

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS



**ELABORACION Y CARACTERIZACIÓN DE
CELDAS SOLARES DE UNION PN EN BASE A
PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS DE SILICIO
AMORFO a-Si:H Y SULFURO DE CADMIO**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

LICENCIADO EN FÍSICA

PRESENTADO POR:

ERIK RODOLFO MALDONADO MENACHO

LIMA – PERÚ
2005

DOY GRACIAS A DIOS, QUIEN HIZO TODAS LAS COSAS,
A MIS PADRES POR SU AYUDA INCONDICIONAL,
Y AL ASESOR DE ESTE TRABAJO, EL PROFESOR ANIBAL VALERA,
POR SU PACIENCIA Y AYUDA

RESUMEN

En el presente trabajo se elaboró y evaluó los espectros de fotocorriente de varias muestras de uniones pn sobre la base de películas semiconductoras de silicio amorfo a-Si: H y sulfuro de cadmio, se consideró varios materiales en la unión como contactos metálicos de la unión pn, además de un contacto de óxido de estaño con la capa de sulfuro de cadmio para mediciones de geometría longitudinal, que será explicado en la parte experimental del presente trabajo.

De los espectros de fotocorriente se determinó la eficiencia cuántica del proceso para cada muestra y con ella las energías de activación de dicho espectro vía el algoritmo correspondiente para los datos de eficiencia cuántica productos del método de fotocorriente espectral; y por procedimientos de comparación con los diferentes casos del presente trabajo y la información de la literatura disponible tanto para el silicio amorfo hidrogenado a-Si:H y el sulfuro de cadmio que fueron obtenidos en diversos laboratorios por otros métodos más sofisticados de tratamiento experimental riguroso; se determinó un diagrama de energías para cada muestra tratada, explicando el origen de las transiciones involucradas. Luego, con todas las muestras analizadas se procedió a la consolidación de los resultados.

CONTENIDO

Página

1. INTRODUCCION	1
2. FUNDAMENTO TEORICO	
2.1 Estructura del silicio amorfo hidrogenado... ..	2
2.2 Densidad de estados electrónicas en a-Si: H.....	5
2.2.1 El Modelo Standard.....	8
2.2.2 The Defect Pool Model	9
2.2.3 Resultados obtenidos de niveles en la discontinuidad de las bandas según varias referencias.....	11
2.2.3.1 Resumen	15
2.3 Estructura del Sulfuro de Cadmio.....	16
2.4 Estados en la discontinuidad de las bandas en sulfuro de cadmio.....	18
2.4.1 Resumen.....	19
3. PARTE EXPERIMENTAL	
3.1 Elaboración de las uniones de óxido de estaño, sulfuro de cadmio y silicio amorfo hidrogenado.	21
3.1.1 Elaboración de películas delgadas de óxido de estaño por la técnica de spray pirólisis.	21
3.1.2 Elaboración de la película de sulfuro de cadmio por la técnica de evaporación en vacío.	22
3.1.3 Elaboración de la película de silicio amorfo hidrogenado por la técnica de descarga plasmática.	24
3.2 Obtención de los espectros de fotocorriente: Método de espectroscopia de fotocorriente.	26
3.2.1 Configuración de muestras y terminología usada.	27

3.3 La eficiencia cuántica.	28
4. ANALISIS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	
4.1 Procedimiento de cálculo de las energías de activación de las muestras.....	29
4.2 Acerca de los errores involucrados.....	30
4.3 Determinación de los diagramas de energía para las muestras analizadas.....	31
<i>Espectro 31N1</i>	33
<i>Espectro 11D1</i>	39
<i>Espectro 30O1</i>	45
<i>Espectro 16N2</i>	51
<i>Espectro 7N1</i>	57
<i>Espectro 7N2</i>	64
<i>Espectro 20O2</i>	69
<i>Espectro 20O3</i>	75
<i>Espectro 19O1</i>	80
<i>Espectro 20O1</i>	86
<i>Espectro 22D3</i>	92
<i>Espectro 26D1</i>	96
4.3.1 Resumen general	101
5. CONCLUSIONES	109
6. REFERENCIAS	112
7. APENDICE I: UNIONES METAL – SEMICONDUCTOR	
8. APENDICE II: RECOMBINACIÓN DE PORTADORES DE CARGA CREADAS POR ILUMINACIÓN	VI

