

10

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE CIENCIAS

**Análisis y Evaluación de Celdas Solares
de Tipo MIS y SIS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
F I S I C O
P R E S E N T A
JOSE ALVARO CHAVEZ CARVAYAR

MEXICO, D. F.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

PROLOGO	i
CAPITULO I	1
1.1 Semiconductores	1
1.2 Fotoconductividad	4
1.3 Unión p-n	6
1.4 Efecto fotovoltaico	11
1.5 Celdas solares	12
1.6 Unión metal-semiconductor	17
CAPITULO II	27
2.1 Descripción del dispositivo	28
2.2 Formación de las celdas SIS y MIS	36
2.3 Eficiencia en las celdas SIS y MIS	40
CAPITULO III	41
3.1 Efectos de algunos parámetros importantes en las celdas	41
3.2 Respuesta espectral	56
3.3 Eficiencia y mecanismos de pérdida	57
CAPITULO IV	65
4.1 Elaboración de las celdas	65
4.2 Resultados experimentales	69
CONCLUSIONES	85
BIBLIOGRAFIA	89
REFERENCIAS	91

PROLOGO

Cada segundo la Tierra recibe una gran cantidad de energía proveniente del Sol y, hasta ahora, el hombre no ha podido aprovecharla satisfactoriamente; sólo utiliza, en forma directa o indirecta, una pequeñísima parte de este torrente energético, ya que la madera, el carbón y el petróleo, fuentes tradicionales de energía, son en realidad energía solar almacenada por mucho tiempo.

Aun cuando en el mundo estas fuentes energéticas convencionales son actualmente suficientes, por ser de carácter no renovable son recursos limitados. Frente a este problema la energía solar se presenta como una fuente alternativa de excepcional importancia.

A pesar de que hasta la primera mitad del siglo actual la investigación sobre esta fuente de energía había tenido un desarrollo excesivamente lento, durante las últimas décadas gran parte del esfuerzo científico orientado hacia la búsqueda de energéticos no convencionales se ha dedicado al estudio y aprovechamiento de la energía solar.

Después de haber logrado energía eléctrica a partir de la energía solar mediante procedimientos indirectos, con grandes pérdidas durante el proceso, en abril de 1954 Daryl Chapin, Calvin Fuller y Gerald Pearson reportaron su descubrimiento efectuado en los laboratorios Bell: la Celda Solar, dispositivo fabricado a base de semiconductores capaz de convertir directamente la energía solar en energía eléctrica ¹. La primera celda que reportaron fue de silicio, con una eficiencia del 6% y a un costo muy elevado.

El crecimiento del programa espacial de los Estados Unidos en la década de los 60's aceleró el desarrollo de la tecnología de las celdas solares como fuente de energía para satélites y misiones espaciales.

En la década pasada y debido en gran parte a la crisis energética de 1973, se incrementó notablemente el interés por

CAPITULO I

INTRODUCCION

Las celdas solares son dispositivos semiconductores que, debido al potencial que representan como medio de transformación directa de energía solar en energía eléctrica para posibles aplicaciones terrestres, han sido objeto de numerosos estudios durante los últimos años.

1.1 SEMICONDUCTORES

Un semiconductor es generalmente una sustancia cristalina que puede ser un elemento simple, un compuesto químico o aun una sustancia orgánica, cuya conductividad eléctrica, de 10^{-10} a $10^4 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ *, se encuentra entre la de los conductores y la de los dieléctricos.

Los semiconductores más estudiados, el silicio y el germanio, tienen una red cristalina del tipo diamantina, representada en la figura 1.1, donde los cuatro electrones de valencia de cada átomo son compartidos con los átomos vecinos formando cuatro enlaces covalentes; la energía necesaria para arrancar estos electrones y formar en el semiconductor portadores de carga libres puede ser comunicada por diferentes medios, ya sea por medios térmicos, por aplicación de intensos campos eléctricos o por radiación.

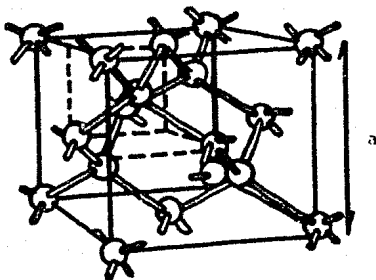


Figura 1.1 Red cristalina del tipo del diamante, donde a es la constante de la red.

PROLOGO

Cada segundo la Tierra recibe una gran cantidad de energía proveniente del Sol y, hasta ahora, el hombre no ha podido aprovecharla satisfactoriamente; sólo utiliza, en forma directa o indirecta, una pequeñísima parte de este torrente energético, ya que la madera, el carbón y el petróleo, fuentes tradicionales de energía, son en realidad energía solar almacenada por mucho tiempo.

Aun cuando en el mundo estas fuentes energéticas convencionales son actualmente suficientes, por ser de carácter no renovable son recursos limitados. Frente a este problema la energía solar se presenta como una fuente alternativa de excepcional importancia.

A pesar de que hasta la primera mitad del siglo actual la investigación sobre esta fuente de energía había tenido un desarrollo excesivamente lento, durante las últimas décadas gran parte del esfuerzo científico orientado hacia la búsqueda de energéticos no convencionales se ha dedicado al estudio y aprovechamiento de la energía solar.

Después de haber logrado energía eléctrica a partir de la energía solar mediante procedimientos indirectos, con grandes pérdidas durante el proceso, en abril de 1954 Daryl Chapin, Calvin Fuller y Gerald Pearson reportaron su descubrimiento efectuado en los laboratorios Bell: la Celda Solar, dispositivo fabricado a base de semiconductores capaz de convertir directamente la energía solar en energía eléctrica ¹. La primera celda que reportaron fue de silicio, con una eficiencia del 6% y a un costo muy elevado.

El crecimiento del programa espacial de los Estados Unidos en la década de los 60's aceleró el desarrollo de la tecnología de las celdas solares como fuente de energía para satélites y misiones espaciales.

En la década pasada y debido en gran parte a la crisis energética de 1973, se incrementó notablemente el interés por

la energía solar tanto en países altamente industrializados como en países en vías de desarrollo, considerándola como una fuente que satisfará algunas de las necesidades energéticas del hombre.

Si bien las celdas solares tienen ciertas ventajas como son: la ausencia en principio de movimiento mecánico, la ausencia de contaminación y un mantenimiento casi nulo, tienen también limitaciones, algunas de carácter fundamental que reflejan la dificultad de controlar diversos parámetros durante su fabricación, conduciendo a dispositivos con una eficiencia de conversión muy pobre y a un costo todavía elevado. La constante investigación sobre celdas solares que permita superar en parte estas limitaciones, conduce al estudio tanto de diversos materiales como de diferentes estructuras.

El objetivo de este trabajo es el presentar algunos de los estudios y resultados que se han efectuado en las áreas teóricas y experimentales sobre un nuevo tipo de celdas solares: SIS y MIS, formadas por tres regiones principales: semiconductor-aislador-semiconductor y metal-aislador-semiconductor respectivamente.

En el primer capítulo se hace referencia al marco teórico sobre el transporte de corriente que se efectúa en los dispositivos semiconductores, en las uniones de estos materiales y sobre el funcionamiento de las celdas solares que sirven como punto de partida para el estudio de las celdas SIS y MIS.

La estructura de estas celdas y su principio de funcionamiento se presentan en el capítulo II.

En el tercer capítulo se consideran algunos trabajos teóricos y se muestran las curvas esperadas de las características I-V de estas celdas. Finalmente, en el capítulo IV, se incluyen trabajos experimentales típicos y se ilustran los resultados con curvas de las características I-V ahora obtenidas en forma experimental; se realiza una comparación entre los resultados teóricos y experimentales y se analizan las posibles ventajas de estas celdas.

CAPITULO I

INTRODUCCION

Las celdas solares son dispositivos semiconductores que, debido al potencial que representan como medio de transformación directa de energía solar en energía eléctrica para posibles aplicaciones terrestres, han sido objeto de numerosos es tudios durante los últimos años.

1.1 SEMICONDUCTORES

Un semiconductor es generalmente una sustancia cristalina que puede ser un elemento simple, un compuesto químico o aun u na sustancia orgánica, cuya conductividad eléctrica, de 10^{-10} a $10^4 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ *, se encuentra entre la de los conductores y la de los dieléctricos.

Los semiconductores más estudiados, el silicio y el germa nio, tienen una red cristalina del tipo diamantina, representa da en la figura 1.1, donde los cuatro electrones de valencia de cada átomo son compartidos con los átomos vecinos formando cua tro enlaces covalentes; la energía necesaria para arrancar es tos electrones y formar en el semiconductor portadores de carga libres puede ser comunicada por diferentes medios, ya sea por medios térmicos, por aplicación de intensos campos eléctricos o por radiación.

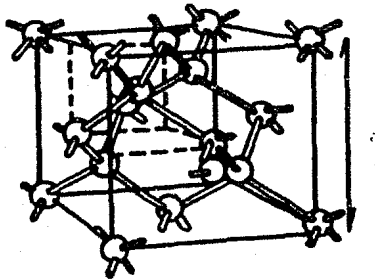


Figura 1.1 Red cristalina del tipo del diamante, donde a es la constante de la red.

Semiconductores intrínsecos.- En un cristal ideal, es decir, que no contiene impurezas y cuya estructura de red es perfecta, los electrones se pueden liberar térmicamente de los enlaces covalentes y convertirse en electrones libres; sin embargo, hay que tener presente que el desprendimiento de un electrón provoca que en su lugar se localice un hueco, equivalente a una carga positiva igual en magnitud a la del electrón.

En presencia de un campo eléctrico externo, cada electrón libre se desplaza y transporta una carga, es decir constituye una corriente eléctrica; este movimiento de electrones se produce en sentido contrario al movimiento de los huecos; así, la corriente eléctrica está formada por dos componentes, la corriente electrónica y la corriente por huecos.

La ruptura del enlace covalente y la correspondiente aparición de un electrón libre y un hueco se denomina "generación de pares electrón-hueco"; en un semiconductor intrínseco el número de electrones libres es igual al número de huecos libres. Si un hueco es llenado por un electrón libre al proceso se le llama recombinación

Esta conductividad, debida al movimiento de los electrones y huecos generados al romperse el enlace, se denomina conductividad intrínseca.

A temperatura de cero grados Kelvin, en la estructura de bandas de energía de un semiconductor intrínseco, la banda de valencia completamente llena y la banda de conducción vacía se encuentran separadas por una región de energías prohibidas E_g , figura 1.2. A esta temperatura el semiconductor se comporta como un aislador.

Al suministrarle energía al cristal, al incrementar la temperatura por ejemplo, algunos de los electrones de la banda de valencia pueden adquirir suficiente energía para alcanzar los niveles energéticos desocupados en la banda de conducción y convertirse en portadores de carga libres.

La conductividad eléctrica de los semiconductores intrínsecos en función de la temperatura tiene la forma

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\beta/T),$$

1.1

donde σ_0 y β son constantes y T es la temperatura en grados Kelvin.

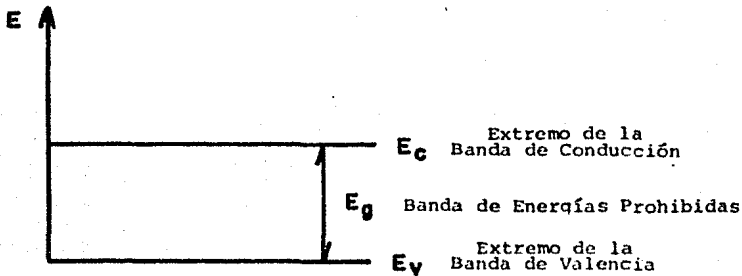


Figura 1.2 Representación esquemática de las bandas de energía de un semiconductor intrínseco.

Semiconductores extrínsecos.- La introducción de un elemento extraño en un semiconductor intrínseco puede modificar fuertemente su conductividad y, al mismo tiempo, lo convierte en un semiconductor extrínseco; la conductividad originada por la impureza introducida es la conductividad extrínseca.

Hay dos tipos de impurezas; a las impurezas capaces de ceder electrones se les denomina impurezas donadoras y los semiconductores que las contienen son del tipo n, mientras que a las impurezas capaces de crear huecos se les denomina aceptoras y los semiconductores son del tipo p. En los semiconductores tipo n la concentración de electrones libres es mucho mayor que la de los huecos; en este caso los electrones son portadores de carga mayoritarios y los huecos portadores de carga minoritarios. En los semiconductores tipo p, los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones los portadores minoritarios.

Para que una impureza, donadora por ejemplo, ceda su electrón a la banda de conducción, es necesario aplicarle una pequeña cantidad de energía; así, aun cuando en un semiconductor estén presentes pequeñas cantidades de impurezas en el cero abso-

luto no hay electrones o huecos libres. A bajas temperaturas las impurezas se ionizan; una vez ionizadas la conductividad cambia un poco al aumentar la temperatura, hasta alcanzar temperaturas en donde la conductividad intrínseca comienza a dominar sobre la conductividad debida a las impurezas. En el silicio (envenenado con 10^{16} cm^{-3} de arsénico) la conductividad es casi constante en tre 100 y 500° K, como se puede observar en la figura 1.3.

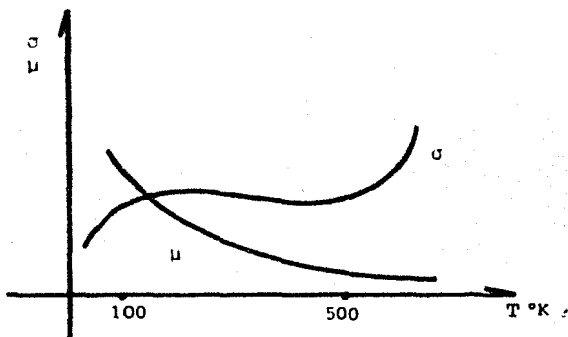


Figura 1.3 Conductividad σ (y movilidad $\mu = \sigma/en$) en función de la temperatura para un semiconductor con impurezas.

En el diagrama de bandas de energía, la introducción de impurezas donadoras o aceptoras se manifiesta por la aparición de niveles localizados en la banda de energías prohibidas, figura 1.4; ahora, para ionizar alguno de los átomos de impurezas y crear portadores de carga libres, ya sean electrones o huecos, se necesita mucha menor energía que E_g , la energía de la banda prohibida.

1.2 FOTOCONDUCTIVIDAD

El proceso básico de la fotoconductividad es la absorción de fotones por el semiconductor; esto provoca portadores de carga libres adicionales que modifican la conductividad del material.

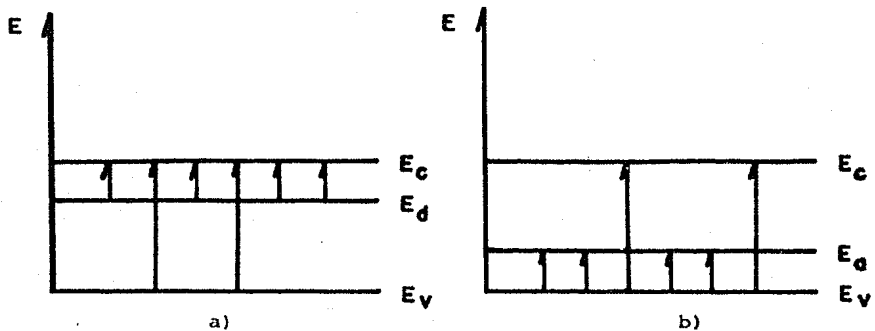


Figura 1.4 Diagramas energéticos para semiconductores extrínsecos; a) tipo n y b) tipo p.

Si la energía de los fotones incidentes es mayor o igual que el ancho de la banda de energías prohibidas E_g , al ser absorbidos por el cristal producen pares electrón-hueco; los electrones pasan a la banda de conducción durante un corto tiempo después del cual pueden recombinarse. Al intervalo de tiempo en que una partícula libre existe antes de recombinarse se le llama tiempo de vida τ y la distancia promedio que un portador viaja en su tiempo de vida es la longitud de difusión L :

$$L = (D \tau)^{1/2} \quad \text{con} \quad D = \mu (kT/e), \quad 1.2$$

D es la constante de difusión, μ es la movilidad del portador, k es la constante de Boltzmann, e es la carga del electrón y T la temperatura absoluta.

El hueco en la banda de valencia y el electrón en la banda de conducción contribuyen a la conductividad; este es el caso de fotoconductividad intrínseca.

En un semiconductor envenenado, si el fotón ioniza una impureza, ya sea donadora o aceptora, tan solo producirá un portador libre y la energía requerida será menor que la energía de la banda prohibida del semiconductor, esta es la fotoconductividad extrínseca, figura 1.5.

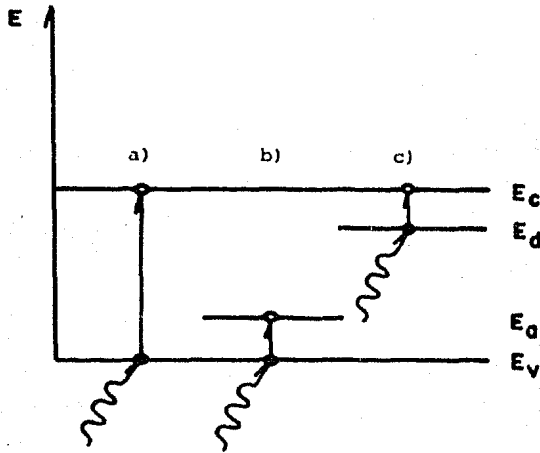


Figura 1.5 Fotoconductividad; a) intrínseca, b) y c) por impurezas.

1.3 UNION P-N

Ya que el principio de funcionamiento de las celdas solares de homounión se basa en los fenómenos producidos por la capa que separa dos materiales de diferente tipo de conductividad, es necesario calcular las características I-V para una unión rectificadora p-n.

Al efectuar conceptualmente un contacto entre dos semiconductores, uno tipo n y otro tipo p, cuyas concentraciones N_D de donadores en el primero y N_A de aceptores en el segundo son iguales, comienza la difusión de portadores mayoritarios a causa de los gradientes iniciales de las concentraciones. Los electrones viajarán de la región n a la región p y los huecos de la región p a la región n; al separarse así los electrones y los huecos producen un campo eléctrico dirigido de la región n a la región p que se opone a la difusión de los portadores de carga; al continuar este proceso se incrementa aún más el campo eléctrico hasta que en algún momento la fuerza de éste impide la difusión y la unión llega a un estado de equilibrio termodinámico. En es

te estado, en el límite de la región n hay una deficiencia de e lectrones y se observa una carga positiva debida a los iones fi jos de las impurezas donadoras, análogamente, en el límite de la región p se encuentra una deficiencia de huecos y se muestra una carga negativa debida a los iones fijos de las impurezas acepto ras.

En el límite del contacto de los dos semiconductores existe te ahora una región vacía de portadores mayoritarios la cual con tiene iones fijos que forman una barrera de potencial; las car- gas fijas no compensadas producen un campo eléctrico dirigido de la región n a la región p, figura 1.6.

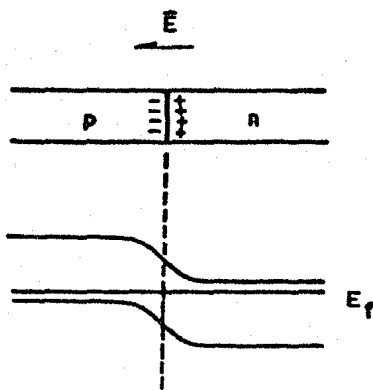


Figura 1.6 Separación de cargas y aparición del campo eléctrico en una unión p-n.

En equilibrio, algunos de los electrones de la región n tie nen suficiente energía para superar la barrera de potencial y di fundirse en la región p donde se convierten en portadores mino ritarios y, después de cierto tiempo, pueden recombinarse. Esta corriente de recombinación J_{nr} es balanceada por una corriente de electrones generados térmicamente en la región p y que se di funden hacia la región n donde se convierten en portadores ma yoritarios; ésta es la corriente de generación J_{ng} .

Para los huecos se tiene también una corriente de recombinación J_{pr} que va de la región p a la región n acompañada por una corriente J_{pg} que consta de huecos generados térmicamente en la región n y que logran difundirse hacia la región p.

En equilibrio, el flujo neto de corriente a través de la unión es cero. Este estado se caracteriza por la igual posición energética del nivel de Fermi en el sistema, figura 1.7.

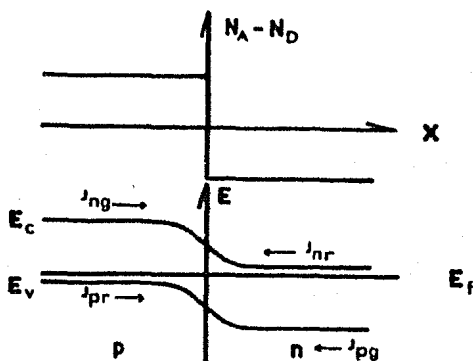


Figura 1.7 Unión p-n abrupta, en equilibrio.

Al aplicar un voltaje externo a la unión, si la región n se conecta a la terminal negativa y la región p a la positiva, es decir se aplica una polarización directa, figura 1.8, el campo externo se opone al campo formado en la unión (por las cargas fijas) reduciendo la altura de la barrera de potencial; así, un mayor número de portadores mayoritarios puede superar esta barrera disminuida. Al aumentar el voltaje externo estas corrientes de recombinación, J_{nr} y J_{pr} , aumentan hasta que la barrera de potencial desaparece y la resistencia de la unión será igual a la resistencia del volumen en el semiconductor. Mientras tanto, el flujo de portadores minoritarios permanece constante debido a que estas corrientes de generación, J_{ng} y J_{pg} , sólo están limitadas por la temperatura y, como resultado, se tiene una corriente neta relativamente grande.

