \frac{\cosh\left(\frac{(d_n - X_n)}{L_p}\right) - e^{-\alpha(d_n - X_n)}}{\sinh\left(\frac{(d_n - X_n)}{L_p}\right)} \right] \quad (3.40)$$

Para el caso en el que alguna de las regiones sea mucho más pequeña, por ejemplo  $d_p - X_p \ll l$ , la contribución de corriente de esta región puede ser despreciada, y con ello simplificar la expresión de la densidad de corriente a la integral de la suma de sólo dos contribuciones:

$$J_L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_m} [J_p(\lambda) + J_{Drift}(\lambda)] d\lambda \quad (3.41)$$

Se puede proponer una última aproximación cuando  $d_p \ll d_n$  y que  $d_n - X_n \gg X_n$  entonces puede decirse que  $d_n - X_n \approx d_n + d_p = d$  en donde se entiende que  $d$  representa el grosor del dispositivo o de la oblea.

Con estas aproximaciones se tiene la expresión final para la densidad de la corriente foto-generada  $J_L$  dada por:

$$J_L = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ (1-R)_\lambda F_\lambda \left[ (1 - e^{-\alpha W}) + \left( \frac{\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} e^{-\alpha W} \right) \left( \alpha L_p - \frac{\text{Cosh} \left( \frac{d}{L_p} \right) - e^{-\alpha d}}{\text{Senh} \left( \frac{d}{L_p} \right)} \right) \right] \right\} d\lambda \quad (3.42)$$

### 3.1.3.2 Voltaje de circuito abierto.

La diferencia de potencial o voltaje que presenta la celda fotovoltaica bajo condiciones de iluminación cuando no se conecta a ninguna carga, es decir, sin flujo de corriente, se conoce como voltaje de circuito abierto y está dado por la ecuación:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{J_L}{J_S} + 1 \right) \approx \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{J_L}{J_S} \right) \quad (3.43)$$

De la ecuación anterior se tiene que para una determinada foto-corriente  $J_L$ , el voltaje de circuito abierto se incrementa de manera logarítmica cuando la corriente de saturación  $J_S$  es reducida.

### 3.1.3.3 Figuras de mérito.

Tomando en cuenta la naturaleza de la celda fotovoltaica como generador de energía eléctrica, es de esperarse que algunas de las principales figuras de

mérito estén relacionadas con variables eléctricas como la corriente, el voltaje y la potencia; sin embargo, para una celda fotovoltaica también son muy importantes los factores que definen qué tanta energía en forma de radiación ha sido convertida eficientemente por la celda fotovoltaica en energía eléctrica. En este sentido se definen entonces las figuras de mérito de factor de llenado FF (en inglés fill factor) y de eficiencia  $\eta$ .

### **3.1.3.3.1 Factor de llenado (fill factor).**

En la figura 3-7 es fácil identificar los puntos  $I_m$  y  $V_m$  que son los valores de corriente y voltaje que proporcionan la potencia máxima. El factor de llenado se define como la relación existente entre la potencia máxima real que la celda es capaz de proporcionar y la potencia que se obtendría si se pudiera contar con el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito. Este parámetro queda definido de la siguiente manera:

$$F.F. = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}} \quad (3.44)$$

De manera gráfica, el factor de llenado puede definirse como la fracción del área del rectángulo formado por las intersecciones de los valores de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  que es llenada por el área del rectángulo formado por las intersecciones de los puntos característicos  $I_m$ ,  $V_m$ .

En la figura 3-7 se ilustran los parámetros de la unión  $p-n$  bajo iluminación antes mencionados, así como el área del rectángulo que muestra qué tanta

potencia puede suministrar el dispositivo, comparada con la potencia que podría lograrse al tener el producto de  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ .

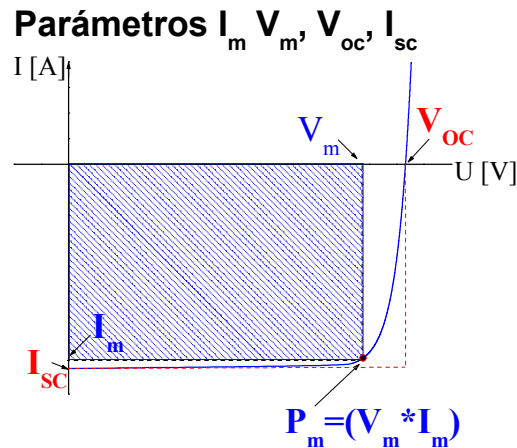


Figura 3-7. Principales parámetros de una celda solar.

La influencia de las resistencias en serie y en paralelo puede apreciarse de manera muy clara en la gráfica de la figura 3-8, en donde la influencia de la resistencia en serie  $R_s$  sobre el factor de llenado es determinante, mientras que la resistencia en paralelo  $R_{SH}$  no muestra un efecto tan dominante en las características del dispositivo.

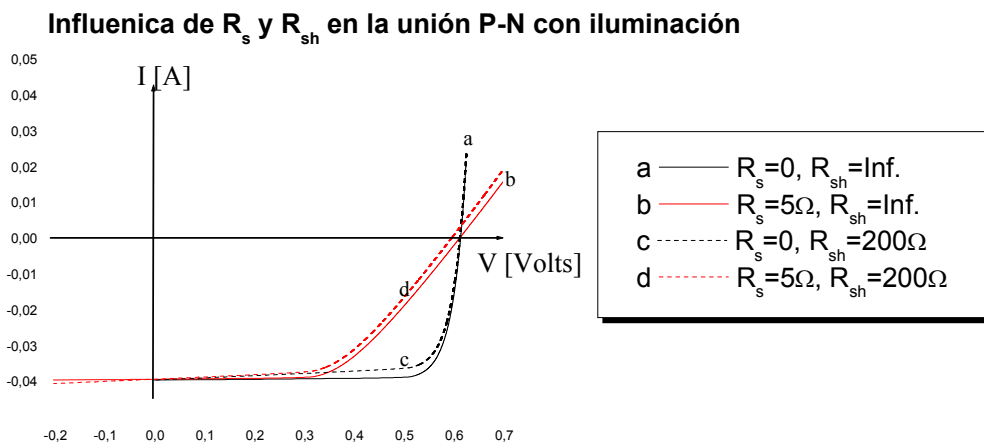


Figura 3-8. Influencia de las resistencias en serie y en paralelo sobre las curvas I-V de la celda solar.



### 3.1.3.3.2 Eficiencia.

La eficiencia es un parámetro de la unión  $p-n$  bajo iluminación que define en una simple cantidad, la forma en que la potencia óptica incidente es transformada en potencia eléctrica por el dispositivo, esto es:

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{opt}} = \frac{I_{SC} V_{OC} F.F.}{P_{opt}} \quad (3.45)$$

Como se observa, a partir de la ecuación (3.45), con el objetivo de incrementar la eficiencia se debe maximizar la corriente foto-generada y el voltaje de circuito abierto. Lo anterior es posible si se minimiza la corriente de saturación  $I_s$ , así como las pérdidas causadas por reflectancia y debidas a las resistencias serial y paralelo de la celda.

### 3.2 Celda solar basada en contactos metal semiconductor (M-S).

Al igual que en las estructuras formadas por unión  $p-n$ , las estructuras metal-semiconductor tienen como principal característica la formación de una barrera de potencial cuando estos dos materiales entran en contacto.

Existen varias diferencias con respecto a una unión  $p-n$ , una de ellas estriba en la naturaleza de la formación de esta barrera.

Analizando el caso ideal, la formación de la barrera en estas uniones, tiene una estrecha relación con la afinidad electrónica del semiconductor y la función trabajo del metal.

En las figuras 3-9 y 3-10 se presentan los diagramas de bandas de energía, en equilibrio térmico, correspondientes a un semiconductor tipo N y un metal, tanto antes como después de formarse el contacto entre ellos.

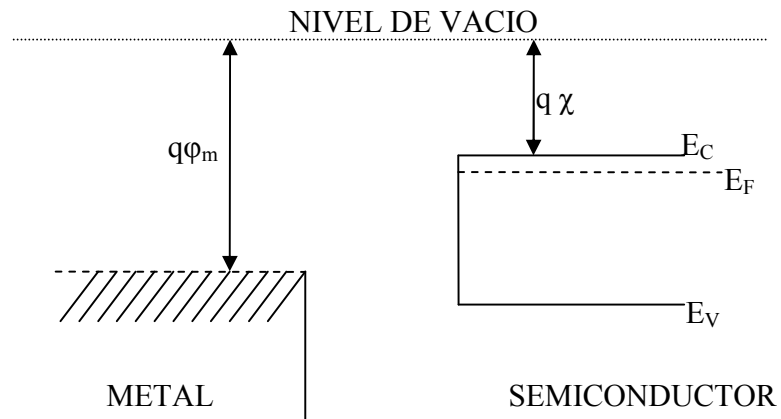


Figura 3-9. Diagrama de bandas previo a la formación del contacto metal-semiconductor.

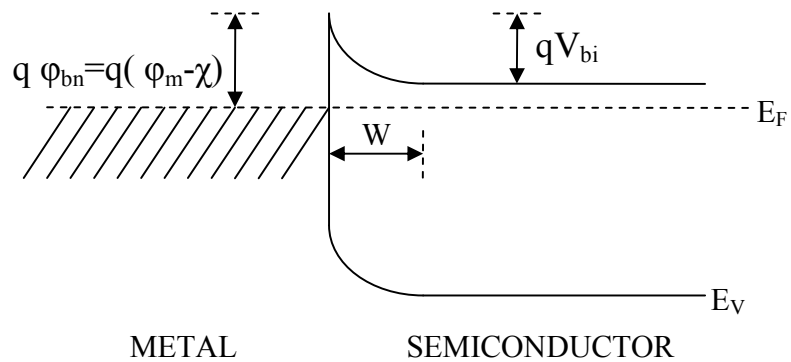


Figura 3-10. Diagrama de bandas ideal una vez realizada la unión metal-semiconductor.

De la figura 3-10 se observa que para el caso ideal se forma una barrera de potencial denotada por  $q\phi_{bn} = q(\phi_m - \chi)$ , (para un semiconductor tipo P sería  $q\phi_{bp} = E_g - q(\phi_m - \chi)$ ).

Sin embargo se ha demostrado experimentalmente que la altura de la barrera formada por uniones de esta clase es menor que la que predice el caso ideal mostrado anteriormente, y aun más, para semiconductores covalentes como lo son el silicio y el germanio la formación de la barrera muestra una dependencia muy débil con la función trabajo del metal empleado [16-18]. Al respecto se han realizado innumerables estudios, responsabilizando a los defectos intrínsecos en la superficie del semiconductor [19] de este hecho; adicionalmente hay quienes se oponen a la existencia de estados localizados en la unión M-S [20]; mientras que otros investigadores han encontrado que la débil dependencia de la altura de la barrera en cuanto al semiconductor empleado se origina desde las primeras capas atómicas de metal depositado en el semiconductor [21-22].

Otra diferencia importante comparando esta estructura con una unión  $p-n$ , es el proceso de transporte de carga, el cual es dominado por los portadores mayoritarios del semiconductor.

Al existir una barrera de potencial en la interfase metal-semiconductor, se forma una región de agotamiento; en este caso, esta región de agotamiento se comporta de manera muy similar a la obtenida para una unión  $p^+-n$  de un solo lado, donde toda la región de agotamiento abarca el material menos dopado.

Hablando de los dispositivos fotovoltaicos basados en este tipo de uniones, la generación de portadores de carga se efectúa en el semiconductor; para ello es necesario contar con películas metálicas suficientemente delgadas para permitir el paso de la mayor cantidad de luz posible; lo anterior conlleva a un aumento en la resistencia de hoja de la capa metálica.

En general, las contribuciones de portadores excitados del metal hacia el semiconductor son tan pequeñas que pueden ser despreciadas. Para obtener los parámetros de celdas fotovoltaicas basadas en estas estructuras, una buena aproximación es considerar la foto-generación de portadores en la región de agotamiento y en el cuerpo del semiconductor.

La ecuación característica corriente-voltaje para un contacto metal-semiconductor es muy parecida a la de la unión  $p-n$  y viene dada por [12]:

$$I = I_S (e^{qV/nkT} - 1) - I_L \quad (3.46)$$

Donde  $I_S$  está definida por:

$$I_S = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (3.47)$$

$A$  es el área,  $n$  es el factor de idealidad,  $A^*$  es la constante efectiva de Richardson para emisión termiónica definida por:

$$A^* = \frac{4\pi qm^*k^2}{h^3} \quad (3.48)$$

Y  $q\phi_B$  es la altura de la barrera de potencial formada en la interfase.

En este caso, la componente principal de la corriente de saturación o corriente de oscuridad será determinada por los portadores mayoritarios que logren cruzar la barrera de potencial en la interfase. La componente proporcionada por emisión termiónica causa que la corriente de saturación en contactos metal-semiconductor sea mayor comparada con su contraparte en la unión  $p-n$ ; esto es un efecto indeseable en los dispositivos fotovoltaicos ya que el voltaje de circuito abierto depende de esta componente. Al disminuir el voltaje de circuito abierto, disminuyen la eficiencia y el factor de llenado del dispositivo. Una alternativa para reducir esa componente es incrementar la altura de la barrera de potencial; el caso extremo ideal es

aquél en el que la barrera se hace igual a la banda prohibida del semiconductor y se utiliza un metal con reflectancia nula.

Se ha desarrollado una regla empírica [23] que proporciona una buena aproximación a la realidad en cuanto a la magnitud de la barrera de potencial que un metal y un semiconductor covalente pueden formar:

$$\phi_B \approx \frac{2}{3} E_g \quad (3.49)$$

Las celdas fotovoltaicas de este tipo han sido consideradas como una alternativa para simplificar el proceso de fabricación, al evitar la necesidad de contar con equipos costosos para realizar difusiones o implantaciones como en el caso de la unión  $p-n$ , y además, evitar la degradación del tiempo de vida de los portadores minoritarios y la reducción de las pérdidas debidas a recombinaciones superficiales gracias a la presencia de una región de agotamiento muy cercana a la superficie. Además de lo anterior, tienen una gran adaptabilidad a los sistemas que emplean semiconductores policristalinos.

