



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

CELDA SOLARES DE $Cu-Cu_2O$ DE BARRERA
SCHOTTKY, DE PARED ANTERIOR.

T E S I S

Que para obtener el título de:

LICENCIATURA EN FISICA

p r e s e n t a :

AARON SANCHEZ JUAREZ

10 jan.
45

México, D. F.

6620

Enero 1979



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

CELDA S SOLARES DE $Cu-Cu_2O$

DE BARRERA SCHOTTKY

DE PARED ANTERIOR

INDICE

INTRODUCCION	1
Cap.1:CONTACTOS	
1.1 Generalidades	5
1.2 Metales, Semiconductores y Aislantes	6
1.3 Contactos metal-metal y metal-semiconductor	11
1.4 Rectificación en el Contacto metal-semiconductor tipo P	28
1.5 Determinación de la Altura de la Barrera	35
1.6 Conclusiones	38
Cap.2:CELDA FOTOVOLTAICAS DE BARRERA SCHOTTKY	
2.1 El Efecto Fotovoltaico	39
2.2 Parámetros Fotovoltaicos	42
2.3 Fotocorriente y Fotovoltaje	48
2.4 Parámetros Limitadores de la Eficiencia	53
2.5 Conclusiones	57
Cap.3: TECNOLOGIA Y CARACTERIZACION DE UNA CELDA SOLAR DE $Cu-Cu_2O$ DE BARRERA SCHOTTKY DE PARED ANTERIOR	
3.1 Técnica de Elaboración	61
3.2 Caracterización	82
3.3 Conclusiones	101
CONCLUSIONES GENERALES	105
BIBLIOGRAFIA	109

INTRODUCCION

Uno de los problemas más grandes que afrontan todos los países del mundo es el de los energéticos. Los materiales con los que se cuenta para producir energía que son del tipo no renovables (tales como el Petróleo, el Carbón, el Uranio, etc.) son escasos y muy pocos países los tienen; además, presentan el inconveniente de que sus desechos son contaminantes. Teniendo esto presente, la mayoría de los países del mundo hacen investigaciones para encontrar otros medios de obtener energía. Uno de estos medios es el de la conversión directa de la energía luminosa a energía eléctrica, que técnicamente se le denomina "conversión fotovoltaica".

Desde un punto de vista estrictamente técnico, los generadores fotovoltaicos representan la solución ideal para obtener energía, ya que su mantenimiento es prácticamente nulo y no es necesario suministrarle combustible para su funcionamiento. Debido a esto, se tiene el hecho de que en las dos últimas décadas se ha incrementado el estudio acerca del aprovechamiento de la energía solar; ésta, es una fuente inagotable de energía, no produce desechos contaminantes, nos llega a la Tierra en forma gratuita y, por medio del uso de generadores fotovoltaicos, ésta energía lu

minosa puede ser transformada directamente a energía eléctrica sin recurrir a ningún proceso intermedio. Los generadores fotovoltaicos reciben comúnmente el nombre de "Celdas Solares", ya que su función es la de transformar directamente la energía luminosa a energía eléctrica. Por esta razón, la conversión fotovoltaica representa una de las más prometedoras formas de aprovechar la energía solar.

La tecnología actual sobre celdas solares, se basa en celdas de silicio monocristalino, celdas hechas con los compuestos III-V o por evaporación de los compuestos II-VI. En todos los casos, el costo por Watt de potencia eléctrica dada por la celda es muy caro. En general, las investigaciones que se realizan en este campo, tienen como objetivos principales el aumentar la eficiencia de conversión y simplificar los procesos de elaboración (para fabricarlas en serie) empleando materiales baratos, con la finalidad de reducir el costo de ellas.

Este trabajo está enfocado a las Celdas Solares de Barrera Schottky de Cu-Cu₂O. Hay varias características del óxido cuproso (Cu₂O) que lo hacen un candidato muy importante para la elaboración de una celda solar de bajo costo. Este material es un semiconductor tipo P, con transición electrónica directa y con un ancho de banda de ener

energías prohibidas de $1.95 \text{ eV}^{(1,2)}$. Esta característica directa es deseable para que los fotones puedan ser efectivamente absorbidos en películas delgadas. La banda de energías prohibidas tiene un intervalo aceptable que permite un acoplamiento efectivo con el espectro solar. Una característica muy significativa del Cu_2O es que puede obtenerse por oxidación del cobre a altas temperaturas. Otra característica muy importante de este material es que la unión o contacto entre el Cu y el Cu_2O constituyen una Barrera Schottky. Este contacto metal semiconductor es la base de los llamados rectificadores Cu/ Cu_2O .

Las celdas solares de Barrera Schottky de Cu- Cu_2O pueden ser elaboradas en dos configuraciones: las de Pared Anterior que son iluminadas por la parte del metal, y las de Pared Posterior que son iluminadas por la parte de semiconductor. En el caso de las celdas de Pared Posterior, una capa superficial del sustrato de cobre es convertida a Cu_2O por oxidación a una temperatura entre 1000 y 1050 C⁽³⁾. La unión rectificadora existe en la interface entre el cobre "madre" y la película de Cu_2O . Las celdas de Pared Anterior se hacen formando la Barrera Schottky entre el sustrato de Cu_2O y la película metálica formada sobre la superficie del sustrato. Esta película se puede -

formar por reducción química de la superficie del Cu_2O a una unión $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ (4). Otra manera de formar ésta unión es depositando por evaporación una película metálica sobre el sustrato de Cu_2O . En ambas configuraciones, la barrera que se forma es la responsable de la separación de las cargas (electrón-hueco) que resultan de la absorción de luz en el semiconductor.

(3)
Tomando en cuenta el estudio que realizó F. Zapien sobre celdas solares de Barrera Schottky de $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ de pared posterior, y los antecedentes que se tienen de los especialistas (5,6,7) con respecto a la eficiencia de conversión de este tipo de celdas en las dos configuraciones, se decidió hacer celdas solares de Barrera Schottky de $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ de pared anterior.

Cobre de grado metalúrgico es el que se empleó para hacer este tipo de celdas (material que no es muy caro) - y la técnica empleada para su elaboración - que es relativamente sencilla - consistió en depositar por evaporación una película de cobre sobre un sustrato de óxido cuproso (Cu_2O).

CAPITULO 1 / CONTACTOS

1.1- Generalidades

El término SOLIDO se aplica en general a substancias elásticas rígidas; es decir, a substancias que tienen un comportamiento elástico no solo cuando se le somete a fuerzas hidrostáticas si no también a esfuerzos cortantes y de tensión. Los materiales que se pueden considerar como sólidos de acuerdo con esta definición, se dividen en dos categorías: los amorfos y los cristalinos. Los sólidos amorfos son aquellos en que sus átomos o moléculas pueden estar enlazados entre sí con bastante firmeza; pero, no poseen regularidad o periodicidad geométrica en la forma en que los átomos están dispuestos o acomodados en el espacio. Los sólidos cristalinos se caracterizan por tener una periodicidad perfecta o casi perfecta en su estructura atómica, lo cual facilita la tarea de comprender y estudiar sus propiedades físicas.

Las muestras macroscópicas de sólidos cristalinos tales como metales, cerámicas, sales iónicas, etc., no siempre se componen de un solo cristal, si no que a menudo están formados por un conjunto de pequeñas unidades de cris-

tal, cada una con diferente orientación separadas entre sí por " fronteras o límites de grano ", las que se pueden considerar como regiones definidas de ruptura y dislocaciones reticulares muy grandes.

1.2- Metales, Semiconductores y Aislantes

Por sus propiedades electrofísicas, todas las sustancias de la naturaleza pueden ser divididas en tres grandes grupos: Metales, Semiconductores y Aislantes. La clasificación más simple de las sustancias es aquella que se hace en base a su resistividad eléctrica.

Si la resistividad de la sustancia está entre 10^{-6} y 10^{-4} ohm.cm, ésta es un metal. Con el aumento de la temperatura, la resistividad (ρ) de algunos metales que micamente puros es aproximadamente proporcional a la temperatura absoluta (T), es decir

$$\rho \approx \frac{\rho_0}{T_0} T \quad (8) \quad 1.1$$

donde ρ_0 es la resistividad del metal a 0 C y $T_0 = 273$ K.

A partir de la Ec.(1.1) es claro observar que si T aumenta, ρ también y por lo tanto, la conductividad (σ) del metal disminuye ya que $\sigma = 1/\rho$. De lo anterior,

podemos decir que los metales a temperatura ambiente no son tan buenos conductores eléctricos como lo son a bajas temperaturas.

Si la resistividad de la sustancia se encuentra en el intervalo comprendido entre 10^{-4} y 10^{10} ohm.cm, se dirá que la sustancia es un semiconductor. Para los semiconductores, el caracter de la relación entre la temperatura y la resistividad es, en forma general :
(8)

$$\rho = \rho_0 \exp(\beta/T) , \quad 1.2a$$

y por consiguiente la conductividad (σ) es

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\beta/T) , \quad 1.2b$$

donde ρ_0 , σ_0 y β son constantes; T es la temperatura en K.

Es obvio que a partir de la Ec.(1.2b), al disminuir la temperatura, la conductividad del semiconductor disminuye. Cuando la temperatura se aproxima al cero absoluto, en determinadas condiciones, los semiconductores se comportan como aislantes. Estas sustancias son aquellas cuya resistividad es mayor que 10^{10} ohm.cm.

Los semiconductores y los aislantes son sólidos que tienen amarres del tipo iónicos o covalentes (pudiendo te-

ner los dos). A 0 K es imposible distinguirlos por su conductividad, pues a esta temperatura, todos los electrones están ligados a los átomos de la red cristalina; a temperaturas mayores de 0 K, los átomos pueden perder electrones a consecuencia de la agitación térmica.

La conductividad de un semiconductor se puede explicar si se parte de las consideraciones energéticas. En un semiconductor, el estado energético de los electrones libres se diferencia de los electrones ligados en una cierta cantidad de energía E_G . Esto lo podemos ver mediante el diagrama energético de la Fig. 1.1. En éste diagrama, E_C es la energía mínima que puede tener un electrón libre. Los posibles valores de energía que tienen los electrones libres forman una zona o banda llamada BANDA de CONDUCCION. E_V es la energía máxima de los electrones en un enlace completo y debajo de este valor, se encuentran todos los electrones de valencia ligados cuyas energías forman una banda llamada BANDA de VALENCIA.

Si todos los enlaces están completos, todos los estados de la banda de valencia están ocupados y en la banda de conducción no hay electrones. Para romper estos enlaces hay que suministrar una mínima cantidad de energía. La magnitud de ésta energía es E_G y caracteriza la anchu

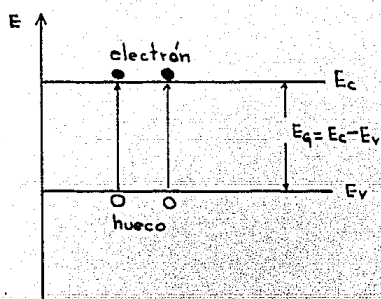


Fig. 1.1 - Diagrama energético de un semiconductor intrínseco.

ra de la banda de energías prohibidas de un semiconductor.

La ruptura del enlace del par electrónico en el diagrama energético es equivalente, al traspaso de un electrón de la banda inferior a la banda superior, debido a lo cuál, se tiene un electrón en la banda de conducción y, en la banda de valencia, se tiene un hueco "libre" con las mismas características del electrón pero con carga positiva. Al semiconductor, en el que a causa de la ruptura de los enlaces de valencia se forma, una cantidad igual de electrones y huecos se le llama INTRINSECO.

La anchura de la banda de energías prohibidas se determina por la naturaleza del enlace químico y, a la vez, depende de la clase de átomos que forman la red cristalina. Por consiguiente, para crear en un semiconductor intrínseco portadores de carga libres, hay que suministrarle una energía del orden del ancho de la banda de energías prohibidas. Esta energía se puede dar no solo por calentamiento si no también por diferentes tipos de radiación, o bien, por medio de intensos campos magnéticos y eléctricos.

De lo anterior, la corriente eléctrica en el semiconductor intrínseco se determina por dos componentes: la corriente electrónica y la corriente por huecos, generadas térmicamente o por algún campo externo aplicado.

Ahora bien, si a un semiconductor intrínseco se le introducen pequeñas cantidades de impurezas, puede suceder dos cosas: a) que al producirse los enlaces completos quede una cantidad de electrones libres desprendidos de la impureza; debido a esto, la concentración de electrones será mayor que la de huecos y tendrán un papel dominante en la conductividad del cristal, recibiendo el nombre de portadores mayoritarios. b) que no se produzcan enlaces completos y que quede una cantidad de huecos libres que se pueden mover por los enlaces del semiconductor, y por lo tanto, que participen en la conductividad del cristal. Entonces, al ser la cantidad de huecos mayor que la de los electrones, éstos reciben el nombre de portadores mayoritarios.

A este tipo de semiconductores se les llama EXTRINSECOS tipo N y tipo P respectivamente.

1.3- Contactos metal-metal y metal-semiconductor

En esta sección se discutirán los fenómenos de contacto que se llevan a cabo entre una unión metal-metal y una unión metal-semiconductor, con el objeto de analizar las propiedades físicas que estos implican.

(11)

A) CONTACTO METAL-METAL .- Supongamos que se tienen dos placas metálicas M_1 y M_2 con las mismas dimensiones, superficies perfectamente limpias y que tengan funciones de trabajo diferentes. Al ponerlas en contacto, los metales comienzan a intercambiar electrones predominando el flujo de electrones del metal con mayor energía de Fermi (función de trabajo menor) hacia el metal con menor energía de Fermi (función de trabajo mayor). Este flujo prosigue hasta que la energía de Fermi para todo el sistema se iguale, generando una diferencia de "potencial de contacto " en equilibrio entre ambos. Este proceso se ilustra en la Fig. 1.2 . En la Fig.1.2a, dos metales que tienen funciones de trabajo diferentes están separados por una distancia d ; los niveles de Fermi no coinciden y el sistema no está en equilibrio. Para lograr el equilibrio entre ambos metales, los electrones deben de pasar a través de la barrera de potencial del metal cuya energía de Fermi es mayor hacia el metal cuya energía de Fermi es menor, hasta que se llegue a una condición de equilibrio en el que los dos niveles de Fermi coincidan. Esto no se logra hasta que los dos metales estén en contacto; es decir, hasta que la distancia d sea del orden de unos cuantos múltiplos de la distancia interatómica (ver Fig. 1.2b). La

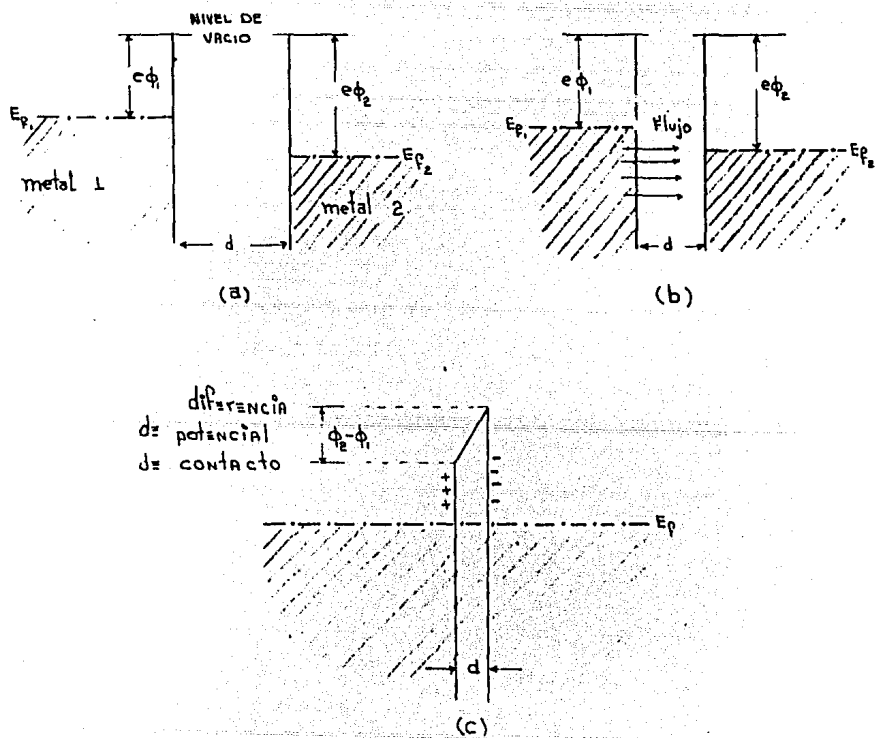


Fig. 1.2- Etapas sucesivas para establecer el equilibrio entre dos metales con funciones de trabajo diferentes.

corriente de electrones crea una carga negativa en el metal de la derecha (metal con energía de Fermi menor) . - El exceso de iones positivos que quedan en el metal de la izquierda, da origen a una carga positiva en esa región. - Así, se establece un campo eléctrico que eleva la energía potencial de los electrones de la derecha con respecto a los de la izquierda, hasta que coinciden los niveles de Fermi de los dos metales (ver Fig.1.2c). En estas condiciones, el sistema esta en equilibrio y la corriente neta desciende a cero. Sin embargo, la transferencia de electrones del metal de la izquierda al de la derecha, ha establecido una diferencia de potencial de magnitud $\phi_2 - \phi_1$ entre los dos metales. A ésta se le denomina Diferencia de Potencial de Contacto entre los dos metales.