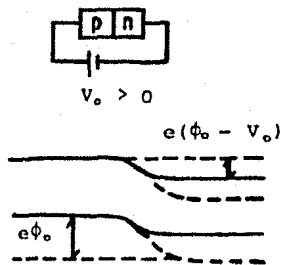


Figura 1.8 Diagrama de bandas de energía de una unión p-n, bajo el efecto de una polarización directa.

Si se invierte la polaridad de la fuente externa, polarización inversa, figura 1.9, la altura de la barrera de potencial aumenta y crece la acción repulsiva sobre los portadores mayoritarios; J_{nr} y J_{pr} se ven reducidas, pero no se impide la circulación de los portadores minoritarios a través de la unión.

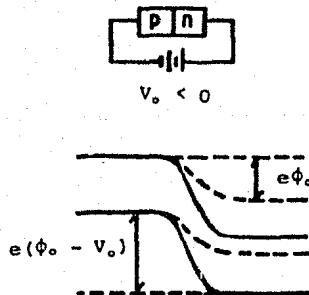


Figura 1.9 Diagrama de bandas de energía de una unión p-n, bajo el efecto de una polarización inversa.

Bajo esta condición, conforme se incrementa el voltaje de

polarización inversa la corriente tiende a un valor negativo pequeño conocido como densidad de corriente inversa de saturación.

CARACTERISTICAS I-V DE UNA UNION P-N

Ya que en equilibrio, el flujo de recombinación J_{nr} de portadores mayoritarios que va de la región n a la región p se con-
trarresta por la corriente J_{ng} de electrones generados térmica-
mente en la región p y que se difunden a la región n, se tiene
que:

$$J_{nr} - J_{ng} = 0 \quad \text{de donde} \quad J_{ng} = J_{nr}, \quad 1.3$$

y en forma similar para los huecos

$$J_{pr} - J_{pg} = 0 \quad \text{o bien} \quad J_{pr} = J_{pg}. \quad 1.4$$

Al aplicar un voltaje externo V_o , en polarización directa, las corrientes de recombinación aumentan mientras que las de ge-
neración permanecen constantes; el número de portadores que tie-
nen suficiente energía para sobrepasar la barrera de potencial
de la unión es proporcional a: $\exp\{-e(\phi_o - V_o)/kT\} = C \exp(eV_o/kT)$; 1.5
así J_{nr} y J_{pr} son proporcionales a $\exp(eV_o/kT)$ y además, pa-
ra satisfacer la condición de equilibrio:

$$J_{nr} = J_{ng} \exp(eV_o/kT); \quad 1.6$$

$$J_{pr} = J_{pg} \exp(eV_o/kT), \quad 1.7$$

entonces, en base a la figura 1.7

$$J_p = J_{pr} - J_{pg} = J_{pg} (\exp(eV_o/kT) - 1); \quad 1.8$$

$$J_n = J_{nr} - J_{ng} = J_{ng} (\exp(eV_o/kT) - 1), \quad 1.9$$

finalmente, la relación entre el voltaje aplicado y la densidad
de corriente eléctrica J estará expresada por

$$J = J_p + J_n = (J_{pg} + J_{ng}) \{\exp(eV_o/kT) - 1\} \quad 1.10$$

$$= J_o [\exp(eV_o/kT) - 1] \quad 1.11$$

donde J_o , la densidad de corriente inversa de saturación, es la suma de las densidades de corriente de generación:

$$J_o = J_{pg} + J_{ng} \quad 1.12$$

Al multiplicar la ecuación 1.8 por el área A del diodo, se obtiene

$$I = I_o [\exp(eV_o/kT) - 1], \quad 1.13$$

I es la corriente total AJ y aquí, $I_o = AJ_o$. 1.14
 I_o es la corriente inversa de saturación del diodo. A la ecuación 1.13 se le conoce como ecuación de rectificación.

Bajo la condición de polarización inversa, la corriente tiene al valor J_o correspondiente a la densidad de corriente inversa de saturación expresada por la relación 1.12, la cual está limitada por el número de pares generados térmicamente, sólo depende de las características del material y de la temperatura y, que en primera aproximación puede escribirse como:

$$J_o = n_p v_n + P_n v_p, \quad 1.15$$

donde n_p y P_n son las densidades de portadores minoritarios, v_n y v_p sus velocidades que, en función de sus longitudes de difusión L_n y L_p y de sus tiempos de vida τ_n y τ_p son:

$$v_n = \frac{L_n}{\tau_n}, \quad v_p = \frac{L_p}{\tau_p}; \quad 1.16$$

finalmente

$$J_o = \frac{n_p L_n}{\tau_n} + \frac{P_n L_p}{\tau_p}. \quad 1.17$$

1.4 EFECTO FOTOVOLTAICO

Si una unión p-n es colocada bajo cierta iluminación, la absorción de fotones con suficiente energía provoca la creación de pares electrón-hueco libres. En presencia del campo eléctrico interno los huecos se mueven hacia la región p y los electro

nes hacia la región n, acumulándose en ambas regiones cerca de la unión; se forma entonces un campo eléctrico opuesto al campo de la región de carga espacial y, por lo tanto, se reduce la barrera de potencial ϕ_0 en cierto valor V_0 que podrá aparecer como un voltaje medible en los extremos de la unión.

1.5 CELDAS SOLARES

La aplicación más importante del efecto fotovoltaico es la conversión directa de energía solar en energía eléctrica mediante las celdas solares.

Básicamente una celda solar es un diodo rectificador que puede entregar potencia cuando es iluminado; a circuito abierto se podrá detectar un voltaje o bien, si se coloca una resistencia de carga, también una fotocorriente. En realidad una celda consta de dos regiones principales:

- a) una capa absorbidora-generadora y
- b) una capa colectora-convertidora

en cuyos extremos se coloca un contacto óhmico. Un diagrama esquemático de una celda fotovoltaica se muestra en la figura 1.10.

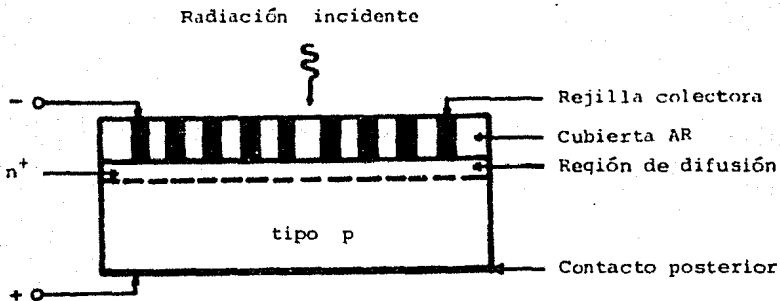


Figura 1.10 Diagrama esquemático de una celda solar.

En oscuridad, las características I-V de una celda solar son semejantes a las de una unión rectificadora descrita con anterioridad:

$$I = I_0 [\exp(eV/kT) - 1]. \quad 1.18$$

Al colocar la celda bajo iluminación cuyos fotones tienen energía $h\nu$ mayor que la de la banda de energías prohibidas, la radiación absorbida generará pares adicionales produciendo una fotocorriente I_g ; ahora, bajo iluminación se encuentra que la relación I-V puede expresarse como

$$I = I_0 [\exp(eV/kT) - 1] - I_g, \quad 1.19$$

I_0 es una corriente de saturación independiente de la iluminación; I_g es la corriente de generación y es proporcional a la intensidad de iluminación N_0 , de tal manera que cuando $N_0 = 0$ se recuperan las características I-V de un diodo.

En condiciones de circuito abierto, $I = 0$ y

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left[\frac{I_g}{I_0} + 1\right]. \quad 1.20$$

En condiciones de corto circuito y si la resistencia interna del dispositivo es nula, $V_0 = 0$ y fluye una corriente máxima de la forma:

$$I_{sc} = I_g \quad 1.21$$

La relación I-V dada por la ecuación 1.13 se muestra en la figura 1.11.

Una celda ideal puede ser representada por un circuito equivalente como el mostrado en la figura 1.12 donde R_c es la resistencia de carga. Este circuito consiste de un generador de corriente constante que provee la fotocorriente I_{sc} en paralelo con un diodo ideal, que proporciona una corriente directa I_d para un voltaje directo V_d . La resistencia de carga lleva una corriente I_c que es la diferencia entre la corriente directa y la fotocorriente.

Para conocer la potencia P generada por una celda fotovoltaica, por unidad de superficie, se considera que

$$P = JV, \quad 1.22$$

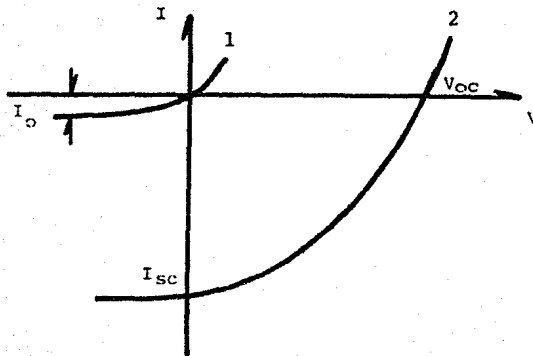


Figura 1.11 Características I-V para una celda solar; 1) en obscuridad y 2) bajo iluminación.

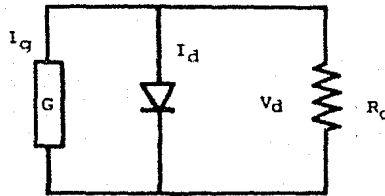


Figura 1.12 Circuito equivalente para una celda ideal.

la cual tiene un valor máximo bajo la condición:

$$\frac{dP}{dV} = 0 . \tag{1.23}$$

En un dispositivo perfecto, la potencia máxima sería igual a:

$$P_{Pm\acute{a}x} = J_{sc} V_{oc} . \tag{1.24}$$

Celdas Reales.- La aproximación de las características de una celda real a este caso perfecto está relacionada por un término conocido como factor de forma o factor de llenado, expresado por

$$ff = \frac{P_{m\acute{a}x}}{J_{sc}V_{oc}} \quad . \quad 1.25$$

La eficiencia de conversi3n para una celda solar est3 definida como

$$\eta = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_i} \quad , \quad 1.26$$

donde $P_{m\acute{a}x}$ es la potencia m3xima de salida y P_i es la potencia de la luz incidente; al sustituir la ecuaci3n 1.25 en la expresi3n 1.26 3sta se convierte en

$$\eta = ff \frac{J_{sc}V_{oc}}{P_i} \quad . \quad 1.27$$

Ya que una celda solar, como todo generador de corriente el3ctrico tiene una resistencia interna que limita sus caracter3sticas de salida, el circuito equivalente de una celda real debe ser modificado para incluir este efecto, figura 1.13.

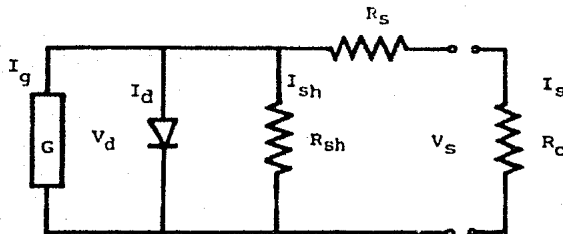


Figura 1.13 Circuito equivalente de una celda real.

En realidad, la resistencia interna del dispositivo posee dos componentes: a) una resistencia en serie R_s debida princi-

palmente a la resistencia intrínseca del semiconductor y a los electrodos de la celda y, b) una resistencia en paralelo R_{sh} que se atribuye a defectos de los materiales utilizados.

En base al circuito de la figura 1.13, al aplicar las leyes de Kirchoff se obtiene

$$I_g = I_d + I_{sh} + I_s ; \quad 1.28$$

$$V_s = V_d - I_s R_s , \quad 1.29$$

donde V_d e I_d son el voltaje y la corriente del diodo. Considerando las dos expresiones anteriores se puede encontrar la relación entre el voltaje y la corriente de salida, V_s e I_s respectivamente

$$I_s \left[1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right] = I_g - \frac{V_s}{R_{sh}} - I_d , \quad 1.30$$

con

$$I_d = I_o \left[\exp(eV_d/kT) - 1 \right] , \quad 1.31$$

sustituyendo la ecuación 1.31 en 1.30 y, con 1.29, resulta

$$I_s = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \left\{ I_g - \frac{V_s}{R_{sh}} - I_o \left[\exp \frac{e(V_s + I_s R_s)}{kT} - 1 \right] \right\} \quad 1.32$$

Valores aproximados de R_s y R_{sh} pueden ser determinados a partir de la curva I-V mediante

$$\left| \frac{dV}{dI} \right| = R_s ; \quad 1.33$$

$$\left| \frac{dV}{dI} \right| = R_{sh} + R_s , \quad 1.34$$

al tomar valores bajo polarización directa y bajo polarización inversa respectivamente, con $|V| \rightarrow \infty$ en ambos casos.

En la figura 1.14 se muestran los efectos de las resisten-

cias en serie y en paralelo cuando éstas no tienen sus valores ideales.

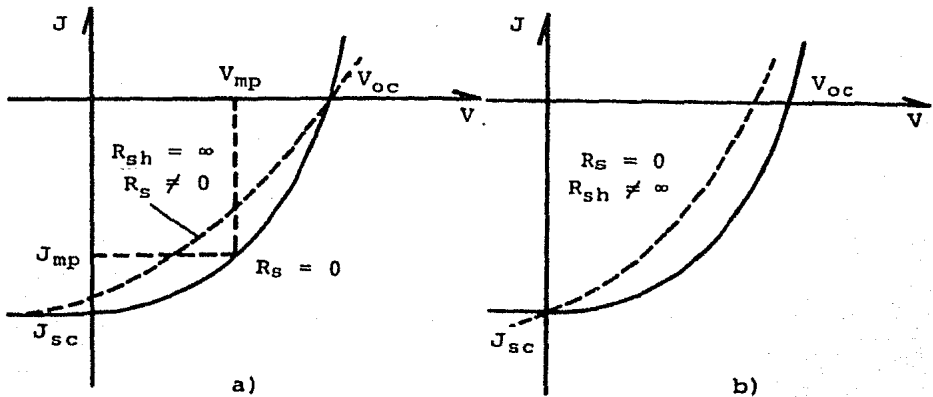


Figura 1.14 Efectos de las resistencias en serie y en paralelo en las características I-V de una celda solar. a) En este caso, $R_s \neq 0$ y $R_{sh} = \infty$; b) ahora $R_s = 0$ y $R_{sh} \neq \infty$.

1.6 UNION METAL-SEMICONDUCTOR

Si se considera que un metal y un semiconductor se encuentran inicialmente separados, al intentar unirlos y reducir cada vez más la distancia entre ellos ésta en algún momento llega a ser tan pequeña que permite que los electrones la atraviesen por tunelaje, figura 1.15, a.

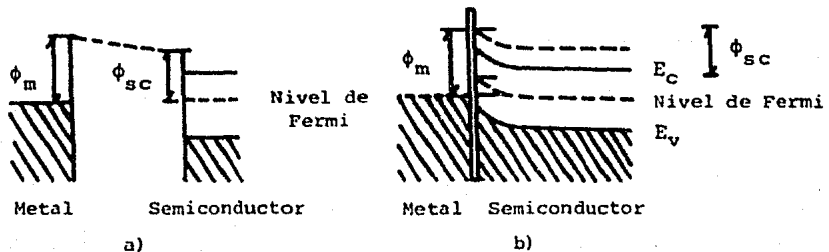


Figura 1.15 Diagramas de energía para una unión metal-semiconductor; a) antes del contacto, b) en contacto.

Cuando se produce el contacto se efectúa una redistribución de cargas que provoca la formación de una capa desértica o de acumulación en el semiconductor. Esto, en el diagrama de bandas de energía, se manifiesta como una deflexión en el extremo de las bandas, llamada barrera Schottky, como se ilustra en la figura 1.15, b.

Hay cuatro casos posibles de contacto metal semiconductor fácilmente distinguibles, los cuales dependen del tipo de semiconductor utilizado, p o n, y de las funciones de trabajo de los materiales, figura 1.16. Dos de estas combinaciones conducen a uniones rectificadoras y las otras dos a contactos óhmicos.

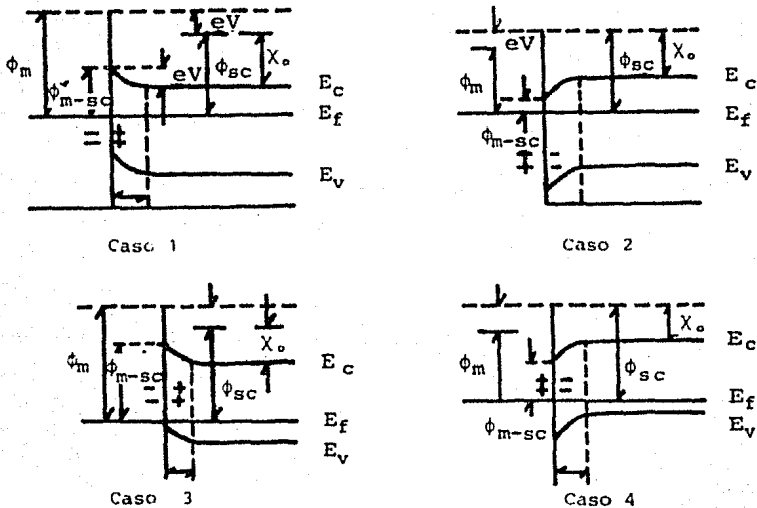


Figura 1.16 Cuatro casos posibles de unión metal-semiconductor.
 Caso 1: $\phi_m > \phi_{sc}$ semiconductor tipo n, unión rectificadora;
 caso 2: $\phi_m < \phi_{sc}$ semiconductor tipo n, contacto óhmico;
 caso 3: $\phi_m > \phi_{sc}$ semiconductor tipo p, contacto óhmico;
 caso 4: $\phi_m < \phi_{sc}$ semiconductor tipo p, unión rectificadora.

Caso 1.- Unión metal-semiconductor tipo n, donde la función de trabajo del metal es mayor que la del semiconductor , $\phi_m > \phi_{sc}$.

Al efectuar el contacto se inicia la redistribución de cargas; como $\phi_m > \phi_{sc}$ el flujo de electrones del semiconductor supe^{ra} al del metal quedando donadores ionizados no compensados en el semiconductor. El metal se carga negativamente y el semiconductor positivamente originándose una diferencia de potencial de contacto $V_{dif} = \phi_m - \phi_{sc} = \phi_B$ y un campo eléctrico que impide el flujo de electrones del semiconductor al metal; este proceso continúa hasta que se igualan los niveles de Fermi en ambos materiales y se establece el estado de equilibrio (figura 1.16). Ahora, el extremo de las bandas de conducción y de valencia del semiconductor se curvan con respecto al nivel de Fermi al acercarse a la superficie de contacto. Se observa entonces que en el semiconductor, cerca de la unión, se forma una capa superficial empobrecida de portadores libres, región desértica.

Si el potencial de contacto es muy grande, la curvatura de las bandas de valencia y de conducción puede ser de tal forma que ahora la primera se encuentre más cerca que la banda de conducción; en este caso la región del semiconductor cercana a la superficie invierte su tipo de conductividad al tipo p; a esta región se le llama región de inversión.

Al aplicar un voltaje externo V_o , éste provocará un aumento o una reducción en la altura de la barrera efectiva y la corriente que circulará cambiará por el factor $\exp[eV/kT]$. Para la condición de polarización directa, con $V_o \gg kT/e$, la corriente es grande y positiva; para polarización inversa, si $|V| \gg kT/e$ la corriente es pequeña y aproximadamente igual a la corriente de saturación.

En este caso, el contacto metal-semiconductor tiene propiedades rectificadoras.

Caso 2.- Unión metal-semiconductor tipo n, donde $\phi_m < \phi_{sc}$. Antes del contacto, el nivel de Fermi del semiconductor

es inferior al nivel de Fermi del metal; al establecer el contacto, fluyen electrones del metal hacia el semiconductor, adquiriendo éste una carga negativa y el metal una carga positiva; ahora en el diagrama de bandas de energía las bandas se desplazan hacia abajo cerca de la superficie de contacto, figura 1.16. En este caso, en lugar de formarse una barrera de potencial se forma una región de acumulación, donde la concentración de electrones es mayor que la de los átomos donadores ionizados.

Al aplicar cierta polarización, sea directa o inversa, ésta sólo afecta el grado en que la capa cercana a la unión se enriquece de portadores mayoritarios; no se forma una barrera rectificadora, ahora se tiene un contacto óhmico.

Caso 3.- Unión metal-semiconductor tipo p, cuando $\phi_m > \phi_{sc}$.

Al establecer el contacto, los electrones fluyen desde el semiconductor al metal, provocando cargas superficiales positivas en el semiconductor y negativas en el metal. Para ambas polarizaciones, la corriente fluirá fácilmente y en este caso, el contacto también es óhmico.

Caso 4.- Unión metal-semiconductor tipo p, donde $\phi_m < \phi_{sc}$.

En la situación previa al contacto el nivel de Fermi del semiconductor está por debajo del nivel correspondiente al metal. Hecho el contacto, los electrones fluyen del metal al semiconductor hasta igualar ambos niveles; la capa superficial del semiconductor se carga negativamente. En este caso la barrera de potencial para los huecos en el lado del semiconductor es:

$$V_{dif} = \phi_{sc} - \phi_m.$$

Si se aplica una polarización directa, figura 1.17, b, la corriente de huecos que fluye del metal al semiconductor no cambia; sin embargo la corriente de huecos que va del semiconductor al metal ha cambiado por el factor $\exp[eV_0/kT]$ pues la altura de la barrera para estos huecos ha sido rebajada. Bajo una polarización inversa, figura 1.17, b, sólo se tiene una corriente débil de portadores minoritarios formada por los electrones que se mueven del semiconductor al metal. Esta es tam-

bién una unión rectificadora.