Otro inconveniente de estas estructuras para usos fotovoltaicos es la necesidad de formar capas metálicas sumamente delgadas para permitir el paso de la radiación hacia el semiconductor, esto añade resistencia en serie al dispositivo. Tanto el proceso como la tecnología necesaria resultan complejos y costosos.

En general, estas estructuras presentan figuras de mérito inferiores a las que se pueden lograr con uniones  $p-n$ . [1, 2].

### 3.3 Celda solar basada en estructuras metal, aislante, semiconductor (MIS).

La incorporación de una película intermedia de material aislante en estructuras metal-semiconductor, es prácticamente inherente al proceso de fabricación de las mismas. La colocación deliberada de una capa de este tipo y con un grosor bien definido, conduce a una mejora en los parámetros fotovoltaicos de estas estructuras en comparación con los obtenidos para estructuras metal-semiconductor [24]. Un diagrama de bandas de estas estructuras se presenta en la figura 3-11.

El análisis de las mejoras logradas al incorporar una película intermedia de aislante, ha conducido a la postulación de varias teorías que explican el efecto causado por la capa intermedia de aislante [24-27]. Algunos de estos modelos atribuyen las mejoras obtenidas a un incremento en la barrera de potencial, lo cual produce como resultado un decremento de la corriente de saturación y como consecuencia a un incremento del voltaje de circuito abierto.

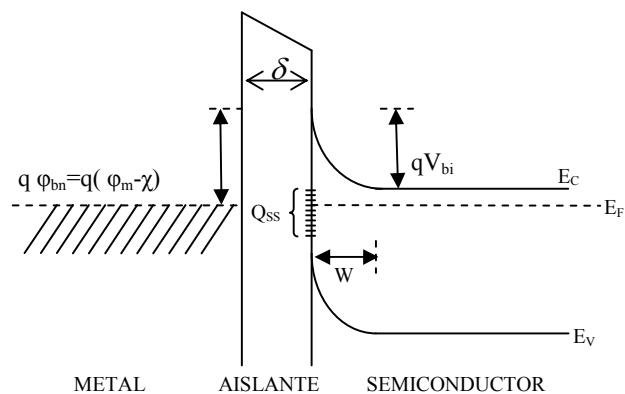


Figura 3-11. Diagrama de bandas de una estructura MIS.

Otros autores [28, 29], predicen un incremento de la barrera de potencial debido a cargas localizadas en la capa aislante. Por otro lado, la mayoría

pronostica un incremento en el voltaje de circuito abierto para grosores de aislante de hasta 30Å (ya que con grosores mayores la corriente foto-generada será limitada).

Todas esas teorías apuntan en dirección de una disminución de la corriente de saturación comparada con la obtenida para una estructura metal-semiconductor.

En estas estructuras la corriente de saturación está dada por [12]:

$$I_S = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \exp(-\delta(q\phi_T)^{1/2}) \quad (3.50)$$

Que es muy similar a la expresión correspondiente a una unión metal-semiconductor, con la inclusión de un término adicional representando la corriente por tuneo a través del aislante. En donde  $q\phi_T$  representa la altura de la barrera de potencial impuesta por la capa de aislante, siendo  $\delta$  el grosor del mismo.

Por otro lado, el voltaje de circuito abierto se expresa como [12]:

$$V_{OC} = \left[ \frac{nkT}{q} \right] \left[ \ln\left(\frac{J_L}{A^*T^2}\right) + \frac{q\phi_B}{kT} + \delta(q\phi_T)^{1/2} \right] \quad (3.51)$$

En las ecuaciones anteriores se observa que el incremento del voltaje de circuito abierto se puede obtener incrementando uno de tres parámetros, la barrera de potencial, el factor de idealidad del diodo, o el grosor del aislante. Esto se consigue usando la capa de aislante mediante varios mecanismos, como lo son la pasivación de enlaces superficiales, o la incorporación de carga en el aislante, lo cual puede inducir incluso una capa de inversión en el material semiconductor.

La disminución de la corriente de tuneleo de portadores mayoritarios puede lograrse aumentando el grosor de la capa de aislante; esto, sin embargo, reduce la corriente foto-generada, y podría hacer necesaria la incorporación de trampas en el aislante con niveles de energía apropiados para facilitar el tuneleo de portadores minoritarios.

En general estas estructuras cuentan con las mismas ventajas que las anteriores. En su fabricación se evita el empleo de procesos de difusión a temperaturas altas (como en la formación de la unión  $p-n$ ) para generar barreras de potencial; mejoran notablemente los parámetros fotovoltaicos en comparación con aquellos basados en simples uniones metal-semiconductor. Además de mejorar considerablemente la altura de la barrera de potencial entre semiconductor y metal, el empleo de temperaturas bajas en el proceso de fabricación disminuye la formación de defectos en la estructura del semiconductor (impurezas y enlaces rotos), que pudieran ocasionar una pérdida de movilidad de los portadores.

Por otro lado, las propiedades electrónicas de los óxidos dependen fuertemente del método empleado para crecerlos, lo cual se ve reflejado directamente en las propiedades fotovoltaicas de los dispositivos.

Adicionalmente, todavía existe la necesidad de contar con una capa metálica ultra-delgada, que incrementa la resistencia en serie de la celda.

### ***3.4 Celda solar basada en semiconductor, aislante, semiconductor (SIS).***

La consideración de introducir una capa de aislante intermedia en una estructura formada por dos semiconductores surge a partir del análisis de las mejoras obtenidas en estructuras MIS y la consideración de que algunas hetero-estructuras se comportan en ciertas ocasiones de manera similar a una barrera Schottky.



Al respecto se ha encontrado favorable el empleo de la capa intermedia de aislante colocada intencionalmente en dispositivos en los cuales la colección de portadores la realiza el semiconductor menos dopado [30]. Recientemente se ha retomado el interés en el empleo de óxidos transparentes conductores (OCT) como el  $\text{SnO}_2$ , el  $\text{In}_2\text{O}_3$  y el óxido de indio dopado con estaño (ITO por sus siglas en inglés) en aplicaciones fotovoltaicas [31]. Dicho interés tiene fundamentos en las propiedades ópticas y eléctricas de estos óxidos.

Los OCT son materiales con una banda prohibida muy grande, mayor a 3eV, pero se comportan como un semiconductor. Estos materiales pueden doparse hasta el nivel de degeneración añadiendo impurezas como el flúor, estaño, molibdeno, titanio, zirconio, erbio, y antimonio entre otros. Además, éstos cuentan con propiedades ópticas de transparencia de hasta el 95% para el rango de longitudes de onda entre los 400 y 2000nm dependiendo del grosor [32]. Su formación se realiza mediante técnicas como el depósito de vapores químicos (por ejemplo:  $\text{InCl}_3$ ,  $\text{SnCl}_2$  para la formación de  $\text{In}_2\text{O}_3$ ), rocío pirolítico, sol-gel, y sputtering.

La función del OCT es similar a la del metal en la celda MIS, ofreciendo las ventajas de alta conductividad aunada a su alta transparencia, y además, posee una mejor estabilidad (menor reacción con el medio) que las películas metálicas.

Además, estos óxidos pueden ser empleados ya sea como cubierta antirreflejante o como parte de la hetero-unión que forma al dispositivo fotovoltaico.

Estudios de estructuras como las formadas específicamente por ITO sobre silicio, se han realizado con el fin de conocer la razón por la cual se pueden obtener eficiencias tan variables [33-35]. Se ha encontrado que las características del dispositivo son altamente dependientes de los parámetros o técnicas de depósito.

Hablando específicamente de la formación de hetero-estructuras ITO/Si, pareciera que la estructura de los dos materiales fuese totalmente incompatible para formar dispositivos fotovoltaicos, pues de acuerdo con las afinidades electrónicas del ITO y el silicio y la gran disparidad en las constantes de red, se presentarían altas corrientes de saturación debido a los defectos formados en la unión.

Mediante un análisis más detallado se ha encontrado [36] que en la mayoría de las uniones fabricadas existe una capa de aislante entre el ITO y el silicio, la cual tiene una gran importancia en el desempeño del dispositivo fotovoltaico. De esta manera, el modelo empleado para describir el comportamiento de estas estructuras resulta ser muy similar al de las estructuras MIS o una forma equivalente. Debido a que el ITO puede doparse hasta la degeneración, su comportamiento es similar al de un metal, y si el aislante intermedio es suficientemente delgado (entre 10 y 30 Å), la corriente de saturación de mayoritarios se verá limitada. Una capa aislante tan delgada presenta una estructura compleja ( $\text{SiO}_x$ ), que pasiva las superficies de ambos semiconductores, acoplando así la disparidad entre las constantes de red del ITO y del silicio; esto consigue explicar la alta eficiencia lograda por estas estructuras. Para los casos en que la capa de aislante es mayor a los 30Å, el dispositivo no cuenta con un flujo de corriente entre el ITO y el semiconductor.

La reducción de la resistencia en serie del dispositivo, la disminución de pérdidas ocasionadas por reflexión, la diversidad de técnicas simples de fabricación, (libres de difusiones o procesos en altas temperaturas), son las principales ventajas que ofrecen estas estructuras con respecto a las analizadas anteriormente.

Un factor a considerar en las estructuras SIS es la extrema sensibilidad de las películas de óxidos al método y parámetros del proceso de fabricación, pues se han obtenido eficiencias del 12%, y variando ligeramente el proceso, éstas pueden decrecer hasta del 2% [37,38].

## **4. Análisis teórico de la celda solar con estructura ITO/Si-n**

Desde el punto de vista de fabricación, una estructura tal como la SIS es una de las más simples debido a que se requiere un número mínimo de pasos para su fabricación, además de ser compatible con cualquier semiconductor. El empleo de óxidos transparentes semiconductores sobre sustratos de silicio cristalino ha sido atractivo desde hace años para la fabricación de celdas solares [39].

Las celdas solares basadas en heteroestructuras formadas por óxidos conductores transparente (OCT) y silicio operando como uniones  $p-n$ , se presentan como un fuerte candidato para fabricar celdas de bajo costo en comparación con aquellas celdas operando como diodos Schottky.

Celdas solares basadas en estructuras SIS del tipo OCT/Silicio han reportado eficiencias hasta del 12% [39, 40]. La dependencia de su eficiencia con respecto a las propiedades del sustrato requiere un análisis profundo para poder mejorar sus características. El análisis teórico realizado y presentado en este capítulo está basado en una estructura de este tipo, los detalles de la estructura estudiada se presentan a continuación.

### ***4.1 Descripción de la estructura estudiada.***

Partimos de un trabajo experimental mediante el cual se fabricaron celdas solares usando rocío pirolítico para depositar películas delgadas de ITO en la superficie de un sustrato de silicio tipo n con resistividad de 10  $\Omega$ -cm

previamente tratado químicamente [41]. El espesor de la película de ITO fue de 80 nm, obteniéndose una resistencia de hoja de  $30 \Omega/\square$ , y la película policristalina presentó una orientación de granos columnar en dirección (100).

Las películas de ITO se comportan como un semiconductor degenerado tipo n con una banda prohibida  $E_g=3.7\text{eV}$ , con una concentración de portadores del orden  $10^{21}\text{cm}^{-3}$ ; por ello el nivel de Fermi ( $E_F$ ) se encuentra dentro de la banda de conducción ( $E_c$ ) dando lugar al efecto de Burstein-Moss ( $\Delta E^{\text{BM}} \approx 0.6\text{eV}$ ).

Previo al depósito de la película de ITO, la oblea de silicio fue sumergida en un baño de HF. El depósito de la película de ITO en la superficie de silicio conlleva a la formación de un contacto Schottky con un valor muy elevado de corriente de saturación, lo cual limita la eficiencia de la celda.

Con el fin de incrementar la eficiencia, el potencial superficial fue aumentado con una capa ultra delgada ( $\sim 15\text{-}17 \text{ \AA}$  de grosor) de  $\text{SiO}_x$  crecida en la superficie de silicio. Este aislante debe ser muy delgado para permitir el intercambio de portadores entre el silicio y la película de óxido de indio.

Debido a la acción conjunta de los iones  $\text{HO}_2^-$  cargados negativamente e incorporados en la película de  $\text{SiO}_x$  [42] y a la significativa diferencia de las funciones de trabajo entre la película de ITO y el substrato de silicio, una barrera de potencial  $\phi_b \approx 0.9 \text{ V}$  se formó en la interfase Si- $\text{SiO}_x$ . El valor de la altura de la barrera de potencial fue obtenido con análisis de las características I-V y C-V de la estructura.

El contacto en la parte posterior de la oblea se formó mediante una capa de Cr/Ni, mientras que en la parte superior se depositó una capa de Cr/Cu/Ni en

forma de rejilla para reducir la resistencia de cuadro y tener suficiente superficie de colección. En la figura 4-1 se muestra la dependencia de la corriente de corto circuito con respecto al voltaje de circuito abierto del dispositivo estudiado [41].

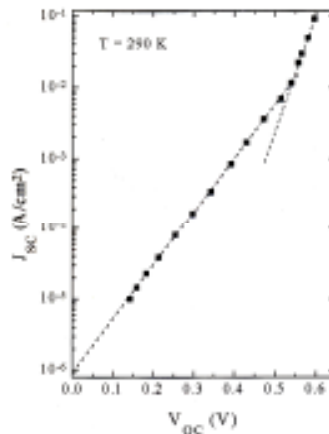


Figura 4-1. Dependencia  $J_{sc}$ - $V_{oc}$  de la estructura ITO-nSi estudiada.

En la figura se observan claramente dos regiones con diferente pendiente; la primera, correspondiendo a voltajes bajos, presenta un coeficiente de idealidad  $n > 2$  debido a recombinación en la región de agotamiento y/o corrientes de fuga superficiales. La segunda región, correspondiente a voltajes elevados, presenta un coeficiente de idealidad  $n \approx 1$ , y que es de interés porque la intersección de una línea de extrapolación de esta parte de las características I-V proporciona el valor de la corriente de saturación (en este caso, del orden de  $10^{-11} A/cm^2$ ).

#### **4.2 Modelo físico empleado.**

Debido a las características del dispositivo, éste puede ser descrito mediante el empleo de dos modelos: una estructura con barrera Schottky y una unión p-n inducida por inversión.