(11)

B) CONTACTO METAL-SEMICONDUCTOR .- En el caso de un contacto metal-semiconductor, se puede seguir el mismo razonamiento que se utilizó en el contacto metal-metal para deducir sus propiedades. Sin embargo, un semiconductor se diferencia de un metal ya que en éste (el semiconductor) puede existir un campo eléctrico en su interior, lo que no se puede tener en un metal. Por este hecho, puede suceder que en el contacto metal-semiconductor, el potencial de contacto este localizado dentro del

semiconductor y no en la interface de contacto como sucede en una unión metal-metal.

Consideremos un contacto metal-semiconductor tipo N y analicemos los siguientes casos:

1) Función de trabajo del metal (ϕ_m) mayor que la función de trabajo del semiconductor (ϕ_{sc}).

2) Función de trabajo del metal (ϕ_m) menor que la función de trabajo del semiconductor (ϕ_{sc}).

1) Si $\phi_m > \phi_{sc}$, lo que sucede es lo siguiente: inicialmente el metal y el semiconductor están separados una distancia d , lo suficientemente grande para impedir el flujo de electrones del semiconductor hacia el metal (ver Fig. 1.3a). Conforme d empieza a disminuir hasta llegar al contacto, hay un momento en que se forma un flujo de electrones a través de la barrera debido a que, hay algunos electrones en la banda de conducción del semiconductor, que tienen la suficiente energía para pasar a través de ésta y, ocupar estados inicialmente vacíos en el metal; ya que, la energía de Fermi del semiconductor (E_{fs}) es mayor que la del metal (E_{fm}) (ver Fig. 1.3b). Este flujo de electrones tiende a cero conforme los niveles de Fermi del metal y del semiconductor se equilibran. En el instante que se llega al equilibrio, el flujo de electrones se

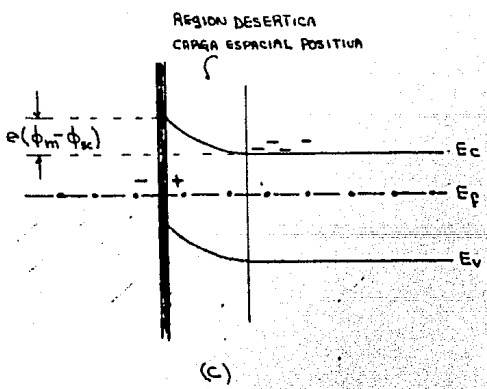
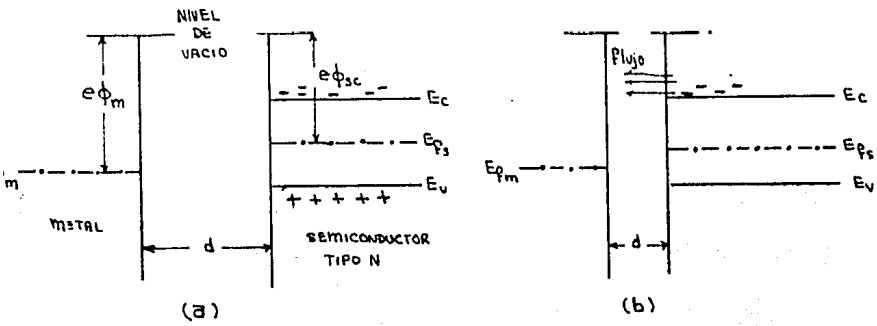


Fig. 1.3- Etapas sucesivas que se llevan a cabo para establecer el equilibrio entre un semiconductor tipo N y un metal con función de trabajo mayor.

hace cero. De esta forma, el campo que se crea debido a la diferencia de potencial de contacto existe ahora dentro del semiconductor; la energía potencial de un electrón en reposo en la banda de conducción dentro del semiconductor, difiere de la energía potencial de un electrón de este tipo que se encuentre en la superficie en la cantidad $e(\phi_m - \phi_{sc})$. Lo anterior implica que los bordes de la banda de conducción y de valencia del semiconductor cambian con respecto al nivel de Fermi conforme se acercan a la superficie de contacto (ver Fig. 1.3c). La densidad de carga espacial positiva dentro de la región superficial del semiconductor, debida a la concentración en exceso de átomos donadores ionizados sobre la población electrónica, es tal que produce un campo eléctrico que basta para conservar la diferencia de potencial $(\phi_m - \phi_{sc})$ entre los dos materiales.

Cerca de la superficie del semiconductor, la densidad neta de portadores libres se reduce con respecto a su valor de equilibrio en el volúmen. A esta capa superficial se le denomina " región de deficiencia ".

Si la diferencia de potencial de contacto $(\phi_m - \phi_{sc})$ es muy grande, el cambio de las bandas de valencia y de conducción con respecto al nivel de Fermi puede ser grande, trayendo como consecuencia que, cerca de la superficie, la

banda de valencia esté más cerca al nivel de Fermi que la de conducción y el material inmediatamente adyacente a la superficie se convierte en tipo P. Si esto sucede, se dice entonces que la superficie invierte su tipo de conductividad y a esta región se le llama " región de inversión " (ver Fig.1.4).

Es importante observar en éste caso lo siguiente:

- a)- En la superficie se forma una barrera de potencial de altura $e(\phi_m - \phi_{sc})$. La formación de esta barrera de potencial y la existencia de la región de deficiencia son la base — como se verá más adelante — para explicar como funciona un rectificador de contacto metal-semiconductor.
- b)- En general, la región de deficiencia es muy ancha, por lo que no existe la posibilidad de que los electrones puedan establecer un túnel a través de dicha barrera.
- c)- En dos materiales que están unidos en contacto íntimo, el espaciado d de las Figs. 1.3c y 1.4 es prácticamente cero y la única barrera que hay, es la barrera superficial del semiconductor (11)

2) Si $\phi_m < \phi_{sc}$, entonces el nivel de Fermi del metal es mayor que el del semiconductor trayendo como consecuencia que, al ponerlos en contacto íntimo, se crea un flujo de electrones del metal al semiconductor hasta que se llega

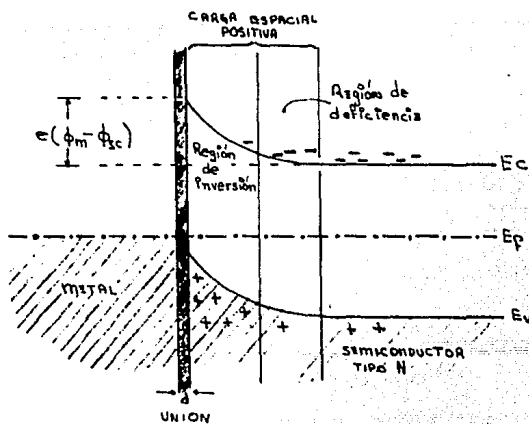


Fig. 1.4- Se ilustra el hecho de que $\phi_m - \phi_{sc}$ es muy grande. Obsérvese que la banda de valencia (E_V) se aproxima al nivel de Fermi (E_f) formando así la región de inversión.

al equilibrio termodinámico en el que los niveles de Fermi de ambos materiales coinciden. En éste caso, el semiconductor adquiere una carga negativa y el metal una positiva y, las bandas de valencia y conducción del semiconductor, se desplazan hacia abajo en la superficie (ver Fig.1.5).

Como resultado de lo anterior, tendremos que en lugar de formarse una barrera de potencial se forma una región de " acumulación " en la que la concentración de electrones es mayor que la de los átomos donadores ionizados. El exceso en la concentración electrónica en la región de acumulación superficial crea la carga espacial necesaria para mantener la diferencia de potencial de contacto entre los dos materiales.

Analicemos ahora el contacto metal-semiconductor tipo P. Como se verá, las características de contacto no son las mismas. Consideremos los casos siguientes:

- 1) La función de trabajo del metal (ϕ_m) es mayor que la del semiconductor (ϕ_{sc}).
- 2) La función de trabajo del metal (ϕ_m) es menor que la del semiconductor (ϕ_{sc}).
- 1) Si $\phi_m > \phi_{sc}$, entonces el nivel de Fermi del metal (E_{fm}) es menor que el del semiconductor (E_{fs}). Esto trae como consecuencia que al ponerlos en contacto íntimo,

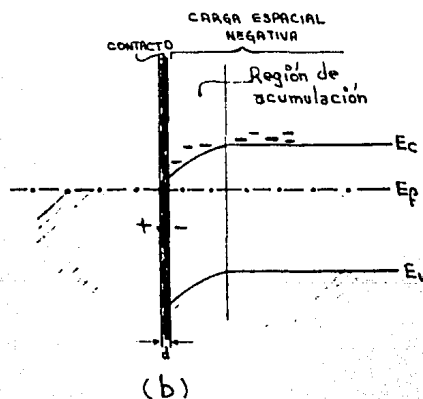
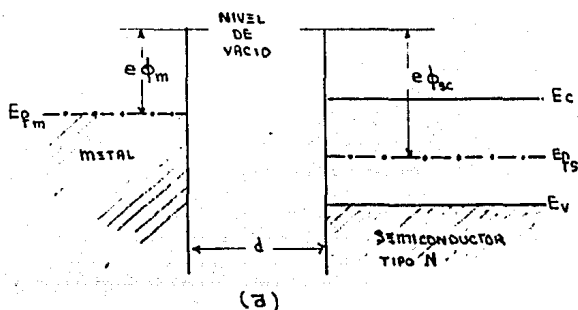


Fig. 1.5- Etapas sucesivas para establecer el equilibrio entre un metal y un semiconductor tipo N con $\phi_m < \phi_{sc}$.

electrones de la banda de valencia del semiconductor fluyen hacia el metal (hasta alcanzar el equilibrio), quedando vacía la región de contacto del semiconductor adquiriendo cargas positivas, por lo que las bandas de valencia y conducción del semiconductor se flexionan hacia arriba. En esta región, el semiconductor se enriquece de huecos — que son portadores mayoritarios — y el metal adquiere electrones. Esto hace que se forme un campo eléctrico que detiene el flujo de portadores mayoritarios. La diferencia de potencial de contacto es $(\phi_m - \phi_{sc})$ (ver Fig.1.6).

2) Si $\phi_m < \phi_{sc}$, entonces la energía de Fermi del metal (E_{fm}) es mayor que la del semiconductor (E_{fs}). Esto trae como consecuencia que al ponerlos en contacto íntimo, electrones del metal pasan a ocupar algunos estados desocupados en la banda de valencia del semiconductor, enriqueciendo de electrones la región de contacto dentro del semiconductor; dichos electrones pasan a ser portadores minoritarios en el semiconductor, formándose así una región de acumulación. En consecuencia, las bandas de valencia y conducción del semiconductor se flexionan hacia abajo (ver Fig.1.7). La diferencia de potencial de contacto es $(\phi_{sc} - \phi_m)$.

Se han analizado las propiedades de un contacto me-

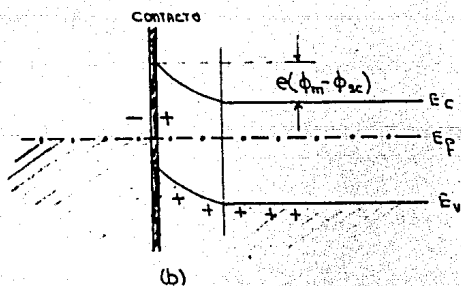
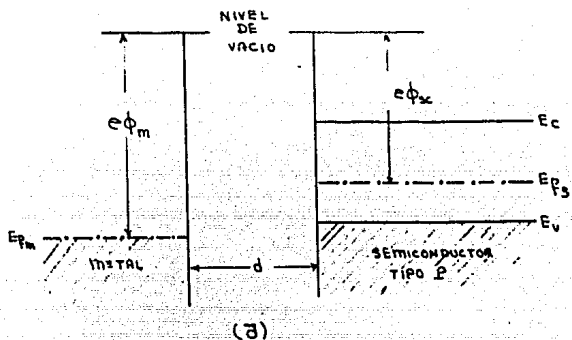


Fig. 1.6- Contacto metal-semiconductor tipo P cuando $\phi_m > \phi_{sc}$. En (a) antes del contacto y en (b) estando en contacto.

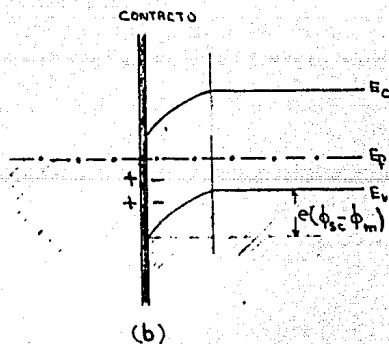
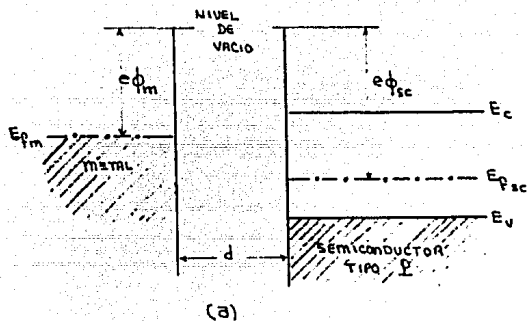


Fig. 1.7- Contacto metal semiconductor tipo P cuando $\phi_m < \phi_{sc}$. En (a) antes del contacto y en (b) estando en contacto.

tal-metal y de un contacto metal-semiconductor. En ambos casos se forma una barrera de potencial en la unión, con la diferencia de que en el contacto metal-semiconductor, la barrera se localiza casi en su totalidad dentro del semiconductor. Cuando el semiconductor es tipo N, los portadores de carga mayoritarios son electrones; si $\phi_m > \phi_{sc}$, cuando se alcanza el equilibrio se forma una barrera de potencial de altura $e\phi_b = e(\phi_m - \phi_{sc})$, que no permite el flujo de estos portadores del semiconductor al metal. Cuando el semiconductor es tipo P, los portadores de carga mayoritarios son huecos; si $\phi_m < \phi_{sc}$, cuando se alcanza el equilibrio se forma una barrera de potencial de altura $e\phi_b = e(\phi_{sc} - \phi_m)$ que no permite el flujo de estos portadores del semiconductor al metal.

Antes de seguir adelante con el análisis del contacto metal-semiconductor, cabe mencionar que cuando en dicho contacto la barrera de potencial que se forma está determinada por la diferencia en la función de trabajo del metal (ϕ_m) y la función de trabajo del semiconductor (ϕ_{sc}), se dice que la barrera es una "Barrera Schottky"; ya que el modelo que se usa para determinar la barrera es el Modelo Schottky. Debido a esto, podemos decir que los cuatro casos que se trataron para un contacto metal-semi

conductor se analizaron siguiendo el Modelo Schottky.

Vamos a analizar un poco más en detalle el contacto metal-semiconductor tipo P cuando $\phi_{im} < \phi_{sc}$, ya que es el caso que se tiene en nuestro estudio de la celda solar de Cu-Cu₂O.

Consideremos el diagrama de la Fig. 1.8. En estado de equilibrio, ciertos huecos del semiconductor tendrán la suficiente energía para sobrepasar la barrera de potencial creando un flujo de corriente de derecha a izquierda J_p^- ; también se tendrá un flujo de huecos del metal al semiconductor J_p^+ . De acuerdo con el Principio de Balance Detallado*, estos dos flujos deben de ser iguales en magnitud en estado de equilibrio. De la misma manera se tiene un flujo de electrones J_n^+ y J_n^- . El primero J_n^+ se compone de electrones que están en el metal y que tienen la suficiente energía para sobrepasar la barrera de potencial y entrar al semiconductor. El flujo J_n^- consiste en electrones de la banda de conducción del semiconductor que pasan al metal. Nuevamente en equilibrio estos dos flujos son iguales. Debido a lo antes dicho, no se tiene

*Principio General de la Mecánica Estadística que establece que en condiciones de equilibrio termodinámico, cualquier proceso microscópico dado y su proceso inverso deben producirse a la misma velocidad.

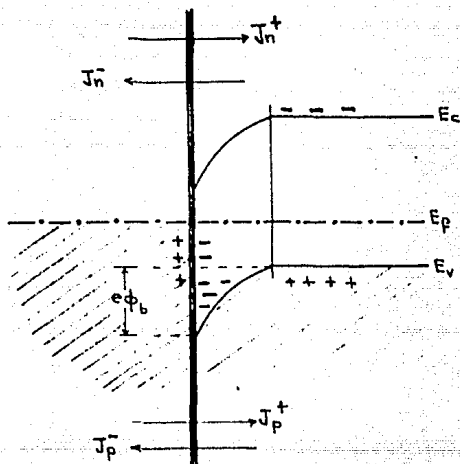


Fig. 1.8- Contacto metal-semiconductor tipo P
 siendo $\phi_m < \phi_{sc}$ en equilibrio ter-
 modinámico.

un flujo neto de huecos y electrones.

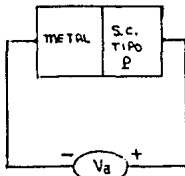
Si el contacto se polariza directamente con un voltaje externo (V_a) tal que el semiconductor es positivo con respecto al metal, la barrera de potencial (ϕ_b) se ve disminuida en V_a , trayendo como consecuencia que una gran cantidad de huecos fluyan del semiconductor al metal; aumentando el flujo J_p^- . Si se polariza inversamente, la barrera ϕ_b se incrementará en V_a trayendo como consecuencia que el flujo J_p^- se reduzca.