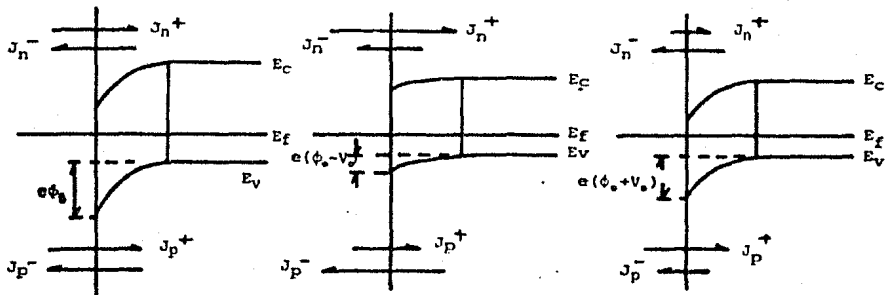


Figura 1.17 Diagramas de un contacto rectificador metal-semiconductor con $\phi_m < \phi_{BC}$, para un semiconductor tipo p; a) en equilibrio, b) bajo polarización directa, c) bajo polarización inversa.

CARACTERISTICAS I-V DE UNA UNION METAL-SEMICONDUCTOR

Para calcular la relación I-V de un contacto metal-semiconductor existen dos aproximaciones:

- 1) Teoría de emisión termiónica y 2) Teoría de difusión.

Estas dos teorías predicen, para la unión metal-semiconductor, características J-V semejantes a la ecuación 1.11 correspondiente a un diodo p-n, sólo que ahora las expresiones para las corrientes de saturación son diferentes respecto a J_0 , para el caso de la unión p-n.

1) Teoría de Emisión.- Esta teoría es aplicable cuando la altura de la barrera $e\phi_B \gg kT$ y cuando el ancho de la región de carga espacial, desértica en este caso, es pequeño comparado con la longitud de difusión de los portadores mayoritarios en el semiconductor tipo n, de tal forma que se desprecian las colisiones de los electrones en esta región; así, el flujo de corriente se debe a una emisión de electrones que, para viajar del semiconductor al metal, sólo deben tener energía suficien-

te para superar la altura de la barrera.

En este caso

$$J = A^* T^2 \exp \left[- \frac{e\phi_B}{kT} \right] \left[\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right], \quad 1.36$$

en donde A^* es la constante de Richardson:

$$A^* = \frac{4 \pi e m^* k^2}{h^3}.$$

Así,

$$J = J_E \left[\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right], \quad 1.37$$

con
$$J_E = A^* T^2 \exp \left[- \frac{e\phi_B}{kT} \right]. \quad 1.38$$

2) Teoría de Difusión.- Si el espesor de la región de carga espacial es mucho mayor que la longitud de difusión de los electrones en el semiconductor, entonces se debe tomar en cuenta el efecto de las colisiones de los electrones dentro de esta región.

Ahora se obtiene

$$J = \frac{e^2 D_n N_D}{kT} \frac{e[V_{dif} - V]^{\frac{1}{2}}}{\epsilon_s} \exp \left[- \frac{e\phi_B}{kT} \right] \left[\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right], \quad 1.39$$

que puede expresarse como

$$J = J_D \left[\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right], \quad 1.40$$

con
$$J_D = \frac{e^2 D_n N_D}{kT} \frac{e[V_{dif} - V]^{\frac{1}{2}}}{\epsilon_s} \exp \left[- \frac{e\phi_B}{kT} \right]. \quad 1.41$$

De la expresión 1.41 se observa que, a diferencia de la corriente de saturación J_E en la teoría de emisión, J_D varía rápidamente con el voltaje aplicado pero es menos sensible a la temperatura. En la figura 1.18 se ilustran las características I-V de la unión metal-semiconductor para las teorías de emisión y de difusión.

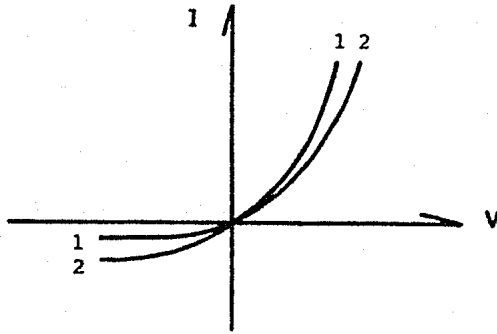


Figura 1.18 Características I-V de un contacto metal-semiconductor; 1) teoría de emisión, 2) teoría de difusión.

Un intento por combinar las dos teorías anteriores, teoría de emisión-difusión, se debe a Zse y Crowell ^{*6}. La expresión I-V para esta teoría es muy parecida a la de la teoría de emisión y puede escribirse como:

$$J = J_s \left[\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right], \quad 1.42$$

donde J_s , la corriente de saturación está expresada como

$$J_s = A^{**} T^2 \exp - \frac{e\phi_B}{kT}, \quad 1.43$$

la forma de A^{**} , la constante de Richardson efectiva, es complicada pero

$$A^{**} \propto A^* . \quad 1.44$$

Experimentalmente se encuentra que la ecuación de rectificación 1.42, en general se debe modificar; en lugar de que

$$J \propto \exp \frac{eV}{kT}, \quad 1.45$$

ahora

$$J \propto \exp \frac{eV}{vkT}, \quad 1.46$$

donde v es el factor de calidad del diodo. Para un diodo ideal $v = 1$, mientras que, para los diodos reales $v > 1$.

CELDAS SOLARES DE BARRERA SCHOTTKY

Si una unión metal-semiconductor se ilumina con fotones cuya energía $h\nu$ es mayor que E_g , los pares electrón-hueco generados cerca de la barrera Schottky son separados por el campo interno y, en los extremos de la unión, se puede medir un foto voltaje. Así, los diodos de barrera Schottky pueden convertirse en celdas fotovoltaicas.

En las celdas solares de barrera Schottky el grueso de la capa metálica es muy importante en la eficiencia de conversión. La transmisión de la luz puede ser aumentada reduciendo el grueso de la película metálica a expensas de un aumento en la resistencia en serie del diodo. Algunos cálculos indican que el grueso apropiado para esta capa se encuentra entre 50 y 140 Å (bajo iluminación AM1 con una resistividad del substrato entre 1 y 3 Ωcm).

En estas celdas es necesaria la evaporación de una cubierta antirreflejante no sólo para aumentar la transmisión de la luz sino también para evitar una fuerte degradación con el medio ambiente. La reflectancia y la transmitancia de una película de aluminio en función del grueso de la película metálica, con una cubierta de ZnS de 550 Å para una $\lambda = 6328$ Å, se muestra en la figura 1.19.

En la figura 1.20 se muestran cálculos para una celda solar de barrera Schottky de aluminio sobre silicio tipo p monocristalino de 2 Ωcm , con orientación (111) y con los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} \phi_B &= 0.6 \text{ V} && \text{altura de la barrera,} \\ A^* &= 32 \text{ A/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^2 && \text{constante de Richardson,} \\ J_s &= A^* T^2 \exp - \frac{e\phi_B}{kT}, \\ v &= \frac{e}{kT} \frac{\partial V}{\partial (\ln J)} = 1.02 \end{aligned}$$

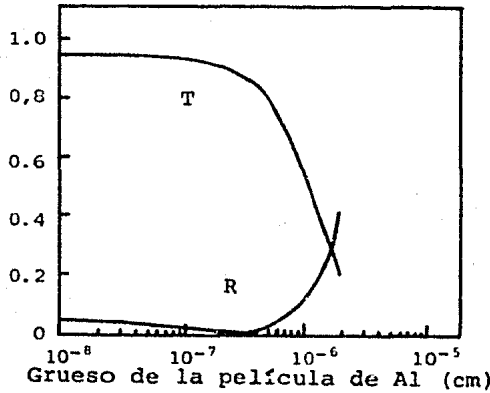


Figura 1.19 Reflectancia y transmitancia en función del grueso (d) para una película de aluminio, con una cubierta de ZnS.

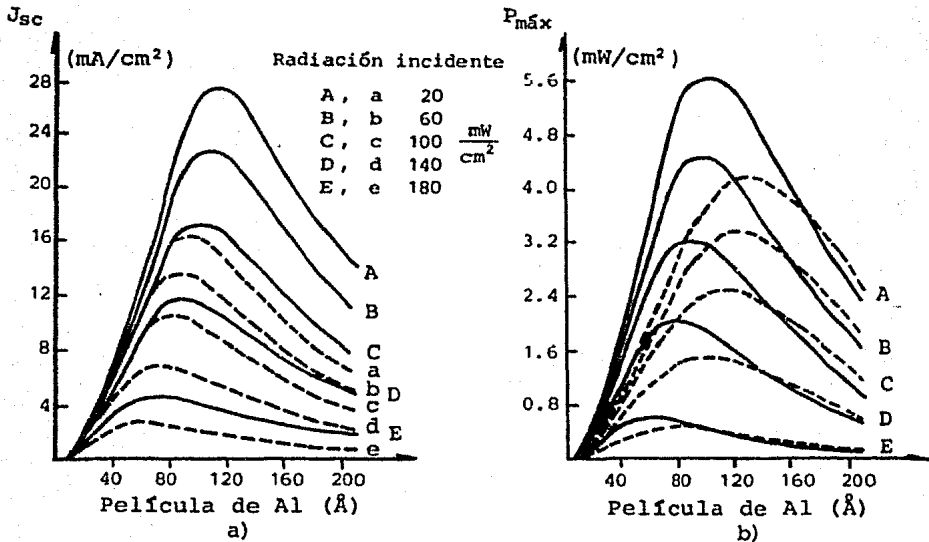


Figura 1.20 a) Corriente de corto circuito y b) potencia máxima para una celda MS con y sin cubierta antirrefleitora (línea continua y punteada respectivamente) en función del grueso de la película metálica.

En esta figura se observa la corriente de cortocircuito y la potencia máxima para una celda con y sin cubierta antirrefletores; se ve también que el grueso óptimo de esta capa depende de la intensidad de iluminación, el cual es casi el mismo para obtener tanto una I_{sc} máxima como una potencia máxima, $P_{máx}$ ².

CAPITULO II

INTRODUCCION

Ya que el principal objetivo en el campo de la conversión fotovoltaica es la construcción de celdas solares que puedan ser utilizadas para generar energía eléctrica a gran escala, es necesario que estos dispositivos alcancen eficiencias relativamente altas y que el costo de producción sea bajo.

Para fines comerciales, la fabricación de una celda solar se basa en la creación de una unión rectificadora utilizando procesos de difusión de impurezas a temperaturas elevadas, método difícil y costoso. Frente a este procedimiento, también es posible inducir un cambio en el tipo de conductividad en la superficie de la base semiconductor mediante la aplicación de una capa metálica ultradelgada o un semiconductor relativamente transparente; esta técnica que prescinde de la difusión de impurezas, pero con la que se logran los mismos resultados, es más fácil y potencialmente barata. La más sencilla manifestación es un diodo de barrera Schottky.

En cuanto a las celdas de barrera Schottky, algunos estudios teóricos indican que sería posible alcanzar una eficiencia máxima del 22 al 23% con silicio tipo p monocristalino; sin embargo los dispositivos fabricados hasta ahora en muy pocas ocasiones pueden lograr una eficiencia mayor del 12 %; estas desventajas se deben principalmente a sus bajos voltajes a circuito abierto. Respecto a esta situación, se ha encontrado experimentalmente que la eficiencia de estas celdas puede ser aumentada por la presencia de una delgada capa aisladora de óxido, 10 a 30 Å, entre el metal y el semiconductor, es decir formando una celda solar MIS; al sustituir el metal de la región superior de esta celda por un semiconductor altamente envenenado, un semiconductor degenerado, se obtiene una celda SIS.

En una unión p-n la profundidad de la difusión en la capa superior es generalmente de algunos cientos o miles de Å, región que se considera "muerta" debido a los defectos causados

durante el proceso, lo que reduce la respuesta ultravioleta de estas celdas. En las celdas SIS y MIS la unión que se forma es virtual, sin defectos que disminuyan esta respuesta como en el caso de las homouniones tradicionales.

En base a las consideraciones anteriores parece importante el analizar cómo una celda puede ser mejorada mediante la introducción de una delgada capa aisladora entre los dos semiconductores o entre el metal y el semiconductor, formando celdas solares del tipo SIS y MIS respectivamente.

2.1 DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO

A pesar de que la teoría describe a estos dispositivos en una forma general ⁴, por ahora se tomarán en cuenta tan solo como convertidores fotovoltaicos.

Estos diodos se pueden considerar como pertenecientes a una familia de heterouniones en los cuales la región superior se encuentra separada de un material, con una banda de energía prohibida mucho más angosta, por medio de una delgada capa aisladora.

Una celda solar SIS funciona como un dispositivo de capa de inversión inducida a causa de la diferencia de las funciones de trabajo de los materiales ⁵. En estas celdas, el semiconductor de banda prohibida ancha sirve para bloquear la corriente de portadores mayoritarios y por lo tanto el transporte de corriente ocurre a través de la región aisladora mediante proceso túnel de portadores minoritarios.

Una celda de este tipo, SIS o MIS, consta de tres regiones principales: a) una capa superior, que puede ser un semiconductor degenerado o un metal, b) una delgada capa aisladora generalmente de óxido y c) un sustrato o base de material semiconductor. La figura 2.1 ilustra en forma esquemática estas celdas.

REGION SUPERIOR

Es precisamente esta región la que determina el tipo específico de la celda, SIS cuando se tiene un semiconductor y MIS

si éste es reemplazado por un metal.

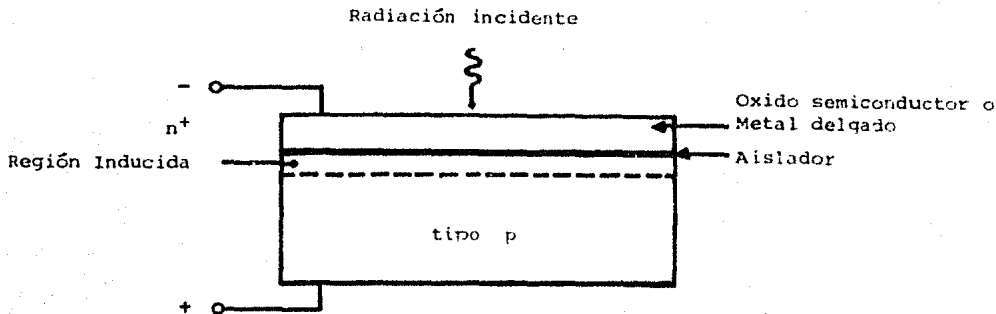


Figura 2.1 Diagrama esquemático de una celda solar SIS o MIS.

Celdas solares del tipo SIS.- En estas celdas, el semiconductor superior es un óxido de banda prohibida ancha, degenerado electrónicamente o altamente envenenado para actuar como un metal.

El grueso de esta capa puede ser de varios cientos o aun miles de Å eliminando problemas asociados con películas delgadas. Otra ventaja de estas películas semiconductoras es que son estables y fuertemente adheribles.

Los materiales más frecuentemente utilizados, sobre substratos de silicio son: óxido de indio In_2O_3 , óxido de estaño SnO_2 y una mezcla de ambos, el estannato de indio (indium-tin oxide) ITO ^{6,7}. En menor escala también se han investigado otros óxidos semiconductores, por ejemplo el ZnO_2 y el Cd_2SnO_4 .

La función de trabajo para el SnO_2 es de 4.75 eV, de 4.34 eV para el In_2O_3 ^{8,9}, mientras que para el ITO es de 4.3 ± 0.1 eV ^{8,10}. Así el SnO_2 sobre silicio tipo n invertirá la superficie al tipo p y creará una unión p^+-n .

Para la elaboración de celdas solares del tipo SIS, el ITO es un compuesto muy utilizado sobre silicio tipo p. En estas celdas, que teóricamente deberían alcanzar una eficiencia del 20%

bajo iluminación AM1, las funciones de trabajo del ITO y del silicio (tipo p) son tales que éste es invertido a uno del tipo n, induciendo una unión n⁺-p en la superficie del sustrato semiconductor. Un diagrama de bandas de energía para una celda de ITO con sustrato de silicio tipo p se muestra en la figura 2.2.

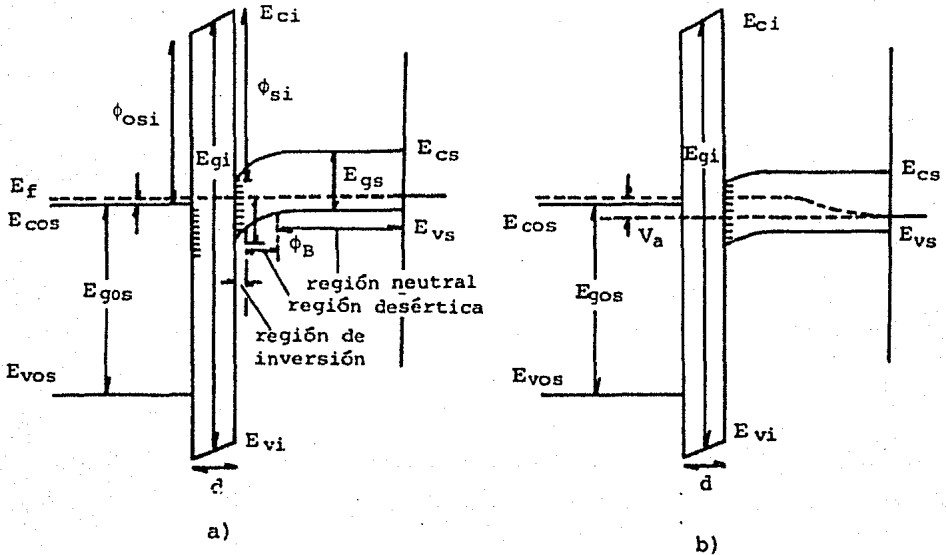


Figura 2.2 Diagrama de bandas de energía para una celda solar SIS, a) en equilibrio, b) bajo polarización directa, donde V_a es el voltaje aplicado.

Entre las características del ITO, semiconductor degenerado de tipo n, que lo hacen ser un material particularmente atractivo se encuentran:

i) La resistencia en serie de la película es pequeña y es ta cubierta superior actúa como una capa metálica en la estructura SIS.

ii) El índice de refracción del ITO (≈ 2.0) produce una cubierta parcialmente antirrefleitora.

iii) Las películas de ITO son estables bajo la mayoría de las condiciones ambientales, son resistentes a ataques químicos y muy adheribles a diversos materiales.

iv) La banda prohibida ancha produce una absorción óptica mínima en el óxido y permite que la mayoría de la luz sea absorbida en las cercanías de la unión dentro del semiconductor base.

v) El ITO puede ser depositado a temperaturas relativamente bajas, 350 a 600° C; esto reduce la interdifusión de componentes logrando uniones abruptas ⁵.

Además de las celdas de ITO sobre silicio monocristalino tipo p, también se han estudiado las estructuras ITO/P₂O₅/InP tipo p e ITO/Ga₂O₃/GaAs tipo p ^{1,6}.

En la tabla 2.1 se resumen algunas de las propiedades del ITO.

Tabla 2.1

PROPIEDADES DEL ITO

Estructura del cristal	Cúbica
Constante de la red	10.118 Å
Banda de energías prohibidas	2.62 a 3.75 eV
Afinidad electrónica	4.1 a 4.3 eV
Resistividad	1.77×10^{-4} a 1.2×10^{-2} Ωcm
Concentración de portadores	1×10^{19} a 1.3×10^{21} cm ⁻³
Índice de refracción	1.68 a 2.48
Coefficiente de expansión térmica lineal	10.2×10^{-6} /° C

Celdas solares del tipo MIS.- En este caso, el semiconductor degenerado de la capa superior es reemplazado por un metal; los materiales que han sido utilizados en esta región son: aluminio principalmente ¹², Mg, Be, Cr, Ta, Ti, Hf, Sc, Y ¹⁴ sobre silicio tipo p monocristalino; Au, Ag, Cu, Ni y Pt sobre silicio tipo n. Las funciones de trabajo de los materiales del primer grupo son bajas, menores que 3.6 eV, mientras que para el segundo grupo son mayores que 3.6 eV ⁷. También se han fabricado celdas de Al con sustratos de GaAs y de Al, Au, Cu y Ag sobre Cu₂O ¹⁵.

El grueso aproximado de la película se encuentra entre 40 y 100 Å ¹⁶. Para obtener con exactitud este valor no sólo se debe tomar en cuenta la transmisión óptica sino también la resistencia de capa, pues las películas metálicas con resistencia de capa grandes conducen a celdas con resistencias en serie altas y factores de forma degradados.

A fin de optimizar las estructuras MIS de Al/SiO₂/Si, las propiedades eléctricas y ópticas de las películas de Al han sido determinadas en función de su grueso. La figura 2.3 proporciona los resultados para la resistencia de capa; en la figura 2.4 se presenta la transmitancia, mientras que, en la figura 2.5 se encuentra la fotocorriente (AM1), todas en función del grueso de la película de aluminio ¹².

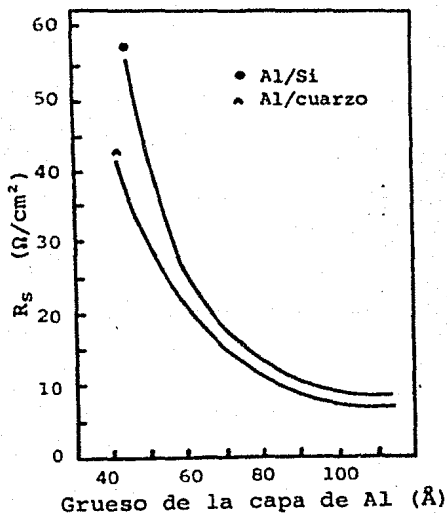


Figura 2.3 Resistencia de capa en función del grueso de la película de aluminio.