Estos modelos son muy diferentes desde el punto de vista de la concentración de portadores minoritarios cerca de la superficie  $p_s(x=0)$ . El primer modelo requiere que  $p_s(x=0) \ll N_D$ , donde  $N_D$  es la concentración de impurezas donadoras en el substrato de silicio. En contraste, el segundo modelo (unión  $p-n$ ) es válido ya sea para el caso  $p_s(x=0) > N_D$  o para una condición de fuerte inversión de la superficie del silicio.

En la figura 4-2 se presenta el diagrama de bandas de energía para la estructura en equilibrio bajo la condición de inversión fuerte.

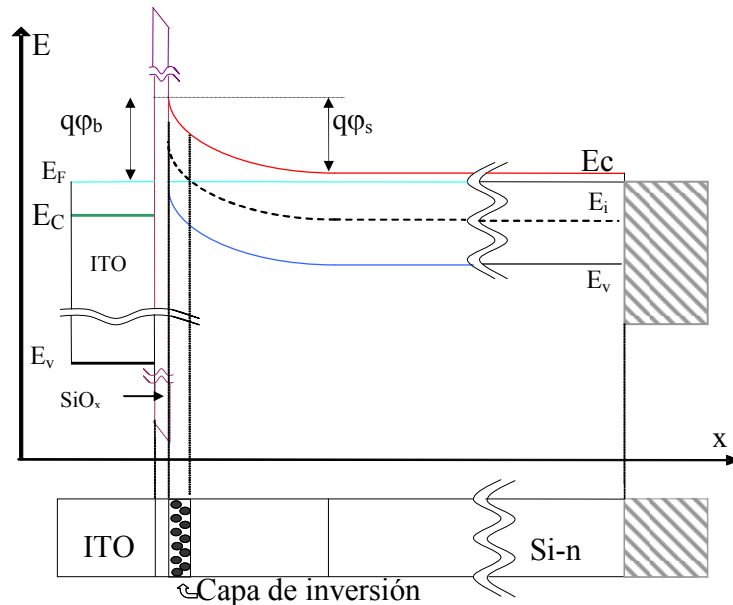


Figura 4-2. Diagrama de bandas de energía de la estructura ITO/SiO<sub>x</sub>/Si-n en equilibrio

Analizando el caso para el cual la superficie del substrato se encuentra bajo la condición de inversión fuerte, tenemos [12]:

$$q\phi_s \geq 2(E_F - E_i) \quad (4.1)$$

En donde

$$E_F - E_i = kT \ln(N_D / n_i) \quad (4.2)$$

Siendo  $\phi_s$  el potencial superficial en la interfase Si/SiO<sub>x</sub>,  $q$  es la carga elemental,  $k$  es la constante de Boltzmann,  $T$  es la temperatura,  $n_i$  es la concentración intrínseca de portadores y  $N_D$  es la concentración de impurezas donadoras en el sustrato de silicio.

Por otra parte

$$q\phi_s = q\phi_B - (E_C - E_F) \quad (4.3)$$

En donde

$$E_C - E_F = kT \ln(N_C / N_D) \quad (4.4)$$

En esta última ecuación  $N_C$  es la densidad efectiva de estados en la banda de conducción. Además se tiene que

$$p_s(x=0) = (n_i^2 / N_D) \exp(q\phi_s / kT) \quad (4.5)$$

Mediante la combinación de las ecuaciones anteriores (4.1-4.5), se puede obtener una relación entre la concentración superficial en la interfase Si/SiO<sub>x</sub> para obtener una fuerte inversión y la barrera de potencial:

$$p_s(x=0) = (n_i^2 / N_C) \exp(q\phi_B / kT). \quad (4.6)$$

En esta ecuación se observa que  $p_s(0)$  es independiente de  $N_D$ , por lo que se encuentra determinada sólo por la altura de la barrera  $\phi_B$ .

La relación entre la concentración de portadores minoritarios en la interfase con respecto a la concentración de portadores mayoritarios en el sustrato definirá de manera clara el modelo aplicable a cada caso.

La figura 4-3 muestra las fronteras de aplicabilidad entre los dos posibles modelos.

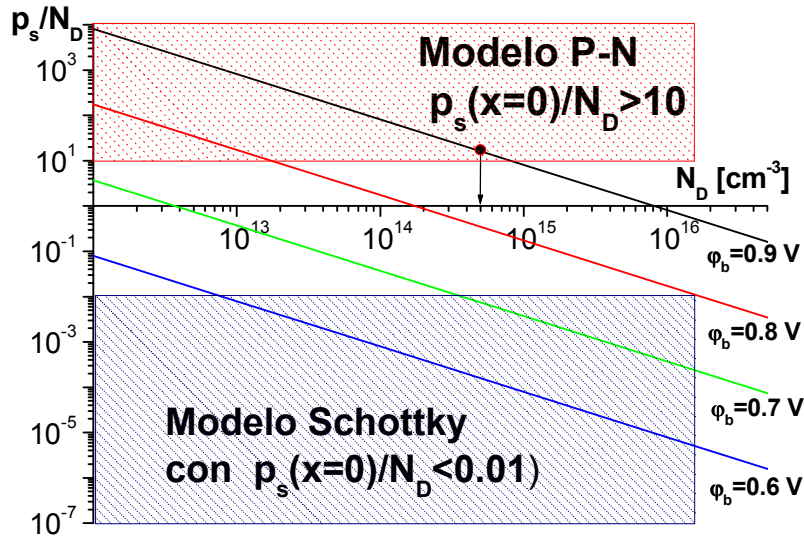


Figura 4-3. Modelos físicos posibles en coordenadas  $p_s(x=0)/N_D$  en función de la concentración  $N_D$  en el sustrato para diferentes alturas de barrera de potencial.

Las áreas sombreadas están relacionadas con los dos modelos posibles y donde es posible usar la teoría bien conocida. La relación  $p_s(x=0)/N_D < 0.01$  indica cuando es aplicable el modelo Schottky, mientras que para el modelo de la unión  $p$ - $n$  se debe considerar que  $p_s(x=0)/N_D > 10$ . Para un caso hipotético, en el que la altura de la barrera es  $0.7\text{ V}$ , la línea en la gráfica tiene intersecciones en los bordes de las áreas que definen cada modelo.

De esta manera las estructuras con sustratos de concentraciones  $N_D > 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  se modelan como barreras Schottky, mientras que aquellas con  $N_D < 4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  presentarán características propias de una unión  $p$ - $n$ . Como es sabido, la concentración de impurezas en el silicio determina su resistividad.



En la estructura experimental estudiada en este trabajo se tiene una altura de la barrera de potencial de 0.9 V usando un substrato de 10  $\Omega$ -cm ( $N_D=5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ); por ello, la estructura podría ser considerada como una unión asimétrica  $p^+-n$  inducida por inversión ( $p_s \geq 10 N_D$ ).

Esta consideración está de acuerdo con los experimentos realizados en estructuras ITO-SiO<sub>x</sub>-nSi presentando una barrera de potencial de 0.8-0.9V, en donde se ha encontrado que los portadores minoritarios controlan el transporte en estos dispositivos, en los cuales la corriente a oscuras es controlada por difusión cuando la capa de óxido es suficientemente delgada [43]. Otros autores han investigado celdas solares MIS y SIS [44, 45], mostrando también la existencia de una capa de inversión en estas estructuras.

### **4.3 Cálculos realizados y resultados experimentales.**

Usando el modelo planteado y los valores reportados en [41] y con la finalidad de obtener los valores de los parámetros más importantes de la celda estudiada, se emplearon dos metodologías diferentes. La primera consistió en el empleo del conjunto de ecuaciones J-V derivadas para una unión  $p-n$ , con el apoyo de las ecuaciones pertinentes para el cálculo de la reflectancia. Por otra parte, se empleó un método empírico [7] que permite el cálculo del factor de llenado y la eficiencia de la celda con el conocimiento previo del voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito.

Además, se pronostican las características de las celdas solares de ITO-SiO<sub>x</sub>-nSi en función de diferentes parámetros que podría presentar el substrato empleado (velocidad de recombinación superficial, resistividad y longitud de difusión de portadores minoritarios).

Para los cálculos en este trabajo, el grosor del sustrato se tomó como  $d=500\mu\text{m}$ , mientras que el grosor y la resistencia de hoja de la película de ITO fueron tomados como  $t=80\text{nm}$  y  $R_s=30\Omega/\square$ , respectivamente. Consideramos el caso en el que la longitud de difusión de portadores minoritarios es menor al grosor del sustrato de silicio y supusimos que la tasa de recombinación en el contacto posterior del sustrato es infinita.

### 4.3.1 Cálculos empleando el modelo de unión p-n.

Con la finalidad de calcular los parámetros teóricos de las celdas solares, supusimos como válida la ecuación (3.21) [12] para las características J-V de estas celdas, tomando el valor de la constante de idealidad  $n=1$ .

El cálculo de la integral de la densidad de foto-corriente se basa en la distribución espectral de la radiación solar incidente, junto con los parámetros del silicio (coeficiente de absorción  $\alpha(\lambda)$ , longitud de difusión de portadores minoritarios  $L_p$  y el grosor del sustrato de silicio  $d$ ); esto de acuerdo con la ecuación (3.42) y que resulta del modelo de unión p-n con algunas simplificaciones obtenidas cuando se desprecia la contribución de corriente de la capa de inversión [23]

La reflectancia espectral  $R(\lambda)$  de la interfase ITO/Si se calculó mediante [46]:

$$R = \frac{(g_1^2 + h_1^2)e^{2\alpha_1} + (g_2^2 + h_2^2)e^{-2\alpha_1} + A \cos(2\gamma_1) + B \sin(2\gamma_1)}{e^{2\alpha_1} + (g_1^2 + h_1^2)(g_2^2 + h_2^2)e^{-2\alpha_1} + C \cos(2\gamma_1) + D \sin(2\gamma_1)} \quad (4.7)$$

Siendo:

$$g_1 = \frac{n_0^2 - n^2 - k^2}{(n_0 + n)^2 + k^2} \quad g_2 = \frac{n^2 - n_1^2 + k^2 - k_1^2}{(n + n_1)^2 + (k + k_1)^2}$$

$$h_1 = \frac{2n_0k}{(n_0 + n)^2 + k^2} \quad h_2 = \frac{2(nk_1 - n_1k)}{(n + n_1)^2 + (k + k_1)^2}$$

$$\alpha_1 = \frac{2\pi kt}{\lambda} \quad \gamma_1 = \frac{2\pi nt}{\lambda}$$

$$A = 2(g_1g_2 + h_1h_2) \quad B = (g_1h_2 - g_2h_1)$$

$$C = 2(g_1g_2 - h_1h_2) \quad D = (g_1h_2 + g_2h_1)$$

En donde  $n$ ,  $n_1$  y  $k$ ,  $k_1$  son los índices de refracción y coeficientes de extinción de la película de ITO y del silicio para una longitud de onda dada  $\lambda$  respectivamente, y  $t$  es el grosor de la película de ITO.

Debido a que el coeficiente de extinción de la película de ITO ( $k$ ) presenta valores suficientemente pequeños, (del orden de  $10^{-2}$  para las longitudes de ondas comprendidas en el rango 280nm - 1100nm), se puede tomar como aproximación adecuada el valor de cero.

Los valores empleados para  $n$ ; así como para  $n_1$   $k_1$  son mostrados en el apéndice 1.

Es importante subrayar que en los cálculos consideramos sólo los valores correspondientes a las longitudes de onda contenidas en el espectro solar cuya energía supere el ancho de banda prohibida del silicio, y que son aquellas son longitud de onda menor a 1100nm y que estén contenidas en el espectro incidente.

Los valores del índice de refracción del ITO se muestran en la figura (4-4).

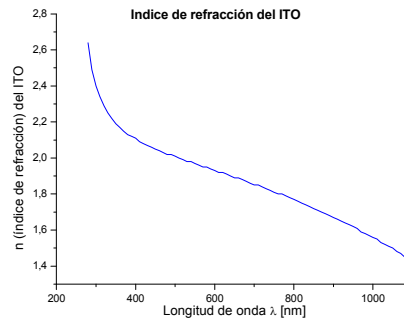


Figura 4-4. Índice de refracción de la película de ITO

La reflectancia y la transmitancia de la película de ITO con un grosor de 80nm se presentan en la figura 4-5, mostrando una transmitancia máxima de 0.9991 en 620nm y una mínima de 0.4071 en 360nm.

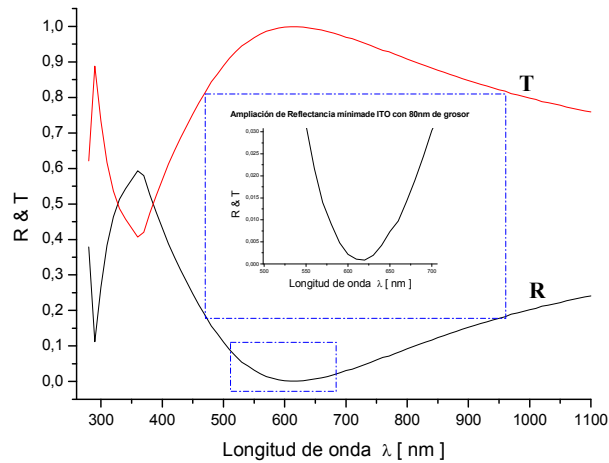


Figura 4-5. Reflectancia y Transmitancia para una película de ITO de 80nm de grosor depositada en un sustrato de silicio.

La figura 4-6 presenta una comparación de la reflectancia y transmitancia para la película de ITO con diferentes grosores; estas películas se depositaron sobre silicio; tanto en este cálculo como en el anterior se emplearon las constantes ópticas del ITO y silicio de acuerdo a Filmetrics Inc.[11].

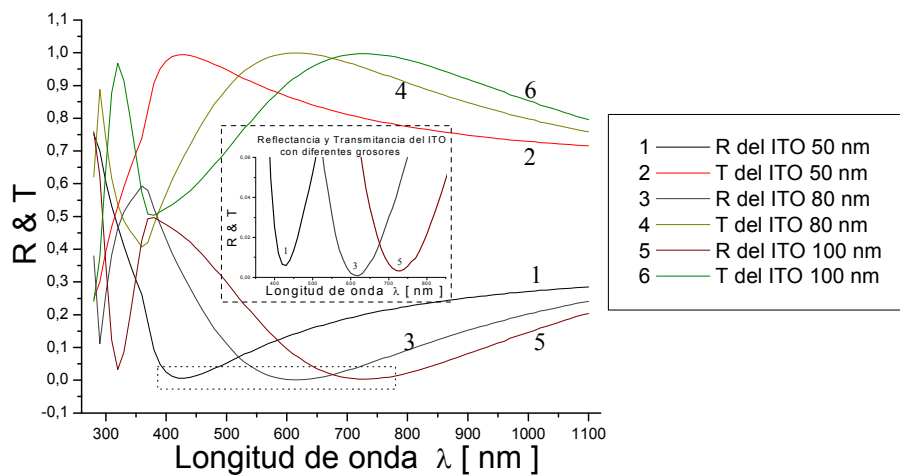


Figura 4-6. Reflectancia y Transmitancia para películas de ITO con diferentes grosores (50nm-100nm) depositadas en un substrato de silicio.