De lo anterior, podemos deducir que el contacto metal-semiconductor tipo P es un contacto rectificador cuando $\phi_m < \phi_{sc}$. En la siguiente sección se hace un análisis detallado de ésta rectificación.

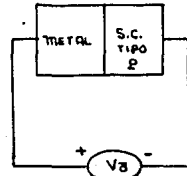
1.4- Rectificación en el contacto metal-semiconductor tipo P

En esta sección se analizará la característica corriente-voltaje de un rectificador de unión metal-semiconductor tipo P. El modelo de la unión que se adoptará es el que se ilustra en la Fig. 1.8.

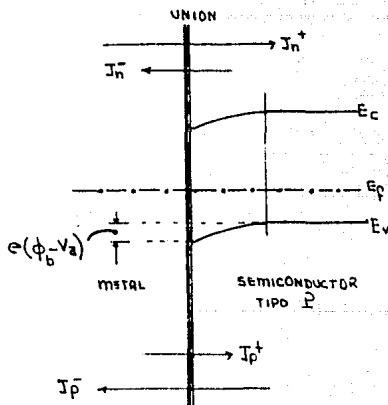
Cuando se polariza directamente el contacto con un voltaje externo (V_a) (ver Fig. 1.9a), la altura de la



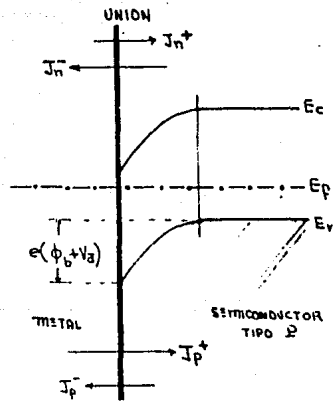
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1.9- En (a) y (b) esquemas de un contacto metal-semiconductor tipo P ($\phi_m < \phi_{sc}$) con polarización directa e inversa, respectivamente. En (c) y (d) diagramas de bandas cuando el contacto se polariza directa e inversa, respectivamente.

barrera original $e\phi_b$ se ve disminuida en la cantidad eV_a (ver Fig. 1.9c), produciéndose así una barrera de altura:

$$e(\phi_b - V_a) = e(\phi_{sc} - \phi_m - V_a) \quad 1.3$$

Evidentemente, los flujos J_p^- y J_n^+ estarán regulados por el número de portadores presentes en el semiconductor y en el metal, que posean la suficiente energía para sobrepasar dicha barrera. Este número es proporcional a $\exp \frac{-e(\phi_b - V_a)}{AKT}$ (11). Los otros dos flujos J_n^- y J_p^+ solo dependen, respectivamente, del número de electrones térmicamente generados que haya en el interior del semiconductor y de la cantidad de huecos del metal que viniendo desde la izquierda puedan sobrepasar la barrera. Estos dos flujos son funciones solo de la temperatura y de los parámetros de las dos sustancias, e independientes de la altura de la barrera $e(\phi_b - V_a)$.

Cabe aclarar que en la expresión $\exp \frac{-e(\phi_b - V_a)}{AKT}$, A representa el factor de calidad de la unión y que para el caso ideal, su valor será la unidad; es decir, $A = 1$.

De lo anterior y considerando que $A = 1$, J_p^- y J_n^+ se pueden expresar como:

$$J_p^- = -J_{p0} \exp \frac{-e(\phi_b - V_a)}{KT} \quad 1.4$$

$$y \quad J_n^+ = J_{n_0} \exp \frac{-e(\phi_b - V_a)}{kT} \quad , \quad 1.5$$

donde J_{p_0} y J_{n_0} son constantes que expresan los flujos de huecos y electrones de cualquier energía que inicialmente inciden sobre la barrera superficial cuando el sistema está en equilibrio; K es la constante de Boltzman y T la temperatura absoluta.

Puesto que J_p^+ y J_n^- deben de ser iguales a $-J_p^-$ y $-J_n^+$ respectivamente cuando no se aplica ningún voltaje, estos flujos se pueden representar como (11)

$$J_p^+ = J_{p_0} \exp \frac{-e\phi_b}{kT} \quad 1.6$$

$$y \quad J_n^- = -J_{n_0} \exp \frac{-e\phi_b}{kT} \quad . \quad 1.7$$

El flujo total de huecos y electrones se puede representar como:

$$J_p = J_p^+ + J_p^- \quad 1.8$$

$$y \quad J_n = J_n^+ + J_n^- \quad 1.9$$

De las Ecs. (1.4) a (1.7) se tiene que

$$J_n = J_{n_0} \exp \frac{-e\phi_b}{kT} \left[\exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right] \quad 1.10$$

$$y \quad J_p = -J_{p_0} \exp \frac{-e\phi_b}{kT} \left[\exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right] \quad 1.11$$

De las dos expresiones anteriores se puede obtener la densidad total de corriente eléctrica que es igual a la diferencia de los dos flujos multiplicada por la carga del electrón; es decir,

$$I_{\text{Tot}} = e (J_n - J_p) \quad 1.12$$

Con las Ecs. (1.10 y 1.11) se deduce que

$$I_{\text{Tot}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right], \quad 1.13$$

donde $I_0 = C \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right)$, 1.14

siendo $C = e(J_{n_0} + J_{p_0})$. 1.15

Si polarizamos inversamente el contacto con un voltaje externo (V_a) — es decir, que el semiconductor sea negativo con respecto al metal (ver Fig. 1.9b) —, la altura de la barrera $e\phi_b$ se incrementará en la cantidad eV_a (ver Fig. 1.9d). Esto trae como consecuencia que los flujos J_p^- y J_n^+ sean:

$$J_p^- = -J_{p_0} \exp\left(\frac{-e(\phi_b + V_a)}{kT}\right) \quad 1.16$$

y $J_n^+ = J_{n_0} \exp\left(\frac{-e(\phi_b + V_a)}{kT}\right)$. 1.17

Si $V_a \gg \frac{kT}{e}$, entonces estos flujos tenderán a cero y

el flujo total de huecos y electrones (Ecs. 1.8 y 1.9) - será:

$$J_p = J_p^+ \quad \text{y} \quad J_n = J_n^- \quad . \quad 1.18$$

Por lo tanto, de las Ecs. (1.6 y 1.7) y de la Ec.(1.12), la densidad total de corriente en polarización inversa será :

$$I_{Tot} = e [J_{n_0} + J_{p_0}] \exp \frac{-e\phi_b}{kT} \quad . \quad 1.19$$

La Ec.(1.19) no es otra cosa que I_0 dada por la Ec.(1.14). Al valor de I_0 se le dá el nombre de "corriente inversa de saturación" y se debe únicamente a los flujos de electrones y huecos que son generados termicamente y que son independientes del voltaje aplicado.

La Ec.(1.13) expresa una relación entre corriente y voltaje aplicado. Si se grafica esta relación obtenemos la gráfica de un diodo rectificador de corriente, donde I_0 corresponde a la corriente inversa de saturación (ver la Fig.1.10).

Se observa de las Ecs.(1.13 y 1.14) que un contacto metal-semiconductor tipo P con $\phi_m < \phi_{sc}$ tiene el comportamiento de un diodo rectificador de corriente, donde para $V_a > 0$ la corriente total crece de acuerdo con la

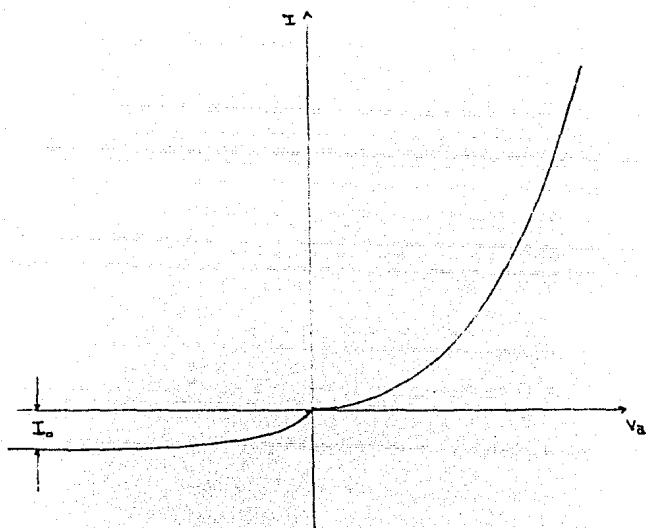


Fig. 1.10 - Gráfica corriente contra voltaje aplicado de la Ec. (1.13). Esta gráfica corresponde a la de un diodo rectificador de corriente ideal ($A = 1$).

ley exponencial dada por la Ec.(1.13). Para $V_a < 0$ (polarización inversa), la corriente total tiende a tomar el valor de I_0 dada por la Ec.(1.14).

Hay que aclarar aquí que el contacto metal-semiconductor tipo N con $\phi_m > \phi_{sc}$ tiene el mismo comportamiento que el caso que tratamos; es decir, es un contacto rectificador. Sin embargo, el caso del contacto metal-semiconductor tipo N con $\phi_m < \phi_{sc}$ (ver Fig.1.5) y el contacto metal-semiconductor tipo P con $\phi_m > \phi_{sc}$ (ver Fig.1.6b), son contactos óhmicos para el flujo de los portadores mayoritarios; es decir, no son contactos rectificadores.

1.5- Determinación de la Altura de la Barrera

Consideremos que el contacto metal-semiconductor es ideal ($A=1$). La manera de determinar la altura de la barrera $e\phi_b$ del contacto es la siguiente: a partir del modelo Schottky, la ecuación para el flujo de corriente sobre la barrera es (Ec. 1.13)

$$I = C \exp \frac{-e\phi_b}{KT} \left[\exp \left(\frac{eV_a}{KT} \right) - 1 \right], \quad 1.20$$

donde C es una constante que depende del modelo de flujo de portadores (emisión o difusión) considerados.

Si aplicamos la función Logaritmo a ambos miembros de la Ec. (1.20) y graficamos el $\ln I$ contra el voltaje aplicado (V_a) en polarización directa, lo que obtenemos es la curva que se muestra en la Fig. 1.11 . A partir de cierto valor de V_a , tal que, $eV_a \gg KT$, la curva se comporta como una línea recta con pendiente e/KT y la extrapolación de ésta línea recta hacia el eje $\ln I$ nos dá el punto de intersección $(0, \ln I_0)$. Como sabemos que

$$I_0 = C \exp \frac{-e\phi_b}{KT}$$

$$\text{entonces } \ln I_0 = \ln C - \frac{e\phi_b}{KT} \quad . \quad 1.21$$

Por lo que la altura de la barrera $|e\phi_b|$ es

$$|e\phi_b| = KT | \ln C - \ln I_0 | \quad . \quad 1.22$$

De esta manera, se puede conocer aproximadamente la altura de la barrera del contacto metal-semiconductor . Conociendo el valor de la altura de la barrera, éste nos indicará la calidad del contacto que se tenga. Si el valor de $e\phi_b$ es pequeño, la corriente inversa de saturación (I_0) será grande trayendo como consecuencia que el contacto tienda a ser óhmico. Si el valor de $e\phi_b$ es grande, entonces I_0 será pequeña y el contacto será rectificador.

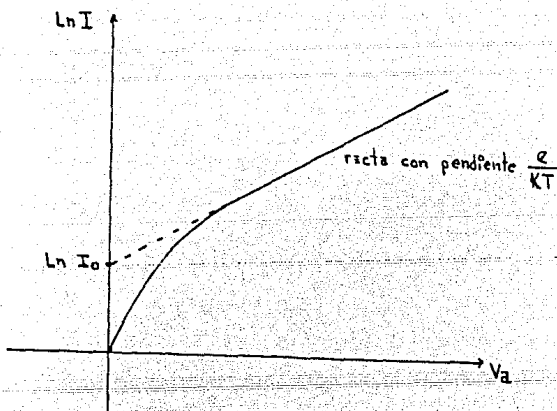


Fig. 1.11- Gráfica del $\ln I$ vs V_a . Esta es una forma geométrica para determinar la altura de la barrera en el contacto metal-semiconductor cuando éste se considera ideal.

1.6- Conclusiones

De los resultados obtenidos anteriormente se puede inferir lo siguiente:

- a) Al poner en contacto un metal con un semiconductor, se forma una barrera de potencial que no permite el flujo de los portadores de carga del semiconductor hacia el metal.
- b) Al polarizar el contacto metal-semiconductor con un voltaje externo, éste puede tener dos tipos de comportamientos (para el flujo de portadores de carga mayoritarios): que sea óhmico o bien, que sea rectificador. Es rectificador si sucede que el semiconductor es tipo N y $\phi_m > \phi_{sc}$, o si el semiconductor es tipo P y $\phi_m < \phi_{sc}$. Es óhmico si sucede que el semiconductor es tipo N y $\phi_m < \phi_{sc}$, o si el semiconductor es tipo P y $\phi_m > \phi_{sc}$.

El hecho de que el contacto metal-semiconductor tipo P sea rectificador cuando $\phi_m < \phi_{sc}$ es muy importante, ya que ha partir del análisis que se realizó se podrá comprender el comportamiento que tiene la celda solar de Cu-Cu₂O, debido a que en éste tipo de celdas, se tiene una unión metal-semiconductor donde $\phi_m < \phi_{sc}$. Por otra parte, se utilizará el hecho de que el contacto es óhmico cuando $\phi_m > \phi_{sc}$, ya que se necesita tener una capa metálica sobre el semiconductor, para poder recolectar a los portadores de carga.

CAPITULO 2 / CELDAS FOTOVOLTAICAS DE BARRERA SCHOTTKY

2.1- Efecto Fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es la generación de una fuerza electromotriz como resultado de la absorción de radiación ionizante sobre dos sustancias. Esto puede ocurrir en gases, líquidos y sólidos ⁽¹⁵⁾; pero es en sólidos y especialmente en los semiconductores donde son observadas eficiencias de conversión de energía solar aceptables.

Para que se produzca el efecto fotovoltaico en un dispositivo con semiconductores es necesario que dos procesos se lleven a cabo: primero, que portadores de carga positivos y negativos — sean generados en exceso por radiación ionizante; y segundo, que el exceso de portadores de carga de signo opuesto puedan ser separados por una barrera electrostática, ya sea en una homounión P-N, en una unión metal-semiconductor o en una heterounión.

A continuación se examinará cada uno de estos dos procesos.

— Absorción de luz en semiconductores: — Consideremos un

rayo de luz monocromático incidiendo sobre un semiconductor homogéneo. Sea el eje X normal al plano de la face constante de la onda monocromática incidente. Conforme la luz penetra en el material, su intensidad decae en función del coeficiente de absorción (α) del material. Si el número de fotones que llegan a la superficie del semiconductor por unidad de área y de tiempo es $Nf_0(\lambda)$, - después de penetrar una distancia x , el número de fotones que no han sido absorbidos por el material será (15) :

$$Nf(x) = Nf_0(\lambda) \exp(-\alpha x) \quad 2.1$$

El parámetro α es una función de la longitud de onda (λ), o bien, de la energía de los fotones ($h\nu$) del rayo incidente.

Si $h\nu > E_G$ (la energía de los fotones es mayor que la energía correspondiente al ancho de la banda de energías prohibidas del semiconductor), la luz absorbida por el material generará pares electrón-hueco; es decir, portadores de carga libres. Si por el contrario $h\nu < E_G$, la luz absorbida por el material es aprovechada por la red dispersándose en forma de calor.

Cuando la energía de los fotones del haz incidente es mayor que la energía correspondiente al ancho de la ban

da de energías prohibidas del semiconductor, se dice que - el haz de luz es ionizante.

En general, se puede afirmar que un semiconductor - que tenga un ancho de banda de energías prohibidas (E_G) menor que la energía de los fotones ($h\nu$) del espectro solar, constituye un candidato para formar una celda fotovoltaica (15).

— Separación de cargas en una celda fotovoltaica: - Una vez que se ha producido el exceso de portadores de carga - (electrón-hueco) por la radiación ionizante, se requiere de una diferencia de potencial entre dos regiones de la celda fotovoltaica para poder separarlos. Tal diferencia de potencial electrostático puede ser producida por una homounión P-N, por una heterounión, o bien, por una unión metal-semiconductor. Recuérdese que en el caso de una unión metal-semiconductor, la diferencia de potencial electrostático; i.e. la altura de la barrera de potencial, depende exclusivamente de las funciones de trabajo del metal y del semiconductor (sin considerar la calidad de la unión).

Habiéndose producido los portadores de carga libres, estos se moverán hacia la barrera bajo la influencia de un gradiente de concentración.

Resumiendo, para el caso de un contacto metal-semi-

conductor tipo P con $\phi_m < \phi_{sc}$ tenemos : cuando se hace incidir un haz de luz ionizante sobre la superficie del semiconductor, una fracción de la radiación penetrará al material generando pares electrón-hueco, que se mueven libremente hasta que, por acción de la barrera de potencial, ésta los separa, trayendo como consecuencia que en el metal se forme un exceso de electrones (carga negativa) mientras que en el semiconductor, queda un exceso de huecos (carga positiva) debido a que la barrera les impide el paso. Este proceso se manifiesta externamente como una fuerza electromotriz. A la generación de esta fuerza electromotriz se la conoce como efecto fotovoltaico.