1 INTRODUCCION

En las últimas décadas se ha tenido un incremento en los estudios de películas delgadas relacionado en su aplicación con la construcción de celdas solares, tratando con ello de reducir costos de producción de las mismas investigando otras técnicas. La idea era mantener una eficiencia óptima y una reducción de los costos. Se fabricaron celdas solares de silicio cristalino con una eficiencia de hasta 25% en el laboratorio [23], luego se implementaron celdas de silicio policristalino o granular con una degradación en la eficiencia (15%) [33] y menor costo de producción, luego se comenzó a trabajar con celdas de películas semiconductoras que llegaban a un 10% de eficiencia y menor costo de producción [23], esto estimuló un mayor estudio de las películas semiconductoras, caracterizándolas y evaluando su eficiencia en combinación con otras.

1.1 OBJETIVOS

El presente estudio no sólo tiene por objetivo caracterizar energéticamente las películas semiconductoras, determinando los modelos de bandas de energía involucrados para el “bloqueo” de la celda solar, sino también, verificar la utilidad del método de espectroscopia de fotocorriente para determinar energías de activación de las películas semiconductoras, frente al uso de otros métodos más complejos que determinan lo mismo. De este modo, en este método, también puede tenerse información importante de la transición predominante en una determinada muestra.

2 FUNDAMENTO TEORICO

2.1 ESTRUCTURA DEL SILICIO AMORFO HIDROGENADO

El silicio amorfo hidrogenado es un material de estructura no periódica y desordenada en el rango de orden largo, por lo cual no se manifiestan en estos las cualidades del silicio cristalino ordenado cuya variación periódica de su potencial interno permite explicar sus estados energéticos por las soluciones de Bloch en la ecuación de Schrödinger:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\Phi + V(r)\Phi = E\Phi \quad (2.1)$$

donde $\Phi(\mathbf{r}) = \exp(i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r})U_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ donde $U_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ es la periodicidad de la red, esta función se extiende sobre toda la red y se distingue por un momentum \mathbf{k} definido y único.

En forma ilustrativa el desorden puede representarse por una función de distribución de pares atómicos, interpretándose ésta como la probabilidad de encontrar un átomo a una distancia R de otro, si se bosqueja esta función se tendría como en la figura 2.1; la función de distribución de pares normalizado versus R/R_{av} la separación de pares atómicos dividido por R_{av} , la distancia promedio de un par de átomos.