Las características de la estructura se calcularon empleando la distribución espectral  $F_{\lambda}$  de la radiación solar relacionada con las condiciones AM0 ( $136\text{mW}/\text{cm}^2$ ) y AM1.5 ( $100\text{mW}/\text{cm}^2$ ), de acuerdo a los estándares 2000 ASTM E-490-00 y ASTM G-173-03, respectivamente.

El voltaje de circuito abierto se calculó de acuerdo a la ecuación (3.43), usando la densidad de la corriente de saturación en obscuridad  $J_S$  expresada por la ecuación (3.20).

La figura 4-7 muestra la corriente de saturación calculada con la ecuación (3.20) para una longitud de difusión de 400 $\mu\text{m}$ . Se muestran de forma separada las contribuciones de cada término de la ecuación. El primer

término es la corriente de recombinación superficial  $J_{sg} = q \frac{n_i^2}{p} S$ , mientras

que el segundo término,  $J_{ps} = \frac{qn_i^2 D_p}{N_D L_p} \coth\left(\frac{d_n}{L_p}\right)$  representa la dependencia de

la corriente de saturación con respecto a las características del substrato (concentración de dopantes, grosor y longitud de difusión de portadores minoritarios). También se muestra la corriente de saturación para el caso ideal ( $S=0$  cm./seg.), cuando no existe generación en la superficie. En esta comparación, el incremento de la corriente de saturación debido a una mayor corriente de generación superficial se muestra claramente, y además se observa que este efecto será mayor para materiales con baja resistividad.

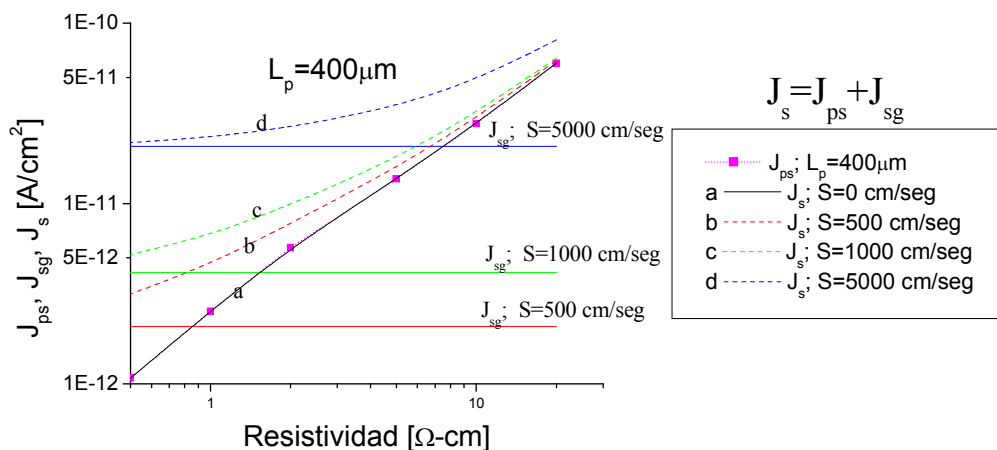


Figura 4-7. Corriente de saturación para diferentes velocidades de recombinación superficial y para substratos con diferente resistividad.

La naturaleza del espectro de radiación incidente sobre la celda define la cantidad de corriente que puede ser generada por la celda solar para cada longitud de onda.

La sensibilidad espectral de la celda (figura 4-8) fue calculada para diferentes valores de  $L_p$  empleando la ecuación 4.8

$$S(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{P_{opt}(\lambda)} \quad (4.8)$$

En la cual  $J_{ph}$  representa la densidad de corriente foto-generada para cada longitud de onda del espectro incidente ( $A/cm^2 \cdot nm$ ) y  $P_{opt}$  es la potencia óptica incidente por unidad de área por unidad de longitud de onda ( $W/cm^2 \cdot nm$ ).

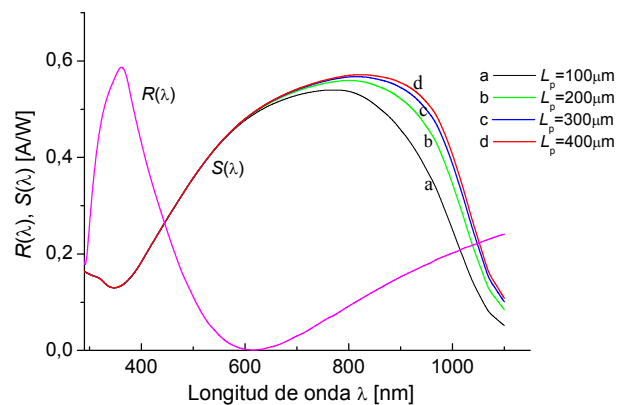


Figura 4-8. Sensibilidad espectral  $S(\lambda)$  y reflectancia  $R(\lambda)$  de la celda ITO-nSi.

Empleando la ecuación (3.42) calculamos la corriente foto-generada para los espectros AM0 y AM1.5 con sustratos que presentan diferentes longitudes de difusión.

La figura 4-9 muestra cómo la corriente foto-generada es mayor para sustratos con mejores características de longitud de difusión.

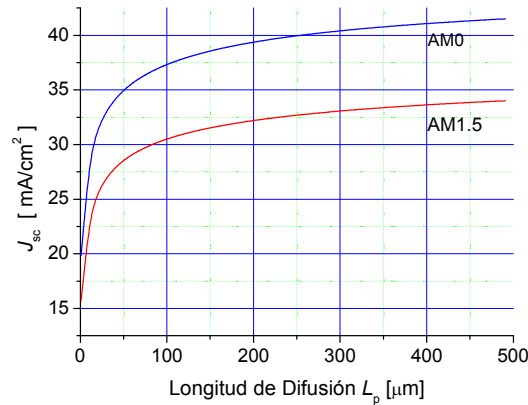


Figura 4-9. Corriente foto-generada por la estructura ITO-nSi para diferentes longitudes de difusión y espectros AM0 y AM1.5.

Adicionalmente, se realizaron cálculos con la finalidad de observar el efecto de la reflectancia del dispositivo sobre la corriente foto-generada, lo cual proporciona información acerca del porcentaje de corriente que no es generada debido a las pérdidas por reflexión. Los resultados se presentan en la tabla 4-1

<b>Modelo empleado:</b>	<b>AM0</b> <b>[A/cm²]</b>	<b>AM1.5</b> <b>[A/cm²]</b>
$J_{TOT} = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [(1-R)_\lambda F_\lambda (1 - e^{-\alpha w})] + \left[ (1-R)_\lambda F_\lambda \left( \frac{\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} e^{-\alpha w} \right) \left( \alpha L_p - \frac{\text{Cosh}\left(\frac{d}{L_p}\right) - e^{-\alpha d}}{\text{Senh}\left(\frac{d}{L_p}\right)} \right) \right] d\lambda$		
d=500um, Lp=400um, caso real ( $R \neq 0$ )	0.0413	0.03371
d=500, Lp=400um, caso ideal ( $R=0$ )	0.0473	0.038173
% de pérdida entre real e ideal para d=500um:	14.5%	13.05%

Tabla 4-1. Comparación de la corriente foto-generada para los casos real ( $R \neq 0$ ) e ideal ( $R=0$ ) con los espectros AM0 y AM1.5

Una vez obtenidas las corrientes foto-generada y de saturación, se calculó el voltaje de circuito abierto de la celda. Al incrementarse la corriente foto-generada con el incremento en la longitud de difusión (fig. 4-9), el voltaje de



circuito abierto crecerá de acuerdo con la ecuación (3.43). Esta ecuación también predice una disminución del voltaje de circuito abierto conforme la corriente de saturación se incrementa de acuerdo a la resistividad del sustrato (figura 4-7). Estas variaciones de  $V_{oc}$  se presentan en la figura 4-10 para diferentes resistividades de sustrato y distintas longitudes de difusión.

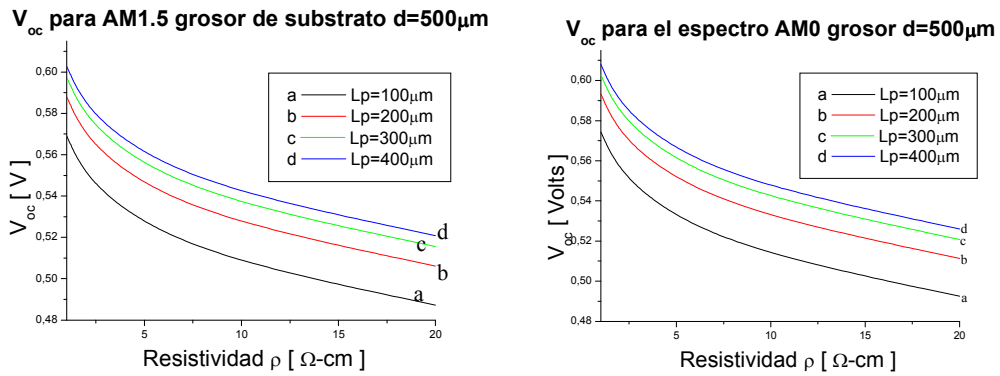


Figura 4-10. Dependencia de  $V_{oc}$  con la resistividad del sustrato para diferentes valores de  $L_p$ . Calculado para ambos espectros, AM1.5 y AM0

Para calcular de manera precisa las características  $I$ - $V$  de las celdas solares bajo iluminación, es necesario tomar en cuenta las resistencias en serie y paralelo de las celdas. Como primera aproximación, para simplificar la ecuación (3.21), se supuso que  $R_{SH} = \infty$ .

La resistencia en serie  $R_s$  de una celda cuadrada de lado  $l$  puede ser calculada de acuerdo con la ecuación 4.9 [47]:

$$R_s = \rho_{Si} \frac{d_{Si}}{A} + \frac{b+a}{l} \left( \frac{R_S^{ITO} d_{ITO}}{8l} + \frac{lR_{MC}}{2a} \right) \quad (4.9)$$

Donde  $\rho_{Si}$ ,  $R_S^{ITO}$ ,  $R_{MC}$  son la resistividad del sustrato de silicio y las resistencia de hoja de la película de ITO y del contacto metálico, respectivamente;  $d_{Si}$  y  $A$  son el grosor y el área del sustrato de silicio,  $d_{ITO}$  es el grosor del ITO;  $a$  es el ancho de las múltiples franjas del contacto

metálico, y  $b$  es la distancia entre los contactos metálicos adyacentes. La geometría de la celda es mostrada en la figura 4-11.

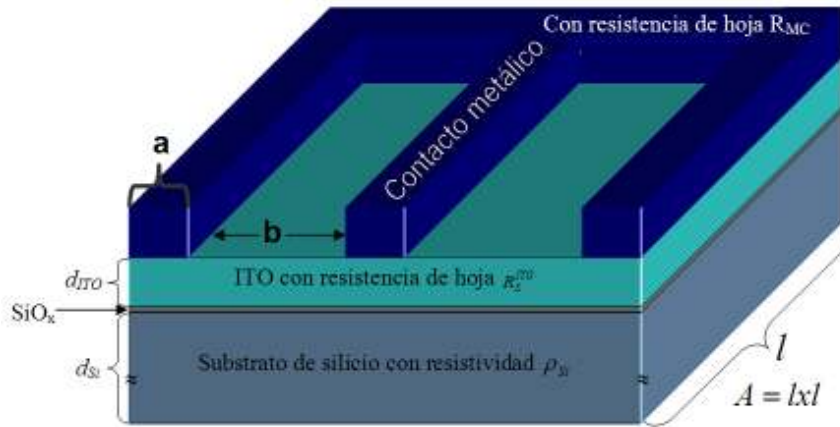


Figura 4-11. Dimensiones empleadas para el cálculo de  $R_S$  para una celda cuadrada de lado  $l$  y área  $A$  incluyendo el sustrato de silicio, la película de ITO y la rejilla metálica.

Los valores empleados para el cálculo de la resistencia en serie para la celda solar de acuerdo con [17] son:  $A=1 \text{ cm}^2$ ,  $l=1 \text{ cm}$ ,  $\rho_{Si}=10\Omega\text{-cm}$ ,  $R_S^{ITO}=30\Omega/\square$ ,  $R_{MC}=0.017\Omega/\square$ ,  $d_{Si}=0.05\text{cm}$ ,  $d_{ITO}=80\text{nm}$ ,  $a=0.01\text{cm}$ , y  $b=0.25\text{cm}$ , dando como resultado final un valor de  $R_S=0.96\Omega$ .

Debe considerarse una resistencia en serie adicional de  $0.84\Omega$ , la cual es introducida por la capa intermedia de  $\text{SiO}_x$ . El valor de esta resistencia fue determinado analizando las características  $I$ - $V$  de una estructura metal-aislante-silicio altamente dopado [41]. Estas características resultaron ser óhmicas para estructuras con un aislante obtenido cuando la muestra se sometió durante 10 minutos a una solución caliente de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . De esta forma, la resistencia en serie total de la celda con área de  $1 \text{ cm}^2$  fue de  $1.8\Omega$ .

Con la finalidad de obtener un mejor ajuste con los resultados experimentales, las características calculadas fueron corregidas incluyendo  $R_{SH}=300 \Omega$ .

En la figura 4-12 puede observarse una concordancia excelente entre las características experimentales y calculadas, así como de los parámetros de la celda (factor de llenado y eficiencia de conversión  $\eta$ ) para los espectros AM0 y AM1.5.