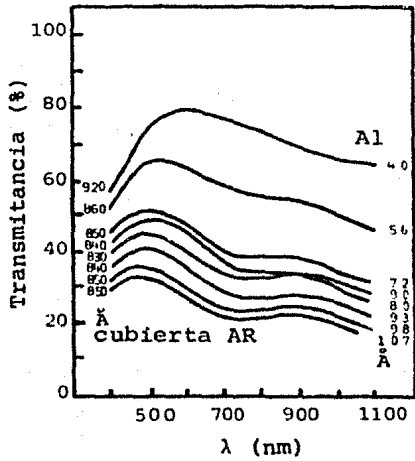


Figura 2.4 Transmittancia para celdas de Al sobre silicio con cubierta antirrefleitora de SiO.

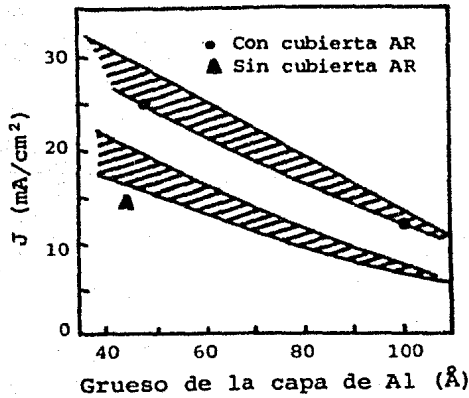


Figura 2.5 Fotocorriente en función del grueso del Al depositado.

CAPA AISLADORA

Si bien la presencia de la región aisladora nos conduce a este nuevo tipo de celdas, el grueso de esta capa es determinante en el funcionamiento del dispositivo; si es mayor de 60 \AA la corriente a través de esta región es despreciable y se obtiene un capacitor. Al reducir un poco el grueso, a unos 30 \AA , pueden fluir por tunelaje corrientes significativas entre el metal y el semiconductor o entre los dos semiconductores, las cuales aumentarán considerablemente cuando la capa aisladora sea todavía más delgada (20 \AA). Para aplicaciones en celdas solares se ha encontrado que el grueso de esta capa debe ser menor de 30 \AA pero mayor de 10 \AA . En forma experimental, utilizando análisis Auger para detectar esta región aisladora de SiO_2 en la interfase ITO/Si se encontró que el grueso del óxido está entre 12 y 18 \AA .

En realidad ésta es una región complicada tanto química como físicamente; en las celdas SIS de ITO/Si es básicamente SiO_2 y se trata por comodidad como un aislador o como un semiconductor de banda prohibida ancha, aun cuando existe la posibilidad de que haya algún compuesto del tipo $\text{Sn}_x\text{Si}_y\text{O}_z$.

Esta interfase en algunas ocasiones se ha considerado como una región de SiO o bien de Si_3N_4 .

En las celdas de ITO con sustratos de InP y GaAs se ha postulado la presencia de una capa interfacial de P_2O_5 y de Ga_2O_3 respectivamente. Por lo general, a un sustrato de GaAs es difícil depositarle una capa aisladora delgada, en el mejor de los casos se ha evaporado una capa de Sb_2O_3 para una estructura $\text{Ag/Sb}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$ tipo p.

A pesar de que aún no se ha establecido el papel exacto de esta capa, se han propuesto diversos mecanismos de acción, los cuales dependen de los materiales utilizados y de las condiciones de elaboración de los diodos. Fonash atribuye tres papeles a esta región aisladora: a) en el control del transporte por el cual la corriente inversa de saturación puede ser reducida, b) la conformación del campo y c) en la modificación de la al

tura de la barrera ϕ_B ; estos factores influyen en las características I-V del dispositivo ¹³.

Hasta ahora, la formación de esta región es uno de los pasos más delicados en la fabricación del diodo, pues a fin de construir una celda eficiente es necesario que la capa aisladora sea suficientemente gruesa para suprimir la corriente de portadores mayoritarios pero que permita que la corriente de portadores minoritarios fluya entre las dos regiones externas sin encontrar una resistencia apreciable.

Finalmente si esta región aisladora es menor que unos 10 Å, sólo presenta un pequeño impedimento al transporte de corriente entre la base semiconductor y la región superior que, en el caso de un metal, se obtiene un diodo Schottky.

SUBSTRATO O BASE SEMICONDUCTORA

El sustrato en las celdas SIS.- El semiconductor absorbente que se ha utilizado con mayor frecuencia en estas celdas es el silicio, del tipo p, del tipo n, monocristalino, policristalino y en algunas ocasiones amorfo.

Además del silicio como sustrato también se ha utilizado el GaAs compuesto que puede proporcionar una eficiencia mayor que el silicio; sin embargo, el principal problema del GaAs como sustrato es la dificultad que presenta para depositarle una película aisladora de alta calidad, pues desafortunadamente los óxidos naturales introducen una gran densidad de estados superficiales en el GaAs y los compuestos de arsénico se descomponen fácilmente a temperaturas relativamente bajas ¹⁴.

Otro material de interés para esta región, con el que se puede obtener una eficiencia alta es el InP, el cual no ha sido muy investigado lo mismo que el CdSe, Ge, CdTe, CuInSe₂, así también el CuIn_{1-x}Ga_xSe_{1.2}Te_{0.8} y algunos compuestos cuaternarios y pentarios ^{6,7}.

Sustratos en celdas MIS.- Hasta ahora casi todas las investigaciones referentes a este tipo de celdas se han realizado con sustratos de silicio en sus diversas formas así como con

GaAs ⁷ y, en pequeña escala, con Cu₂O material con el que se han obtenido eficiencias muy bajas ¹⁵.

2.2 FORMACION DE LAS CELDAS SIS Y MIS

Para encontrar qué semiconductor o metal deberá actuar como región superior, para que logre invertir el tipo de conductividad de la parte superior de la base semiconductor, es necesario analizar las funciones de trabajo de los posibles materiales que conformarán la celda ¹¹:

Como regla general, para formar un diodo SIS con óxido semiconductor tipo n en la capa superior, la afinidad electrónica de éste debe ser mayor o igual a aquella del semiconductor tipo p que actúa como sustrato; en el caso de una base semiconductor tipo n, la afinidad electrónica del óxido debe ser mayor o igual a la suma de la energía de la banda prohibida y la afinidad electrónica del semiconductor tipo n. En la práctica, la banda de energía prohibida del óxido semiconductor se debe encontrar en el rango 3 - 4 eV mientras que la capa aisladora debe ser capaz de graduar la estructura del cristal, la constante de la red y el coeficiente de expansión térmica entre el óxido semiconductor y la base semiconductor.

Las configuraciones SIS posibles se presentan en la tabla 2.2; se observa que hay un mayor número de combinaciones (ITO, ZnO) para sustratos semiconductores tipo p que para semiconductores tipo n, donde el SnO₂ parece ser el único candidato. En la tabla 2.3 se indican algunos parámetros de las bases y los óxidos semiconductores involucrados ¹¹.

En cuanto a las celdas MIS, en la tabla 2.4 se muestran algunas de las combinaciones de materiales que han sido investigadas.

Tabla 2.2

ALGUNAS CONFIGURACIONES SIS POSIBLES

Base semiconductora	Banda de energías prohibidas de la base semiconductor (T=300°K)	Afinidad electrónica deseable del óxido semiconductor para una base semiconductor tipo p.	Posibles óxidos semiconductores	Posible eficiencia AMI %	Afinidad electrónica deseable del óxido semiconductor para una base semiconductor tipo n.	Posibles óxidos semiconductores	Posible eficiencia AMI %
Si	1.12	4.05	ZnO, ITO	21	5.17	SnO ₂	21
Ge	0.80	4.0	ZnO, ITO	11	4.80	SnO ₂	11
InP	1.34	4.4	ZnO, ITO In ₂ O ₃ Cd ₂ SnO ₄	24	5.74	SnO ₂	24
GaAs	1.43	4.07	ZnO, ITO	25	5.50	SnO ₂	25
CdTe	1.44	4.30	ZnO, ITO Cd ₂ SnO ₄	25	5.74	SnO ₂	25
CuInSe ₂	1.02	4.58	ZnO, ITO Cd ₂ SnO ₄ Bi ₂ O ₃	18	5.60	SnO ₂	18

Tabla 2.3

PROPIEDADES DE ALGUNOS SEMICONDUCTORES

SEMICONDUCTOR	ESTRUCTURA DE LA RED	CONSTANTE DE LA RED			COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA LINEAL ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
		a	b	c	
Si	Diamante	5.431			2.33
Ge	Diamante	5.657			5.8
InP	Zincblenda	5.869			4.5
GaAs	Zincblenda	5.653			5.8
CdTe	Zincblenda	6.477			5.9
CuInSe ₂	Chalcopirita	5.782		11.62	
In ₂ O ₃	Cúbica	10.118			10.2
SnO ₂	Tetragonal	4.737		3.185	4.0
ITO	Cúbica	10.118			10.2
ZnO	Hexagonal	3.249		5.205	

Tabla 2.4

POSIBLES CONFIGURACIONES MIS

Base semicon- ductora	Banda de energías prohibi- das de la base se- miconduc- tora (T=300°K)	Función de trabajo de seable del metal para una base se- miconducto- ra tipo p.	Metales posibles	Posible eficien- cia AMI %	Función de trabajo de seable del metal para una base se- miconducto- ra tipo n.	Metales posibles	Posible eficien- cia AMI %
Si	1.12	4.05	Al Cr Ta Ti Mg	21	5.17	Ag Au Pt	21
GaAs	1.43	4.07	Al Cr Ta Ti Mg	25	5.50	Ag Au Pt	25
InP	1.34	4.40	Al Cr Ta Ti Mg	23	5.74	Ag Au Pt	23

2.3 EFICIENCIA EN LAS CELDAS SIS Y MIS

Puesto que la conversión de fotones incidentes en portadores de carga se realiza en el volumen de la base, la eficiencia deberá estar básicamente determinada por la banda de energía prohibida del sustrato; bajo esta consideración, en las celdas SIS y MIS la eficiencia esperada debe ser muy parecida a la de una celda de unión p-n tradicional si, en ambos tipos de celdas, se utiliza el mismo semiconductor como sustrato.

Para obtener una eficiencia óptima, la banda de energía prohibida del semiconductor absorbedor-generador se debe encontrar entre 1.3 y 1.6 eV²¹, entre otros compuestos el GaAs y el InP poseen esta característica, sin embargo, el material semiconductor que ha sido utilizado con mayor frecuencia como sustrato, tanto en las celdas SIS como en las MIS, es el silicio.

La eficiencia teórica máxima para una celda de ITO/SiO₂/Si tipo p monocristalino de 0.2 Ωcm, con una capa interfacial de 12 Å, bajo iluminación AM1 es casi del 21 %. La eficiencia máxima hasta ahora ha sido reportada por Godfrey y Green y es del 17.6 %²² con silicio tipo p monocristalino; se ha logrado un poco más del 10 % con silicio tipo n y, en general, las celdas con silicio tipo p han alcanzado eficiencias más altas que con silicio tipo n. En cuanto a las celdas con silicio policristalino se ha llegado al 12.6 %²⁴.

Después del silicio como semiconductor base se encuentra el GaAs, compuesto con el que se puede conseguir una eficiencia teórica máxima del 25 % y, en casi todos los trabajos donde se utiliza este compuesto se ha superado el 12 % . Otro material con el que también sería posible lograr una eficiencia del 25% es el InP, pero desafortunadamente ha sido poco investigado.

2.3 EFICIENCIA EN LAS CELDAS SIS Y MIS

Puesto que la conversión de fotones incidentes en portadores de carga se realiza en el volumen de la base, la eficiencia deberá estar básicamente determinada por la banda de energía prohibida del sustrato; bajo esta consideración, en las celdas SIS y MIS la eficiencia esperada debe ser muy parecida a la de una celda de unión p-n tradicional si, en ambos tipos de celdas, se utiliza el mismo semiconductor como sustrato.

Para obtener una eficiencia óptima, la banda de energía prohibida del semiconductor absorbedor-generador se debe encontrar entre 1.3 y 1.6 eV²¹, entre otros compuestos el GaAs y el InP poseen esta característica, sin embargo, el material semiconductor que ha sido utilizado con mayor frecuencia como sustrato, tanto en las celdas SIS como en las MIS, es el silicio.

La eficiencia teórica máxima para una celda de ITO/SiO₂/Si tipo p monocristalino de 0.2 Ωcm, con una capa interfacial de 12 Å, bajo iluminación AM1 es casi del 21 %. La eficiencia máxima hasta ahora ha sido reportada por Godfrey y Green y es del 17.6 %²² con silicio tipo p monocristalino; se ha logrado un poco más del 10 % con silicio tipo n y, en general, las celdas con silicio tipo p han alcanzado eficiencias más altas que con silicio tipo n. En cuanto a las celdas con silicio policristalino se ha llegado al 12.6 %²⁴.

Después del silicio como semiconductor base se encuentra el GaAs, compuesto con el que se puede conseguir una eficiencia teórica máxima del 25 % y, en casi todos los trabajos donde se utiliza este compuesto se ha superado el 12 %. Otro material con el que también sería posible lograr una eficiencia del 25% es el InP, pero desafortunadamente ha sido poco investigado.

CAPITULO III

INTRODUCCION

El primer tratamiento completo del transporte de corriente en el diodo MIS fue publicado por Green, King y Schewchun en 1974, y desde entonces se han propuesto diversos modelos para describir el comportamiento de estos diodos ya sea en forma general o como convertidores fotovoltaicos.

En esta sección se presentarán algunos de los estudios teóricos sobre el funcionamiento de este tipo de celdas y se analizarán algunos factores importantes que pueden influir en sus características. Recordemos que aun cuando los diodos MIS han sido un poco más estudiados que los del tipo SIS, la teoría de los diodos MIS es, bajo ciertas condiciones, un caso limitado de la teoría SIS.

Se mostrarán las características I-V en obscuridad y bajo iluminación de estos diodos en función de algunos parámetros importantes y, al final se hará una comparación de estos datos con resultados obtenidos en forma experimental para observar si estas predicciones teóricas son apropiadas.

Algunos de los parámetros que influyen en el funcionamiento de las celdas y que afectan tanto al voltaje a circuito abierto como a la corriente de corto circuito son:

La resistividad del sustrato

El grueso de la región aisladora

La carga del aislador y la densidad de estados superficiales

La orientación del cristal

La temperatura

EFECTO DE LA RESISTIVIDAD DEL SUBSTRATO

Entre los diversos parámetros que dependen del nivel de impurezas se encuentran: a) la longitud de difusión, observada a través de la movilidad y del tiempo de vida de los portadores de

carga, b) la concentración misma de los portadores, c) la posición del nivel de Fermi y ch) el coeficiente de absorción.

El tiempo de vida de los portadores minoritarios en función del nivel de envenenamiento (para el silicio tipo p), basado en el trabajo de Kendal, está expresado por ²⁵

$$\tau_n = \frac{\tau_{no}}{1 + \frac{N_A}{N_{OA}}}, \quad \text{donde:} \quad 3.1$$

$$\tau_{no} = 3.95 \times 10^{-6} \text{ seg y}$$

$$N_{OA} = 7.1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}.$$

mientras que, a 300°K, las movilidades de los huecos y de los electrones, para varias densidades de envenenamiento están dadas por

$$\mu = \mu_{mín} + \frac{\mu_{máx} - \mu_{mín}}{1 + \left(\frac{N}{N_{OB}}\right)^\alpha}, \quad 3.2$$

donde N es la densidad de envenenamiento N_A o N_D y los valores de los otros parámetros se encuentran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1

Valores característicos de las movilidades, para los electrones y para los huecos.

	$\mu_{mín}$ $\left(\frac{m^2}{V \text{ seg}}\right)$	$\mu_{máx}$	N_{OB} (m^{-3})	α
Electrones	9.2×10^{-3}	0.136	1.3×10^{23}	0.91
Huecos	4.77×10^{-3}	0.0495	6.3×10^{22}	0.76

Celdas solares SIS.- Cálculos sobre la eficiencia de conversión en función de la resistividad del sustrato para celdas SIS de ITO/Si con una capa aisladora de 12 Å se presentan en la figura 3.1, donde es posible observar que un aumento en la concentración de impurezas causa un incremento en la eficiencia, alcanza un máximo alrededor de $1.5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$, unos 0.2 Ωcm, y posteriormente disminuye. Esto se debe a que, con-

siderando inicialmente al dispositivo como un diodo de unión n^+p , al aumentar la concentración de impurezas (aceptoras) en el silicio, el nivel de Fermi se corre hacia el extremo de la banda, la altura de la barrera aumenta y, como consecuencia, el V_{oc} aumenta. Sin embargo, si la concentración de impurezas es mayor, las movilidades y los tiempos de vida de los portadores comienzan a disminuir y, como se puede observar de las ecuaciones 3.1 y 3.2 se produce una disminución en la J_{sc} a través de una degradación en la longitud de difusión L , definida en la ecuación 1.2. La corriente de cortocircuito se puede expresar como

$$J_{sc} = eN\alpha L \frac{\exp(-\alpha W)}{1 + \alpha L} - \frac{\exp(-\alpha L)}{\alpha L^2 - 1} \exp\left(\frac{(\alpha L - 1)(L - W) - 1}{\sinh(L - W)}\right), \quad 3.3$$

aquí W es el ancho de la región desértica del semiconductor más la región de inversión y N es el número de fotones que entra al semiconductor por m^2 por segundo. Eventualmente la reducción en J_{sc} es mayor que el aumento del V_{oc} y la eficiencia cae ²⁵.

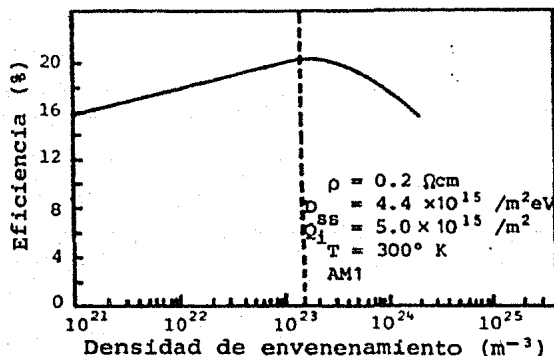


Figura 3.1 Efecto de la densidad de envenenamiento en la eficiencia de conversión para un diodo SIS de ITO/SiO₂/Si tipo p.

Celdas solares MIS.- La resistividad del sustrato produce resultados semejantes a los descritos para las celdas SIS. En la figura 3.2 se muestra la eficiencia en función de la densidad de envenenamiento para dos diferentes gruesos de la región aisladora; también en este caso hay dos parámetros del semiconductor que varían con la resistividad del sustrato: la longitud de difusión y el tiempo de vida de los portadores minoritarios. De esta figura se puede observar que la eficiencia aumenta con la densidad de envenenamiento, alcanza un máximo al rededor de $3 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ($0.014 \text{ } \Omega\text{cm}$) y entonces disminuye ²⁶.

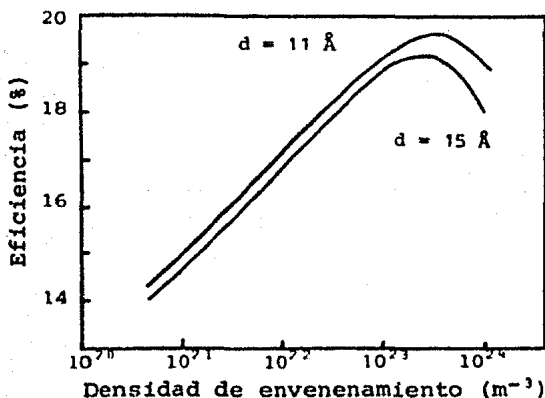


Figura 3.2 Efecto de la densidad de envenenamiento en la eficiencia de conversión para una celda MIS: Al/SiO₂/Si tipo p, donde el grueso del aislador se encuentra como parámetro.

EFFECTOS DEL GRUESO DE LA CAPA AISLADORA

Uno de los parámetros clave que puede controlar en forma drástica la eficiencia de conversión en este tipo de celdas es el grueso de la capa interfacial. Como se había indicado anteriormente el rango apropiado para el grueso de esta región es de 10 a 20 Å; el valor superior es aquel en el cual la corriente del diodo es pequeña mientras que, para un grueso menor que 10 Å, el dispositivo se comporta como un diodo Schottky.

Celdas solares SIS.- La figura 3.3 muestra algunos cálculos en la eficiencia de una celda ITO/Si en función del grueso de la capa interfacial, para dos valores típicos de la resistividad del sustrato $0.2 \Omega\text{cm}$ y $2.0 \Omega\text{cm}$. Se observa que la eficiencia es muy baja hasta que el grueso de la capa llega a unos 20 \AA y aumenta rápidamente cuando se acerca a 15 \AA . La disminución de la eficiencia en este intervalo, 15 a 20 \AA , se puede pensar como un cambio en las características I-V debido a la transición de la forma normal de operación a la forma de operación túnel manifestada como un aumento en la resistencia en serie efectiva a causa del cambio exponencial de la corriente túnel en función del grueso de la región interfacial ²⁵.