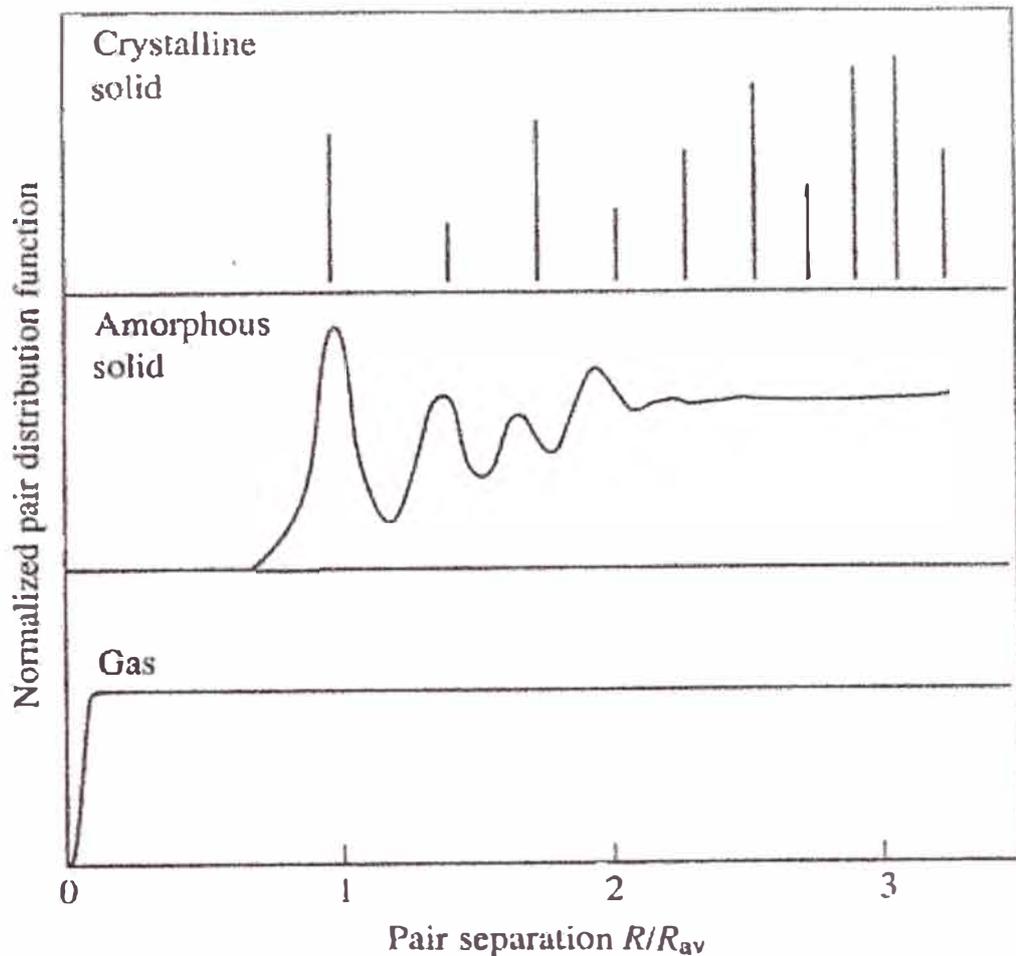


Fig. 2.1: Bosquejo de una función de distribución de pares atómicos en un material cristalino, amorfo y en un gas versus R/R_{av} , tomado de la referencia[24].

Como se observa, en la estructura cristalina las posiciones específicas de los átomos producen probabilidades en ciertas posiciones y no es posible en otras posiciones. Para el caso amorfo fuera de estas posiciones sí hay probabilidad de encontrar átomos, por lo que se obtienen las “campanas” que se observan. Para el estado gaseoso todas las posiciones son posibles con la misma probabilidad, excepto las distancias de influencia electrostática. Se debe destacar de este esquema la correspondencia de picos en el orden de rango corto de la estructura amorfa con la estructura ordenada del cristal.

Un semiconductor de estructura amorfa tiene tres características principales:

- El orden de rango corto de la red ideal,
- El desorden de rango largo y

- Los defectos de coordinación.

En el rango de orden corto, la estructura es similar a la cristalina, salvo por la perturbación de los defectos superficiales de las fronteras de grano o “grain boundaries”. En el rango largo es obvia la ausencia de periodicidad.

La coordinación es una calificación de los defectos. Un cristal tiene defectos intersticiales, vacancias y dislocaciones, pero esto no puede aplicarse a una estructura amorfa, por lo que el concepto de defecto se redefine, cualquier átomo fuera de lugar es un defecto en una estructura cristalina, la cual puede ser un intersticio o una vacancia. La única característica estructural de una red aleatoria es el enlace de un átomo a sus vecinos, a lo cual se le llama defecto de coordinación, en la cual un átomo tiene diferentes estados de enlace del ideal. A los “enlaces sueltos” o “no terminados” también se les llama “dangling bonds” (“enlaces sueltos”)

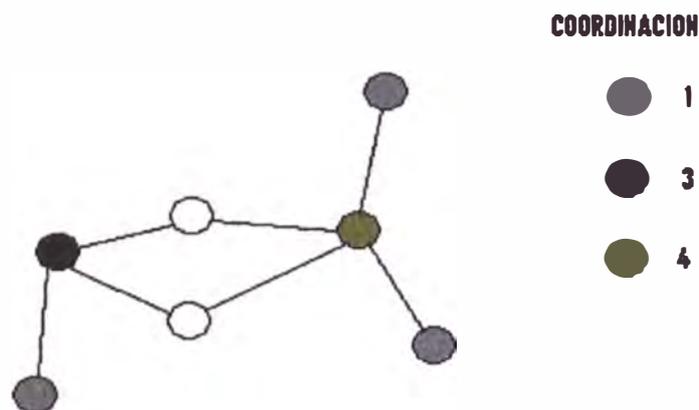


Fig. 2.2: Ejemplo de una red amorfa indicando la coordinación de enlace de cada átomo.