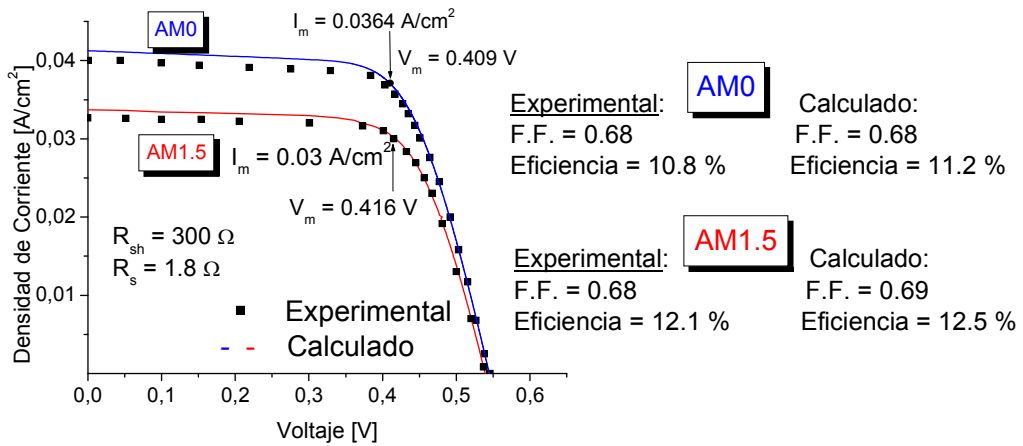


Figura 4-12. Características I-V experimentales y calculadas para la celda ITO/Si-n.

### 4.3.2 Cálculos del factor de llenado (F.F.) empleando el método empírico.

Además de las ecuaciones (3.20), (3.21), (3.42) y (3.43), así como las involucradas para el cálculo de la reflectancia y resistencia en serie, existe un método empírico [48] con el cual es posible calcular el factor de llenado (F.F.) de la celda, en base al conocimiento de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $R_S$  y  $R_{SH}$ .

Como primer paso, se define al voltaje normalizado como:

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{nkt/q} \quad (4.10)$$

Este voltaje normalizado se usa en la expresión empírica para calcular el factor de llenado  $FF_0$  para el caso ideal en el que  $R_S$  y  $R_{SH}$  no tengan ningún efecto en la celda y está dada por:

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} - 0.72)}{v_{oc} + 1} \quad (4.11)$$

Y que es válida o aplicable para valores de  $v_{oc} > 10$ .

Como es bien sabido, una celda real siempre tendrá asociada una resistencia en serie y otra en paralelo de acuerdo a la figura 3-4. Para introducir estas resistencias en este método, se define una resistencia característica de la celda:

$$R_{CH} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (4.12)$$

Una vez que se conoce  $R_{CH}$  con la ecuación (4.12), existen tres posibles casos: cuando  $R_{SH} \gg R_{CH}$  podría despreciarse el efecto de  $R_{SH}$ , cuando  $R_S \ll R_{CH}$ , podría despreciarse el efecto de  $R_S$ , y finalmente cuando ninguna condición anterior se cumple y se debe incluir el efecto de ambas resistencias.

En el primer caso,  $R_{SH} \gg R_{CH}$ , se puede definir una resistencia en serie normalizada:

$$r_s = \frac{R_S}{R_{CH}} \quad (4.13)$$

La expresión aproximada para factor de llenado, válida para  $v_{oc} > 10$  y  $r_s < 0.4$  es:

$$FF = FF_0(1 - r_s) \quad (4.14)$$

Donde  $FF_0$  se obtiene con la ecuación (4.11).

En el segundo caso,  $R_S \ll R_{CH}$ , se define una resistencia en paralelo normalizada:

$$r_{sh} = \frac{R_{SH}}{R_{CH}} \quad (4.15)$$

Entonces, la aproximación para calcular el factor de llenado, válida para  $v_{oc} > 10$  y  $r_s > 2.5$  está dada por:

$$FF = FF_0 \left\{ 1 - \frac{(v_{oc} + 0.7) FF_0}{v_{oc} r_{sh}} \right\} \quad (4.16)$$

Finalmente, para el caso en el que ambas resistencias son considerables, el factor de llenado de la celda quedará dado por:

$$FF = FF_0 (1 - r_s) \left\{ 1 - \frac{(v_{oc} + 0.7) \left( \frac{FF_0 (1 - r_s)}{r_{sh}} \right)}{v_{oc}} \right\} \quad (4.17)$$

Para tomar en cuenta los efectos tanto de  $R_S$  como de  $R_{SH}$ , los cálculos se realizaron mediante el uso de la ecuación (4.17), empleando los mismos valores para  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $R_S$  y  $R_{SH}$  calculados mediante las ecuaciones J-V características del modelo *p-n*.

De esta forma, con este método se obtuvo el factor de llenado (F.F.), y con ayuda de la ecuación (3.45) se calculó la eficiencia para los dos espectros AM1.5 y AM0. Los valores empleados fueron:  $L_p=400\mu\text{m}$ ,  $d=500\mu\text{m}$ ,  $R_S=1.8\Omega$ ,  $R_{SH}=300\Omega$ ,  $\rho=10\Omega\text{-cm}$  y  $S=500\text{cm/seg}$ .

Los resultados obtenidos empleando las ecuaciones (3.20), (3.21), (3.42), y (3.43) para obtener las características I-V de la celda, así como aquellos obtenidos con el método empírico, se presentan en la tabla 4-2, donde

también se incluyen los valores experimentales obtenidos para la misma celda [41].

<b>AM0</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Método Empírico</b>	<b>Cálculo con ecuaciones J-V</b>	<b>Valor Experimental</b>
$V_{oc} [V]$	0.545	0.545	0.54
$J_{sc} [mA/cm^2]$	41.3	41.3	40
$F.F.$	<b>0.688</b>	0.682	0.68
$\eta [\%]$	11.3	11.2	10.8
<b>AM1.5</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Método empírico</b>	<b>Cálculo con ecuaciones J-V</b>	<b>Valor Experimental</b>
$V_{oc} [V]$	0.545	0.545	0.539
$J_{sc} [mA/cm^2]$	33.7	33.7	40
$F.F.$	<b>0.697</b>	0.694	0.68
$\eta [\%]$	12.7	12.5	12.1

Tabla 4-2. Comparación de resultados experimentales y calculados (mediante dos métodos) para el análisis de la celda ITO/Si-n para el espectro AM0. Se usaron los valores:  $L_p=400\mu m$ ,  $d=500\mu m$ ,  $R_S=1.8 \Omega$ ,  $R_{SH}=300 \Omega$ ,  $\rho=10 \Omega -cm$ ,  $S=500cm/seg$ .

La obtención de los parámetros principales como el factor de llenado y la eficiencia de la celda, mediante el empleo de dos metodologías independientes, es una técnica que nos permite evaluar la precisión de los datos obtenidos. La comparación de los valores obtenidos por ambos métodos (tabla 4-2) deja en claro que el modelo de unión  $p-n$  empleado en este análisis es capaz de describir fielmente el comportamiento de la estructura fotovoltaica estudiada.

Contando con estas bases, se pueden predecir, de manera certera, las características de estructuras de este tipo (ITO/Si-n) variando las características del sustrato, es decir, empleando diferentes valores de resistividad, recombinación superficial, así como también diferentes valores de longitud de difusión. Esto permitirá conocer las características del sustrato que optimicen el rendimiento de los dispositivos basados en estructuras similares.

#### ***4.4 Mejoras pronosticadas con el modelo empleado.***

Empleando diferentes tasas de recombinación superficial ( $S=0$  cm./seg.,  $S=500$  cm./seg. y  $S=5000$  cm./seg.) y sustratos con diferentes resistividades, se realizó una comparación para una longitud de difusión de 400um. Lo anterior permite visualizar el efecto de la corriente de recombinación superficial sobre los principales parámetros fotovoltaicos de la celda.

La figura 4-13 muestra los resultados de esta comparación tanto para el espectro AM0 como para el AM1.5.

En ella se observa claramente la importancia de contar con superficies pasivadas para evitar las tasas de recombinación superficial elevadas, pues entre menor sea ésta, mejores parámetros fotovoltaicos se obtendrán.

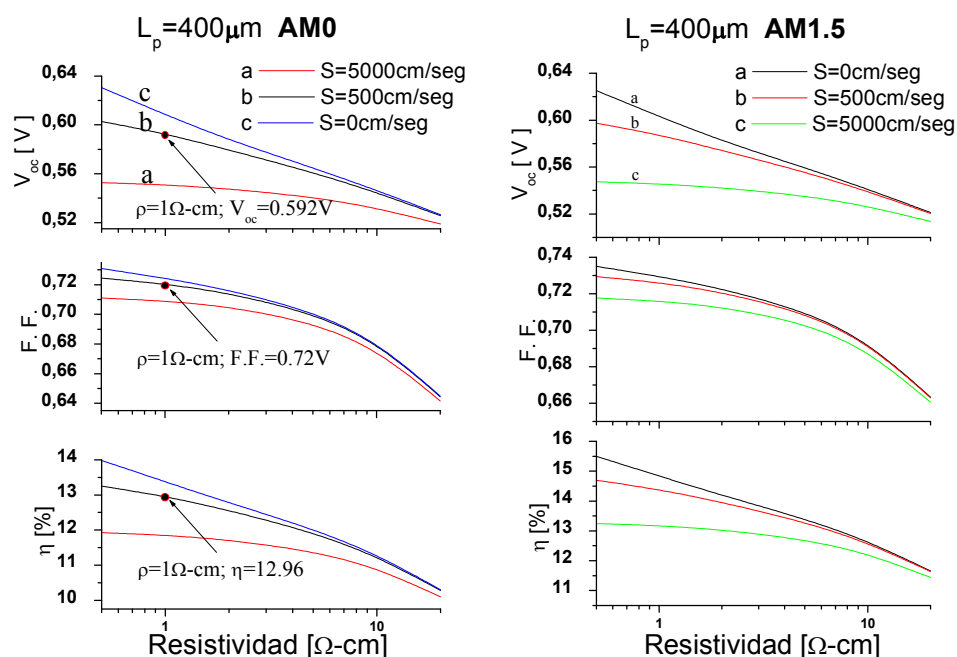


Figura 4-13. Parámetros calculados para celdas hipotéticas con  $L_p=400\mu\text{m}$ , diferentes resistividades de sustrato y longitudes de difusión. Esto se realizó para ambos estándares, AM0 y AM1.5

Si analizamos la figura 4-13 para AM0, y nos situamos en un sustrato de resistividad  $1\Omega\text{-cm}$ , y con  $L_p=400\mu\text{m}$ , podemos obtener  $V_{oc}=0.59\text{V}$ ,  $FF=0.72$  y una eficiencia fotovoltaica de hasta  $12.96\%$  para una tasa de recombinación de  $S=500\text{cm/seg}$ . Para una velocidad de recombinación  $S=5000\text{cm/seg}$  los parámetros se reducen a  $V_{oc}=0.55\text{V}$ ,  $FF=0.70$ , y la eficiencia es de apenas un  $11.83\%$ .

Se hace notorio que una velocidad de recombinación superficial baja, permitirá el empleo de sustratos con menor resistividad para mejorar substancialmente todas las características del dispositivo.

La reducción de la longitud de difusión disminuye directamente la posibilidad de que los portadores foto-generados sean colectados antes de recombinarse. Es de esperarse que un decremento en este parámetro derive en una reducción de la eficiencia total del dispositivo. Lo anterior se



corroboró al realizar cálculos con una longitud de difusión de 200 $\mu$ m. Los resultados se muestran en la figura 4-14.

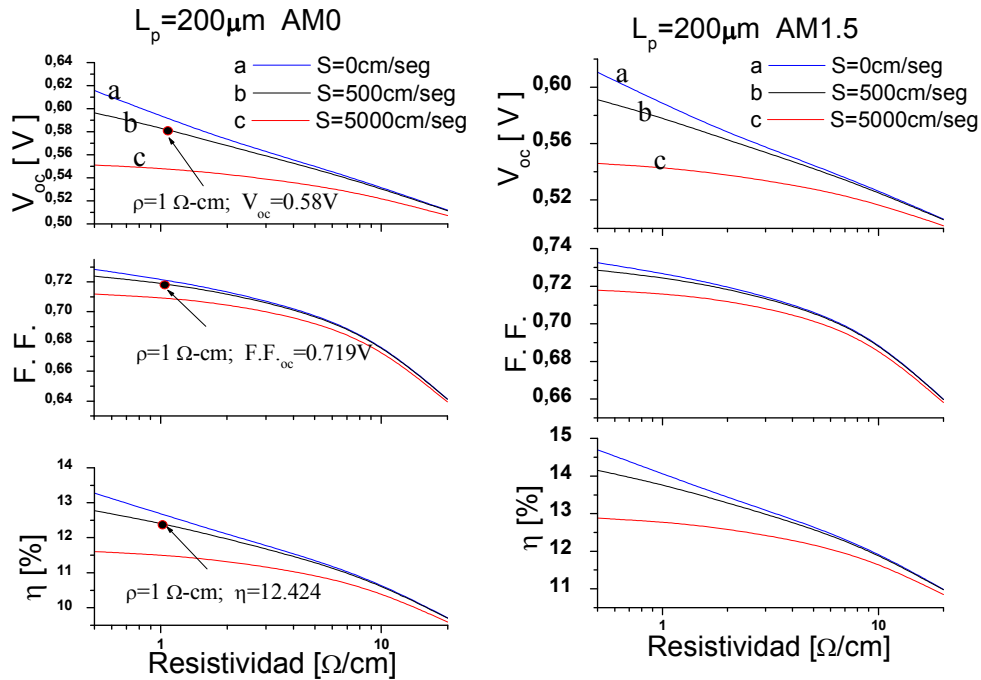


Figura 4-14. Parámetros calculados para celdas hipotéticas con  $L_p=200\mu\text{m}$ , diferentes resistividades de sustrato y longitudes de difusión. Se emplearon ambos estándares, AM0 y AM1.5

La figura 4-14 muestra la reducción en los parámetros de la celda para el caso de una  $L_p=200\mu\text{m}$  en comparación con aquellos obtenidos para  $L_p=400\mu\text{m}$  (figura 4-13).

Por ejemplo, para AM0 con un sustrato de resistividad 1 $\Omega$ -cm, y  $L_p=200\mu\text{m}$ , podríamos obtener voltajes de circuito abierto  $V_{oc}=0.58\text{V}$ ,  $FF=0.719$  y una eficiencia fotovoltaica de hasta 12.42% para una tasa de recombinación de  $S=500\text{cm/seg}$ .