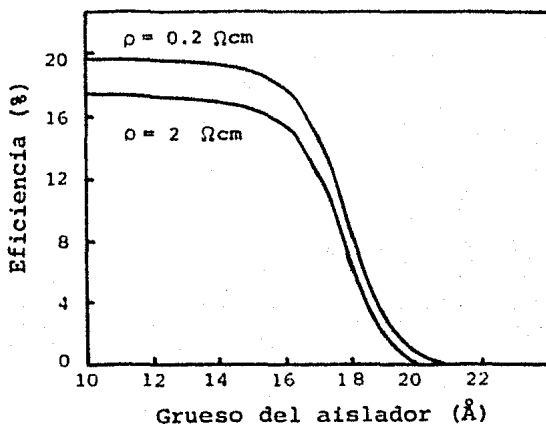


Figura 3.3 Eficiencia en función del grueso de la región aisladora para una celda solar SIS.

Cálculos de la J_{SC} , del factor de forma y del V_{OC} para estas celdas se presentan en la figura 3.4, donde el V_{OC} varía lentamente con el grueso del aislador y en una forma aparentemente lineal. Este comportamiento se puede explicar en base a la relación 3.4, pues el V_{OC} depende de la altura de la barrera superficial ϕ_B y ésta a su vez es proporcional a la altura

de la barrera ϕ'_{osi} del óxido semiconductor al aislador. Así:

$$\phi'_{\text{osi}} = \phi_{\text{osi}} - \frac{e(Q_{\text{ss}} + Q_i)}{\epsilon_i} d, \quad 3.4$$

es la relación entre el valor efectivo de ϕ_{osi} y el valor real ϕ'_{osi} donde Q_{ss} es la carga de los estados superficiales, Q_i es la carga efectiva en la capa interfacial aislador-silicio y d es el grueso de la capa interfacial ²⁵.

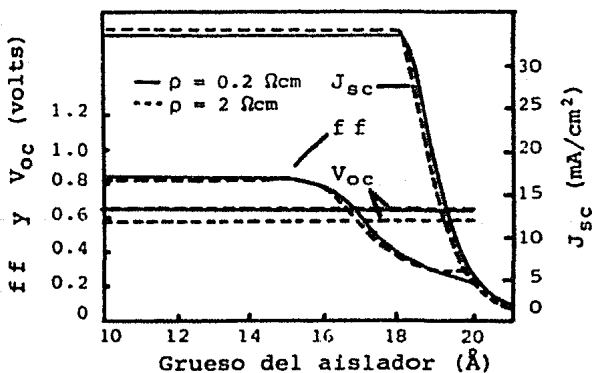


Figura 3.4 Factor de forma, corriente de cortocircuito y voltaje a circuito abierto en función de la capa aisladora.

En general, el rango apropiado de la región aisladora depende de la combinación de los materiales utilizados en las celdas; en las figuras 3.5 y 3.6 se ilustra la eficiencia en función del grosor de la región aisladora para las celdas: ITO/Ga₂O₃/GaAs tipo p e ITO/P₂O₅/InP tipo p ¹¹.

Celdas solares MIS.- Respecto a estas celdas, la figura 3.7 presenta los valores calculados de las características I-V en obscuridad para una celda de Al/SiO₂/Si tipo p de 2 Ωcm en función del grosor de la región aisladora.

En la figura 3.8 se encuentran los resultados de la efi-

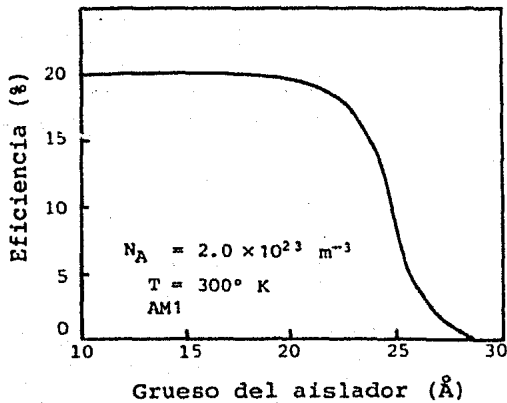


Figura 3.5 Eficiencia en función del grueso del aislador para una celda SIS de ITO/Ga₂O₃/GaAs.

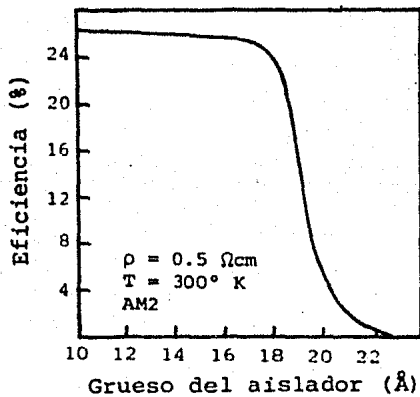


Figura 3.6 Eficiencia en función del grueso del aislador para una celda solar SIS de ITO/P₂O₅/InP.

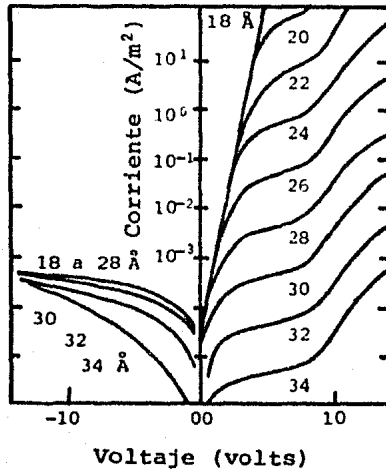


Figura 3.7 Características en obscuridad para una celda solar MIS con el grueso del aislador como parámetro.

ciencia también en función del grueso del aislador para dos valores de la resistividad del sustrato (donde se puede observar un comportamiento similar al de las celdas SIS); para gruesos mayores de 20 Å la eficiencia es despreciable mientras que alrededor de 15 Å aumenta considerablemente ²⁶.

Los valores calculados de la J_{sc} y del factor de forma se incluyen en la figura 3.9; aquí también el V_{oc} cambia lentamente con el grueso del aislador y en forma lineal. Esta dependencia lineal del V_{oc} se encuentra en forma análoga al caso SIS, sólo que, la expresión que nos relaciona el valor efectivo de la altura de la barrera de la región metal-aislador con su valor real es:

$$\phi'_{mi} = \phi_{mi} - \frac{e(Q_{ss} + Q_i)}{\epsilon_i} d, \quad 3.5$$

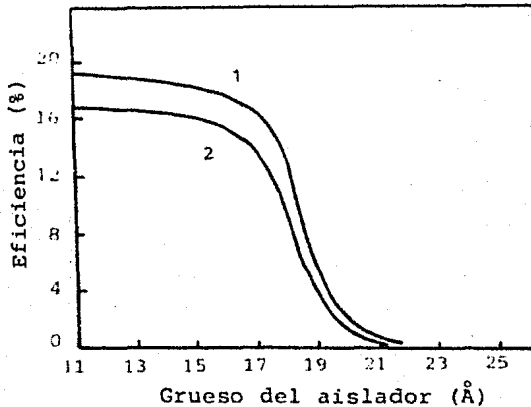


Figura 3.8 Eficiencia en función del grueso del aislador para una celda solar MIS, para dos valores de la resistividad del sustrato, 1) $0.02 \Omega\text{cm}$ y 2) $2.0 \Omega\text{cm}$.

los parámetros involucrados tienen el mismo significado que en la ecuación 3.4. Así, hay un decrecimiento lineal de ϕ_{mi} al aumentar d y por lo tanto un decrecimiento lineal en el V_{oc} .

En resumen, la región interfacial aisladora no sólo interviene en la introducción tanto de estados superficiales localizados como de cargas fijas, sino también en el control del transporte ^{28,29}.

EFFECTOS DE LA CARGA DEL AISLADOR Y DE LOS ESTADOS SUPERFICIALES

Los efectos de los estados superficiales en estas celdas son en realidad complejos pues se les atribuyen las siguientes características: a) son centros de almacenamiento de carga, b) son centros de recombinación-generación y c) proporcionan trayectorias túnel adicionales entre el sustrato semiconductor y la región superior ^{1, 26, 30}.

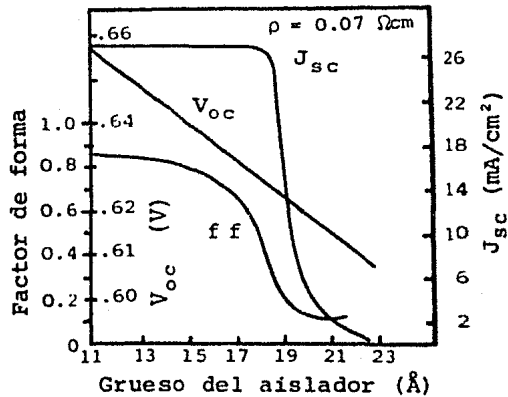


Figura 3.9 Valores calculados del factor de forma, de la corriente de corto circuito y del voltaje a circuito abierto en función del grosor de la capa aisladora, para una celda solar MIS.

A pesar de que el origen físico de los estados superficiales y de la carga del aislador no ha sido completamente entendido, se encuentra que éstos están relacionados con diversos factores como por ejemplo la forma de oxidación y la orientación del cristal.

Para celdas del tipo MIS, en el caso del silicio, el efecto de la carga del aislador es virtualmente indistinguible de un cambio en la altura de la barrera metal-aislador (ϕ_{mi}); una densidad de carga de 10^{12} cm^{-2} localizada cerca de la interfase aislador-semiconductor provoca una reducción efectiva en ϕ_{mi} de casi 0.1 eV. Algunos dispositivos con capa de inversión en la superficie pueden tolerar densidades de estados superficiales superiores a 10^{13} cm^{-2} sin mostrar una degradación apreciable en sus propiedades.

Para asegurar el mejor funcionamiento del diodo es necesario minimizar la introducción de estos centros de carga durante la fabricación o bien removerlos después de su introduc

ción. El tratamiento térmico ha sido ampliamente utilizado para este propósito; una temperatura (típica) máxima para este proceso es de unos 450 °C durante una hora.

En el V_{oc} , el efecto de los estados superficiales se observa a partir de las siguientes expresiones ³²:

$$V_{oc} = \frac{n k T}{e} \left[\ln \frac{J_{sc}}{J_0} + \chi^{\frac{1}{2}} d \right], \quad 3.6$$

donde

$$J_0 = A^* T^2 \exp - \frac{e \phi_B}{k T}, \quad 3.7$$

con

$$\phi_B = \frac{1}{\nu} (E_g + \chi_s - \phi_m) + (1 - \frac{1}{\nu}) \phi_0, \quad 3.8$$

y

$$\nu = 1 + \frac{e d D_{ss}}{\epsilon_i \epsilon_s}, \quad 3.9$$

ν es el factor de calidad del diodo, J_{sc} es la corriente foto generada, χ es la barrera de potencial del óxido, χ_s es la afinidad electrónica del metal, ϕ_m es la función de trabajo del metal, ϕ_0 es el nivel neutral de estados superficiales, A^* es la constante de Richardson y D_{ss} es la densidad de estados superficiales.

La ecuación 3.6 se puede reducir a una expresión de la forma:

$$V_{oc} = \alpha - \beta D_{ss} \quad 3.10$$

donde α y $\beta > 0$.

Con algunos valores característicos:

$$J_{sc} = 25 \frac{mA}{cm^2}, \quad d = 20 \text{ \AA}, \quad \phi_m = 4.15 \text{ eV},$$

$$A^* = 32 \frac{A}{cm^2 \cdot K^2}, \quad E_g + \chi_s = 5.25 \text{ eV}, \quad \phi_0 = 0.20 \text{ eV},$$

se obtiene

$$V_{oc} = 0.65 - 2.10 \times 10^{-14} D_{SS}; \quad 3.11$$

en este caso V_{oc} se mide en volts y D_{SS} en $\text{cm}^{-1}\text{eV}^{-1}$.

La reducción en el V_{oc} también se puede observar a través de la relación correspondiente a la altura de la barrera

$$\phi'_{mi} = \phi_{mi} - \frac{e(Q_{SS} + Q_i)}{\epsilon_i} d \quad 3.12$$

en este caso los parámetros involucrados tienen el mismo significado que en la expresión 3.5.

El efecto de los estados superficiales y de la carga del óxido sobre la eficiencia de conversión, para tres casos considerados como representativos: a) nivel medio, b) nivel alto y c) nivel bajo, se muestran en la figura 3.10 ²⁶.

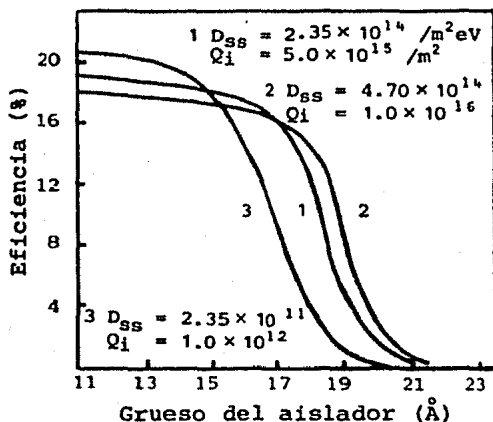


Figura 3.10 Efecto de la densidad de estados superficiales y de la carga del aislador para tres casos: 1) nivel medio, 2) nivel alto y 3) nivel bajo.

Las características I-V en función de la densidad de estados superficiales se ilustran en la figura 3.11, donde también se presentan tres casos: 1) cuando los estados superficiales

son despreciables, 2) cuando están distribuidos a través de la banda de energías prohibidas del silicio (como en la figura 3.12) y actúan sólo como almacenes de carga y centros de recombinación-generación y 3) cuando los estados superficiales además de tener las características anteriores, proporcionan también trayectorias túnel adicionales entre el metal y el semiconductor.

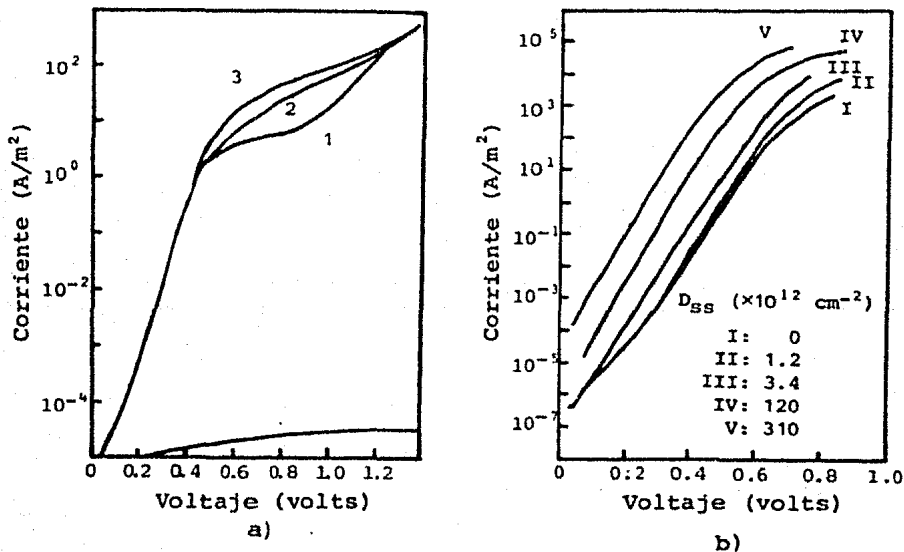


Figura 3.11 Características I-V en función de los estados superficiales. a) ¹, b) ⁶.

En resumen, los estados superficiales tienen un pequeño efecto sobre las características del dispositivo y actúan principalmente como una carga fija en la interface semiconductor-aislador ^{1,30}.

EFFECTOS DE LA ORIENTACION DEL CRISTAL

Ya que la densidad de estados superficiales para el silicio depende de la orientación cristalográfica y, como

$$D_{SS} (111) > D_{SS} (110) > D_{SS} (100), \quad 3.13$$

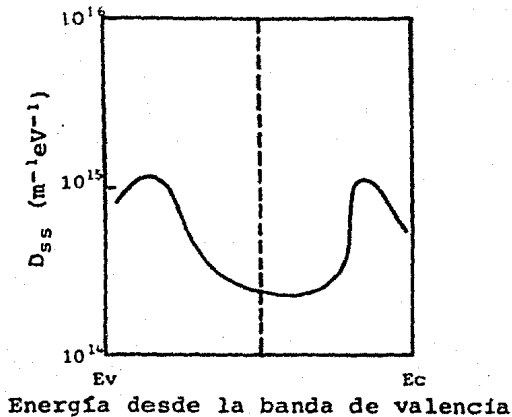


Figura 3.12 Distribución de los estados superficiales a través de la banda de energías prohibidas para el silicio.

se espera una pequeña degradación en la eficiencia del diodo para orientaciones diferentes a (100) ²⁶.

EFFECTOS DE LA TEMPERATURA

Los efectos de la temperatura sobre el funcionamiento de las celdas se deben tanto a la variación en el proceso de tunelaje con la temperatura, como al cambio de las propiedades de transporte del semiconductor, siendo ésta la causa más importante. Los parámetros que se alteran en este caso son: la banda de energías prohibidas, las movilidades y los tiempos de vida de los portadores, las concentraciones de los portadores, los niveles de Fermi y el coeficiente de absorción⁷.

La eficiencia, la corriente de corto circuito, el factor de forma y el voltaje a circuito abierto fueron calculados en función de la temperatura para el rango 200 - 425° K, estos valores se muestran en la figura 3.13. La figura 3.14 es la curva I-V en función de la temperatura para una celda SIS de

ITO/Si. En la figura 3.13 se aprecia que la corriente de cortocircuito es casi independiente de la temperatura, que el factor de forma cae al aumentar la temperatura y, que el cambio más importante ocurre en el V_{oc} ; aun cuando el decrecimiento es aparentemente lineal, un examen más cuidadoso revela que la pendiente aumenta ligeramente al aumentar la temperatura.

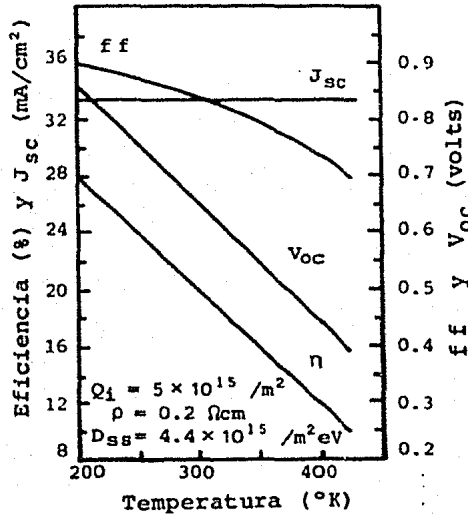


Figura 3.13 Valores calculados de η , J_{sc} , V_{oc} y ff en función de la temperatura.

La figura 3.14 señala que la corriente en oscuridad para una celda SIS aumenta levemente con la temperatura. Si atribuimos una corriente de saturación J_s al diodo, ésta también aumentará con la temperatura. Utilizando la ecuación del diodo ideal tenemos:

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left[\frac{J_{sc}}{J_s} + 1 \right]. \quad 3.14$$

La expresión convencional para la corriente de saturación pue-

de ser escrita como

$$J_S = A \cdot T^2 \exp - \frac{e\phi_B}{kT} \quad . \quad 3.15$$

Combinando estas dos ecuaciones y considerando que J_{sc} es independiente de T , se observa una reducción en el V_{oc} al aumentar la temperatura. Así, la disminución del V_{oc} conduce a una caída en la eficiencia en función de la temperatura, en una forma casi lineal.

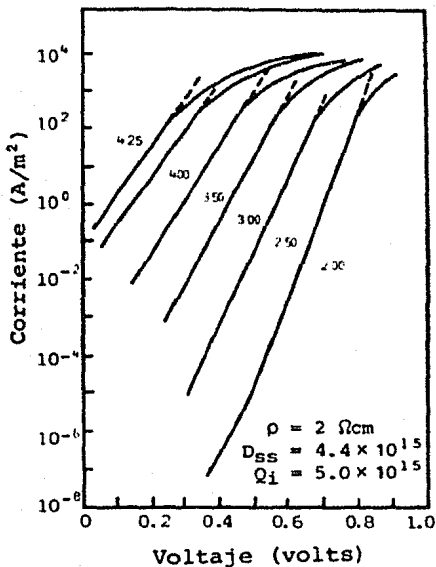


Figura 3.14 Características I-V en función de la temperatura para una celda solar SIS.

3.2 RESPUESTA ESPECTRAL

A pesar de que en las celdas SIS la respuesta en el ultravioleta es un poco mejor que para las celdas de unión p-n (donde la región superior es una capa altamente envenenada y llena

de defectos) aún existen pérdidas a causa del óxido semiconductor superior (ITO) que no permiten acercarse a la eficiencia predicha por la teoría^{25,34}. En la figura 3.15 se presentan cálculos de la respuesta espectral bajo iluminación AM1, para una celda SIS de ITO/SiO₂/Si tipo p.

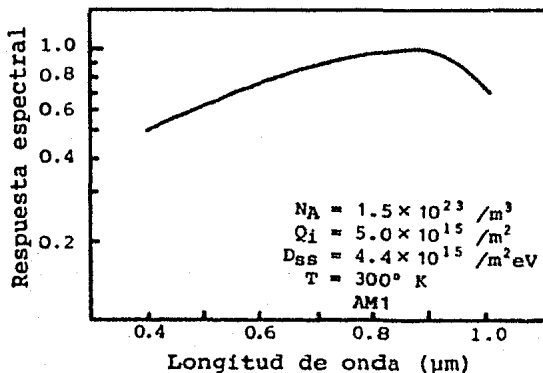


Figura 3.15 Respuesta espectral para una celda solar SIS.