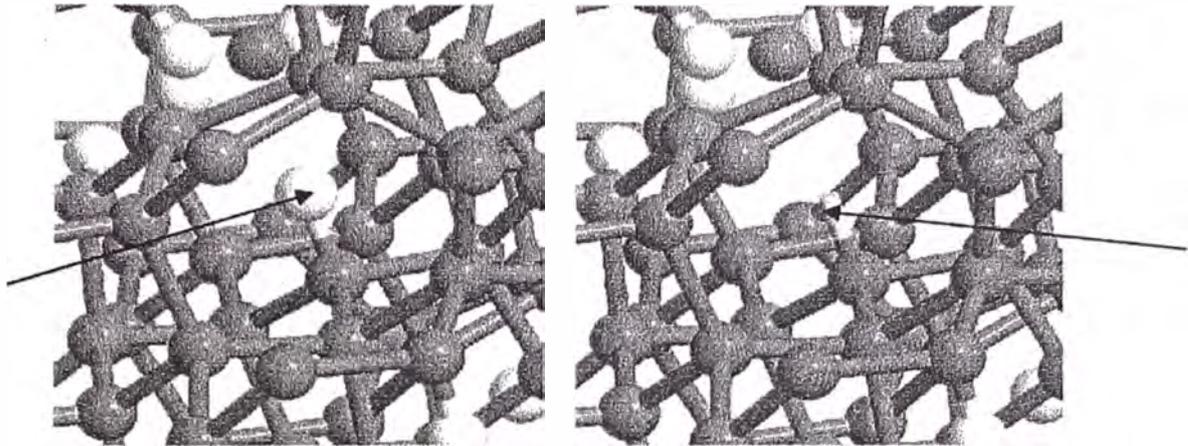


Fig. 2.3: Representación estructural del silicio amorfo hidrogenado alrededor de un enlace suelto o "dangling bond". Las flechas indican la presencia de un átomo de hidrógeno sofocando un enlace suelto y en el lado derecho la ausencia del átomo de hidrógeno y aparición de un enlace suelto [8]

La flecha señala el lugar del hidrógeno cuando se enlaza al Si y cuando el silicio no está completado en su enlace es un "dangling bond".

2.2 DENSIDAD DE ESTADOS ELECTRONICOS EN A-Si:H

En una estructura cristalina la periodicidad de la red determina una estructura de bandas y una energía de discontinuidad de la banda (banda de energías prohibidas para un electrón en el cristal) definido e indirecto.

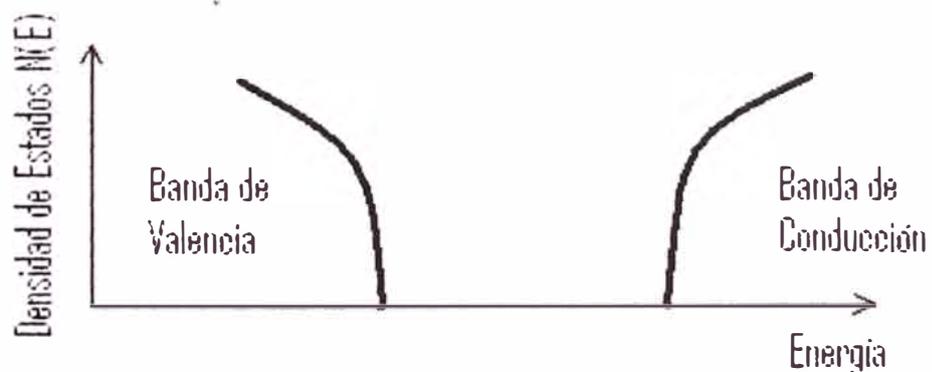


Fig.2.4: Diagrama de bandas para una estructura de semiconductor cristalino.

El hecho es que la estructura amorfa también presenta una estructura de bandas con una energía de discontinuidad, en donde la situación amorfa del material determina una perturbación a la estructura cristalina. Esta estructura es fuertemente influenciada por el rango de orden corto, que es la misma en la situación amorfa y cristalina. Pero la banda prohibida deja de ser indirecta y el costo en energía llega a ser menor que en el caso indirecto.