Se analizó también en qué porcentaje los parámetros de la celda son afectados por la recombinación superficial y por la longitud de difusión

característica del material. En este análisis se realiza una comparación entre las gráficas 'c' de la figura 4-13 (caso ideal  $S=0$ ) y las gráficas 'a' ( $S=5000\text{cm/seg.}$ ) y 'b', ( $s=500\text{cm/seg.}$ ). Se realizaron cálculos para analizar las desviaciones del caso ideal antes descritas. En la figura 4-15 se muestran los resultados incluyendo diferentes longitudes de difusión y resistividades del substrato. Para cada caso se tiene que:

$$\Delta V_{oc} = 100 - \left( \frac{V_{oc}(S \neq 0)}{V_{oc}(S = 0)} \right) * 100 \quad (4.18)$$

$$\Delta FF = 100 - \left( \frac{FF(S \neq 0)}{FF(S = 0)} \right) * 100 \quad (4.19)$$

$$\Delta \eta = 100 - \left( \frac{\eta(S \neq 0)}{\eta(S = 0)} \right) * 100 \quad (4.20)$$

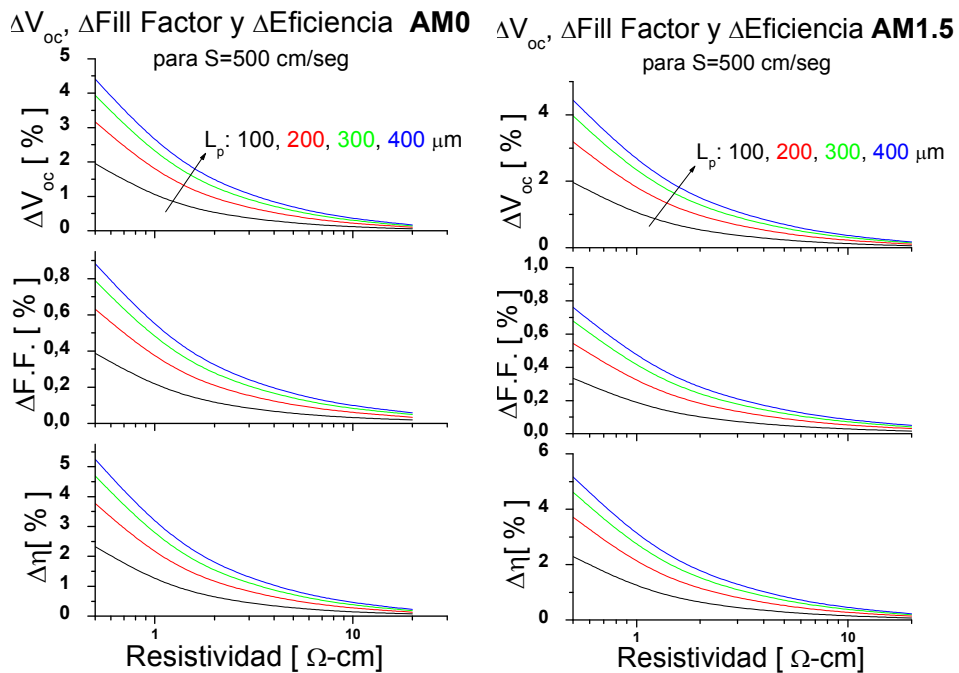


Figura 4-15. Porcentaje de variación de los parámetros de la celda comparando el caso ideal  $S=0\text{cm/seg.}$  con aquél en el que  $S=500\text{cm/seg.}$  Se emplearon ambos estándares, AM0 y AM1.5

No obstante la mejoras presentadas por substratos con menor resistividad para el caso de una recombinación superficial baja y elevado valor de longitud de difusión, en la figura 4-15 se observa que el caso más sensible a la existencia de la recombinación superficial, en este caso de 500cm/seg., es aquel substrato con una menor resistividad y una mayor longitud de difusión.

En la figura 4-16 se muestra la comparación anterior, pero para un caso con una velocidad de generación superficial mucho mayor ( $S=5000\text{cm/seg}$ ).

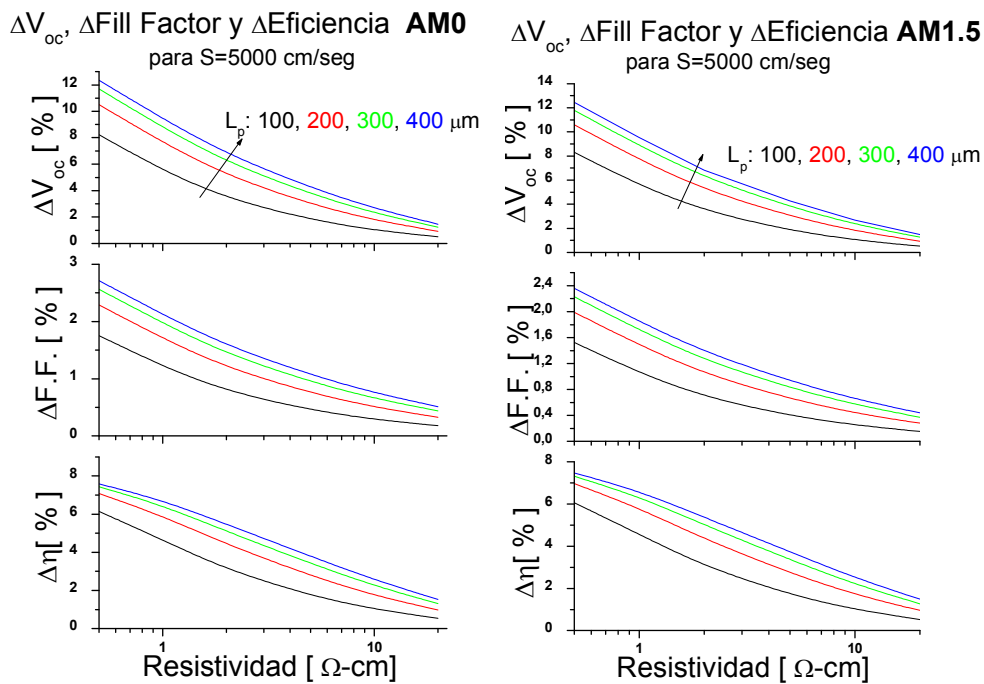


Figura 4-16. Variación de los parámetros de la celda comparando el caso ideal  $S=0\text{cm/seg}$  con aquél en el que  $S=5000\text{cm/seg}$ . Se emplearon ambos estándares, AM0 y AM1.5

Ahora la desviación con respecto al caso ideal es muy considerable, pues en el peor de los casos con  $L_p=400\mu\text{m}$  se llega a tener una diferencia de hasta un 12% menos de  $V_{oc}$  comparado con el caso ideal ( $S=0\text{cm/seg}$ ).

# 5. Conclusiones

---

## 5.1 Conclusiones generales.

El objetivo principal de este trabajo de investigación fue el desarrollar un modelo físico y matemático que describiera el comportamiento de celdas solares basadas en una estructura experimental ITO/Si-n de manera precisa y confiable; que permitiera también la formulación de una receta física y tecnológica para incrementar las características de estructuras similares.

Para esto, se estudiaron las principales características de los modelos físicos como unión *p-n* y *barrera Schottky* con los límites de aplicación de cada uno.

Se encontró que, de acuerdo a la resistividad del substrato empleado en la celda estudiada, el comportamiento de la celda solar podría ser descrito de manera fiel mediante el empleo del modelo de unión *p-n* lograda por inversión superficial del substrato.

La aplicación de este modelo en las celdas ITO/Si-n fabricadas en silicio con resistividad de  $10 \Omega\text{-cm}$  presentó una excelente concordancia entre los resultados teóricos y experimentales [41], así como con los cálculos teóricos de la eficiencia de las celdas solares con estructuras semiconductor-aislante-semiconductor [44, 45].

La fiabilidad del modelo empleado nos permitió formular una serie de recomendaciones para incrementar las características de celdas solares tipo ITO/Si-n. Se encontró que la eficiencia de estas celdas puede incrementarse

hasta 14% bajo condiciones de iluminación de AM1.5 empleando substratos de silicio con resistividad 1  $\Omega$ -cm.

Se encontró también que el empleo de substratos con resistividad menor a 1 $\Omega$ -cm el modelo de unión  $p$ - $n$  lograda por inversión superficial del substrato no es aplicable. En este caso sus características serán descritas por el modelo de barrera Schottky con eficiencia considerablemente menor que la de las celdas basadas en unión  $p$ - $n$  lograda por inversión superficial del substrato.

De esta forma las celdas solares basadas en estructuras ITO/Si- $n$  son prometedoras para la conversión de la energía solar debido a sus excelentes figuras de mérito y su relativo bajo costo.

## **5.2 Proyecto a futuro.**

La estructura estudiada en este trabajo presentó un comportamiento que puede ser descrito en base al modelo de unión  $p$ - $n$  por inversión superficial, (dentro de los límites en los cuales el modelo es aplicable). Este resultado nos invita a la realización de un nuevo estudio, en el cual se obtenga mediante alguna técnica simple la formación de la unión  $p$ - $n$  tan poco profunda que pudiera igualar la conseguida con la capa de inversión en la estructura ITO/Si- $n$ , pero con la ventaja de que la región  $p$  formada tenga la posibilidad de contribuir a la corriente foto-generada. Aunado a lo anterior, se plantea la posibilidad de depositar una capa de ITO que reduzca la resistencia de contacto con la rejilla metálica y a su vez haga las funciones de una capa que pasiva la superficie del silicio y sea antirreflejante.

Se realizaron cálculos para poder predecir las características de una estructura como la descrita, obteniéndose los resultados mostrados en la figura 5-1 para AM0 y AM1.5 en el caso en que se tiene una capa de ITO en

substrato de silicio y una unión  $p$ - $n$  con profundidad de 0.15 $\mu$ m. Los valores empleados para la realización de estos cálculos son: 80nm de grosor de la capa de ITO con  $R_S^{ITO}=30 \Omega/\square$ , grosor del substrato de 500 $\mu$ m, con resistividad  $\rho_{Si}=1 \Omega\text{-cm}$ , resistencia del contacto metálico  $R_{MC}=0.017\Omega/\square$ , resultando de acuerdo con la ecuación (4.9) en  $R_S=0.43\Omega$  y empleando  $R_{SH}=5000\Omega$  y  $L_p=200\mu\text{m}$  se tiene (fig. 5-1):

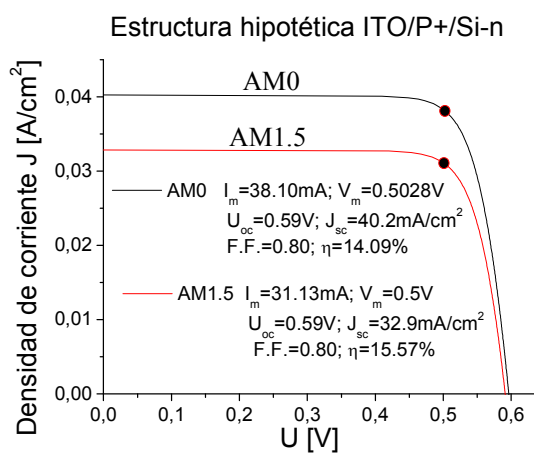


Figura 5-1. Características calculadas para la estructura hipotética ITO/Si-p+/Si-n

En vista de la mejora obtenida en los resultados teóricos de esta estructura ITO/Si-p+/Si-n comparada con la estructura ITO/Si-n, se prosiguió a fabricar estructuras  $p+n$  empleando difusión en hornos de procesos térmicos rápidos (RTP por sus siglas en inglés) y fuente dopante líquida aplicada en plato giratorio (SOD spin on dopant por sus siglas en inglés). Lográndose obtener profundidades de unión de hasta 0.18 $\mu$ m con resistencias de hoja de 144 a 158 $\Omega/\square$ .

Las estructuras fueron fabricadas en obleas de silicio tipo n (con orientación (100) y resistividad de 4  $\Omega\text{-cm}$ ).

Las difusiones se realizaron durante 20 segundos a temperaturas desde 800°C hasta 1100°C. Una vez realizada la formación de la unión  $p+n$  se

evaporó aluminio para formar los contactos. La caracterización realizada se basó en el análisis de las características I-V de las estructuras para determinar la corriente de saturación y con ello, predecir el voltaje de circuito abierto que se lograría.

Los mejores resultados obtenidos fueron corrientes de saturación del orden de  $3 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ , con lo cual, suponiendo una corriente foto-generada de  $30 \text{ mA/cm}^2$  podría obtenerse un voltaje de circuito abierto de  $0.54 \text{ V}$ , lo cual está por debajo del  $0.59 \text{ V}$ . obtenido mediante los cálculos teóricos.

Hasta este momento, no podemos concluir que este tipo de estructura supere experimentalmente los parámetros ofrecidos por la estructura estudiada ITO/Si-n.

En este sentido se plantea como trabajo futuro la depuración del proceso de fabricación de las estructuras ITO/Si-p+/Si-n con la finalidad de mejorar los parámetros logrados con la estructura ITO/Si-n y obtener un método simple de fabricación de celdas solares aun más eficientes que la estudiada en este trabajo.

# Apéndice I

Tabla 1. Valores empleados para el índice de refracción del ITO, índice de refracción y coeficiente de extinción del Silicio.