3.3 EFICIENCIA Y MECANISMOS DE PERDIDA

Si bien la eficiencia teórica máxima para una celda solar SIS de ITO/SiO₂/Si tipo p de 0.2 Ωcm , con una capa interfacial de 12 Å, bajo iluminación AM1, es casi del 20%⁶, los trabajos experimentales en pocas ocasiones han logrado eficiencias mayores al 12% (figura 3.16); estos resultados sugieren la necesidad de identificar y analizar las pérdidas que impiden acercarse a ese valor teórico⁷.

Los mecanismos de pérdida que más influyen en el funcionamiento de las celdas se pueden dividir en cuatro categorías: 1) pérdidas por absorción-reflexión asociadas con la capa superior del diodo, 2) pérdidas por recombinación asociadas con la región desértica superficial, 3) pérdidas del V_{oc} causadas por: a) variaciones en la función de trabajo de la capa supe-

rior, b) imperfecciones en la capa interfacial que pueden provocar una reducción en la altura de la barrera SiO_2/Si y c) una excesiva corriente inversa de saturación del diodo; 4) pérdidas a causa de la resistencia en serie y en paralelo ocasionadas por: a) efectos de la resistencia en serie debida a contactos y a la resistencia de capa del ITO, b) resistencia en paralelo producida por corrientes de fuga a causa de los defectos del material y c) resistencia asociada con la capa interfacial.

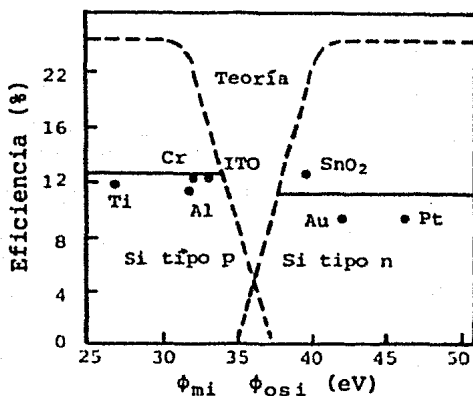


Figura 3.16 Eficiencias obtenidas en forma experimental para diversas celdas solares, tanto SIS como MIS.

La reducción en la eficiencia debida a la absorción-reflexión en las celdas SIS de ITO sobre silicio es considerable. En la figura 3.17 se presenta la reflexión y transmisión para películas de ITO de 3 000 Å de grueso las cuales muestran un 80 a 90% de transmisión; esto indica que una capa de ITO de este espesor no forma una cubierta antirreflejo ideal; con un índice de refracción aproximadamente igual a 2 parece mejor una capa de 750 Å, sin embargo, la resistividad del ITO no es lo suficientemente baja como para usar capas tan delgadas ⁶.

Una reflexión entre el 10 y el 20% en la capa superior de

ITO provoca una reducción en la eficiencia entre el 2 y el 4%⁷.

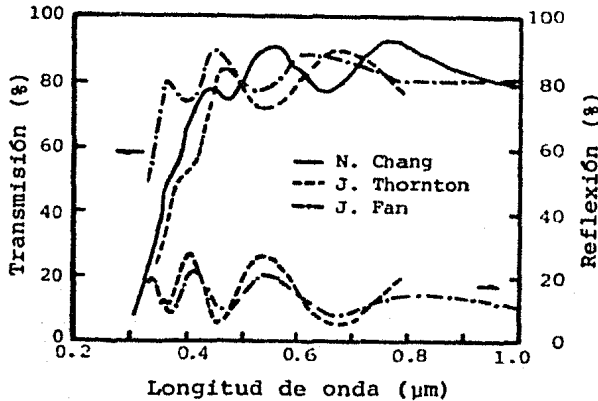
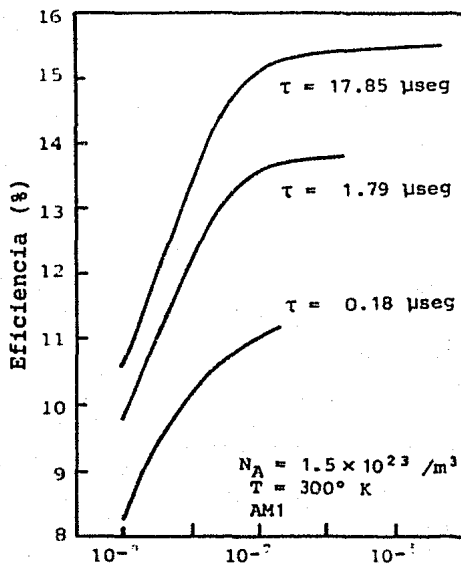


Figura 3.17 Reflexión y transmisión para películas de ITO de 3 000 Å de grueso.

Pérdidas por recombinación en la región desértica.- Parece ser que en la capa desértica del silicio ocurre una recombinación considerable producto de los daños causados durante la fabricación del diodo. En la figura 3.18 se presenta este efecto sobre la eficiencia de conversión como función del tiempo de vida en la región desértica.

Una vez establecido el tiempo de vida en la región desértica ($\tau = 17.85 \times 10^{-6}$ seg, por ejemplo³⁵) el efecto de este parámetro en las características I-V así como el factor de forma, se muestra en la figura 3.19, donde se puede observar que se requiere una reducción aproximada de tres órdenes de magnitud en τ para que éste tenga un efecto apreciable en η .

Pérdidas en el V_{oc} .- Otra gran pérdida en la eficiencia se debe a la reducción en el V_{oc} ; una primera causa está relacionada con las posibles variaciones en la función de trabajo o afinidad electrónica del material de la capa superior. Para una celda de ITO, en la figura 3.20 se presenta el efecto de ϕ_{osi}



Tiempo de vida de la región desértica (seg)

Figura 3.18 Eficiencia en función del tiempo de vida de la región desértica.

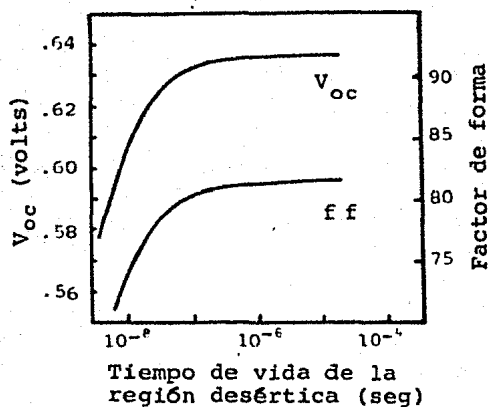


Figura 3.19 Características I-V en función del tiempo de vida de la región desértica.

sobre la eficiencia; un valor de ϕ_{osi} cercano a la región de transición, 3.6 eV, tiene un marcado efecto sobre η . Un corrimiento de 0.1 eV en ϕ_{osi} puede causar una caída del 1.5% en la eficiencia, que podría aumentar hasta el 2 o 3% como resultado de la composición del ITO o de variaciones en los procesos de depósito de esta capa que afectan su estructura electrónica.

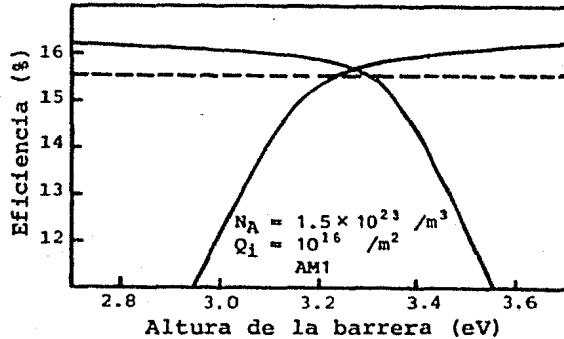


Figura 3.20 Efecto de la función de trabajo en la eficiencia de las celdas.

Una segunda causa en la disminución del V_{oc} se debe a las irregularidades físicas de la capa interfacial, pues en ocasiones, estas delgadas capas no son completamente uniformes, pueden contener agujeros que provocan un contacto directo entre la película superior y el silicio, se forma entonces una barrera Schottky y se reduce el V_{oc} . Es difícil estimar con precisión la caída de la eficiencia en este caso, pero podría ser del 2 al 3%.

Finalmente, la corriente de saturación del diodo (polarización inversa o directa débil) puede reducir el voltaje V_{oc} :

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left[\frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right]. \quad 3.14$$

Los valores excesivos de la corriente de saturación pue-

den ser producto de corrientes de defecto en la capa desértica, de corrientes de estados superficiales y de corrientes periféricas. En este caso puede haber una caída del 3% en la eficiencia.

Efectos de la resistencia en serie y en paralelo.- En el caso de las celdas SIS, la resistencia en serie puede ser dividida en dos componentes, una producida por la resistencia en serie de la película de ITO y otra por la interface. La desviación, observada experimentalmente, de la conducta lineal en la gráfica $\log I - V$ bajo una polarización alta, figura 3.21, se debe a la resistencia en serie, mientras que, a polarización baja, la desviación de la conducta lineal es a causa de la resistencia en paralelo.

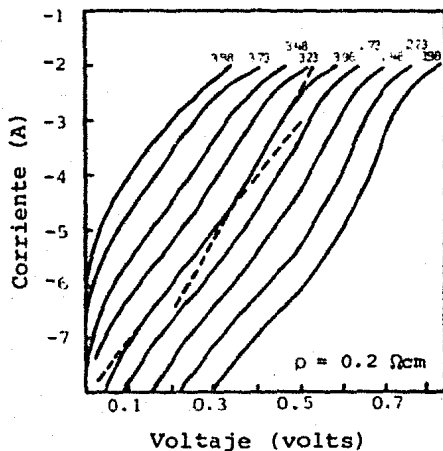


Figura 3.21 Características I-V obtenidas experimentalmente para una celda solar SIS.

Para saber cómo está dividida la resistencia en serie, en resistencia en serie convencional y en resistencia interfacial, ésta puede ser calculada si se conoce el grueso de la región interfacial. Una curva de R_s (Ωcm^2) vs. el grueso de la capa interfacial se encuentra en la figura 3.22.

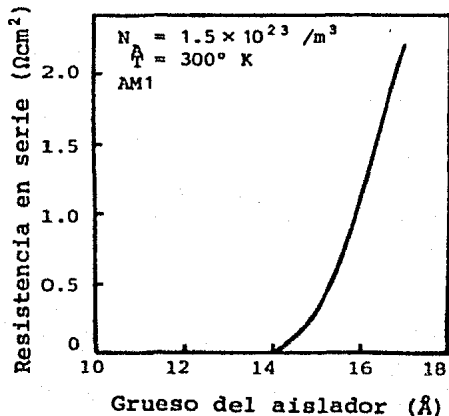


Figura 3.22 Resistencia en serie en función del grosor del aislador.

Es posible encontrar una pérdida considerable en la eficiencia si la capa interfacial es muy gruesa o si la resistividad del ITO aumenta demasiado. En este caso, la caída en la eficiencia a causa de la resistencia en serie puede ser hasta de un 10% ³⁵.

En la tabla 3.2 se muestran los cuatro mecanismos de pérdida y se indica su posible acción en la reducción de la eficiencia y, para propósitos de comparación, en la tabla 3.3 se presentan los cálculos de las características para una celda ideal con una eficiencia del 20% ⁶.

Desafortunadamente estos mecanismos de pérdida generalmente actúan en conjunto lo que hace difícil la minimización de cada uno de ellos.

Tabla 3.2

RESUMEN DE LOS MECANISMOS DE PERDIDA Y SU EFECTO EN LA REDUCCION DE LA EFICIENCIA A PARTIR DEL MAXIMO POSIBLE (20 %)

Mecanismo	Reducción
1) Reflexión-transmisión a través de la capa de ITO (J_{sc})	Hasta el 8%
2) Recombinación en la región desértica (V_{oc} y ff)	0.1 al 1%
3) Reducción en el V_{oc}	
i) alta función de trabajo ϕ_{osi} (0-3%)	
ii) imperfecciones en la región de SiO_x	0 al 12%
iii) bajo envenenamiento del ITO (0-9%)	
iv) corriente de saturación demasiado alta (0-9%)	
4) Resistencia en serie y en paralelo (ff)	
i) región interfacial (0-10%)	
ii) resistencia de capa y contactos (0-5%)	0 al 10%
iii) en paralelo (0-2%)	

Tabla 3.3

CARACTERISTICAS TEORICAS PARA UNA CELDA SIS ITO/ SiO_2 /Si tipo p. Substrato monocristalino con resistividad 0.2 Ω cm.

$$J_{sc} = 36 \text{ mA/cm}^2$$

$$V_{oc} = 0.66 \text{ V}$$

$$ff = 0.84$$

$$\eta = 20 \%$$

CAPITULO IV

INTRODUCCION

Fue en forma experimental como se encontró la presencia de una delgada capa aisladora interfacial en una celda de ITO sobre silicio, formando realmente una celda solar del tipo SIS. En este capítulo se presentan algunos aspectos experimentales sobre celdas SIS y MIS que se consideran de interés.

4.1 ELABORACION DE LAS CELDAS

La fabricación de una celda SIS y MIS se inicia con el substrato semiconductor sobre el cual se deja crecer una delgada capa de óxido por un lado y por el otro se evaporará un contacto posterior. Se forma el contacto superior, una capa semiconductor o metálica y, finalmente, se evapora una cubierta anti-reflectora. A continuación se indican algunos detalles de la elaboración para cada tipo de celdas.

Celdas del tipo SIS.- En este caso la oblea de silicio es generalmente colocada en una atmósfera de oxígeno a temperaturas elevadas para hacer crecer una capa de SiO_2 ; posiblemente las interfaces mejor caracterizadas hasta ahora son las de SiO_2 sobre silicio, mientras que para algunos materiales semiconductores como InP, CdSe y CuInSe₂, la naturaleza de la capa interfacial es desconocida.

Una vez que ha sido formada la interface, se debe aplicar un óxido semiconductor superior para invertir la superficie del substrato y formar la barrera. Entre los materiales utilizados para la formación de la región superior destaca el estannato de indio, ITO, por esta razón se tomará como celda representativa aquella formada por una capa de ITO sobre silicio monocristalino tipo p y, en particular de ITO con el 90% de In_2O_3 y el 10% de SnO_2 , pues además de su buena transmitividad óptica tiene al mismo tiempo una resistividad aceptable ⁷.

Existen varios métodos para depositar el ITO, evaporación

por haz electrónico, pulverizado RF ³⁶, pulverizado por haz de iones ⁶ y rocío químico ⁷.

Ya que celda ha sido formada, es necesario proporcionarle un contacto posterior aceptable y una cubierta antirrefletores. Los contactos óhmicos sobre silicio son relativamente fáciles de lograr, se evapora una capa de aluminio entre 1 500 y 3 000 Å para silicio tipo p y una capa de Cr-Au sobre silicio tipo n para las celdas SIS SnO₂/SiO₂/Si tipo n por ejemplo ⁷. En el caso de GaAs y otros semiconductores es difícil la elaboración de este contacto posterior.

Para las celdas SIS de ITO, la región superior, una capa relativamente gruesa (3 000 Å), puede ser usada como una cubierta parcialmente antirrefletores.

Celdas solares MIS.- A pesar de que existen diversos métodos para preparar estas celdas, todas siguen más o menos un procedimiento común. Después de la limpieza del sustrato se deposita o se deja crecer la capa interfacial que, en el caso de silicio, es generalmente de SiO₂. Para la formación de esta capa ultra delgada es muy común la oxidación en un tubo de cuarzo, bajo una temperatura de 800 a 1 000°C, el cual puede contener oxígeno seco, aire, nitrógeno, vapor de agua o algunas otras variaciones. Los tiempos de crecimiento son usualmente cortos, algunos minutos a lo más. También es posible producir una interfase aceptable colocando el silicio en una solución de agua bidestilada cerca de su punto de ebullición y mediante algunas otras técnicas como oxidación en plasma, anodización y evaporación; hasta ahora es difícil afirmar cuál de todas produce la mejor capa interfacial o el mejor óxido, pues cada una de estas técnicas probablemente conduce a compuestos con propiedades físicas y químicas diferentes ⁷.

El problema de preparar una capa interfacial sobre GaAs es, como ya se había indicado, muy grande; los mejores resultados han sido obtenidos con Sb₂O₃, depositados por evaporación. Se han probado algunos otros métodos tales como oxidación en plasma, a-

nodización, el uso de vapor de agua y varios agentes químicos sin obtener mucho éxito ⁷.

Después de la interface se forma la región superior, en la mayoría de los casos los metales pueden ser depositados por técnicas convencionales, calentamiento por resistencia, calentamiento por haz de electrones o pulverizado. El grueso de la película es aproximadamente de 50 Å; con este grueso pueden existir imperfecciones y la celda se vuelve muy sensible a ataques ambientales; esta rápida degradación puede ser evitada mediante una cubierta antirrefleitora adecuada. Una celda MIS requiere, además de esta cubierta, una rejilla de colección especialmente si posee una área grande.

Aunque la celda Al/SiO₂/Si se considerará como estructura MIS representativa, el material base de estas celdas, generalmente silicio monocristalino tipo p, en ocasiones es sustituido por otros compuestos como GaAs, Cu₂O y CdSe.

Celdas MIS de Al/SiO₂/Si.- La elaboración de estas celdas se inicia con las obleas de silicio monocristalino tipo p, con resistividades entre 3 y 5 Ωcm y de orientación (100); estas obleas se marcan y se cortan en pequeñas áreas. Después de los procesos de limpieza y de ataque químico, se forma un contacto posterior depositando 1 500 Å de aluminio; la muestra es tratada térmicamente y, en este momento, se forma la capa de SiO₂; el proceso térmico generalmente consta de los siguientes pasos: i) se introduce el sustrato en un horno a 500°C, bajo un flujo de Ar, ii) se mantiene el sustrato en Ar durante 5 minutos, iii) se cambia el argón por oxígeno durante otros cinco minutos, iv) se regresa al flujo de Ar y v) después de cinco minutos, a 500 °C bajo el flujo de Ar se deja enfriar el sustrato en un extremo del tubo.

El contacto superior se obtiene evaporando una capa de aluminio de alta pureza, de 40 a 60 Å, a una velocidad de 10-20 Å/seg y, finalmente, se elabora la cubierta antirrefleitora de SiO₂, una capa de 900 Å a una velocidad de 10 Å/seg. Tanto el Al como el SiO₂ se depositan bajo un vacío de 10⁻⁶ torr ¹².

Celdas MIS de Be sobre silicio monocristalino y policristalino.- En este caso se utiliza silicio tipo p de orientación (100); las obleas, con resistividades de 8 a 12 Ωcm , son marcadas en pequeñas áreas, efectuando a continuación los procesos de limpieza; baños de tricloroetileno, acetona y agua destilada; se efectúa un ataque químico con una solución de: HNO_3 : 48% HF : CH_3COOH = 6 : 1 : 4 para remover los daños superficiales debidos al corte y a los procesos de pulido mecánico, son enjugadas en agua bidestilada; se transfieren a una solución de HF durante un minuto y finalmente se limpian ultrasonicamente en agua bidestilada, se secan y se colocan en un sistema de vacío.

Las técnicas para formar la capa aisladora de óxido sobre las superficies ya limpias son:

- i) Oxidación química.- Las obleas se introducen en ácido nítrico durante 11 minutos.
- ii) Oxidación por aire.- La oxidación térmica se efectúa en un tubo de cuarzo con una atmósfera de aire, a 400°C y por 30 minutos.
- iii) Oxidación con O_2 .- En este caso la oxidación es similar al inciso anterior, sólo que bajo una atmósfera de oxígeno a 420°C y por 18 minutos.

Ahora, el Be (99.9%) se evapora para formar una capa de 100 a 250 Å , a una presión de 3×10^{-5} torr, a temperatura ambiente y a una velocidad de 15 $\text{Å}/\text{seg}$. Por último se forma el contacto posterior evaporando una capa de 300 Å de Pt a temperatura ambiente y se cortan las obleas en áreas de 0.5 - 1 cm^2 ³⁷

Celdas MIS sobre silicio amorfo.- La película metálica superior para estas celdas fue depositada sobre sustratos de a cero inoxidable donde la película de silicio amorfo se obtuvo por medio de una descarga gaseosa rf en silano. La capa aisladora (de TiO_x) fue de 0 - 3 nm de grueso y el espesor de la capa metálica superior (níquel con 50% de transparencia) fue de 7.5 nm. En este caso no se aplicó cubierta antirreflejante ^{38, 39}.

Celdas MIS sobre GaAs.- Aun cuando existen reportes de cel

das MIS con sustratos de GaAs que han resultado muy eficientes, es difícil depositar una película aisladora de alta calidad sobre este compuesto; los óxidos naturales introducen una alta densidad de estados superficiales en el GaAs y los compuestos de As se descomponen fácilmente a temperaturas relativamente bajas; frente a esto el nitruro de Ga se presenta como un material prometedor.

Celdas MIS con sustratos de Cu_2O .- Para estas celdas los sustratos de Cu_2O fueron preparados por oxidación de láminas de Cu en aire a $1\ 000^\circ\ \text{C}$, con resistividades de 150 a $250\ \Omega\text{cm}$. Después del proceso de limpieza y antes de ser introducidos a un sistema de vacío para la formación de la capa de SiO_2 , los sustratos fueron atacados en 8 M NH_3 , y después enjuagadas en agua bidestilada. El óxido fue depositado a temperatura ambiente. La región superior fue obtenida evaporando diversos materiales como Au, Ag, Al y Cu con un grueso típico de 40 a $60\ \text{Å}$ y con 50% de transparencia. El contacto óhmico posterior fue hecho por evaporación al vacío de Au y el contacto frontal con una máscara. El área total de la celda típica es de $1.0\ \text{cm}^2$ ¹⁵.