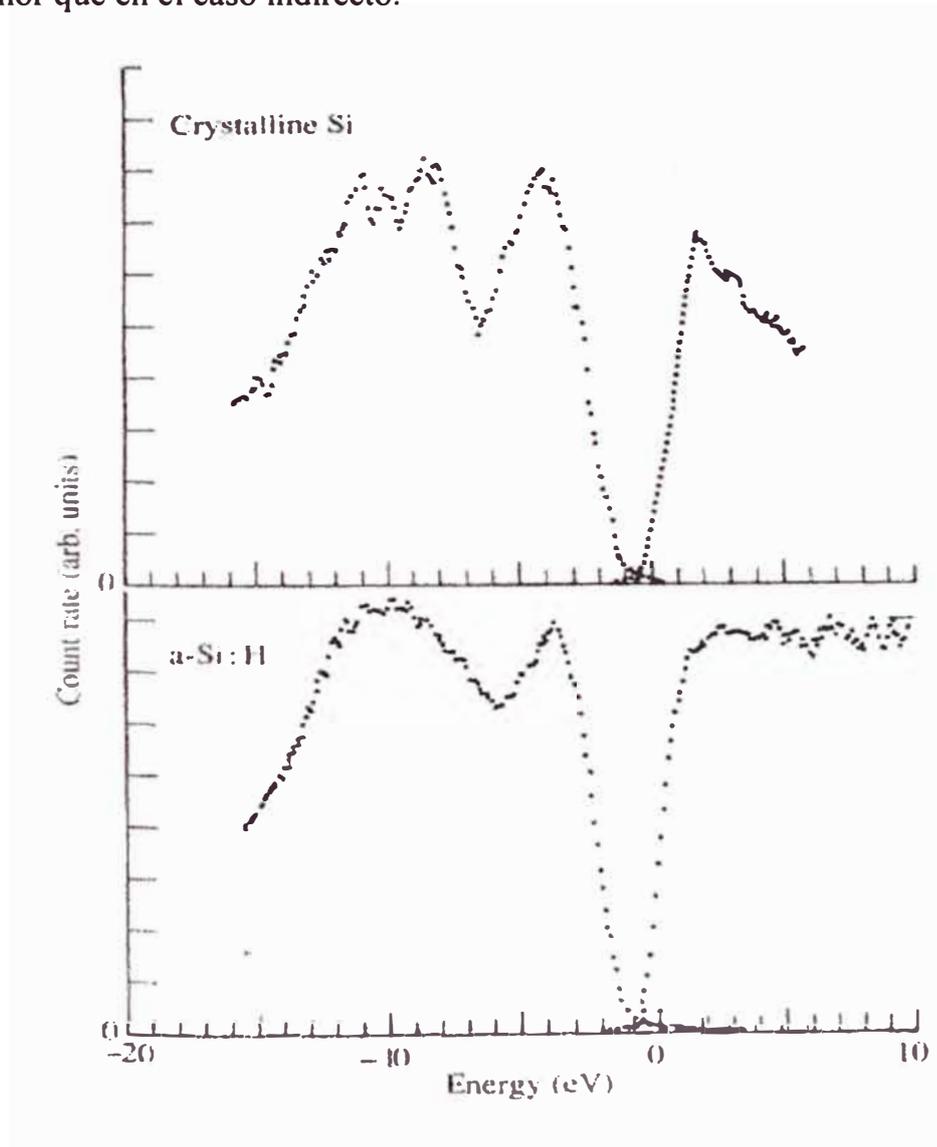


Fig. 2.5: Esta es una representación de las bandas de conducción y de valencia reales productos de una experiencia con técnicas de fotoemisión de rayos X en silicio cristalino y en a-Si:H (Jackson et.al. 1985[24])

Esta imagen nos muestra la similitud de los resultados en ambas fases y que la energía involucrada en el desorden es pequeña, de los tres picos que aparecen en la banda de valencia del silicio cristalino, dos de ellos se mezclan en una sola apareciendo como un único pico ampliado en a-Si:H.