2.2- Parámetros Fotovoltaicos

Consideremos una celda fotovoltaica de Barrera Schottky; es decir, una celda formada por una unión metal-semiconductor donde el contacto está explicado por el Modelo Schottky. Este tipo de celda puede tener, como ya se mencionó, dos configuraciones o arreglos: el de pared anterior, que consiste en una celda para ser iluminada por el lado del metal; y el de pared posterior, para ser iluminada por el lado del semiconductor.

Consideremos el primer arreglo ya que es el que ocupa este trabajo. La Fig. 2.1 muestra el esquema del arreglo de pared anterior para la unión de un metal con un semiconductor tipo P, siendo $\phi_m < \phi_{sc}$. En la Fig. 2.2 se ilustra el diagrama de bandas de energía correspondiente a éste arreglo.

Si se hace incidir luz ionizante ($h\nu > E_G$) sobre la superficie del metal (capa metálica transparente), entonces ésta será absorbida por el semiconductor, generándose pares electrón-hueco. El exceso de portadores de carga de signos opuestos se mantienen libres y, bajo la influencia de un gradiente de concentración llegan hasta la barrera de potencial en la región de contacto, donde son separados por acción de ésta. La Fig. 2.3 ilustra este proceso.

La relación corriente-voltaje dada por la Ec.(1.13) para cuando se aplica un voltaje de polarización en sentido directo e inverso, corresponde a la de un diodo rectificador de corriente. Esta misma relación corresponde a la de un diodo ideal de Barrera Schottky en la obscuridad. Esta relación la podemos escribir como

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad 2.2$$

En esta relación, I_d es la corriente que da el diodo o cel-

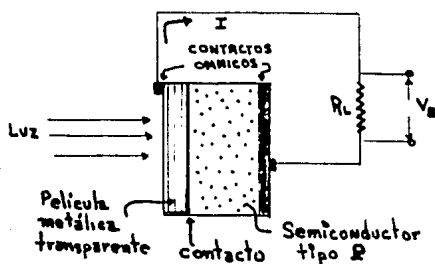


Fig. 2.1 - Esquema de una celda fotovoltaica de Barrera Schottky en iluminación. I es la fotocorriente y V el fotovoltaje de salida a través de R_L .

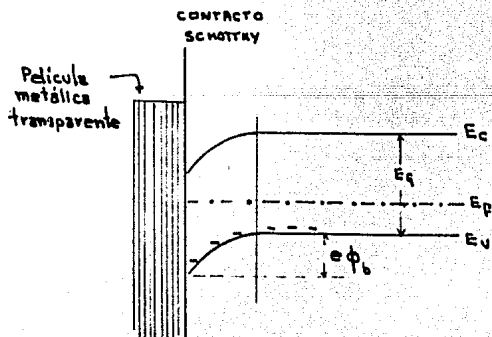


Fig. 2.2 - Diagrama de bandas en el contacto metal-semiconductor tipo P siendo $\phi_m < \phi_{sc}$. La altura de la barrera de potencial es $e\phi_b$.

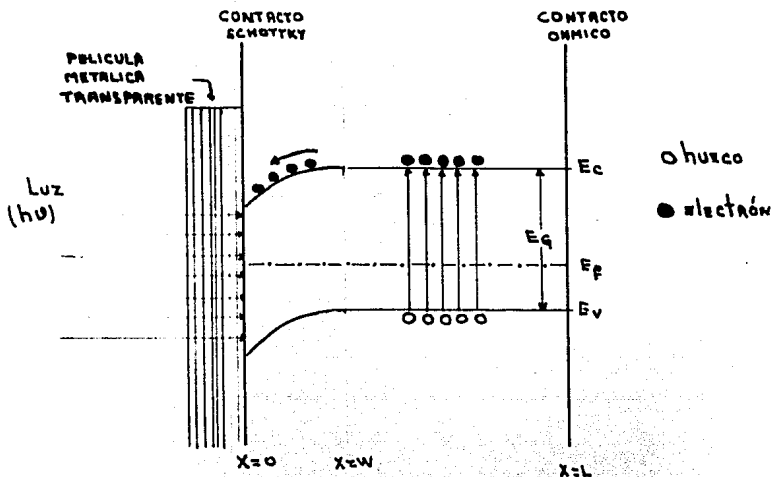


Fig. 2.3 - Diagrama de bandas de energía para una unión metal-semiconductor tipo P, siendo $\phi_m < \phi_{sc}$, bajo iluminación. E_g es el ancho de banda de energías prohibidas, $h\nu$ la energía de los fotones incidentes ($h\nu > E_g$) y W es el ancho de la región de inversión.

da cuando se le aplica un voltaje externo (V_a) en la oscuridad. Una gráfica de esta relación se observa en la Fig. 2.4 .

Ahora bien, al hacer incidir un haz de luz sobre el diodo de Barrera Schottky o celda tal y como se ilustra en la Fig. 2.1 , el comportamiento que se tiene entre la corriente y el voltaje es el que se ilustra en la Fig. 2.5 .

La parte de la curva que se localiza en el cuarto cuadrante de la Fig. 2.5 es el que interesa en celdas solares de cualquier tipo. En ella podemos definir cinco parámetros que son los que indicarán que tan eficiente es la celda. Estos parámetros son: la corriente a corto circuito (I_{sc}) que corresponde al máximo valor de corriente que puede entregar la celda; el voltaje a circuito abierto (V_{oc}) que corresponde al máximo voltaje que puede proporcionar la celda; el voltaje V_{mp} y la corriente I_{mp} corresponden a los valores de voltaje y corriente para máxima potencia (P_{max}); es decir, $P_{max} = I_{mp} V_{mp}$. Con el valor de P_{max} podemos obtener la resistencia de carga (R_L) . Este valor de R_L se determina en forma geométrica inscribiendo en la curva I_s vs V_s (Fig.2.5) el rectángulo de mayor área posible (área del rectángulo igual a P_{max}), y el valor del inverso de la pendiente de la recta trazada desde el origen -

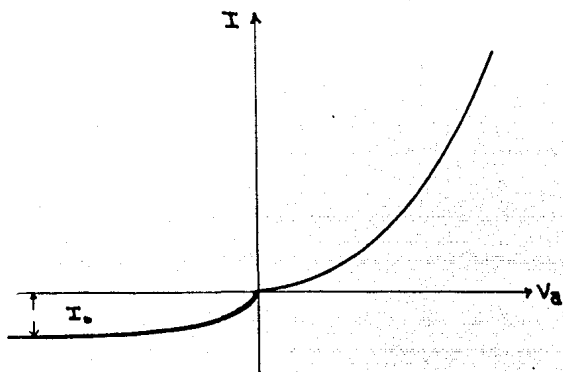


Fig. 2.4- Curva corriente vs voltaje de una celda solar cuando se le aplica un voltaje externo (V_a) directa e inversamente en la oscuridad. Caso en el que $A=1$.

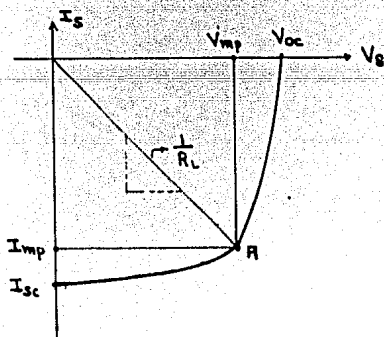


Fig. 2.5- Curva corriente vs voltaje de una celda solar bajo iluminación. Se observan los parámetros importantes: la corriente a corto circuito (I_{sc}), el voltaje a circuito abierto (V_{oc}), la corriente (I_{mp}) y el voltaje (V_{mp}) para máxima transferencia de potencia.

al punto H corresponde al valor de R_L (ver Fig.2.5). -
Con este valor de R_L se puede asegurar que se tendrá la má
xima transferencia de potencia desde la celda a la resisten
cia de carga.

2.3- Fotocorriente y Fotovoltaje

Se sabe que todo generador de potencia eléctrica tie
una resistencia interna. Las celdas solares, por ser genera
dores de potencia eléctrica, también poseen una cierta re
sistencia interna. Esta se compone de dos partes : una lla
(5)
mada Resistencia en Serie (R_s) y la otra llamada Resistencia
en Paralelo (R_{sh}) . Las dos intervienen en las caracterfsti
cas corriente-voltaje de la celda. El origen de R_s se debe
principalmente a los electrodos que se colocan en la celda,
aunque hay una contribución que tiene su origen debido a -
la resistencia intrínseca del semiconductor. Su valor se -
puede determinar a partir de $\left| \frac{dv}{dI} \right|$ tomando varios valores
en polarización directa. La R_{sh} tiene su origen debido a
las pérdidas superficiales a lo largo de los bordes de la cel
da y a los defectos del material. Su valor se puede determi
nar de $\left| \frac{dv}{dI} \right|$ en polarización inversa y con la condición
de que $|v| \rightarrow 0$.

Una celda fotovoltaica de Barrera Schottky se puede representar por medio de un circuito equivalente, como el que se muestra en la Fig. 2.6. En este diagrama, la fotocorriente está representada por un generador de corriente (I_{ph}) y es opuesta en dirección a la corriente en polarización directa ($I_j + I_{rg}$) del diodo. Las corrientes I_j e I_{rg} (existentes en la obscuridad) son iguales a las densidades de corriente J_j y J_{rg} multiplicadas por el área total de la celda. La fotocorriente es igual a la densidad de corriente multiplicada por el área efectiva de la celda; i.e. el área total menos el área que ocupa los contactos o la rejilla.

Aplicando el teorema de Kirchoff para el circuito de la Fig. 2.6 se puede escribir una relación entre la corriente I_s y el voltaje V_s de salida. Esta relación es

$$I_s \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = I_{ph} - \frac{V_s}{R_{sh}} - I_d, \quad 2.3$$

donde I_d es la corriente en la obscuridad, siendo ésta $I_j + I_{rg}$. I_j es la corriente debida a la inyección de electrones del metal al semiconductor, I_{rg} es la corriente de recombinación producida por portadores generados termicamente y que depende del ancho de la banda de energías prohibidas.

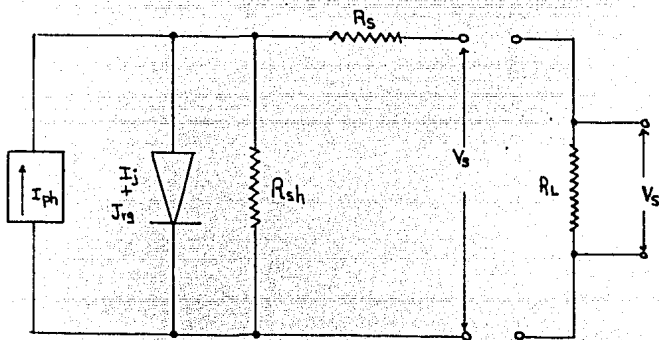


Fig. 2.6- Circuito equivalente de una celda solar incluyendo la resistencia en serie (R_s) y la resistencia en paralelo (R_{sh}).

Ahora bien, si en la celda hacemos la suposición de que el valor de R_s es muy pequeño y el valor de R_{sh} es muy grande, entonces sus efectos se pueden despreciar; y si se considera que

$$I_d = I_o \left[\exp\left(\frac{eV_a}{AKT}\right) - 1 \right], \quad 2.4$$

donde A es el "factor de calidad de la unión", entonces I_o tendrá que ser usado aproximadamente como la suma de I_j e I_{rg} siendo éstas funciones de un voltaje V_a introducido en la unión, el cual, es igual a $V_s + I_s R_s$. La ventaja de ésta aproximación es que la Ec. (2.3) se puede escribir de la forma

$$I_s = I_{sc} - I_o \left[\exp\left(\frac{eV_s}{AKT}\right) - 1 \right], \quad 2.5$$

donde la corriente a corto circuito (I_{sc}) esta dada por

$$I_{sc} = I_{ph}, \quad 2.6$$

y el voltaje de salida (V_s) esta dado por la relación

$$V_s = V_a - I_s R_s. \quad 2.7$$

Una gráfica de la Ec. (2.5) se muestra en la Fig. 2.5 en donde se consideró que $A=1$.

De la Ec. (2.5), si suponemos que $I_s=0$, el voltaje -

de salida (V_s) será igual al voltaje a circuito abierto (V_{oc}) y, por lo tanto, lo podemos expresar como

$$V_{oc} = \frac{AKT}{e} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad 2.8$$

Refiriéndose a la Fig. 2.5 y a la Ec.(2.5), se debe indicar que el valor de A determina la "curvatura" de la gráfica I_s vs V_s y que en condiciones ideales tendrá un valor de uno. Así mismo, la potencia máxima (P_{max}) - dada por la celda es:

$$P_{max} = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad , \quad 2.9$$

y a la relación

$$F.F. = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad , \quad 2.10$$

se le conoce como "Factor de Llenado o Factor de Curva" el cual nos indica la "cuadratura" de la curva I_s vs V_s .

La eficiencia de conversión (η) de una celda se define como

$$\eta = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{P_i} \quad , \quad 2.11$$

donde P_i es la potencia de la luz incidente. Haciendo uso de la Ec.(2.10), la eficiencia η se puede escribir

como $\eta = F.F. \frac{I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_i}$. 2.12

En esta expresión, se observa claramente que para una potencia incidente (P_i) fija, la eficiencia de conversión aumenta si el valor de F.F. aumenta.

Todo lo anterior fué obtenido suponiendo que R_s es muy pequeña y que R_{sh} es muy grande. Si esto no sucediera, entonces de las Ecs. (2.3, 2.4 y 2.6) se tiene

$$I_s = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \left\{ I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_s}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_s}{R_{sh}} \right\} . \quad 2.13$$

Comparando I_s dada por la Ec.(2.5) e I_s dada por la Ec.(2.13), se observa que ésta última se ve disminuida por el factor $\frac{1}{1 + R_s/R_{sh}}$ y por el cociente $\frac{V_s}{R_{sh}}$. Esto trae como consecuencia que el valor de V_{oc} disminuya; la potencia máxima (P_{max}) es menor; el factor de llenado (F.F.) es pequeño y por lo tanto la eficiencia de conversión (η) será menor.

2.4- Parámetros limitadores de la Eficiencia

Al elaborar celdas solares, una de las principales metas que se persigue es que la eficiencia de conversión, de energía solar a energía eléctrica, sea lo más grande po-

sible. Para lograr obtener celdas con un valor grande de la eficiencia se necesitan resolver ciertos problemas que la limitan, entre los cuales se tienen los siguientes:

-A) Pérdidas por utilización parcial de la energía de los fotones:- Cuando los fotones tienen una energía mucho mayor que la necesaria para generar pares electrón-hueco, se tiene una pérdida de energía que se disipa en el material en forma de calor. Una manera de reducir ésta pérdida de energía es seleccionando al material semiconductor con un ancho de banda de energías prohibidas que se acople al espectro solar. Los fotones con energía menor que el ancho de banda de energías prohibidas siempre la disipan en forma de calor.

-B) Pérdidas debido al Factor de Llenado:- La máxima potencia que puede entregar una celda solar corresponde al punto β de la Fig.2.5, el cual se obtiene trazando el rectángulo de mayor área que se pueda inscribir en la curva I_s vs V_s . El factor de llenado (F.F.), el cual se definió anteriormente (Ec. 2.10), depende de I_{mp} , V_{mp} , I_{sc} y V_{oc} . Este valor es representativo de la cuadratura de la curva I_s vs V_s . Si este valor es muy pequeño, la eficiencia de conversión de la celda será pequeña, de donde es deseable que I_{mp} e I_{sc} , lo mismo que V_{mp} y V_{oc} ,

sean del mismo orden y lo mayor posible. Esto solo se logra si el factor de calidad de la unión es bueno ($A=1$) y si, además, R_s es muy pequeña con R_{sh} muy grande.

-C) Pérdidas debidas a la resistencia en serie (R_s) y a la resistencia en paralelo (R_{sh}):- Como se mencionó en la Secc.3, la resistencia en serie tiene su principal origen en los contactos eléctricos de la celda. Para ver sus efectos, pongamos una resistencia variable en serie con la celda e iluminémosla con una potencia incidente constante (5). Conforme aumenta el valor de R_s , el valor del voltaje a circuito abierto (V_{oc}) no se ve afectado; sin embargo, la corriente a corto circuito disminuye (ver Fig.2.7). Esto trae como consecuencia que la curva ideal (Fig.2.5) tienda a ser una recta, teniéndose que el factor de llenado disminuye y por ende la eficiencia de conversión. Este problema se puede resolver si se hacen electrodos óhmicos en las dos substancias que forman la celda.

La resistencia en paralelo tiene su origen en los bordes de la celda y en defectos cristalinos. Para ver sus efectos coloquemos una resistencia variable en paralelo con la celda e iluminémosla (5). Conforme disminuye el valor de R_{sh} a partir de un valor muy grande, la corriente a corto circuito (I_{sc}) no se ve afectada; pero el valor del -

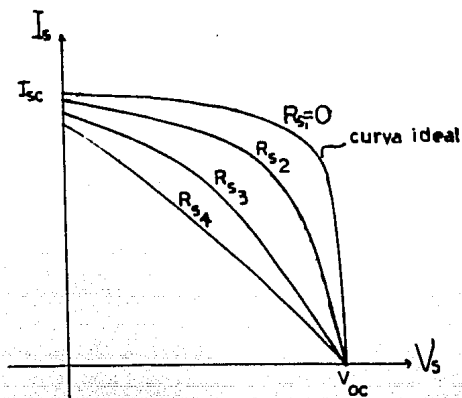


Fig. 2.7- Efectos de la resistencia en serie (R_s) en una celda solar en iluminación. Aquí $R_{s1} < R_{s2} < R_{s3} < R_{s4}$.