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Celdas SIS.- Las características en oscuridad y bajo iluminación de una celda SIS de $\text{ITO/SiO}_2/\text{Si}$ en función de la composición de la región superior se presentan en la figura 4.1, donde se puede observar que en el V_{oc} no hay cambios notables al aumentar la cantidad de SnO_2 en el ITO, pero tanto la fotocorriente como el factor de forma se modifican fuertemente con la concentración de este óxido ^{0,40}; la reducción en la corriente se debe a la disminución de la transmisión de la película superior como lo señala la figura 4.2, mientras que la caída en el factor de forma está relacionada con el aumento de la resistividad.

Ya que el ITO con un 90% de In_2O_3 y 10% de SnO_2 ha dado buenos resultados, en la figura 4.3 se presentan las características I-V en oscuridad y bajo iluminación para una celda $\text{ITO/SiO}_2/\text{Si}$ con esta composición, la cual muestra los siguientes paráme-

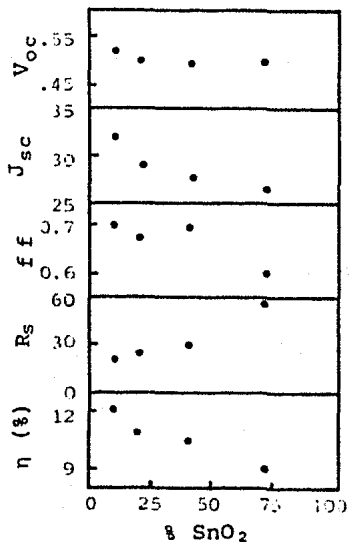


Figura 4.1 Características I-V de una celda solar SIS en función de la composición de la región superior.

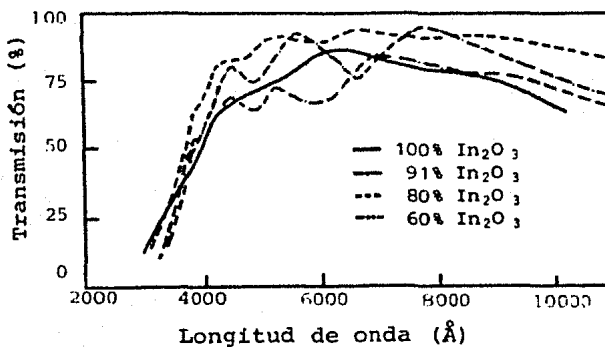


Figura 4.2 Transmisión óptica de las películas de ITO en función de su composición.

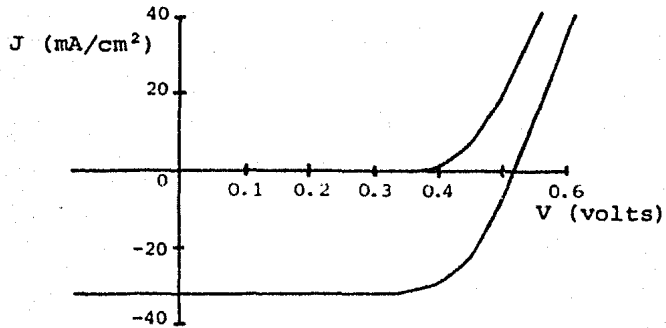


Figura 4.3 Características I-V en oscuridad y bajo iluminación para una celda solar SIS.

datos: $J_{sc} = 32 \text{ mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc} = 0.52 \text{ V}$, $ff = 0.71$ y $\eta = 12.8\%$, bajo iluminación AM1.

En la figura 4.4 se incluyen las características I-V para una celda ITO/ SiO_x /Si para el caso de silicio policristalino.

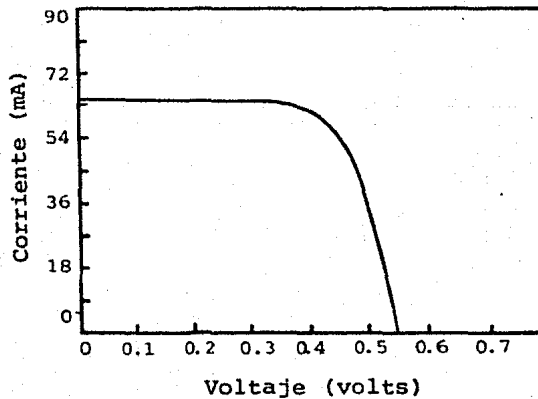


Figura 4.4 Características I-V para una celda solar SIS con sustrato policristalino.

En cuanto a las celdas SIS con capa superior de ITO, aún no se tienen resultados satisfactorios al utilizar sustratos diferentes al silicio, sólo hay un reporte donde se alcanzó una eficiencia del 14.4 % (bajo iluminación AM2) con InP . En la tabla 4.1 se encuentran las características fotovoltaicas para algunas celdas SIS cuyas áreas fueron en todos los casos, de 0.075 cm^2 .

Tabla 4.1

CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO PARA ALGUNAS CELDAS SIS, CON DIFERENTES TIPOS DE SUBSTRATOS

	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	ff	η (%)
ITO - GaAs tipo p (polic)	0.49	14	0.57	3.9
ITO - InP tipo p (polic)	0.62	13	0.25	2.0
ITO - CuInSe ₂ tipo p (polic)	0.20	22	0.34	1.5
Cd ₂ SnO ₄ - Si tipo p (monoc)	0.50	32	0.53	8.5
ITO - CuIn _{0.3} Ga _{0.7} Se _{1.2} Te _{0.8} tipo p	0.65	29	0.69	13.0

Celdas MIS.- La figura 4.5 es una curva I-V para una celda MIS de Al/SiO₂/Si tipo p monocristalino cuyas características típicas se resumen en la tabla 4.2 ¹².

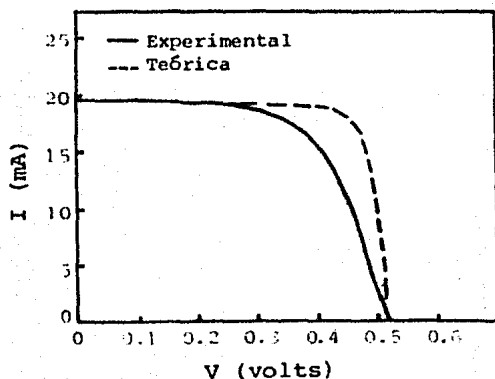


Figura 4.5 Curva I-V para una celda MIS de Al.

Tabla 4.2

CARACTERISTICAS TÍPICAS DE UNA CELDA MIS DE Al/SiO₂/Si tipo p (monoc)

Estructura:

Capa aisladora

17 a 19 Å de SiO₂

Capa superior

45 Å de Al a 11 Å/seg

Cubierta antirrefleтора

900 Å de SiO

Area de la celda

1.5 cm²

Area efectiva

0.71 cm²

Características:

$$J_{SC} = 27.5 \text{ mA/cm}^2$$

$$V_{OC} = 0.515 \text{ V}$$

$$ff = 0.65$$

$$\eta = 9.1 \%$$

En el caso de silicio amorfo, las características fotovoltáicas de una celda MIS de Al/TiO_x/Si, para diferentes grosores de la región interfacial se presentan en la figura 4.6 ^{39,41}

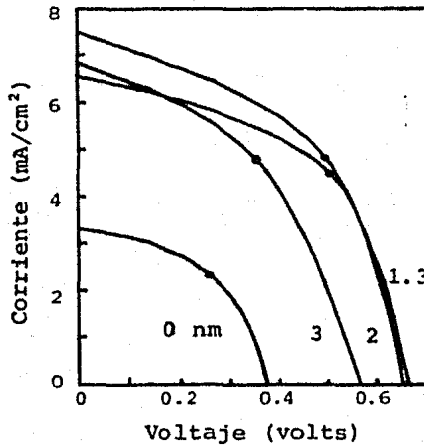


Figura 4.6 Características I-V para una celda MIS con sustrato de silicio amorfo.

En la figura 4.7 se observa la eficiencia en función del grueso de la capa aisladora, para una celda MIS de silicio amorfo ³⁹.

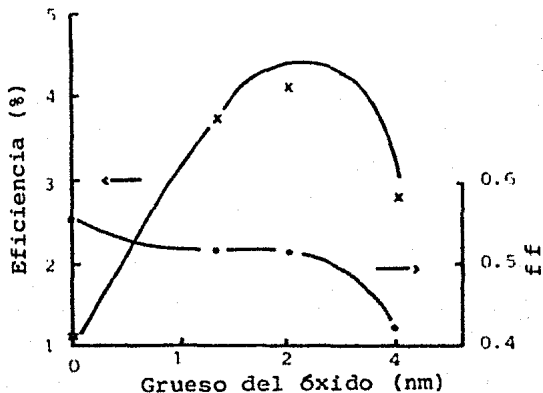


Figura 4.7 Eficiencia en función del grueso de la capa aisladora para una celda MIS sobre silicio amorfo.

Para celdas MIS de GaAs se han fabricado del tipo: Ag/Sb₂O₃/GaAs tipo n con una eficiencia del 17%, en la tabla 4.3 se incluyen las características de estas celdas.

Tabla 4.3

CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO PARA UNA CELDA Ag/Sb₂O₃/GaAs

$$J_{sc} = 26.5 \text{ mA/cm}^2$$

$$V_{oc} = 0.80 \text{ V}$$

$$ff = 0.80$$

$$\eta = 17 \%$$

En la figura 4.8 se muestran las características I-V en obscuridad y bajo iluminación (AM1), para celdas MIS sobre Cu₂O

con una capa interfacial de SiO_2 ; los pequeños voltajes obtenidos conducen a bajas eficiencias ¹⁵.

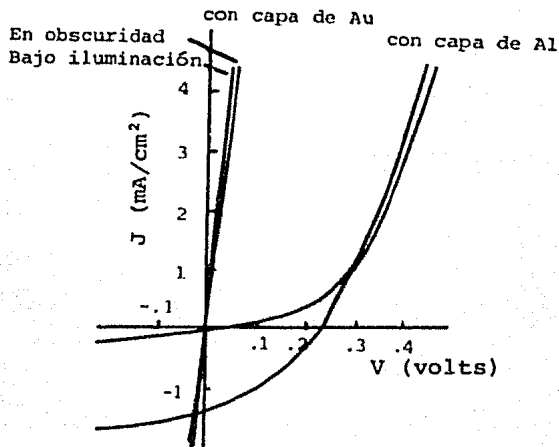


Figura 4.8 Características I-V en oscuridad y bajo iluminación para una celda MIS sobre Cu_2O .

En la tabla 4.4 y en las figuras 4.9 y 4.10 se observan las características para celdas MIS de cromo sobre silicio monocristalino y policristalino que, en el primer caso se tiene una eficiencia del 12.2 % y del 8.8 % para el segundo.

Tabla 4.4
CARACTERISTICAS EXPERIMENTALES PARA CELDAS SOLARES MIS DE Cr.

Substrato	Grueso de la capa de		V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	ff	η (%)
	Cr (Å)					
Monocristalino	31		0.60	26.4	0.77	12.2
Policristalino	37		0.50	24.2	0.73	8.8

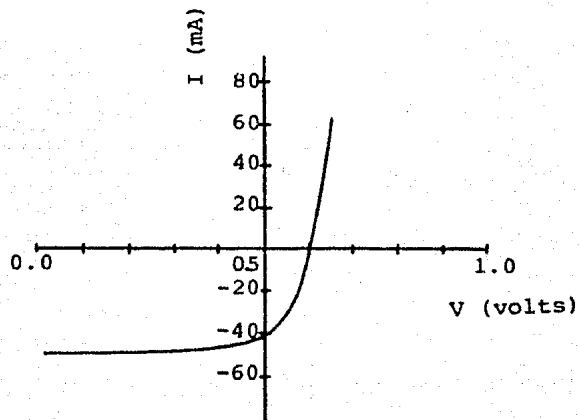


Figura 4.9 Características I-V para una celda solar MIS de Cr sobre silicio monocristalino.

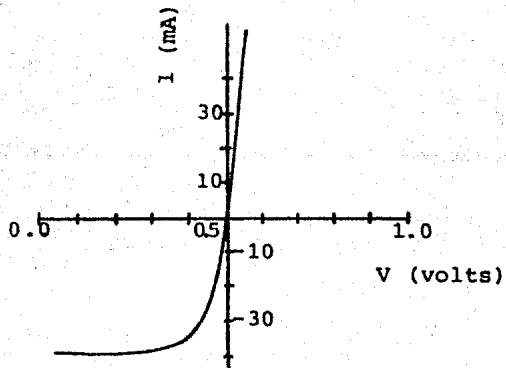


Figura 4.10 Características I-V para una celda solar MIS de Cr sobre silicio policristalino.

CARACTERISTICAS EN FUNCION DE LA CAPA INTERFACIAL

Un aspecto importante en los diodos SIS y MIS es el efecto del grueso de la región interfacial. Algunos resultados de η , J_{sc} y V_{oc} en función del grueso de esta capa, para una celda MIS de Al/SiO₂/Si tipo p monocristalino con resistividad de 0.2 Ω cm y un grueso de la capa de Al de 60 Å, se encuentran en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 ⁷.

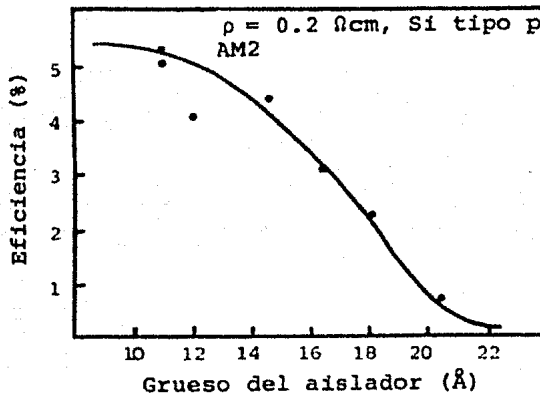


Figura 4.11 Eficiencia en función del grueso de la capa aisladora, para una celda MIS de Al.

Es posible observar que, en esta figura, los resultados experimentales están de acuerdo con la teoría, pues la eficiencia, para gruesos mayores que 22 Å, es casi cero y aumenta considerablemente cerca de 14 Å; no obstante, la eficiencia máxima obtenida es menor que la predicha por la teoría; esto se debe a la gran pérdida por reflexión en la superficie, como se indicó anteriormente.

En cuanto a la J_{sc} en función del grueso de la región aisladora, los resultados se acercan mucho a la teoría. El V_{oc} se aparta un poco de los cálculos para gruesos menores que 14 Å, lo cual puede atribuirse a defectos en la capa interfacial lo que disminuye la altura de la barrera efectiva.

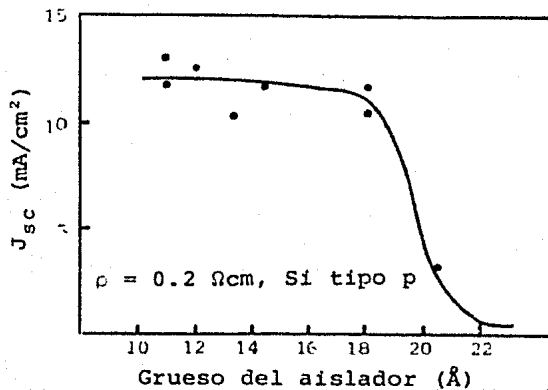


Figura 4.12 Corriente de corto circuito en función del grueso de la capa aisladora, para una celda MIS de Al.

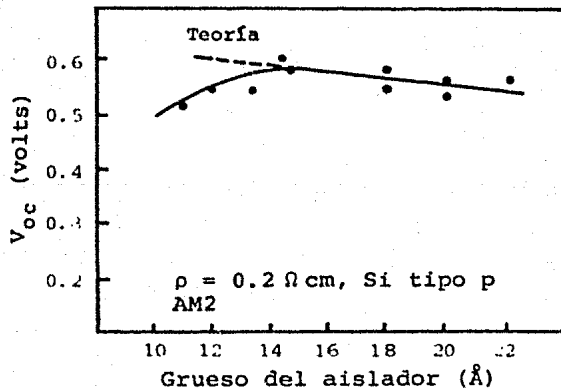


Figura 4.13 Voltaje a circuito abierto en función del grueso de la capa aisladora, para una celda MIS de Al.

En la figura 4.14 se presentan las características I-V para celdas MIS de Be sobre silicio, a temperatura ambiente, para diferentes procesos de oxidación; la curva 1 corresponde a una celda MS sin capa interfacial de óxido y las curvas 2, 3 y 4 pertenecen a los procesos de O_2 , oxidación química y oxidación en aire respectivamente. Los mejores resultados se obtuvieron por oxidación química y las características I-V para este caso se señalan en la figura 4.15.

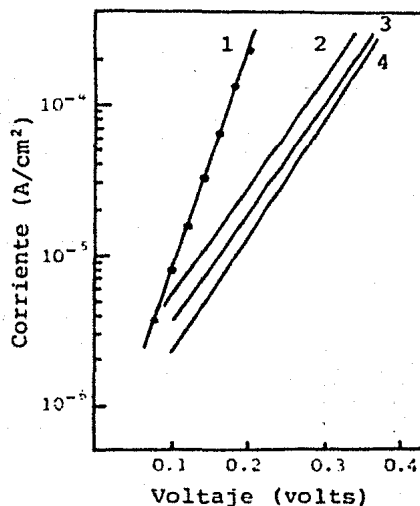


Figura 4.14 Características I-V para celdas solares MIS de Be para diferentes procesos de oxidación: 1) celda MS, 2) celdas obtenidas por proceso de O_2 , 3) por oxidación química y 4) por oxidación en aire.

DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA EN LAS CARACTERÍSTICAS I-V

Una curva experimental log I-V (en oscuridad) para una celda SIS de ITO-Si, en función de la temperatura, se presenta en la figura 4.16 ^{9,35}. En la figura 4.17 están contenidas algunas de las características I-V (en oscuridad), también en función de la temperatura, para celdas MIS de Al-Si, donde se

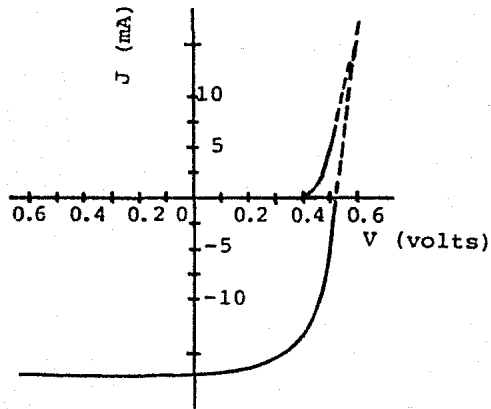


Figura 4.15 Características I-V para una celda MIS de Be.

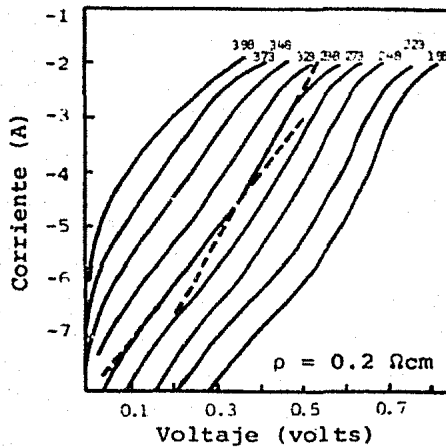


Figura 4.16 Curva log I-V (en oscuridad) para una celda SIS en función de la temperatura.

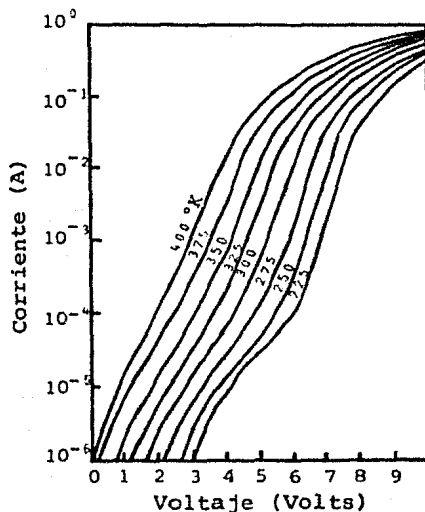


Figura 4.17 Características I-V (en oscuridad) para una celda MIS en función de la temperatura.

aprecian tres regiones, una de polarización baja, otra intermedia y otra para polarización alta ⁴².

Finalmente, al tomar en cuenta los datos de la tabla 4.5 se ve que en cualquier dispositivo deberán estar presentes algunos defectos a causa de las desigualdades en la estructura del cristal, la constante de la red y del coeficiente de expansión térmica ¹⁰.

EFFECTOS DE LA CUBIERTA ANTIRREFLECTORA EN LA RESPUESTA ESPECTRAL

Como se mencionó anteriormente, una pérdida importante en las características de la celda se debe a la reflexión-absorción asociada con la capa de ITO (en el caso de las celdas SIS) ya que ésta no actúa como una cubierta antirreflectora ideal. Enge

Tabla 4.5
PROPIEDADES DE ALGUNOS SEMICONDUCTORES

SEMICONDUCTOR	ESTRUCTURA DE LA RED	CONSTANTE DE LA RED			COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA LINEAL ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
		a	b	c	
Si	Diamante	5.431			2.33
Ge	Diamante	5.657			5.8
InP	Zincblenda	5.869			4.5
GaAs	Zincblenda	5.653			5.8
CdTe	Zincblenda	6.477			5.9
CuInSe ₂	Chalcopirita	5.782		11.62	
In ₂ O ₃	Cúbica	10.118			10.2
SnO ₂	Tetragonal	4.737		3.185	4.0
ITO	Cúbica	10.118			10.2
ZnO	Hexagonal	3.249		5.205	

neral las corrientes de corto circuito son fuertemente afectadas por la calidad de la cubierta antirrefleitora utilizada; una cubierta adecuada en los diodos MIS puede aumentar la transmitancia del metal y con esto la eficiencia de la celda.