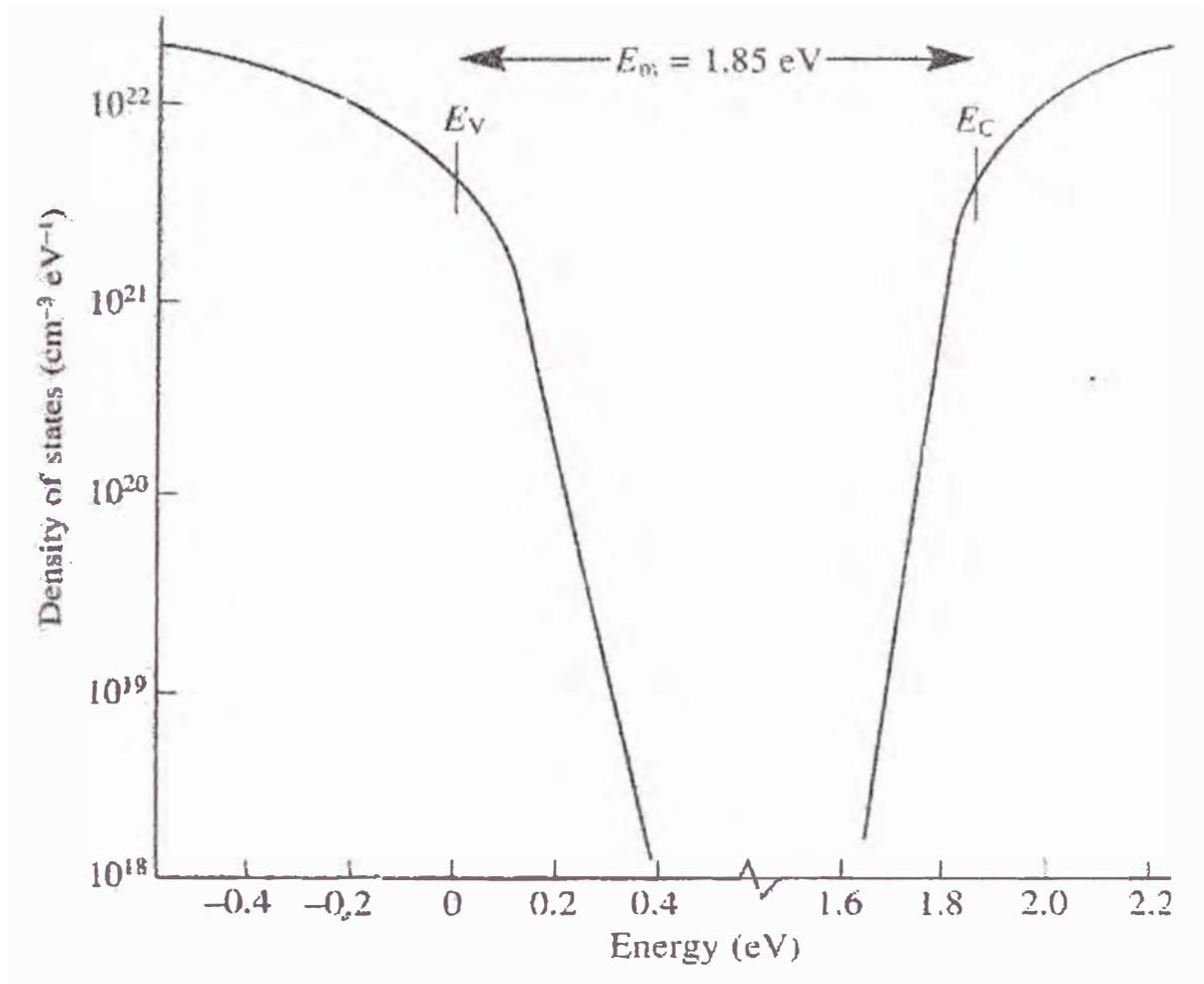


Fig. 2.6: E_c y E_v son los límites deducidos experimentalmente como bordes exponenciales de las colas de banda[24]

La distribución de la densidad de estados en la fig. 2.6 fue deducida para a-Si:H de baja densidad de defectos, teniéndose colas de banda que son aproximadamente exponenciales, cuya razón no es conocida.