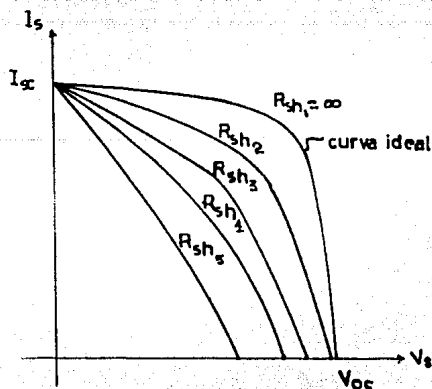


Fig. 2.8- Efectos de la resistencia en paralelo (R_{sh}) en una celda solar en iluminación. En ésta gráfica $R_{sh5} < R_{sh4} < \dots < R_{sh1}$.

voltaje a circuito abierto (V_{oc}) disminuye (ver Fig.2.8). Esto trae como consecuencia que la curva ideal (Fig.2.5) tienda a ser una recta, teniéndose como efecto que el factor de llenado disminuya y por lo tanto también la eficiencia. De la Fig.2.8 podemos ver que entre más grande sea su valor, sus efectos en la curva I_s vs V_s serán menores.

-D) Pérdidas por reflexión en la superficie:- Es claro que al incidir la luz sobre la superficie de la celda, parte de ella es reflejada y la demás penetra al material siendo la parte reflejada proporcional al coeficiente de reflexión del material. Una manera de minimizar la cantidad de luz que se refleja en una celda, es recubriéndola con un material antirreflector, para que de ésta manera penetre mayor cantidad de luz a ella.

2.5- Conclusiones

En el contexto de éste capítulo se han analizado las características fotovoltaicas de una celda solar de Barrera Schottky. Los resultados antes vistos nos indican que el material semiconductor Cu_2O —en base a sus características— constituye un buen candidato como componente para dichas celdas.

Por otra parte, se tienen ciertos parámetros que limitan a la eficiencia. Por lo tanto, al elaborar una celda solar de Barrera Schottky de $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$, se deberá de tener cuidado con lo siguiente:

- a) al realizar el contacto $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$. Esto con el fin de que la calidad de la unión sea lo mejor posible, ya que ésta repercute sobre la eficiencia de conversión.
- b) al colocar los contactos eléctricos. Un contacto eléctrico malo hace que la resistencia en serie aumente, trayendo como consecuencia que la eficiencia de conversión disminuya.

Cabe aclarar, que ya teniendo al substrato de Cu_2O , estos son los puntos de mayor importancia que se deben de controlar, de manera más cuidadosa en la elaboración de la celda, para tener una eficiencia aceptable.

CAPITULO 3/TECNOLOGIA Y CARACTERIZACION DE UNA CELDA SOLAR DE Cu-Cu₂O DE BARRERA SCHOTTKY DE PARED ANTERIOR

En los capítulos anteriores se ha expuesto la teoría de un contacto metal-semiconductor tipo P, dándole mayor énfasis al caso en que la función de trabajo del metal es menor que la del semiconductor. Este énfasis se debe a que las celdas solares de Cu-Cu₂O de Barrera Schottky, que son el propósito de este trabajo, presentan esa característica.

En este capítulo se expondrán algunos de los problemas más comunes en la elaboración de celdas solares; así mismo, se expondrán también algunas de las características que se tomaron en cuenta para seleccionar el material semiconductor, la técnica empleado para su elaboración y su caracterización fotovoltaica.

Para la elaboración de celdas solares se necesita seleccionar al semiconductor que se va a emplear en base a consideraciones teóricas, tecnológicas y económicas. Se ha afirmado en el Cap.2 que el material semiconductor debe tener el ancho de la banda de energías prohibidas menor

que la energía de los fotones que forman el espectro solar; que la transición de los electrones de la banda de valencia a la de conducción, debida a la absorción de fotones, es - preferible que sea directa; que el coeficiente de absorción (α) del material semiconductor sea grande (esto con el fin de que sea aprovechada al máximo la energía solar y, - que el semiconductor sea de bajo costo y facil elaboración.

En base a las consideraciones anteriores y al hecho - que se tiene de que el contacto Cu-Cu₂O es rectificador, - se seleccionó al Cu₂O como el material semiconductor a-- adecuado para formar una celda solar de Barrera Schottky - con el Cu. Sus características son las siguientes:

a) El Cu₂O se puede obtener, entre otros procesos , por oxidación del cobre, ya que éste metal con función de - (9) trabajo de 4.65 eV es fácil de oxidar a altas temperatu-- ras en atmósfera normal.

b) El Cu₂O es un semiconductor tipo P .

c) Su función de trabajo es de 5 eV .

d) Sus transiciones ópticas son directas.

e) Su ancho de banda de energías prohibidas es de - 1.9 eV , acoplándose perfectamente al espectro solar, ya - que la longitud de onda en la que más emite el Sol es de - 5980 A ; siendo la energía de los fotones a ésta longitud de

onda del orden de 2 eV .

3.1- Técnica de Elaboración

La técnica empleada para la elaboración de una celda solar de Cu-Cu₂O de Barrera Schottky, de pared anterior, se constituye de dos partes esenciales:

A: Obtención del sustrato de Cu₂O, por oxidación del cobre a altas temperaturas.

B: Elaboración del contacto Cu-Cu₂O, por evaporación del Cu sobre el sustrato de Cu₂O.

A: Obtención del sustrato de Cu₂O (óxido cuproso).

Para hacer los sustratos de Cu₂O, se hizo una investigación previa para saber como se podían obtener a partir de láminas de cobre mediante una oxidación en un horno y en atmósfera normal. Se encontró que el Cu₂O existe a una temperatura que va aproximadamente desde los 375C a 1230C⁽¹³⁾. Sabiendo el intervalo de temperatura de existencia del Cu₂O, lo que se buscó fué la temperatura y el tiempo óptimo para que una lámina de cobre se transformara totalmente a óxido cuproso. Para esto, se tuvo que hacer un estudio que consistió en lo siguiente (ver diagrama de bloques en la Fig. 3.1) :

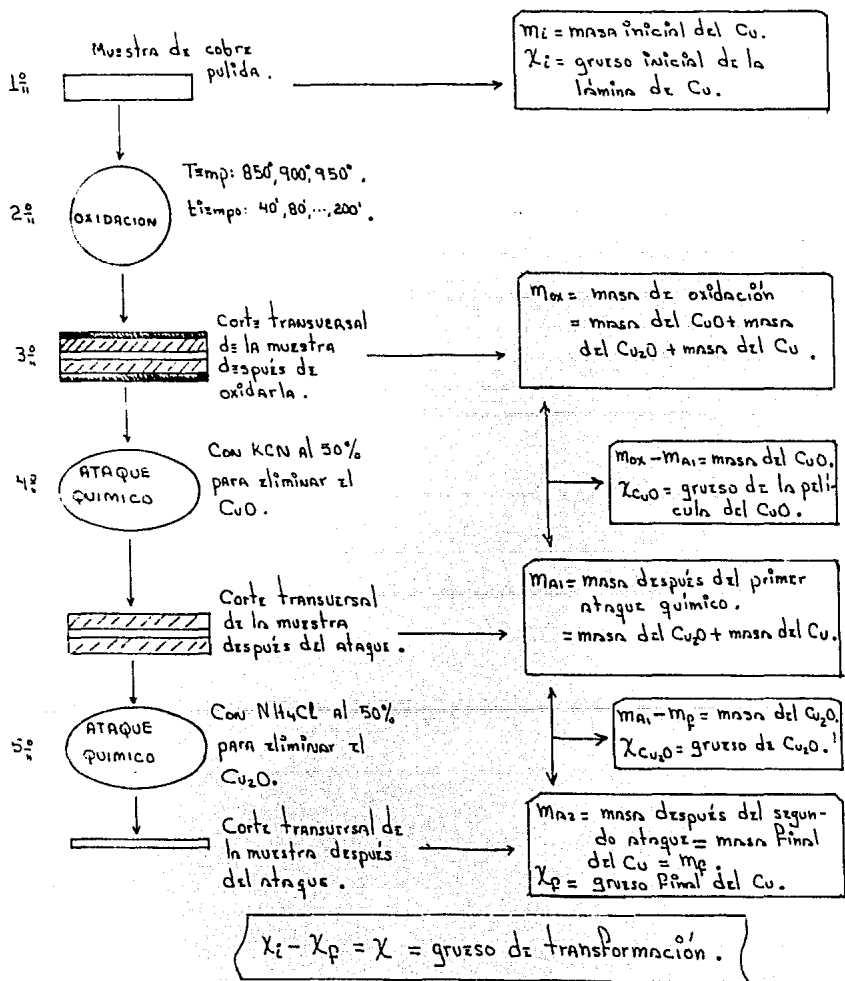


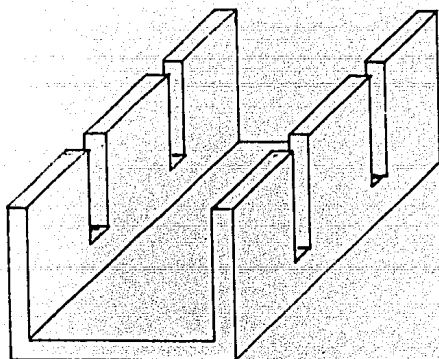
Fig. 3.1 Diagrama de bloques. En este diagrama se muestran los distintos pasos que se hicieron para encontrar la temperatura y el tiempo óptimos para que una lámina de cobre se transforme totalmente a una junta CuO-Cu₂O-Cu.

1^o Se cortaron láminas de cobre de un área aproximada de 6 cm^2 ($2 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$), se pulieron y se pesaron - obteniéndose así una masa inicial m_i . Se calculó su grueso χ_i por métodos gravimétricos siendo este aproximadamente de 520μ para todas las muestras.

2^o Se oxidaron las muestras mediante una mufla (marca Lindberg, Mod. 51848 con $\pm 5^\circ \text{C}$ en la precisión de la lectura) en atmósfera normal. Las temperaturas que se emplearon fueron de 850 , 900 y 950°C . Para cada temperatura se obtuvieron 10 muestras a tiempos distintos. Los tiempos se variaron de $40'$ en $40'$ en el intervalo de $40'$ a $200'$. - El dispositivo experimental que se usó para la oxidación - consistió en un portamuestras de cobre en forma de canal - con cuatro ranuras donde se colocaron las muestras (ver - Fig. 3.2).

3^o Después de oxidarlas, se volvieron a pesar, obteniéndose así una masa de oxidación m_{ox} . Era de esperar, que al sacar las muestras del horno, se les formara una capa de óxido cúprico (CuO); así que m_{ox} estaba compuesta de : masa del CuO más la masa del Cu_2O más la masa del Cu (ver Fig. 3.1.) .

4^o Como siguiente paso, las muestras fueron atacadas con KCN (cianuro de potasio) al 20% para eliminar



**Fig. 3.2- Portamuestras de cobre que se utilizó
en la oxidación de las muestras.**

(16)

las dos capas (superior e inferior) de óxido cúprico (CuO). Este ataque químico se hizo con mucho cuidado ya que el KCN al diluirlo en agua produce gases tóxicos que pueden ocasionar la muerte. Después de éste primer ataque, se volvieron a pesar las muestras obteniéndose una masa que se denominará de ataque 1 (m_{AL}). Esta m_{AL} estaba compuesta de: masa del Cu_2O más la masa del Cu.

5^o Después de esto, las muestras fueron atacadas ahora con NH_4Cl (cloruro de amonio) al 50% para eliminar las dos capas de Cu_2O (superior e inferior). Inmediatamente después, se pesaron las muestras obteniéndose una masa de ataque 2, que le llamaremos masa final del cobre (m_p); ya que, al final de todo este proceso, se obtiene una lámina muy delgada de Cu. La diferencia entre m_{AL} y m_p nos dá la masa del Cu_2O y, evidentemente, obtenemos el grueso de la película (se calculó por métodos gravimétricos).

Si graficamos el crecimiento del grueso de la película de Cu_2O (χ_{Cu_2O}) contra el tiempo de oxidación (t), para las tres temperaturas empleadas, podríamos suponer, observando los datos, dos tipos de relaciones:

$$\chi_{Cu_2O} \propto t$$

3.1

$$\chi_{\text{Cu}_2\text{O}}^2 \propto t$$

3.2

La primera relación fué desechada inmediatamente - ya que no describe el comportamiento de la curva de crecimiento de la película del Cu_2O (ver Fig. 3.3).

La segunda relación nos dá un comportamiento adecuado, siempre y cuando sea de la forma

$$\chi_{\text{Cu}_2\text{O}}^2 = Dt$$

3.3

siendo D un parámetro que depende de la temperatura cuyas unidades son A^2/min . La Fig. 3.3 nos muestra la gráfica del crecimiento del grueso de la película del Cu_2O contra el tiempo de oxidación para las tres temperaturas empleadas y el valor que adquiere el parámetro D.

También podemos conocer la masa M_t de Cu, que al oxidar la muestra se transformó en Cu_2O y CuO . Esta estará dada por la diferencia entre m_t y m_p del mismo. Si tenemos el valor de M_t , entonces por métodos gravimétricos encontramos el " grueso de transformación ". Sea χ el grueso de transformación del Cu. Si graficamos el grueso de transformación (χ) contra el tiempo de oxidación (t) para las tres temperaturas empleadas, se observa también un comportamiento de la forma:

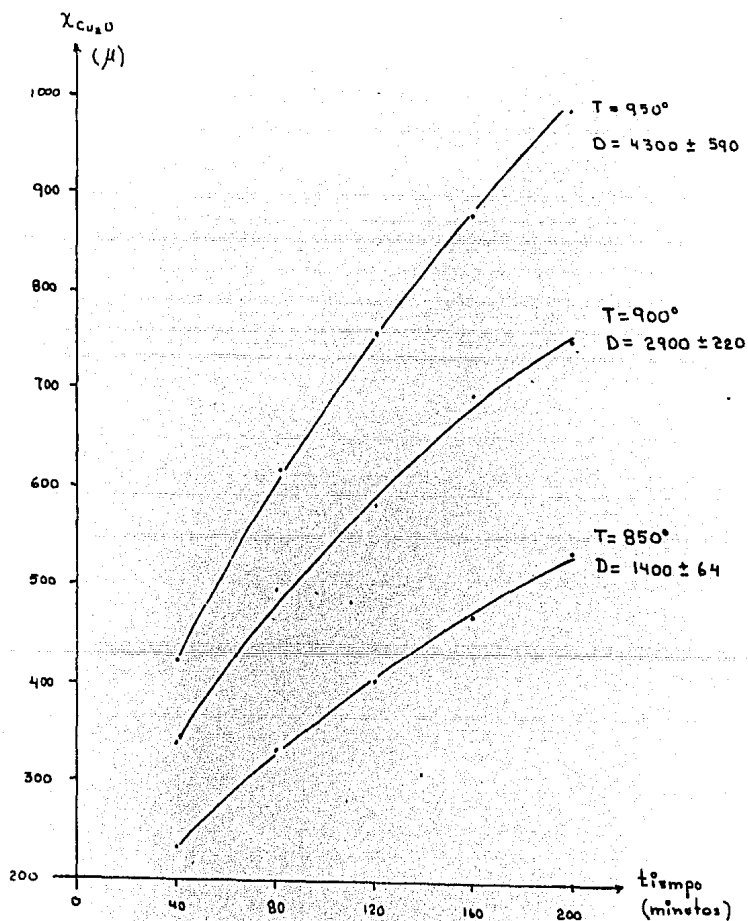


Fig. 3.3- Gráfica de la Ec. (3.3). Se muestra el crecimiento de la película de Cu_2O contra el tiempo de oxidación para las tres temperaturas empleadas.

$$\chi^2 \propto t$$

3.4

Sea $\chi^2 = at$ la relación entre χ y t , donde a es un parámetro que depende de la temperatura. La Fig. 3.4 nos muestra la gráfica χ vs t para las tres temperaturas.

Teniendo como base las gráficas de la Fig. 3.4, se puede conocer a priori el tiempo de oxidación y la temperatura adecuada para los cuales, una lámina de cobre de determinado grueso que se vaya a oxidar, se transforme totalmente en una " junta " de $\text{CuO-Cu}_2\text{O-CuO}$. Como $\chi = \chi_i - \chi_p$ y, además, queremos que $\chi_p = 0$, entonces $\chi = \chi_i$. Recuérdese que χ_i y χ_p son los gruesos de la lámina de cobre antes y después de oxidarlas respectivamente.

Por ejemplo, si $\chi_i = 300 \mu$, de la gráfica de la Fig. 3.4 tenemos:

- a) a una temperatura de 850C se necesita un tiempo de oxidación de 158 ± 1 minuto.
- b) a una temperatura de 900C se necesita un tiempo de oxidación de 78 ± 1 minuto.
- c) a una temperatura de 950C se necesita un tiempo de oxidación de 48 ± 1 minuto.