$\lambda$ [nm]	n del ITO	$n_1$ Silicio	$k_1$ Silicio	$\lambda$ [nm]	n del ITO	$n_1$ Silicio	$k_1$ Silicio
280	2.64	2.9	5.304	700	1.85	3.78	0.01216
290	2.49	4.42	5.2321	710	1.85	3.77	0.01166
300	2.4	5	4.1437	720	1.84	3.76	0.0109
310	2.34	5.01	3.5571	730	1.83	3.75	0.01039
320	2.29	5.02	3.2924	740	1.82	3.74	0.00988
330	2.25	5.09	3.1148	750	1.81	3.73	0.00911
340	2.22	5.21	3.0066	760	1.8	3.72	0.00846
350	2.19	5.44	2.9891	770	1.8	3.71	0.00793
360	2.17	6.08	2.9821	780	1.79	3.7	0.00741
370	2.15	6.82	2.0184	790	1.78	3.7	0.00689
380	2.13	6.45	0.94505	800	1.77	3.69	0.00636
390	2.12	5.94	0.5611	810	1.76	3.68	0.00584
400	2.11	5.56	0.38707	820	1.75	3.67	0.00544
410	2.09	5.28	0.29118	830	1.74	3.66	0.00337
420	2.08	5.07	0.22847	840	1.73	3.65	0.00289
430	2.07	4.91	0.19407	850	1.72	3.65	0.00259
440	2.06	4.79	0.1701	860	1.71	3.64	0.00229
450	2.05	4.68	0.14856	870	1.7	3.64	0.00202
460	2.04	4.58	0.13026	880	1.69	3.63	0.00176
470	2.03	4.49	0.1197	890	1.68	3.63	0.00163
480	2.02	4.41	0.09398	900	1.67	3.63	0.00154
490	2.02	4.35	0.0769	910	1.66	3.62	0.00132
500	2.01	4.29	0.07317	920	1.65	3.62	0.00117
510	2	4.24	0.06032	930	1.64	3.61	0.00097
520	1.99	4.19	0.05553	940	1.63	3.61	0.000935
530	1.98	4.15	0.04508	950	1.62	3.61	0.000768
540	1.98	4.11	0.04803	960	1.61	3.6	0.00069
550	1.97	4.08	0.04378	970	1.59	3.6	0.00062
560	1.96	4.05	0.03833	980	1.58	3.59	0.000515
570	1.95	4.02	0.03415	990	1.57	3.59	0.000475
580	1.95	3.99	0.02752	1000	1.56	3.59	0.00037
590	1.94	3.96	0.02973	1010	1.55	3.58	0.0002718
600	1.93	3.94	0.02498	1020	1.53	3.58	0.000229
610	1.92	3.92	0.02361	1030	1.52	3.57	0.00019
620	1.92	3.9	0.02202	1040	1.51	3.57	0.000149
630	1.91	3.88	0.02058	1050	1.5	3.57	0.00013
640	1.9	3.87	0.0177	1060	1.48	3.56	0.000102
650	1.89	3.85	0.01648	1070	1.47	3.56	7.90E-05
660	1.89	3.83	0.01577	1080	1.45	3.55	6.10E-05
670	1.88	3.82	0.0144	1090	1.44	3.55	4.40E-05
680	1.87	3.8	0.0134	1100	1.43	3.55	2.40E-05
690	1.86	3.79	0.01304				



## **Ecuaciones contenidas en la tesis**

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.1) \dots\dots\dots 17$$

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \quad (2.2) \dots\dots\dots 17$$

$$\frac{dW_\lambda}{d\lambda} = \frac{c}{4} \frac{dE_\lambda}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc / \lambda kT) - 1} \quad (2.3) \dots\dots\dots 18$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\mu n} \quad (2.4) \dots\dots\dots 20$$

$$n^* = n + ik \quad (2.5) \dots\dots\dots 22$$

$$n^* = \sqrt{\varepsilon^* \mu} = \sqrt{\varepsilon^*} \quad (2.6) \dots\dots\dots 22$$

$$n + ik = \sqrt{\varepsilon_1 + i\varepsilon_2} \quad (2.7) \dots\dots\dots 22$$

$$I(x) = e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (2.8) \dots\dots\dots 23$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{2\omega k}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.9) \dots\dots\dots 23$$

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2.10) \dots\dots\dots 24$$

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{(1-R)^2 e^{-2\alpha d}} \quad (2.11) \dots\dots\dots 24$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (2.12) \dots\dots\dots 26$$

$$D_p = \left(\frac{kT}{q}\right) \mu_p \quad (2.13) \dots\dots\dots 26$$

$$\mu_e = 65 + \frac{1265}{1 + \left(\frac{N}{8.5 \times 10^{16}}\right)^{0.72}} \text{ cm}^2 / V - s \quad (2.14) \dots\dots\dots 26$$

$$\mu_h = 47.7 + \frac{447.3}{1 + \left(\frac{N}{6.3 \times 10^{16}}\right)^{0.76}} \text{ cm}^2 / V - s \quad (2.15) \dots\dots\dots 26$$

$$I = I_S (e^{qV / kT} - 1) \quad (3.1) \dots\dots\dots 31$$

$$I = I_S \left\{ e^{q / kT (V - IR_S)} - 1 \right\} \quad (3.2) \dots\dots\dots 32$$

$$I = I_S \left\{ e^{q / kT (V - IR_S)} - 1 \right\} + \frac{V}{R_{SH}} \quad (3.3) \dots\dots\dots 32$$

$$D_p \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} - \mu_p E \frac{\partial(\delta p)}{\partial x} + g - \frac{\partial(\delta p)}{\tau_{p0}} = \frac{\partial(\delta p)}{\partial t} \quad (3.4) \dots\dots\dots 33$$

$$J_n = q\mu_n n_p E + qD_n \frac{dn_p}{dx} \quad (3.5) \dots\dots\dots 33$$

$$J_p = q\mu_p p_n E - qD_p \frac{dp_n}{dx} \quad (3.6) \dots\dots\dots 33$$

$$D_p \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} - \frac{\partial(\delta p)}{\tau_{p0}} = 0 \quad \acute{o} \quad \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} - \frac{\partial(\delta p)}{L_p^2} = 0 \quad (3.7) \dots\dots\dots 33$$

$$n_p - n_{p0} = A \cosh(x + X_p / L_n) + B \sinh(x + X_p / L_n) \quad (\text{lado P}) \quad (3.8) \dots\dots 33$$

$$p_n - p_{n0} = C \cosh(x - X_n / L_p) + D \sinh(x - X_n / L_p) \quad (\text{lado N}) \quad (3.9) \dots\dots 33$$

$$D_n \left( \frac{\partial n_p}{\partial x} \right) = S_p (n_p (-d_p) - n_{p0}) \quad (3.10) \dots\dots\dots 34$$

$$-D_p \left( \frac{\partial p_n}{\partial x} \right) = S_n (p_n (d_n) - p_{n0}) \quad (3.11) \dots\dots\dots 34$$

$$n_p - n_{p0} = n_{p0} (e^{qV/kT} - 1) \left[ \cosh(x + X_p / L_n) + \zeta_p \sinh(x + X_p / L_n) \right] \quad (3.12) \dots\dots\dots 34$$

$$p_n - p_{n0} = p_{n0} (e^{qV/kT} - 1) \left[ \cosh(x - X_n / L_p) - \zeta_n \sinh(x - X_n / L_p) \right] \quad (3.13) \dots\dots\dots 34$$

$$\zeta_n = \frac{S_n \cosh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) + \frac{D_p}{L_p} \sinh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right)}{\frac{D_p}{L_p} \cosh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) + S_n \sinh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right)} \quad (3.14) \dots\dots\dots 34$$

$$\zeta_p = \frac{S_p \cosh\left(\frac{d_p - X_p}{L_n}\right) + \frac{D_n}{L_n} \sinh\left(\frac{d_p - X_p}{L_n}\right)}{\frac{D_n}{L_n} \cosh\left(\frac{d_p - X_p}{L_n}\right) + S_p \sinh\left(\frac{d_p - X_p}{L_n}\right)} \quad (3.15) \dots\dots\dots 35$$

$$I_s = q \left( \frac{n_{p0} D_n}{L_n} \zeta_p + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \zeta_n \right) \quad (3.16) \dots\dots\dots 35$$

$$I_s = q \left( \frac{n_{p0} D_n}{L_n} \frac{S_p L_n}{D_n} + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \zeta_n \right) = q \left( \frac{n_i^2}{p_{p0}} S_p + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \zeta_n \right) \quad (3.17) \dots\dots\dots 35$$

$$\zeta_n = \frac{\cosh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right)} = \coth\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) \quad (3.18) \dots\dots\dots 35$$

$$I_s = q \left[ \frac{n_i^2}{p_{p0}} S_p + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \coth \left( \frac{d_n - X_n}{L_p} \right) \right] = q \left[ \frac{n_i^2}{p_{p0}} S_p + \frac{n_i^2 D_p}{N_D L_p} \coth \left( \frac{d_n - X_n}{L_p} \right) \right] \quad (3.19)$$

$$I_s = q \left[ \frac{n_i^2}{p_{p0}} S_p + \frac{n_i^2 D_p}{N_D L_p} \coth \left( \frac{d_n}{L_p} \right) \right] \quad (3.20) \dots\dots\dots 36$$

$$\ln \left( \frac{I + I_L}{I_s} - \frac{V - IR_s}{R_{SH} I_s} + 1 \right) = \frac{q}{kT} (V - IR_s) \quad (3.21) \dots\dots\dots 38$$

$$J_L = J_{DIF} + J_{Drift} = J_N + J_p + J_{Drift} \quad (3.22) \dots\dots\dots 39$$

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda) F(\lambda) [1 - R(\lambda)] \exp[-\alpha(\lambda)x] \quad (3.23) \dots\dots\dots 40$$

$$G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = 0 \quad (3.24) \dots\dots\dots 40$$

$$G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = 0 \quad (3.25) \dots\dots\dots 41$$

$$D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} + \alpha F(1 - R) \exp(-\alpha x) - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = 0 \quad (3.26) \dots\dots\dots 41$$

$$n_p - n_{p0} = A \cosh(x/L_n) + B \sinh(x/L_n) - \frac{\alpha F(1 - R) \tau_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \exp(-\alpha x) \quad (3.27) \dots\dots\dots 41$$

$$-D_n \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} = S_p (n_p - n_{p0}) \quad (3.28) \dots\dots\dots 41$$

$$n_p - n_{p0} \approx 0 \quad (3.29) \dots\dots\dots 42$$

$$n_p - n_{p0} = \left[ -\alpha F(1 - R) \tau_n / (\alpha^2 L_n^2 - 1) \right] \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_n}{D_n} + \alpha L_n \right) \sinh \left( \frac{(d_p - X_p) - x}{L_n} \right) + e^{-\alpha(d_p - X_p)} \left( \frac{S_p L_n}{D_n} \right) \sinh \frac{x}{L_n} + \cosh \frac{x}{L_n}}{\left( \frac{S_p L_n}{D_n} \right) \sinh \left( (d_p - X_p) / L_n \right) + \cosh \left( (d_p - X_p) / L_n \right)} - e^{-\alpha x} \right] \quad (3.30) \dots\dots\dots 42$$

$$J_n = q D_n \left( \frac{dn_p}{dx} \right)_{(d_p - X_p)} = \left[ q \alpha L_n F(1 - R) / (\alpha^2 L_n^2 - 1) \right] \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_n}{D_n} + \alpha L_n \right) - e^{-\alpha(d_p - X_p)} \left( \frac{S_p L_n}{D_n} \cosh \frac{(d_p - X_p)}{L_n} + \sinh \frac{(d_p - X_p)}{L_n} \right)}{\frac{S_p L_n}{D_n} \sinh \left( \frac{(d_p - X_p)}{L_n} \right) + \cosh \left( \frac{(d_p - X_p)}{L_n} \right)} - \alpha L_n e^{-\alpha(d_p - X_p)} \right] \quad (3.31) \dots\dots\dots 42$$

$$D_p \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} = S_n (p_n - p_{n0}) \quad (3.32) \dots\dots\dots 43$$

$$p_n - p_{n0} \approx 0 \quad (3.33) \dots\dots\dots 43$$

$$p_n - p_{no} = [-\alpha F(1-R)\tau_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)] e^{-\alpha(X_n + d_p)}$$

$$\left[ \frac{\cosh\left(\frac{x - (X_n + d_p)}{L_p}\right) e^{-\alpha(x - (X_n + d_p))} - \left(\frac{S_n L_p}{D_p}\right) \cosh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) e^{-\alpha(d_n - X_n)} + \sinh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) + \alpha L_p e^{-\alpha(d_n - X_n)}}{\frac{S_n L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right)} \right]$$

$$\left[ \sinh\left(\frac{x - (X_n - d_p)}{L_p}\right) \right]$$

(3.34) ..... 43

$$J_p = -qD_p \left(\frac{dp_n}{dx}\right)_{(d_p + X_n)} = [q\alpha L_p F(1-R) / (\alpha^2 L_p^2 - 1)] e^{-\alpha(d_p + X_n)}$$

$$\left[ \alpha L_p - \frac{\left(\frac{S_n L_p}{D_p}\right) \left[ \cosh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) - e^{-\alpha(d_n - X_n)} \right] + \sinh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) + \alpha L_p e^{-\alpha(d_n - X_n)}}{\frac{S_n L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right)} \right]$$

(3.35) ..... 43

$$J_{Drift} = qF(1-R)e^{-\alpha(d_p - X_p)} [1 - e^{-\alpha W}] \quad (3.36) \dots\dots\dots 44$$

$$J_L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_m} [J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{Drift}(\lambda)] d\lambda \quad (3.37) \dots\dots\dots 44$$

$$J_n = [q\alpha L_n F(1-R) / (\alpha^2 L_n^2 - 1)] \left[ \frac{\alpha L_n - e^{-\alpha(d_p - X_p)} \left( \sinh\left(\frac{d_p - X_p}{L_n}\right) \right)}{\cosh\left(\frac{(d_p - X_p)}{L_n}\right)} - \alpha L_n e^{-\alpha(d_p - X_p)} \right]$$

(3.38) ..... 44

$$J_n = qF(1-R) \left[ \frac{\alpha^2 L_n^2}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \right] [1 - e^{-\alpha(d_p - X_p)}] \quad (3.39) \dots\dots\dots 45$$

$$J_p = qF(1-R) \left[ \frac{\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} e^{-\alpha(d_p + X_n)} \right] \left[ \alpha L_p - \frac{\cosh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right) - e^{-\alpha(d_n - X_n)}}{\sinh\left(\frac{d_n - X_n}{L_p}\right)} \right] \quad (3.40) \dots\dots 45$$

$$J_L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_m} [J_p(\lambda) + J_{Drift}(\lambda)] d\lambda \quad (3.41) \dots\dots\dots 45$$

$$J_L = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ (1-R)_\lambda F_\lambda \left[ (1-e^{-\alpha W}) + \left( \frac{\alpha L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} e^{-\alpha W} \right) \left( \frac{\alpha L_p \operatorname{Cosh}\left(\frac{d}{L_p}\right) - e^{-\alpha d}}{\operatorname{Senh}\left(\frac{d}{L_p}\right)} \right) \right] \right\} d\lambda \quad (3.42) \dots\dots\dots 46$$