En las celdas MIS frecuentemente se aplica una cubierta de SiO; una capa de SiO superior no sólo actúa como una cubierta antirrefleitora sino también tiende a inducir una capa de inversión debajo del silicio la cual mejora la eficiencia de colección para los portadores de carga minoritarios. Experimentalmente se ha encontrado que la velocidad de evaporación del SiO puede modificar levemente la efectividad de esta capa.

Además de las cubiertas de SiO también se han elaborado cubiertas de Ta₂O₅ sin embargo, hasta ahora, las cubiertas antirreflectoras más utilizadas y más efectivas parecen ser las de SiO⁴⁴.

Tanto en la figura 4.18 como en la 4.19 se presenta la respuesta espectral para diodos SIS de ITO-Si y para celdas MIS de Cr respectivamente y, por último, en las figuras 4.20 y 4.21 se observa cómo los dispositivos MIS de Al son fuertemente afectados por la cubierta antirreflejante^{5,12,45}.

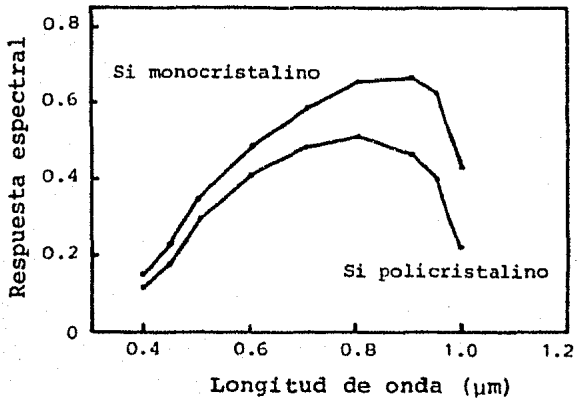


Figura 4.18 Respuesta espectral para celdas SIS de ITO con sustratos de silicio, monocristalino y policristalino.

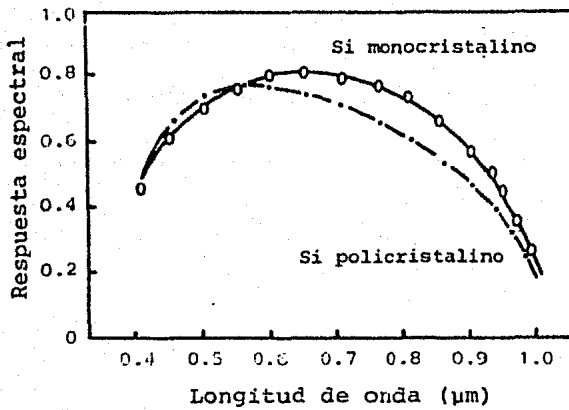


Figura 4.19 Respuesta espectral para celdas MIS de Cr con sustratos de silicio, monocristalino y policristalino.

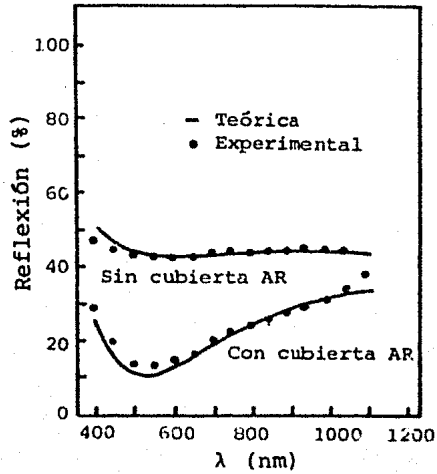


Figura 4.20 Reflexión para una celda MIS de Al.

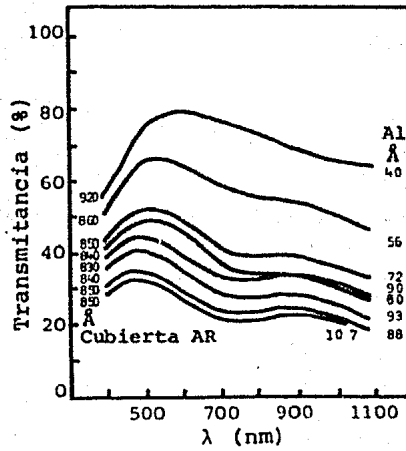


Figura 4.21 Transmitancia para celdas MIS de Al con cubierta anti-reflejante de SiO₂.

CONCLUSIONES

La introducción de una delgada capa aisladora entre la región metálica superior y el sustrato semiconductor de una celda Schottky puede mejorar notablemente la eficiencia del diodo y, al mismo tiempo, conduce a un nuevo tipo de estructuras: las celdas MIS (y SIS).

Este nuevo tipo de celdas ofrece ciertas ventajas con respecto a las uniones p-n tradicionales y las celdas MS que las hacen atractivas como convertidores fotovoltaicos.

Una ventaja frente a las celdas de unión p-n es la eliminación del proceso de difusión a temperaturas elevadas. La difusión anómala que frecuentemente se tiene en las fronteras de las celdas tradicionales provoca una seria degradación en el funcionamiento del diodo, las celdas SIS y MIS no deben sufrir tales problemas y sólo depender de las propiedades del material semiconductor utilizado, por esta razón es atractivo el uso de silicio policristalino como sustrato. Al apartar los efectos nocivos del alto envenenamiento de la región superior se mejora la respuesta espectral y, además en las celdas SIS, la región superior puede actuar como una cubierta parcialmente antireflectora, de alta transparencia y de resistencia aceptable.

En cuanto a las celdas MIS, la presencia de la capa aisladora incrementa el V_{oc} y con esto la eficiencia del dispositivo, esto en comparación a las celdas MS.

Otra gran ventaja de este tipo de celdas es su costo, razonablemente bajo y con una variedad de métodos de elaboración.

En este trabajo se presentó brevemente la influencia de algunos factores sobre la eficiencia de los diodos MIS y SIS: el nivel de envenenamiento del sustrato, el grueso del aislador, la carga del óxido y los estados superficiales, la orientación del cristal y la temperatura. Algunos de estos factores pueden ser modificados mediante la elección adecuada del subestrato y aun de la región superior; otros, como la densidad de estados superficiales y el grueso del óxido interfacial son con

trolados por el método de fabricación utilizado.

Es posible obtener, para las celdas SIS de ITO/SiO₂/Si tipo p monocristalino, una eficiencia del 21% (AM1) con un envenenamiento bajo del sustrato (0.2 Ωcm), con una capa interfacial delgada (12 Å) y una densidad moderada de defectos (por ejemplo D_{SS} = 4.4 × 10¹¹ cm⁻² eV⁻¹ y Q_i = 5 × 10¹¹ cm⁻²), y para las celdas MIS de Al/SiO₂/Si monocristalino tipo p una eficiencia del 21% (AM2) con un sustrato altamente envenenado (unos 0.07 Ωcm) y una densidad de defectos baja: D_{SS} = 2.4 × 10⁷ cm⁻² eV⁻¹ y Q_i = 10⁸ cm⁻².

A pesar de que algunos autores afirman haber encontrado en sus resultados experimentales un gran acuerdo con las predicciones teóricas, esto es sólo de una manera cualitativa, pues en realidad la investigación sobre este nuevo tipo de celdas se encuentra en una etapa inicial, al grado de que aún no existe una teoría que explique completamente los fenómenos de transporte en los dispositivos. Las figuras C.1 y C.2 muestran que efectiva-

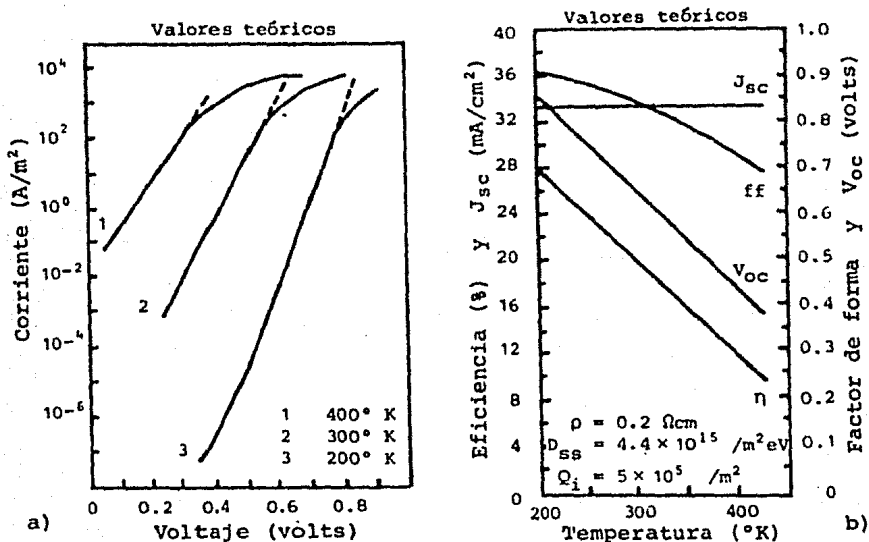


Figura C.1 Efecto de la temperatura, a) en las características I-V, b) en η, Voc, J_{sc} y ff, para una celda SIS de ITO sobre Si.

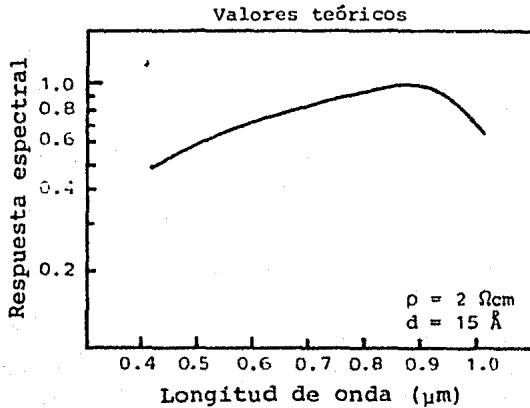


Figura C.2 Respuesta espectral para una celda SIS de ITO sobre Si.

mente, para celdas SIS de ITO sobre Si, los resultados experimentales se ajustan a aquéllos obtenidos en forma teórica^{8,25}.

Si bien el factor crítico en estas celdas es la región aisladora -ya que ésta debe ser lo suficientemente delgada para que ocurra el proceso de tunelaje entre la región superior y el substrato y suficientemente gruesa para evitar la formación de una barrera Schottky- hasta ahora la formación de esta capa es el principal problema en la fabricación de las celdas, todavía se está lejos de controlar de una forma efectiva el grueso de esta región. No obstante, se han intentado diversos métodos para la obtención de la capa aisladora y por el momento no es posible indicar cuál de éstos es el mejor.

Es necesario mencionar que la estructura física de la capa aisladora por el momento no está bien definida pues ocurren reacciones químicas que modifican fuertemente su composición. Hay investigaciones que prueban que el modelo en las celdas MIS de Al/SiO₂/Si no es correcto, debe ser Al/Al₂O₃(Si)/Si pues la película de aluminio reduce al SiO₂ produciendo Al₂O₃ + Si en la

región aisladora.

Aun cuando se han obtenido buenos resultados con las celdas SIS y MIS, parece que no es posible aumentar su eficiencia al mejorar y optimizar cada uno de los factores involucrados, pues juntos forman un complicado sistema del cual se debe encontrar la mejor combinación. Se ha observado invariablemente que cualquier cambio intencional para reducir algún mecanismo de pérdida importante en la estructura va acompañado por efectos secundarios inesperados. Esta situación es diferente a la encontrada en las uniones convencionales p-n de silicio, donde una cuidadosa optimización de los parámetros conduce a celdas solares altamente eficientes.

Entre los dispositivos SIS y MIS de mayor eficiencia es posible mencionar aquellos fabricados con GaAs, InP y silicio monocristalino, mientras que los diodos con sustratos de silicio amorfo y Cu_2O muestran una baja J_{sc} que los conduce a una eficiencia pobre.

Finalmente, hay que recordar que el grado de experimentación con las celdas SIS y MIS no ha alcanzado el nivel de sofisticación que con el de las celdas de unión p-n y, sin duda, futuras investigaciones sobre estas estructuras permitirán superar algunos de los problemas que se han encontrado durante la elaboración y conseguir así que este tipo de celdas tengan una buena perspectiva para aplicaciones terrestres.

***BIBLIOGRAFIA**

- 1 J.P. McKelvey
Física del estado sólido y de semiconductores
Limusa, 1976.
- 2 D.A. Fraser
The physics of semiconductor devices
Oxford P. S., 1979.
- 3 V. Dulin
Electron devices
MIR, 1980.
- 4 A. van der Ziel
Electrónica física del estado sólido
Prentice/Hall Internacional, 1972.
- 5 Wert y Thomson
Física de los sólidos
McGraw Hill, 1967.
- 6 S.M. Sze
Physics of semiconductor devices
Wiley International Edition, 1979.
- 7 K. V. Shalíмова
Física de los semiconductores
MIR, 1975.
- 8 Bruk Y., Garshenin V., Kurnosov A.
Producción de dispositivos semiconductores
MIR, 1971.
- 9 J.I. Pankove
Optical processes in semiconductors
Dover, 1975.

REFERENCIAS

- 1 M. A. Green, F. D. King y J. Shewchun,
Minority carrier MIS tunnel diodes and their application
to electron and photovoltaic energy conversion- 1 Theory
Solid State Electronics 17, 551, 1974.
- 2 J. T. Lue y Y. D. Hong,
The dependence of the photocurrent of MIS solar cells on
thickness of Schottky barrier metals
Solid State Electronics 21, 1213, 1978.
- 3 W. A. Anderson, A. E. Delahoy y R. A. Milano,
An 8% efficient layered Schottky-barrier solar cell
Journal of Applied Physics 45 (9), 3913, 1974.
- 4 I. Adamcik y J. Schröfel,
Controlling the characteristics of a MIS system by means
of an interlayer
Thin Solid Films 29, 297, 1975.
- 5 J. Dubow y S. Kar,
Majority carrier conduction effects in ITO/SIS solar cells
14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference,
San Diego, California, USA; p. 619, 1980.
- 6 D. Burk, J. Shewchun, M. Spitzer, R. Singh, J. Kukulka,
J. Hadrevi y J. J. Loferski,
Semiconductor-Insulator-Semiconductor (SIS) solar cells:
indium-tin-oxide on silicon
14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference,
San Diego, California, USA; p. 1376, 1980.
- 7 J. Shewchun,
Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) and Semiconductor-
Insulator-Semiconductor (SIS) Solar Cells: 2. Perform-
ance Characteristics
Solar Energy Conversion, (A.E. Dixon y J.D. Leslie Ed.)
Pergamon, 1978.

- 8 J. Shewchun, J. Dubow, C.W. Wilmsen, R. Singh, D. Burk
y J. F. Wager,
The operation of the semiconductor-insulator-semiconductor
solar cells: Experiment
Journal of Applied Physics 50 (4), 2832, 1979.
- 9 R. J. Stirn y Y. C. M. Yeh,
A 15% efficient antireflection-coated metal-oxide-semi-
conductor solar cell
Applied Physics Letters 27 (2), 95, 1975.
- 10 R. Singh y J. Shewchun,
The importance of the electron affinity of oxide-semi-
conductors as used in solar cells
Applied Physics Letters 33 (7), 601, 1978.
- 11 J. Shewchun,
Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) and Semiconductor-
Insulator-Semiconductor (SIS) Solar Cells: 1. Basic
Principles
Solar Energy Conversion, (A.E. Dixon y J.D. Leslie Ed.)
Pergamon, 1978.
- 12 L. C. Olsen, D. L. Barton y W. Miller,
Investigation of Al-Si MIS solar cells
14th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.
San Diego, California, USA; p. 1354, 1980.
- 13 E. D. Stokes y T. L. Chu,
Diffusion lengths in solar cells from short-circuit
current measurements
Applied Physics Letters 30 (8), 425, 1977.
- 14 P. Munz, K. Kirshbaum, G. Kragler y E. Bucher,
Silicon MIS solar cells with non-conventional barrier
metals
14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference,
San Diego, California, USA; p 1360, 1980.

- 15 E. Y. Wang, D. Trivich, R. J. Komp, Tzer-Fu Huang
y D. J. Brinker,
Cuprous oxide MIS solar cells
14th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.
San Diego, California, USA; p.458, 1980.
- 16 E. Saucedo y J. Mimila-Arroyo,
A 14% efficiency $\text{SnO}_x - \text{SiO}_2 - (\text{n})\text{Si}$ solar cell
14th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.
San Diego, California, USA; p 1370, 1980.
- 17 A. Myszkowski y J. A. Chávez,
Posibles aplicaciones de las celdas MIS (SIS)
Proc. I Reunión sobre Semiconductores, CINVESTAV, IPN,
México, D.F. 1981.
- 18 A. K. Ghosh, C. Fishman y T. Feng,
Theoretical efficiency of SnO_2/Si solar cells
Journal of Applied Physics 50 (5), 3454, 1979.
- 19 P. De Visschere
A twodimensional model of an MIS inversion layer solar
cell
14th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.
San Diego, California, USA; p. 86, 1980.
- 20 T. Hariu, T. Usuba, H. Adachi y Y. Shibata,
Reactive sputtering of gallium nitride thin films for
GaAs MIS structures
Applied Physics Letters 32 (4), 252, 1978.
- 21 D. L. Pulfrey y R. F. McQuat,
Schottky-barrier solar-cell calculations
Applied Physics Letters 24 (4), 167, 1974.
- 22 R. B. Godfrey y M. A. Green
655 mV open-circuit voltage, 17.6% efficient silicon MIS
solar cells
Applied Physics Letters 34 (11), 790, 1979.

- 23 M. A. Green y J. Shewchun,
Current multiplication in metal-insulator-semiconductor
(MIS) tunnel diodes
Solid State Electronics 17, 349, 1974.
- 24 R. B. Godfrey y M. A. Green,
A 15% efficient silicon MIS solar cell
Applied Physics Letters 33 (7), 637, 1978.
- 25 J. Shewchun, J. Dubow, A. Myszkowski y R. Singh,
The operation of the semiconductor-insulator-semiconductor
(SIS) solar cell: Theory
Journal of Applied Physics 49 (2), 855, 1978.
- 26 J. Shewchun, R. Singh y M. A. Green,
Theory of metal-insulator-semiconductor solar cells
Journal of Applied Physics 48 (2), 765, 1977.
- 27 S. J. Fonash,
The role of the interfacial layer in metal-semiconductor
solar cells
Journal of Applied Physics 46 (3), 1286, 1975.
- 28 S. J. Fonash,
Metal-insulator-semiconductor solar cells: theory and
experimental results
Thin Solid Films 36, 387, 1976.
- 29 S. J. Fonash,
Outline and comparison of the possible effects present
in a metal-thin-film-insulator-semiconductor solar cell
Journal of Applied Physics 47 (8), 3597, 1976.
- 30 M. A. Green,
Effects of pinholes, oxide traps and surface states on
MIS solar cells
Applied Physics Letters 33 (2), 178, 1978.

- 31 T. P. Ma y W. H-L. Ma,
Low pressure rf annealing: A new technique to remove
charge centers in MIS dielectrics
Applied Physics Letters 32 (7), 441, 1978.
- 32 N. G. Tarr, D. L. Pulfrey y P. A. Iles,
MIS solar cells with back surface fields
Applied Physics Letters 35 (3), 258, 1979.
- 33 H. C. Card y E. S. Young,
MIS-Schottky theory under conditions of optical carrier
generation in solar cells
Applied Physics Letters 29 (1), 51, 1976.
- 34 S. K. Dey, W. A. Anderson, A. E. Delahoy y C. Cartier,
Spectral-response and diffusion-length studies of amor-
phous, polycrystalline, ribbon, epitaxial and single-
crystal silicon MIS solar cells
Journal of Applied Physics 50 (6), 4425, 1979.
- 35 J. Shewchun, D. Burk, R. Singh, M. Spitzer y J. Dubow,
The semiconductor-insulator-semiconductor (indium tin
oxide on silicon) solar cell: Characteristics and loss
mechanisms
Journal of Applied Physics 50 (10), 6524, 1979.
- 36 T. Mizrah y D. Adler,
Operation of ITO/Si heterojunction solar cells
Applied Physics Letters 29 (10), 682, 1976.
- 37 Y. Maeda,
A Be p-silicon MIS solar cell
Applied Physics Letters 33 (4), 301, 1978.
- 38 J. I. B. Wilson y P. Robinson,
MIS diodes on amorphous silicon
Solid State Electronics 21, 489, 1978.

- 39 J. I. B. Wilson, J. McGill y P. Robinson,
MIS solar cells on amorphous silicon
13th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.
Washington D. C., USA; 1978.
- 40 J. B. Dubow, D. E. Burk y J. R. Sites,
Efficient photovoltaic heterojunctions of indium tin
oxides on silicon
Applied Physics Letters 29 (8), 494 1976.
- 41 J. McGill, J. I. B. Wilson y S. Kinmond,
The interfacial layer in MIS amorphous silicon solar
cells
Journal of Applied Physics 50 (1), 548, 1979.
- 42 J. Shewchun, R. Singh, D. Burk y F. Scholz,
Temperature dependence of the current-voltage characteris-
tics of silicon MIS solar cells
Applied Physics Letters 35 (5), 416, 1979.
- 43 A. K. Ghosh, C. Fishman y T. Feng,
SnO₂/Si solar cells-Heterostructure or Schottky-barrier
or MIS-type device
Journal of Applied Physics 49 (6), 3490, 1978.
- 44 R. E. Thomas, C. E. Norman y R. B. North,
High efficiency MIS/inversion layer silicon solar cells
14th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.
San Diego, California, USA; p. 1350, 1980.
- 45 W. A. Anderson, A. E. Delahoy, J. S. Kim, S. H. Hyland
y S. K. Dey
High-efficiency Cr-MIS solar cell on single and poly-
crystalline silicon
Applied Physics Letters 33 (7), 558, 1978.