En base a lo anterior, se empezó a trabajar sobre la obtención del sustrato de Cu_2O . Dicho sustrato fue obtenido al oxidar láminas de cobre de un área aproximada de

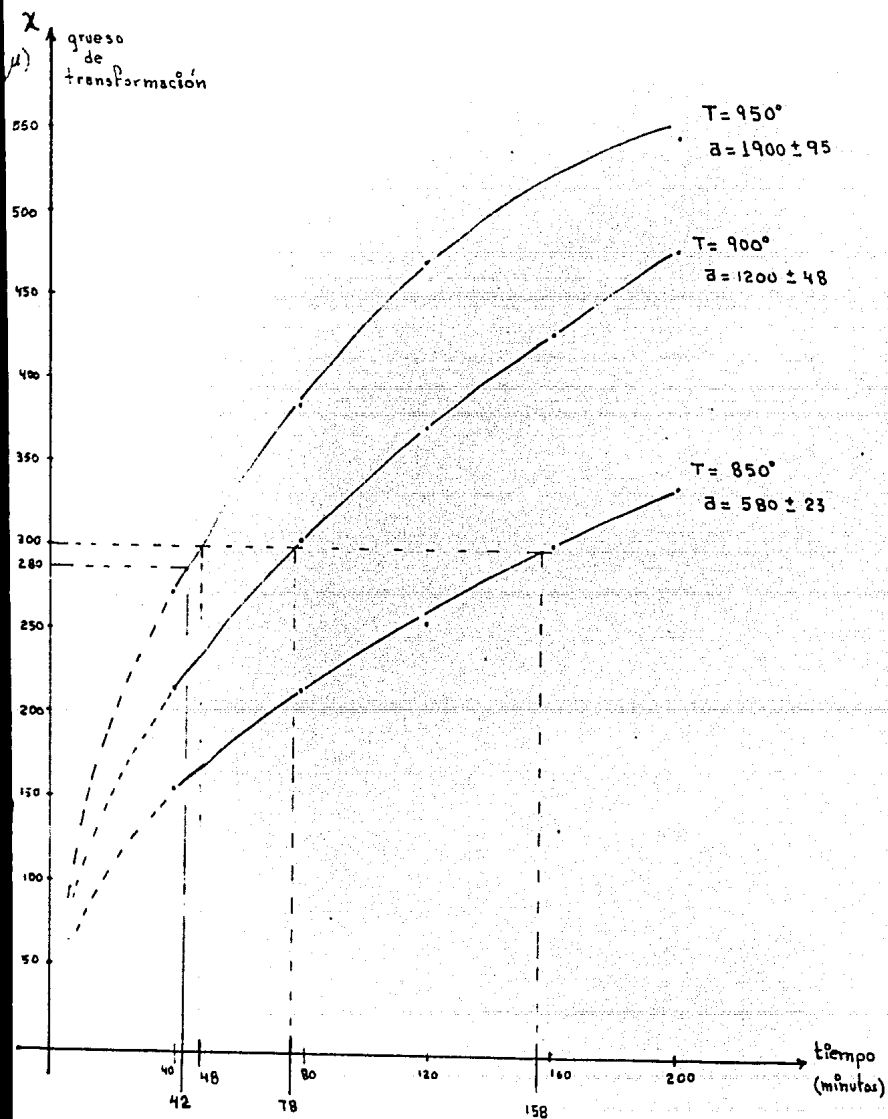


Fig. 3.4- Gráfica del grueso de transformación (χ) contra el tiempo de oxidación (t), para las temperaturas de 800, 900 y 950 C .

16 cm² (4 cm X 4 cm) y un grueso aproximado de 280 μ , en una mufla Lindberg (Mod. 51848) a una temperatura de 950 C y en atmósfera normal.

Las muestras de cobre inicialmente se pulieron y se les hizo un ataque químico con ácido nítrico (HNO_3) al 50%, durante 5 seg. , para eliminar las impurezas que hay sobre la superficie de las muestras.

Se tuvo la necesidad de cambiar el portamuestras que se había utilizado anteriormente para hacer las oxidaciones, ya que se observó que las muestras se pegaban a éste y, además, en la región de contacto muestra-portamuestra, la oxidación no era igual que en la región libre de éste contacto. El portamuestra que se usó se muestra en la Fig. 3.5 .

Las muestras se colgaron de dos de sus esquinas por medio de alambres. El alambre tenía que ser de platino ya que es uno de los pocos materiales que, a la temperatura de formación del Cu_2O , no reacciona con él . (14)

Como no se tenía alambre de platino, se experimentó con varios tipos de alambre: tungsteno, oro, tantalio y cobre; en el orden en que aparecen. Los tres primeros no resultaron adecuados ya que se rompían. El que dió buenos resultados fué el de cobre, con un diámetro aproximado de 1200 μ .

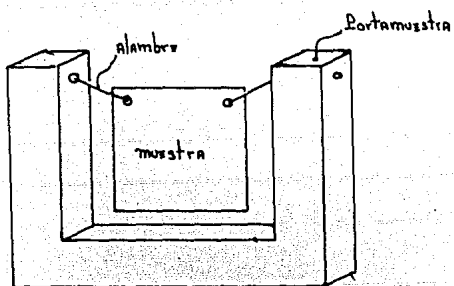


Fig. 3.5- Portamuestras que se usó para oxidar a las láminas de Cu durante la obtención de los substratos de Cu_2O .

Teniendo el portamuestras, el alambre de cobre y las muestras, se procedió a oxidarlas en la mufla a la temperatura antes dicha, con un tiempo de oxidación de 42 ± 1 min. (que es el tiempo indicado en la Fig.3.4, para un grueso de 280μ).

Terminada la oxidación, las muestras fueron sacadas de la mufla y enfriadas inmediatamente en agua, para evitar la formación de una película muy gruesa de CuO . Después, se procedió a eliminar la capa de CuO con KCN al 20%, quedando solamente así los substratos de Cu_2O .

Los substratos así obtenidos muestran claramente (en algunos a simple vista y en otros mediante un microscopio) las fronteras de grano superficiales y, cuando los substratos se observan con luz transmitida a través de ellos, se ve el color característico rojo rubí del óxido cuproso.

Observando los substratos de Cu_2O obtenidos de la forma antes indicada, se llegó a las siguientes conclusiones:

- a) Los substratos son policristales.
- b) Con respecto al tamaño de grano, el crecimiento de éstos no es uniforme ya que, en algunas muestras, hay una región (distinta en cada muestra) donde el grano tiene un tamaño que varía de 1 a 4 mm (ver Fig.3.6) . Esto se piensa que es una consecuencia directa de la historia del

material original.

c) El tamaño de grano promedio, medido fuera de la región antes dicha, fué de $620 \pm 24 \mu$ (ver Fig. 3.7).

d) Al observar transversalmente los substratos se aprecian dos hileras de granos colocados tal como si fueran bloques (ver Fig. 3.8).

e) Se cree posible llegar a obtener un substrato compuesto de un solo cristal, ya que, el tamaño de grano depende de la temperatura de obtención del Cu_2O , del tiempo y temperatura de templado y del grosor de la muestra del Cu .⁽¹⁴⁾ El estudio para la obtención del monocristal de Cu_2O se hará en futuras investigaciones.

B: Elaboración del contacto $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$

Para elaborar una celda solar de $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ de Barra Schottky es necesario tener en contacto el Cu y el Cu_2O . Como la función de trabajo del Cu ($\phi_m = 4.65 \text{ eV}$)⁽⁹⁾ es menor que la del Cu_2O ($\phi_{sc} = 5 \text{ eV}$), este contacto resulta ser rectificador (ver Cap.1, Secc.4).

Para formar el contacto $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ se decidió depositar, por evaporación al vacío, una película de Cu sobre una de las caras del substrato de Cu_2O ; ya que resulta ser más sencilla esta técnica que la de formar, por métodos quí

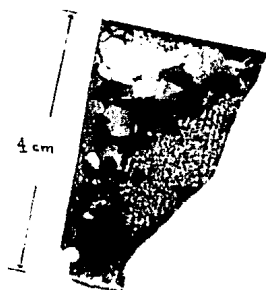


Fig. 3.6- Fotografía de la región de un sustrato de Cu_2O donde se observan las fronteras de grano a simple vista.



Fig. 3.7- Fotografía de una región de un sustrato de Cu_2O . Obsérvese las fronteras de grano bien definidas.



Fig. 3.8- Fotografía de un corte transversal a una muestra de Cu_2O . Obsérvesen los dos granos colocados en forma de bloques.

micos, la unión Cu-Cu₂O .

Para una celda solar de Cu-Cu₂O de Barrera Schottky de pared anterior, la película de Cu debe de ser transparente y con un grueso óptimo del orden de 100 a 200 Å ^(2,4,7). Recuérdese que en una celda solar de éste tipo, la celda se ilumina por el lado del Cu; por ésta razón y debido a que los portadores de carga se van a generar en el semiconductor Cu₂O, la película de Cu deberá de ser transparente a la luz para que la mayor parte de ésta llegue al semiconductor y genere los portadores de carga.

Teniendo este dato presente, se comenzó a trabajar sobre la elaboración de las celdas. Para la evaporación del Cu se usó una evaporadora fabricada por el Instituto de Física de la UNAM. Las evaporaciones se hicieron a una presión de 8×10^{-5} mm de Hg. A continuación se describen los problemas técnicos que se presentaron y la solución que se les dió.

1^o La evaporadora empleada no tiene un medidor que garantice la razón de depósito del material evaporado; por consiguiente, no se puede conocer directamente el grueso de la película evaporada. Como la película de Cu que se va a depositar sobre el Cu₂O debe de ser transparente, se ideó un dispositivo para cumplir este requisito: a una lámi

na delgada de cobre se le hicieron cinco orificios, cuatro en forma cuadrada con un área de 9 cm^2 y uno en forma rectangular con un área de 2 cm^2 (ver Fig. 3.9). En cada uno de los cuatro orificios se colocaron los substratos de Cu_2O y en el orificio de forma rectangular se colocó un vidrio . Este portamuestrase colocó dentro de la evaporadora de tal forma que el vidrio quedara exactamente abajo del crisol. Es claro que al evaporar el Cu , éste se deposita tanto en los substratos de Cu_2O como en el vidrio. Como la campana de la evaporadora tiene dos ventanas (una lateral y otra arriba; ver Fig.3.10) , se puede observar la evaporación . De esta manera, y observando también el crisol, se decidía cuando se terminaba la evaporación. Ahora bien, el grueso aproximado de la película de Cu depositada sobre los substratos se puede conocer a partir de la película depositada sobre el vidrio, utilizando el método de transmisión y reflexión de la luz.

2.º Ya teniendo la unión de Cu-Cu₂O se debe de garantizar la forma de recolectar a los portadores de carga. Para esto, sobre la película de Cu se depositó , por evaporación, una rejilla de Cu. Así mismo, sobre la cara libre del substrato de Cu_2O , es necesario depositar por evaporación, un determinado metal A para poder colectar dichos -

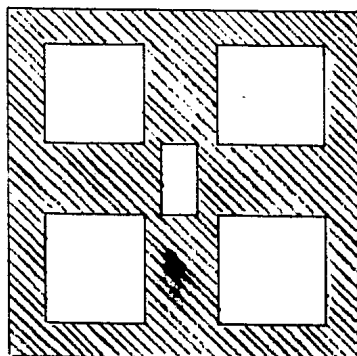


Fig. 3.9- Portamuestras usado para determinar el grueso aproximado de la película de Cu durante la evaporación.

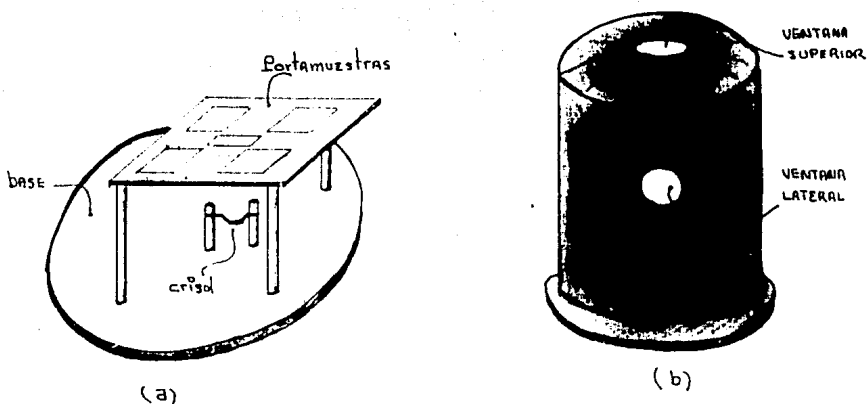


Fig. 3.10- Esquemas de la base y la campana, de la evaporadora. En (a) se muestra la base con el portamuestras colocado sobre unos postes. En (b) se ilustra la campana con sus dos ventanas.

portadores. Al depositar este metal A sobre el Cu_2O se forma un contacto semiconductor-metal A el cual debe de ser óhmico para que los portadores que fluyan del semiconductor al metal A al producirse el efecto fotovoltaico no encuentren ninguna barrera. Del Cap. 1 Secc. 4, para que el contacto semiconductor-metal sea óhmico, la función de trabajo del metal debe de ser mayor que la función de trabajo del semiconductor tipo P. En base a esto y debido a que la función de trabajo del Cu_2O es de 5 eV, se buscó un metal con función de trabajo mayor que 5 eV. A continuación se da una lista de los metales que cumplen con este requisito:

Iridio	$\phi = 5.27 \text{ eV}$	Selenio	$\phi = 5.9 \text{ eV}$
Platino	$\phi = 5.65 \text{ eV}$	Oro	$\phi = 5.1 \text{ eV}$
Paladio	$\phi = 5.12 \text{ eV}$	Niquel	$\phi = 5.11 \text{ eV}$

De todos éstos se escogió al oro, ya que es relativamente fácil colocar sobre de él un contacto eléctrico.

Tomando en consideración estos problemas, se elaboraron las primeras cuatro celdas. Se les colocaron los contactos eléctricos y se hicieron inmediatamente unas mediciones preliminares para ver si efectivamente se produce el efecto fotovoltaico. Estas mediciones fueron satisfactorias ya que sí se produjo dicho efecto y con una eficiencia de

conversión del 0.5% aproximadamente.

Cuando se decidió hacer mediciones más precisas para poder caracterizarlas plenamente, las celdas ya no respondieron de igual manera. Esto se debió a que la película de cobre, por ser muy delgada, se había oxidado presentándose un tercer problema: el de degradación. Para subsanar este problema, se investigó con que tipo de material se debe de recubrir la celda para evitar que la película de cobre se oxide; además, que dicho recubrimiento no reaccione con la celda. Se encontró ⁽¹⁰⁾ que las resinas a base de silicio dan regulares resultados para subsanar este problema, y son las que hasta la fecha se han probado experimentalmente con mayor frecuencia.

Finalmente, se hicieron otras cuatro celdas con la técnica de elaboración siguiente:

a) Evaporación de una película de oro (no transparente) sobre una de las caras del sustrato de Cu_2O .

b) Evaporación de una película transparente de cobre sobre la otra cara del sustrato de Cu_2O .

c) Evaporación de una rejilla de cobre sobre la cara donde se depositó la película de cobre.

d) Colocación de los contactos eléctricos.

e) Encapsulamiento de todo el conjunto.

En la Fig. 3.11 se ilustra la forma definitiva de las celdas terminadas. En (a), se tiene un corte transversal de la celda donde se puede apreciar todos los elementos que la forman y, en (b), una celda vista desde arriba (por la parte de la rejilla colectora).

En la Fig. 3.12 se muestra una fotografía de las cuatro celdas encapsuladas y enmarcadas en una tableta de lucita.

3.2- Caracterización

La técnica de elaboración de las celdas solares de $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ de Barrera Schottky se vió en la sección anterior, la física de éstos diodos se explicó en el Cap. 1 y 2, y en lo que resta de éste capítulo, se tratará su análisis para obtener sus características como convertidores de energía luminosa a energía eléctrica.

La caracterización de las celdas tiene como objetivo conocer los parámetros más importantes inherentes a las mismas. A continuación se expone la forma en que se analizaron cada uno de estos parámetros y los resultados obtenidos.

A: Características de Diodo

Para conocer las características de diodo rectificador

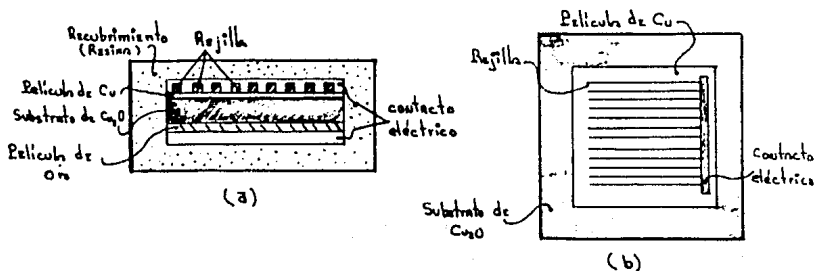


Fig. 3.11 - Una celda solar de Cu-Cu₂O . En (a) un corte transversal . En (b) una vista superior .