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_L}{J_S} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_L}{J_S}\right) \quad (3.43) \dots\dots\dots 46$$

$$F.F. = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}} \quad (3.44) \dots\dots\dots 47$$

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{opt}} = \frac{I_{SC} V_{OC} F.F.}{P_{opt}} \quad (3.45) \dots\dots\dots 49$$

$$I = I_S (e^{qV/nkT} - 1) - I_L \quad (3.46) \dots\dots\dots 52$$

$$I_S = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (3.47) \dots\dots\dots 52$$

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (3.48) \dots\dots\dots 52$$

$$\phi_B \approx \frac{2}{3} E_g \quad (3.49) \dots\dots\dots 53$$

$$I_S = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \exp(-\delta(q\phi_T)^{1/2}) \quad (3.50) \dots\dots\dots 55$$

$$V_{OC} = \left[ \frac{nkT}{q} \right] \left[ \ln\left(\frac{J_L}{A^* T^2}\right) + \frac{q\phi_B}{kT} + \delta(q\phi_T)^{1/2} \right] \quad (3.51) \dots\dots\dots 55$$

$$q\phi_S \geq 2(E_F - E_i) \quad (4.1) \dots\dots\dots 62$$

$$E_F - E_i = kT \ln(N_D / n_i) \quad (4.2) \dots\dots\dots 62$$

$$q\phi_S = q\phi_B - (E_C - E_F) \quad (4.3) \dots\dots\dots 63$$

$$E_C - E_F = kT \ln(N_C / N_D) \quad (4.4) \dots\dots\dots 63$$

$$p_s(x=0) = (n_i^2 / N_D) \exp(q\phi_s / kT) \quad (4.5) \dots\dots\dots 63$$

$$p_s(x=0) = (n_i^2 / N_C) \exp(q\phi_B / kT). \quad (4.6) \dots\dots\dots 63$$

$$R = \frac{(g_1^2 + h_1^2)e^{2\alpha_1} + (g_2^2 + h_2^2)e^{-2\alpha_1} + A \cos(2\gamma_1) + B \operatorname{sen}(2\gamma_1)}{e^{2\alpha_1} + (g_1^2 + h_1^2)(g_2^2 + h_2^2)e^{-2\alpha_1} + C \cos(2\gamma_1) + D \operatorname{sen}(2\gamma_1)} \quad (4.7) \dots\dots\dots 66$$

$$S(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{P_{opt}(\lambda)} \quad (4.8) \dots\dots\dots 71$$



# Figuras contenidas en la tesis

Figura 2-1. Características de la esfera solar.....	15
Figura 2-2.- Posición del Sol respecto al objetivo en la Tierra para la cual se considera la masa óptica de aire uno AM1.....	16
Figura 2-3. Espectro solar para AM0 y AM1.5.....	17
Figura 2-4. Comparación de los espectros AM1.5 y de un cuerpo negro a 6000K.....	18
Figura 2-5. Índice de refracción y coeficiente de extinción del Silicio.....	23
Figura 2-6. Coeficiente de absorción del silicio.....	24
Figura 3-1. Diagrama de bandas de una unión <i>p-n</i> .....	30
Figura 3-2 Geometría de una celda solar de unión P-N .....	32
Figura 3-3 Geometría de la unión <i>p-n</i> bajo condiciones de iluminación. ....	36
Figura 3-4. Circuito equivalente de la celda solar bajo condiciones de iluminación. .	37
Figura 3-5. Gráfica I-V de la unión P-N en obscuridad y bajo iluminación. ....	38
Figura 3-6. Gráfico de la generación en función de la profundidad.....	40
Figura 3-7. Principales parámetros de una celda solar.....	48
Figura 3-8. Influencia de las resistencias en serie y en paralelo sobre las curvas I-V de la celda solar.....	48
Figura 3-9. Diagrama de bandas previo a la formación del contacto metal-semiconductor. ....	50
Figura 3-10. Diagrama de bandas ideal una vez realizada la unión metal-semiconductor. ....	50
Figura 3-11. Diagrama de bandas de una estructura MIS. ....	54
Figura 4-1. Dependencia $J_{sc}$ - $V_{oc}$ de la estructura ITO-nSi estudiada. ....	61
Figura 4-2. Diagrama de bandas de energía de la estructura ITO/SiO <sub>x</sub> /Si-n en equilibrio .....	62
Figura 4-3. Modelos físicos posibles en coordenadas $p_s(x=0)/N_D$ en función de la concentración $N_D$ en el sustrato para diferentes alturas de barrera de potencial. ....	64
Figura 4-4. Índice de refracción de la película de ITO.....	68
Figura 4-5. Reflectancia y Transmitancia para una película de ITO de 80nm de grosor depositada en un sustrato de silicio. ....	68
Figura 4-6. Reflectancia y Transmitancia para películas de ITO con diferentes grosores (50nm-100nm) depositadas en un sustrato de silicio.....	69
Figura 4-7. Corriente de saturación para diferentes velocidades de recombinación superficial y para sustratos con diferente resistividad.....	70
Figura 4-8. Sensibilidad espectral $S(\lambda)$ y reflectancia $R(\lambda)$ de la celda ITO-nSi. ....	71
Figura 4-9. Corriente foto-generada por la estructura ITO-nSi para diferentes longitudes de difusión y espectros AM0 y AM1.5.....	72
Figura 4-10. Dependencia de $V_{oc}$ con la resistividad del sustrato para diferentes valores de $L_p$ . Calculado para ambos espectros, AM1.5 y AM0 .....	73
Figura 4-11. Dimensiones empleadas para el cálculo de $R_s$ para una celda cuadrada de lado $l$ y área $A$ incluyendo el sustrato de silicio, la película de ITO y la rejilla metálica. ....	74
Figura 4-12. Características I-V experimentales y calculadas para la celda ITO/Si-n. ....	75

Figura 4-13. Parámetros calculados para celdas hipotéticas con $L_p=400\mu\text{m}$ , diferentes resistividades de substrato y longitudes de difusión. Esto se realizó para ambos estándares, AM0 y AM1.5 .....	80
Figura 4-14. Parámetros calculados para celdas hipotéticas con $L_p=200\mu\text{m}$ , diferentes resistividades de substrato y longitudes de difusión. Se emplearon ambos estándares, AM0 y AM1.5 .....	81
Figura 4-15. Porcentaje de variación de los parámetros de la celda comparando el caso ideal $S=0\text{cm/seg.}$ con aquél en el que $S=500\text{cm/seg.}$ Se emplearon ambos estándares, AM0 y AM1.5 .....	82
Figura 4-16. Variación de los parámetros de la celda comparando el caso ideal $S=0\text{cm/seg}$ con aquél en el que $S=5000\text{cm/seg}$ . Se emplearon ambos estándares, AM0 y AM1.5 .....	83
Figura 5-1. Características calculadas para la estructura hipotética ITO/Si-p+/Si-n ..	86



# **Tablas contenidas en la tesis**

Tabla 4-1. Comparación de la corriente foto-generada para los casos real ( $R \neq 0$ ) e ideal ( $R=0$ ) con los espectros AM0 y AM1.5 .....	72
Tabla 4-2. Comparación de resultados experimentales y calculados (mediante dos métodos) para el análisis de la celda ITO/Si-n para el espectro AM0. Se usaron los valores: $L_p=400\mu\text{m}$ , $d=500\mu\text{m}$ , $R_s=1.8 \Omega$ , $R_{SH}=300 \Omega$ , $\rho=10 \Omega \text{ -cm}$ , $S=500\text{cm/seg}$ . .	78

# Referencias

---

- [1] E. J. Charlson and J. C. Lien, *J. Appl. Physics*, 46, 3982 (1975).
- [2] J. P. Pompon and P. Siffert, *J. Appl. Physics*, 47, 3248 (1976).
- [3] F. A. Lindholm, A. Neugroschel, S. C. Pao, J. G. Fossum and C. -T. Sah, *Proc 13<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, p. 1302 (1978).
- [4] R. Siegel and J.R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Mc Graw Hill, 1972, New York.
- [5] M. P. Thekackara, *The Solar Constant and the Solar Spectrum Measured from a Research Aircraft*, NASA, Technical Report No. R-351, 1970.
- [6] P. R. Gast, *Solar Radiation*, Handbook of Geophysics, ed. C. F. Campan et al. (N. Y., Macmilan 1970).
- [7] Martin A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*, Prentice Hall, New Jersey, 1982.
- [8] D. M. Caughey and R. E. Thomas, *Carrier Mobilities in Silicon Empirically Related to Doping and Field*, Proceedings of IEEE 55 (1967).
- [9] M. W. Barsoum, *Fundamentals of ceramics*, Institute of Physics Publishing, Bristol (2003).
- [10] P. V. Pavlov, A. F. Jojlov, *Física del estado sólido*, Editorial Mir, Moscu (1987).
- [11] [Http://www.Filmetrics.com](http://www.Filmetrics.com)
- [12] S. M. Sze, *Physics of semiconductor devices*, Wiley, New York, 1981.
- [13] J. P. McKelvey, *Física del estado sólido y de semiconductores*, Editorial Limusa, México, 1976.
- [14] M. B. Prince, *Silicon Solar Energy Converters*, *J. Appl. Phys.*, 26,534, (1955).
- [15] H. J. Hovel, *Solar Cells*, in R. K. Willardson and A. C. Beer, Eds., *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 11 Academic, New York, 1975, *Photovoltaic Materials and Devices for Terrestrial Applications*, IEEE Tech. Dig. Int. Electron Device Meet., 1979, p. 3.
- [16] Kurtin, S. McGill, T. C., and Mead C. A. *Physics Rev. Lett.* 22, 1433, (1969).
- [17] Mead, C. A. *Solid-State Electron.* 9, 1023 (1966).
- [18] Milnes, A. G. and Feucht, D. L. *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions* Academic Press, New York, (1972).

- [19] Bardeen, J. *Physics Rev.* 71, 717 (1947).
- [20] Heine, V. *Physics Rev. A* 138, 1689, (1965).
- [21] Lindau, I. et al *J. Vac. Sci. Technol.* 15, 1332, (1978).
- [22] Many, A., Goldstein, Y. and Grover, *Semiconductor surfaces*, pag.194, North Holland Publ., Amsterdam (1971).
- [23] Alan L. Fahrenbruch, Richard H. Bube, *Fundamentals of Solar Cells*, Academic Press, New York, 1983.
- [24] Card, H. C., Yang, E. S. *Appl. Phys. Lett.* 29, 51 (1976).
- [25] Card, H. C., and Rhoderick, E. H. *J. Phys.* 4, 1589 (1971).
- [26] Pulfrey, D. L. *IEEE Trans. Electron Devices* ED 23, 587 (1976).
- [27] Lillington, D. R., and Townsend, W. G. *Appl. Phys. Lett.* 28, 98, (1976).
- [28] M. A. Green, R. B. Godfrey, M. R. Willison, and A. W. Blakers, *High Efficiency Silicon minMIS Solar Cells*, Conf. Rec. 14<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Spec. Conf., IEEE, New York, 1980, p 684.
- [29] R. E. Thomas, C. F. Norman, and R. B. North, *High Efficiency MIS/Inversion Layer Silicon Solar Cells*, Conf. Rec. 14<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Spec. Conf., IEEE, New York, 1980, p 1350.
- [30] DeVisschere, P., and Pauwels, H. *Proc. CEC Photovoltaic Sol. Energy Convers. Conf. 1<sup>st</sup>*, 1977, p. 330, Reidel Publ., Dordrecht, Netherlands. (1978).
- [31] R. Singh, M. A. Green, and K. Rajkanan, *Review of Conductor-Insulator-Semiconductor (CIS) Solar Cells*, *Solar Cells* 3 95-148 (1981).
- [32] D. S. Ginley, C. Bright, *Transparent Conducting Oxides*, *MRS Bull.* 25 (8) (2000) 15.
- [33] L. Eckertová, *Physics of Solid Films*, Plenum Press, NY (1977).
- [34] Bach, D. Krause, *Thin Films on Glass*, Springer-Verlag-Berlin Heidelberg, Germany (1997).
- [35] M. Ohring, *Materials Science of Thin Films (Deposition and Structure)*, Academic Press, N. Y. (2002).
- [36] Shewchun, J., Green, M. A., and King, F. D. *Solid State Electron*, 17, 551, 563 (1974).
- [37] Dubow, J. B., Burk, D. E., and Sites, J. R. *Appl. Phys. Lett.* 29, 494, (1976).
- [38] Mizrah, T., and Adler, D. *Appl. Phys. Lett.* 29, 682, (1976).

- [39] J.C. Manificier et al., *Efficient sprayed  $In_2O_3$ : Sn n-type silicon heterojunction solar cell*, *Appl. Phys. Lett.* 1977, pp. 459-462.
- [40] T. Feng et al., *Efficient electron-beam-deposited ITO/nSi solar cells*, *J. Appl. Phys.* 50, 1979, pp. 4972-4974.
- [41] O. Malik, F.J. De la Hidalga-W, C. Zúñiga-I, A. Torres-J, and G. Ruiz-T, *Experimental and theoretical analysis of the conversion efficiency of ITO-nSi solar cells fabricated by a low cost spray deposition technique*, *Journal of non-crystalline solids* (2007).
- [42] S. Verhaverbeke et al., *The role of  $HO_2^-$  in SC-1 cleaning solutions*, *MRS Symposium Proceedings*, 477, 1977, pp. 47-56.
- [43] O. Malik, et al., *Room temperature electro luminescence from metal oxide-silicon surface-barrier diodes*, *Proceedings of the 16-th International Conference on Microelectronics (ICM 2004)*, December 06-08, 2004, Tunisia, pp.471-474.
- [44] J. Shewchun et al., *MIS and SIS Solar cells*, *IEEE Trans. Electron Devices* 27, 1980, pp. 705-715.
- [45] K.K. Ng et al., *A comparison of majority and minority carrier silicon MIS solar cells*, *IEEE Trans. Electron Devices*, 4, 1980, pp. 716-724.
- [46] O. S. Heavens, *Optical properties of thin solid films*, Dover, N. Y., 1991.
- [47] M. Wolf, *Progr. Astronaut and Rocket*, 3, 231 (1961).
- [48] M. A. Green, *General Solar Cell Factors...*, *Solid-State Electronics* 20 (1977), 265-266.