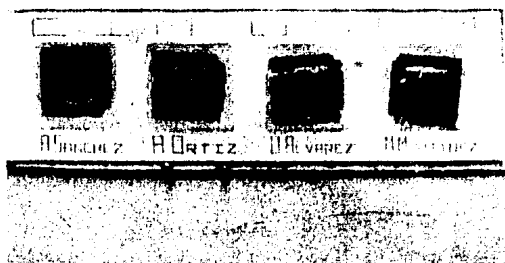


Fig. 3.12 - Fotografía de las cuatro celdas encapsuladas y enmarcadas en una tableta de lycita .

de corriente de las celdas, se empleó el circuito que se muestra en la Fig. 3.13. La celda y una resistencia de $2\text{ K}\Omega$ fueron colocadas en serie, un multímetro digital (marca Fluke, Mod. 1479, error del aparato 0.05%) fué colocado en paralelo con la resistencia para determinar la corriente en el circuito. Se aplicaron voltajes externos en el intervalo de 0 a 19 v en polarización directa y de 0 a 10 v en polarización inversa.

Con los datos de corriente y voltaje en la oscuridad se hizo la gráfica I vs V_0 de tres celdas, la cual se muestra en la Fig. 3.14. En cada gráfica se observa un comportamiento exponencial de la corriente con respecto al voltaje aplicado. Este comportamiento lo describe la Ec. (2.2).

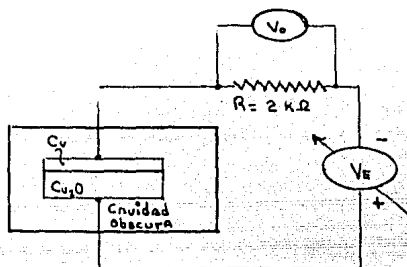
El error experimental en las medidas de corriente y voltaje aplicado fué:

Para C_2 de 0.06 a 0.6 % .

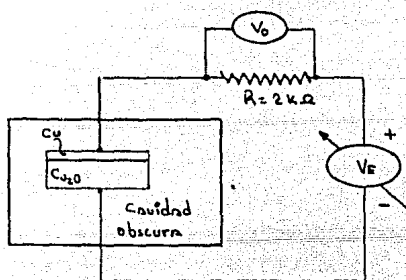
Para C_3 de 0.1 a 1.1 % .

Para C_4 de 0.05 a 0.5 % .

El error teórico involucrado se puede evaluar como sigue: se usó un multímetro digital con una incertidumbre del 0.05% a escala completa y una incertidumbre de $\pm 0.01\text{ v}$ en la lectura, lo cual representa un error del 1.23%. En la resistencia se tiene una incertidumbre del 0.02% y en-



(a)



(b)

Fig. 3.13 - Diagrama del circuito empleado para analizar el comportamiento de diodo de las celdas en la oscuridad. En (a) polarización directa y en (b) polarización inversa. El voltaje aplicado (V_a) a la celda a través de la resistencia es la diferencia entre el voltaje externo (V_E) y el voltaje leído (V_0).

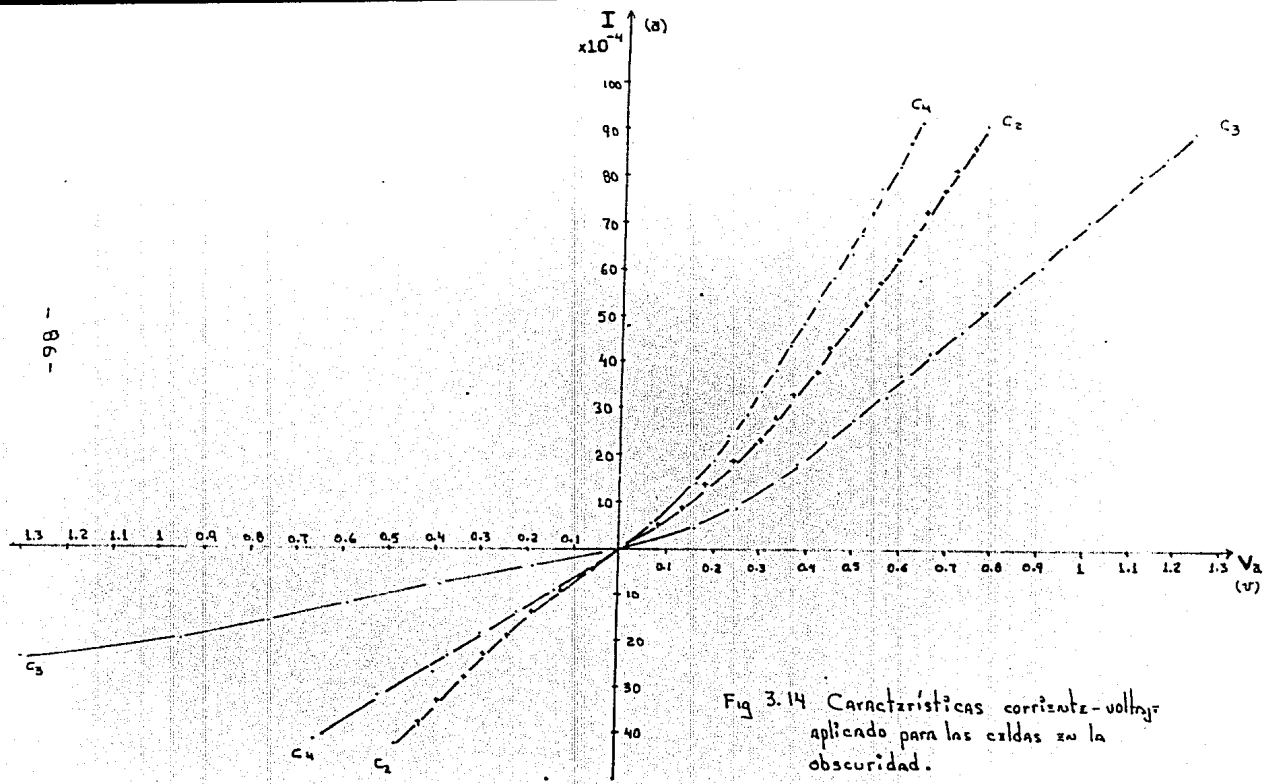


Fig 3.14 Características corriente-voltaje aplicando para las celdas en la oscuridad.

la fuente del 0.05% . En total se tiene un error teórico - aproximado del 1.3% . Comparando el error teórico con - el experimental se puede concluir que los datos experimen- tales son confiables.

B: Altura de la Barrera

Para calcular la altura de la barrera ($e\phi_b$), se grafi- ca $\ln I$ vs V_a , donde I es la corriente dada por la cel- da cuando se le aplica un voltaje V_a en la oscuridad en - polarización directa. La gráfica de $\ln I$ vs V_a se muestra en la Fig. 3.15 para las tres celdas analizadas.

Del Cap.1, Secc.5, tenemos que la altura de la barre- ra ($e\phi_b$) esta dada por la Ec.(1.22), siendo ésta

$$|e\phi_b| = KT \left| \ln C - \ln I_0 \right|$$

El valor encontrado para $\ln I_0$ a partir de las grafi- cas de la Fig.3.15 fué de:

C₂: $\ln I_0 = 6.5363$ con un error experimental del orden de 0.3%.

C₃: $\ln I_0 = 6.46$ con un error experimental del orden de 0.7%.

C₄: $\ln I_0 = 6.5231$ con un error experimental del orden de 0.5%.

A partir de los valores de $\ln I_0$ para las celdas anali- zadas, tenemos que los valores para I_0 son:

C₂: $I_0 = 0.6897$ ma C₃: $I_0 = 0.639$ ma C₄: $I_0 = 0.6806$ ma

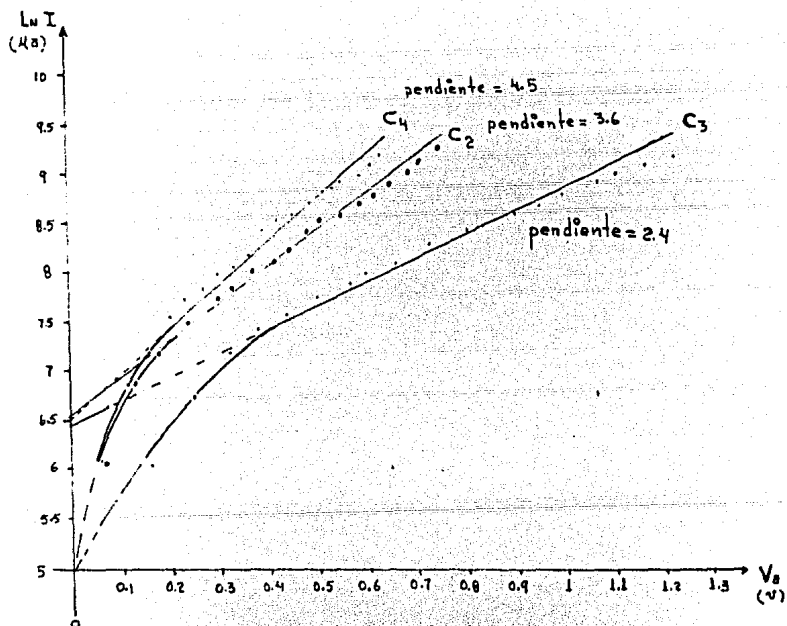


Fig. 3.15- Gráfica de $\text{Ln } I$ vs V_o para las tres celdas analizadas. La extrapolación de las curvas hacia el eje $\text{Ln } I$ nos dá el valor de $\text{Ln } I_0$.

con un error experimental del orden de 1 %.

Si en la expresión para $|e\phi_b|$ suponemos que la constante C es igual a la unidad y que $T=300K$, el valor de la altura de la barrera para las celdas será de :

$$C_2: e\phi_b = 0.1689 \text{ eV}$$

$$C_3: e\phi_b = 0.1669 \text{ eV}$$

$$C_4: e\phi_b = 0.1685 \text{ eV}$$

con un error experimental del orden de 1%. El error teórico considerado es del orden de 12% debido a que, al tomar a T como 300K se puede tener un error del 10%. Para obtener los valores anteriores se tomó a la constante de Boltzmann $k = 1.38 \times 10^{-23}$ joule/K.

Cabe aclarar que estos valores de $e\phi_b$ se encontraron suponiendo que la constante $C=1$ y que por lo tanto no son los valores reales que se tienen, ya que estos serán $(e\phi_b)' = kT \ln C - e\phi_b$; y además, suponiendo que la unión que se produjo entre el Cu y el Cu₂O fué ideal ($A=1$).

Para el análisis que se está haciendo, podemos decir que el valor de $e\phi_b$ es aproximadamente de 0.2 eV. Este valor es muy pequeño comparado con los valores reportados teóricamente que son del orden de 0.7 a 0.8 eV. El hecho de que la altura de la barrera sea pequeña se debe probablemente a que al depositar la película de Cu, sobre el -

substrato de Cu_2O , el contacto que se produjo no fué uniforme. Esto tiene que traer como consecuencia que el factor de calidad (A) de la unión no sea óptimo.

C: Propiedades Fotovoltaicas

Estas propiedades se determinaron usando el circuito que se muestra en la Fig. 3.16 . Se colocó una resistencia variable en serie con la celda y, en paralelo con la resistencia variable, se colocó un multímetro digital (marca Fluke, Mod. 14791, error del aparato 0,05%) para determinar el voltaje dado por la celda cuando esta se ilumina con una potencia incidente constante. Como resistencia variable se usó una década de resistencias (marca Gen Rad, Mod. 1434, error del aparato 0.02%) y la potencia incidente fué proporcionada por una lámpara de 100W con filamento de tungsteno. Su potencia fué medida con un medidor de potencia (marca Spectra-Physics, Mod.401B, error del aparato 20%). El error experimental al medir la potencia fué del 5%. Con el fotovoltaje y la fotocorriente proporcionados por las celdas se obtuvo las gráficas de la Fig. 3.17 . En cada una de éstas gráficas se inscribió el rectángulo de mayor área para determinar el valor de la resistencia de carga (R_L) para máxima transferencia de potencia (ver Fig. 2.5) .

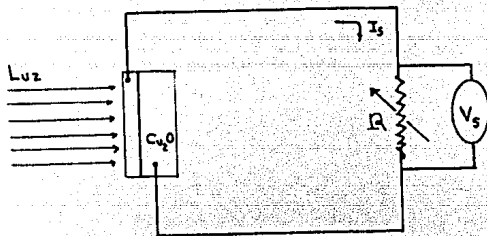


Fig. 3.16- Diagrama del circuito empleado para analizar la corriente y el voltaje dado por la celda, cuando ésta se ilumina con una potencia incidente constante.

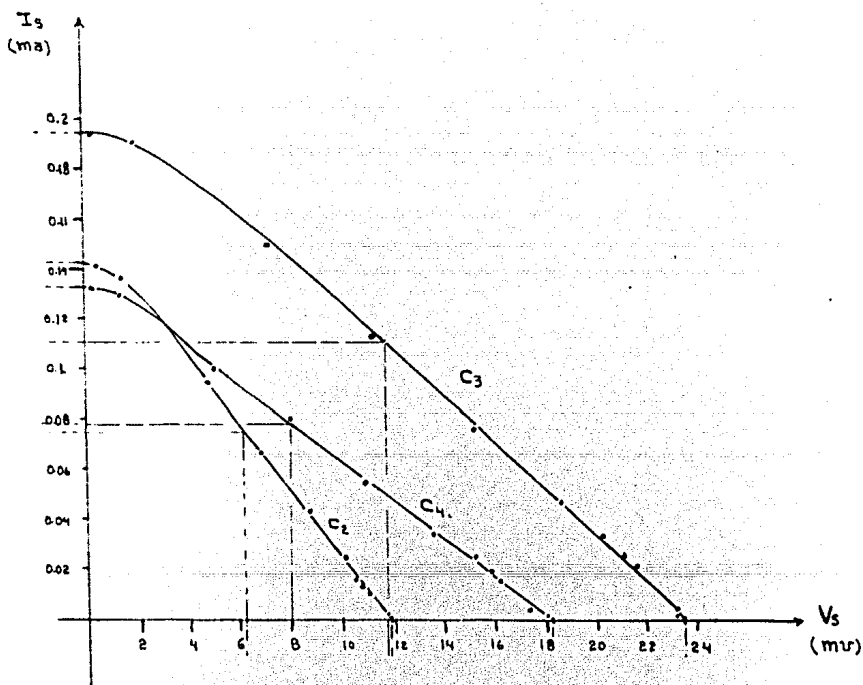


Fig. 3.17- Gráfica I_s vs V_s en iluminación para las tres celdas analizadas. En ellas se inscribió el rectángulo de mayor área - para determinar el valor de R_L .

El error experimental en las medidas de fotocorriente y fotovoltaje fué del orden de 1 a 9%; mientras que el error teórico fué del orden del 22% (0.05% del multímetro y una incertidumbre en la lectura de 0.001 mv , 0.4% de la resistencia y el 20% del medidor de potencia).

El valor de la resistencia de carga fué de:

C₂: $R_L = 81.4 \Omega$ con un error experimental del orden de 9%.

C₃: $R_L = 106.3 \Omega$ con un error experimental del orden de 8%.

C₄: $R_L = 102.5 \Omega$ con un error experimental del orden de 10%.

Ahora bien, la corriente a corto circuito (I_{sc}) y el voltaje a circuito abierto (V_{oc}) resultaron ser de (ver Fig. 3.17) :

C₂: $V_{oc} = 11.9 \text{ mv}$ $I_{sc} = 0.142 \text{ ma}$

C₃: $V_{oc} = 23.5 \text{ mv}$ $I_{sc} = 0.195 \text{ ma}$

C₄: $V_{oc} = 18.2 \text{ mv}$ $I_{sc} = 0.132 \text{ ma}$

con un error experimental para cada valor del orden de 4%.

Si en la Ec.(2.5) , que es: $I_s = I_{sc} - I_o \left[\exp\left(\frac{eV_s}{AKT}\right) - 1 \right]$, hacemos que $I_s = 0$, entonces V_s será el voltaje a circuito abierto V_{oc} y la Ec.(2.5) adquiere la forma

$$I_{sc} = I_o \left[\exp\left(\frac{eV_{oc}}{AKT}\right) - 1 \right] \quad 3.4$$

A partir de esta expresión se puede calcular el valor que tiene el factor de calidad (A) de la unión. Este valor

esta dado por la expresión siguiente:

$$A = \frac{e V_{oc}}{KT \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right)} \quad 3.5$$

Substituyendo los valores de I_{sc} , V_{oc} y el valor de I_0 que es la corriente inversa de saturación, calculados anteriormente para cada una de las celdas tendremos:

$$C_2: A = 2.44 \quad C_3: A = 3.41 \quad C_4: A = 3.96$$

con un error experimental del orden de 9%. El error teórico considerado es del orden de 22%.

Estos valores, que ya se esperaban debido a que los valores para la altura de la barrera son pequeños, son mayores que el valor ideal que es la unidad. Un valor aceptable para este tipo de celdas sería entre 1 y 2. Que el valor del factor de calidad (A) para cada celda no estuviera dentro del intervalo del valor aceptable, implicó que el valor para la altura de la barrera fuera pequeño y por lo tanto que el contacto $Cu-Cu_2O$ tendiera a ser óhmico.

De lo anterior, ya se puede afirmar que la eficiencia de conversión de las tres celdas analizadas va a ser pequeña.

El factor de llenado (F.F.) está dado por la relación (2.10), siendo ésta:

$$F.F. = \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_{sc} V_{oc}}$$

La corriente y el voltaje para máxima transferencia - de potencia fueron de (ver Fig. 3.17):

$$C_2: \quad V_{mp} = 6.15 \text{ mv} \quad I_{mp} = 0.075 \text{ ma}$$

$$C_3: \quad V_{mp} = 11.8 \text{ mv} \quad I_{mp} = 0.111 \text{ ma}$$

$$C_4: \quad V_{mp} = 8 \text{ mv} \quad I_{mp} = 0.078 \text{ ma}$$

con un error experimental para cada valor del orden de 4%.

Si sustituimos estos valores y, los valores de I_{sc} y V_{oc} en la expresión para F.F. tendremos:

$$C_2: \text{ F.F.} = 0.27 \quad C_3: \text{ F.F.} = 0.28 \quad C_4: \text{ F.F.} = 0.25$$

con un error experimental para cada valor del orden de 8%.

Estos valores son pequeños ya que un valor aceptable sería de 0.85 ⁽²⁾ y, probablemente, se deban a que se tiene un valor muy grande para la resistencia en serie (R_s) y un valor pequeño para la resistencia en paralelo (R_{sh}).

D: Cálculo de las resistencias en Serie (R_s) y en Paralelo (R_{sh})

a) Para el cálculo de la resistencia en serie se toma en cuenta la Ec.(2.2)

$$I_d = I_o \left[\exp\left(\frac{e V_a}{A K T}\right) - 1 \right] ,$$

donde se debe de incluir el término $I_d R_s$ que representa la caída de potencial en R_s cuando ésta se toma en cuenta -

(ver Fig. 3.18). Con éste término la ecuación anterior toma la forma

$$I_d = I_o \left[\exp \frac{e(V_a - I_d R_s)}{AKT} - 1 \right] , \quad 3.6$$

de donde resolviendo para R_s tendremos

$$R_s = \frac{V_a}{I_d} - \frac{AKT}{eI_d} \ln \left(\frac{I_d}{I_o} + 1 \right) , \quad 3.7$$

en donde I_d es la corriente dada por la celda cuando se le aplica un voltaje V_a en la oscuridad y en polarización directa.

Substituyendo el valor de I_o y A de cada celda, y con los valores obtenidos de I_d , se tiene:

$$C_2: R_s = 78 \Omega \quad C_3: R_s = 120 \Omega \quad C_4: R_s = 40 \Omega$$

con un error experimental del orden de 11%. El error teórico es del orden de 22% (el mismo que se tenía).

El valor para R_s , de cada celda, es muy grande comparado con el valor ideal que es $R_s < 1 \Omega^{(2,5)}$. Esto trajo como consecuencia que la curva I_s vs V_s tendiera a ser una recta (ver Fig. 3.17) y que los valores de I_{sc} e I_{mp} fueran pequeños. Estos valores grandes de R_s se deben probablemente a los potenciales de contacto que se generaron entre grano y grano en la dirección transversal (ver Fig 3.B). en el sustrato de Cu_2O y, también a que los contactos eléc

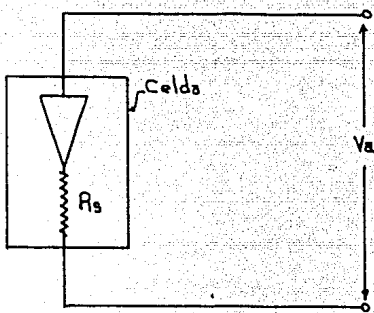


Fig. 3.18- Representación de una celda de Barrera - Schottky tomando en cuenta la resistencia en serie (R_s). Cuando se aplica un voltaje V_a en polarización directa, circula una corriente I_d y, por lo tanto, hay una caída de potencial $I_d R_s$ en la resistencia.

tricos se oxidaron.

b) Para el cálculo de R_{sh} se toma en cuenta la Ec. (2.13), siendo ésta

$$I_s = \frac{I}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \left(I_{sc} - I_d - \frac{V_s}{R_{sh}} \right),$$

de donde resolviendo para R_{sh} tenemos

$$R_{sh} = - \frac{I_s R_s + V_s}{I_s + I_d - I_{sc}} \quad 3.8$$

En esta expresión I_s y V_s son la corriente y el voltaje de salida de la celda en iluminación, I_{sc} es la corriente a corto circuito, R_s es la resistencia en serie e I_d es la corriente en la obscuridad dada por la expresión

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{e V_s}{A K T}\right) - 1 \right]$$

La resistencia en paralelo (R_{sh}) se calcula en el punto para el cual la celda entrega la corriente y el voltaje para máxima transferencia de potencia; es decir, $I_s = I_{mp}$ y $V_s = V_{mp}$. Substituyendo los valores de I_{mp} , I_d , I_{sc} , R_s y V_{mp} en la Ec.(3.8) tenemos

$$C_2: R_{sh} = 87 \Omega$$

$$C_3: R_{sh} = 143 \Omega$$

$$C_4: R_{sh} = 101 \Omega$$

con un error experimental del orden de 12%. El error teórico es del orden de 22%.

Estos valores son muy pequeños comparados con el va-

(2,5)

lor ideal que es infinito . Además, nos trajo como consecuencia que la curva I vs V en iluminación tendiera a ser una recta y que los valores de V_{oc} y V_{mp} fueran pequeños. Estos valores tan pequeños se deben probablemente a que existen muchas dislocaciones, defectos cristalinos e impurezas en el Cu_2O .

Los valores muy grandes para R_s y muy pequeños para R_{sh} implicaron que el factor de llenado (F.F.) fuera muy pequeño. Por lo tanto, ya se puede inferir que la eficiencia de conversión será pequeña.

E: Cálculo de la Eficiencia de Conversión

Para conocer la eficiencia de conversión de las tres celdas se hizo lo siguiente: empleando el circuito de la Fig. 3.16, se fijó en la década de resistencias el valor de la resistencia de carga (R_L) para cada celda y se expuso al Sol. Simultáneamente, la potencia de la luz solar se midió con un piranómetro global (marca Kipp-Zonen, Mod. CM5, error del aparato 2%). Los valores de corriente y voltaje para máxima transferencia de potencia fueron así obtenidos y la eficiencia de conversión se calculó mediante la expresión

$$\eta = \frac{I_{mp} V_{mp}}{P_{se}} \times 10^2 \quad . \quad 3.9$$

En la Tabla 3.1 se localizan estos valores de la eficiencia para cada una de las celdas analizadas.

TABLA 3.1 : Eficiencia de conversión

Celda	$A_e(\text{cm}^2)$	$P_s(\text{w}/\text{m}^2)$	$R_L(\Omega)$	$V_{mp}(\text{mv})$	$I_{mp}(\text{ma})$	$P_{se}(\text{w})$	$\eta\%$
2	4	883	81	60.2	0.75	0.35	0.013
3	4.6	901	106	27.6	0.26	0.42	0.002
4	4.7	850	102	23.2	0.23	0.4	0.001

En esta tabla, A_e es el área efectiva de la celda; P_s es la potencia del Sol; R_L la resistencia de carga; I_{mp} y V_{mp} es la corriente y el voltaje para máxima transferencia de potencia dados por la celda cuando se expuso a la luz solar; y $P_{se} = P_s \times A_e$, es la potencia del Sol efectiva que incide sobre la celda.

Los errores involucrados son: para A_e , experimental del orden de 4%, teórico del orden de 6%; para P_s , experimental del orden de 1%, teórico del orden de 2%; para P_{se} , experimental del orden de 3%, teórico del orden de 12%; para la eficiencia, experimental del orden de 10%, teórico del orden de 13%.

Los valores encontrados para la eficiencia de conversión son muy pequeños comparados con el valor que se esperaba obtener (del orden de 0.5%) en base a estudios pre-

liminares que se habían hecho. Esta gran diferencia se debe probablemente a lo siguiente: como no se cuenta con un simulador solar, se tuvo que esperar tres semanas después de haber elaborado las celdas para hacer las mediciones con luz solar debido al mal tiempo. En ese lapso de tiempo, la película de Cu, la rejilla de Cu y los contactos eléctricos se oxidaron, trayendo como consecuencia que la resistencia en serie (R_s) aumentara. Debido a esto, se puede concluir que probablemente la resina con la que se recubrieron las celdas no evitó la oxidación; o bien, que la oxidación se debió a la gran cantidad de burbujas de aire que se formaron en la resina al momento del encapsulamiento (ver la fotografía que se muestra en la Fig. 3.19).

3.3- Conclusiones

En base a los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

a) El hecho de que el valor para el factor de calidad (A) sea grande, implicó que el valor para la altura de la barrera ($e\phi_b$) sea pequeño. Esto nos trajo como consecuencia que se tuviera un valor grande para la corriente inversa de saturación (I_o); lo cual hizo, que el contacto Cu-Cu₂O

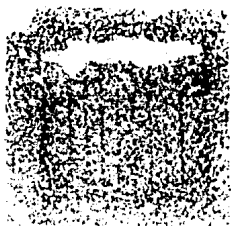


Fig. 3.19- Fotografía de una celda encapsulada.

Obsérvese la gran cantidad de burbujas de aire que se formaron en la resina al momento del encapsulamiento.

tendiera a ser óhmico.

b) A partir del valor obtenido para el factor de calidad, podemos inferir de que el contacto $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ no es uniforme. Esto se debe probablemente a que la superficie del Cu_2O que se elaboró no es uniforme; y además, de que existen sobre ella impurezas.

c) Los valores encontrados para I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} y V_{mp} fueron pequeños debido a la influencia que tienen las resistencias en serie (R_s) y en paralelo (R_{sh}). Los valores grandes para R_s se deben probablemente a los potenciales de contacto que se generaron en el semiconductor y a la calidad de los contactos eléctricos. Los valores muy pequeños obtenidos para R_{sh} se debieron probablemente a que en el semiconductor se tienen muchas impurezas, dislocaciones o defectos cristalinos; o bien, a que el contacto $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ no es uniforme.

d) Todo lo anterior contribuyó a que el valor obtenido para la eficiencia de conversión (η) fuera pequeño. Pero además, hubo otro factor que hizo que el valor para fuera muy pequeño: la oxidación que se produjo - en un lapso de tiempo de tres semanas desde la elaboración - en la película de Cu , en la rejilla de Cu y en los contactos eléctricos. Esto fué debido probablemente al tipo de resina que

se utilizó para el encapsulamiento, o bien, a las burbujas de aire que se formaron en la resina. Este factor contribuyó a que la resistencia en serie aumentara, trayendo como consecuencia, que la eficiencia de conversión disminuyera.

e) Para obtener celdas solares de éste tipo con mayor eficiencia se deberán de resolver ciertos problemas a saber: elaboración de un sustrato de Cu_2O libre de impurezas y que este compuesto de un solo cristal en la dirección transversal; que el contacto que se produzca entre el Cu y el Cu_2O sea lo mejor posible (valor de A tendiendo a la unidad); que los contactos eléctricos sean de buena calidad y, que la resina con la que se vayan a encapsular de óptimos resultados (que evite la oxidación).

Por otra parte, se debe recalcar que la celda con mayor eficiencia (C_2) es la que tiene menor valor para el factor de calidad ($A = 2.44$), menor valor para la resistencia de carga ($R_L = 81 \Omega$) y mayor valor para la altura de la barrera ($e\phi_b = 0.1689 \text{ eV}$). Esto concuerda perfectamente con la teoría.

CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo principal de éste trabajo fué el de obtener celdas solares de Cu-Cu₂O de Barrera Schottky, en la configuración de pared anterior, usando para su elaboración materiales baratos y empleando una técnica relativamente sencilla en base al equipo que se tiene. El cobre ciertamente es más barato que los materiales usados actualmente en la elaboración de celdas. Así mismo, presenta la característica que no todos los metales tienen que al oxidarlo a altas temperaturas se obtiene el semiconductor Cu₂O, que forma un contacto rectificador con el Cu. El proceso de elaboración de las celdas consistió en dos partes esenciales: obtención del sustrato de Cu₂O por oxidación del Cu a altas temperaturas y depósito por evaporación al vacío, de la película de Cu para formar la unión de Cu-Cu₂O. Este proceso de elaboración se puede reproducir en cualquier laboratorio con el siguiente equipo: un horno (o mufla) y una evaporadora.

La eficiencia de conversión de las celdas elaboradas con ésta técnica resultó ser del orden de 0.01% (para C₂). Este valor tan pequeño se debió a que se tiene un contac-

to $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ tendiendo a ser óhmico debido a la mala calidad de la unión, un valor muy grande para R_s y un valor muy pequeño para R_{sh} . Por otra parte, al calcular la eficiencia de las celdas, se supuso que la resina no refleja la luz; es decir, que la potencia del Sol efectiva (P_{se}) no sufre ningún cambio al atravesar la resina. Si esto no sucede, entonces es muy probable que se tenga en estas celdas analizadas una eficiencia mayor.

Entonces, para elaborar celdas de éste tipo con mayor eficiencia se tendrán que resolver ciertos problemas importantes:

a) Mejorar el factor de calidad de la unión.- Si este factor se mejora traería como consecuencia que la altura de la barrera del contacto $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ sea mayor, por lo cual, la corriente inversa de saturación tendrá que tener un valor más pequeño que el obtenido. Para mejorar éste factor se requiere que la superficie del sustrato de Cu_2O este perfectamente limpia de impurezas y perfectamente uniforme; con esto, se lograría eliminar uno de los factores que hacen que la resistencia en paralelo disminuya. Posteriormente se hará una investigación para buscar un método mediante el cual se logre uniformizar la superficie del Cu_2O y eliminar las impurezas que en él existen.

b) Disminuir el valor de la resistencia en serie.- Para lograr esto, se tiene que producir un substrato de Cu_2O que este compuesto de un solo grano en la dirección transversal y, además, mejorar los contactos eléctricos. Para esto, se hará una investigación posterior para optimizar la temperatura y tiempo de oxidación para lograr lo anterior e investigar la geometría y dimensiones de los contactos eléctricos.

c) Evitar que la película de Cu y los contactos eléctricos se oxiden, haciendo que el valor de R_s disminuya y por lo tanto, que el valor de la eficiencia aumente. Para esto, se tiene que hacer una investigación a fondo para encontrar el tipo de material adecuado para encapsular a las celdas.

d) Se debe de optimizar el grueso de la película de cobre que se deposita sobre el Cu_2O , con el fin de obtener un mayor rendimiento de la celda. Para esto, se hará una investigación futura, con equipo apropiado, para verificar el grueso óptimo (entre 100 y 200 Å) que los especialistas (2,4,7) en este ramo recomiendan.

Si se resuelven estos problemas, es posible obtener celdas con una eficiencia de conversión mayor del 1% y, entonces, se puede pensar en un análisis de costos para po-

der compararlas con las celdas ya existentes.

Por último, creo que este trabajo presenta varias líneas de investigación futuras, tanto teóricas como experimentales, con el fin de que en un tiempo razonable se puedan hacer celdas solares de $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ competitivas con las ya existentes; para la producción de energía eléctrica.

BIBLIOGRAFIA

- (1) V.P.Smirnov , "Band Structure of a Cuprous Oxide Crystal". Soviet Physics Solide State , 8 , 2020 (1967)
- (2) L.C.Olsen and R.C.Bohara , "Experimental and Theoretical studies of Cu_2O Schottky Barrier Solar Cells" . IEEE Photovoltaic Specialists Conference,381 (1975).
- (3) F.Zapien N. , "Celdas Fotovoltaicas de Barrera Schottky" Tesis Profesional (Licenciatura) UNAM (1978).
- (4) J.A.Assimos and D.Trivich , "Photovoltaic properties and Barrier Heights of single-crystal and Polycrystalline Cu_2O -Cu Contacts". J.A.P. Vol. 44 No 4 1637-1693 , Abril 1973:
- (5) H.Hovell , " Solar Cell". Academic Press, New York 112-124, (1975).
- (6) R.J.Stirn and Y.Schuam M. , "Improved Schottky Barrier Solar Cells". IEEE Photovoltaic Specialists Conference 391 (1975).
- (7) Stephen J.F. , "Metal-Thin Film Insulator-Semiconductor Solar Cells". IEEE Photovoltaic Specialists Conference , 376 (1975).
- (8) K.V.Shalimova , "Física de Semiconductores " . Editorial Mir (1975) .

- (9) H.B.Michaelson, "The work function of the elements and its periodicity". J.A.P., Vol. 48, No- 11 4729-4733, Noviembre (1977).
- (10) Wacker-Silicone, "Silicones for the Electronics Industry". Folleto Wacker-Chemie GMBH (1978) .
- (11) J.P. Mc Kelvey , "Solid State and Semiconductor Physics". Harper and R. P. International (1966).
- (12) L.O.Gronthal, "The Copper-Oxide Rectifier and Photoelectric Cell". Review of Modern Physics , 5 , 141-168, Abril (1933).
- (13) M.O.Keefe and W.J.Moore, "Defects in Cuprous Oxide".
- (14) R.S.Toth, R.Kilkson and D.Trivich , "Preparation of Large Area Single-Crystal Cuprous Oxide". J.A.P. , Vol 31 No-6 , 1117-1121, Junio (1960).
- (15) J.J.Loferski , "Principles of Photovoltaic Solar Energy Conversion" . IEEE Photovoltaic Specialists Conference , 1-4 (1973).
- (16) N.A.Lange, "Hand Book of Chemistry " . Mc.Wraw-Will Book Co. , 1967.