2.2.1 EL MODELO STANDARD

De acuerdo al modelo más ampliamente aceptado para la estructura de defectos en a-Si:H, la densidad de estados en la discontinuidad de las bandas, está dominado por una única banda de estados defecto producidos por los “dangling bonds” o enlaces sueltos de la estructura del silicio. Este es conocido como el Modelo Standard para los estados en la discontinuidad en a-Si:H, un bosquejo del cual tenemos aquí:

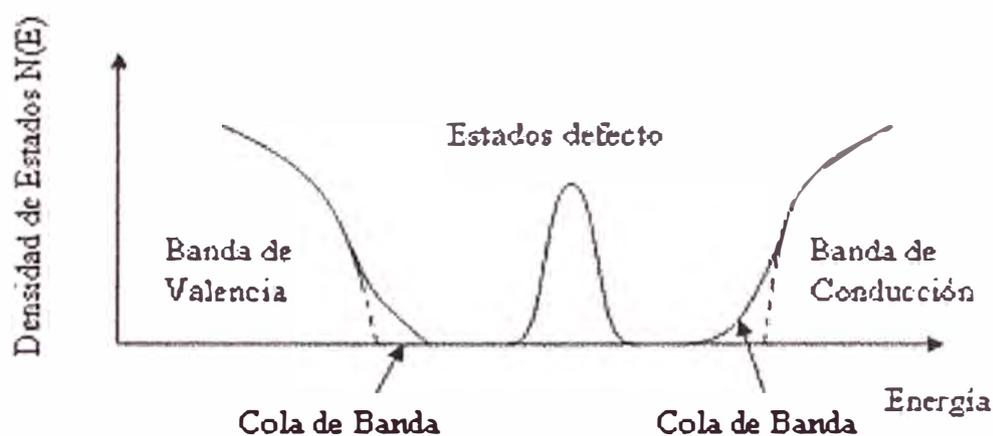


Fig. 2.7: Bosquejo según el Modelo Standard y el predominio de los estados defecto proporcionados por los enlaces sueltos de la estructura amorfa.

Para describir este modelo diremos que la diferencia más significativa entre un cristal y su fase amorfa se encuentra en los bordes de la banda donde el desorden crea una cola de estados localizados (colas de banda) que se extiende dentro de la discontinuidad de la banda del material.

2.2.2 EL MODELO “DEFECT POOL” ⁽¹³⁾

Como ya se ha dicho, el a-Si:H es un material conformado por una red aleatoria amorfa, de enlaces covalentes Si-Si y de enlaces Si-H. A pesar de su fase amorfa, el material presenta una discontinuidad o “gap” óptico y fotoconductividad, gracias a un dopaje que va desde 4% hasta 40% de hidrógeno que “sofoca” los enlaces sueltos de la estructura amorfa pura, sin el hidrógeno los defectos y enlaces sueltos de la estructura hacen al material de poco interés, pues la presencia de estos reduce la fotosensitividad y disminuye el desempeño del a-Si:H. Para dar un ejemplo de la importancia de la presencia del hidrógeno en el silicio amorfo puro veamos los siguientes datos:

En a-Si puro producido por sputtering la densidad de defectos típico es de $10^{19} - 10^{20}$ por cm^3 . En material de a-Si:H intrínseco o llamado “device quality”, se tiene $10^{15} - 10^{16}$ por cm^3 . Como se observa hay una reducción de hasta cuatro órdenes de magnitud de la presencia de defectos, siendo responsable de esto el hidrógeno [23].

A pesar de esta reducción de defectos, los que quedan pueden estar cargados positivamente por ausencia de un electrón; pueden ser neutrales, en el diagrama de bandas esto corresponde a una transición de D^+ a D^0 ($D^+ + 1e \rightarrow D^0$); también pueden ser doblemente ocupados, el nivel de energía de tal estado corresponde a una

transición D^0 a D^- ($D^0+1e \rightarrow D^-$). Estos defectos afectan el transporte electrónico mediante el papel de centros de recombinación que toma lugar por su posición en la mitad de la banda prohibida.

De *Mensing et al Journal of NonCrystalline Solids 299-302 (2002) 621-625* [13], podemos ver el modelo “Defect Pool” que considera un “pozo” de defectos en la cual se distinguen tres regiones de carga para los enlaces sueltos y se compara con los propuestos para el modelo Standard.

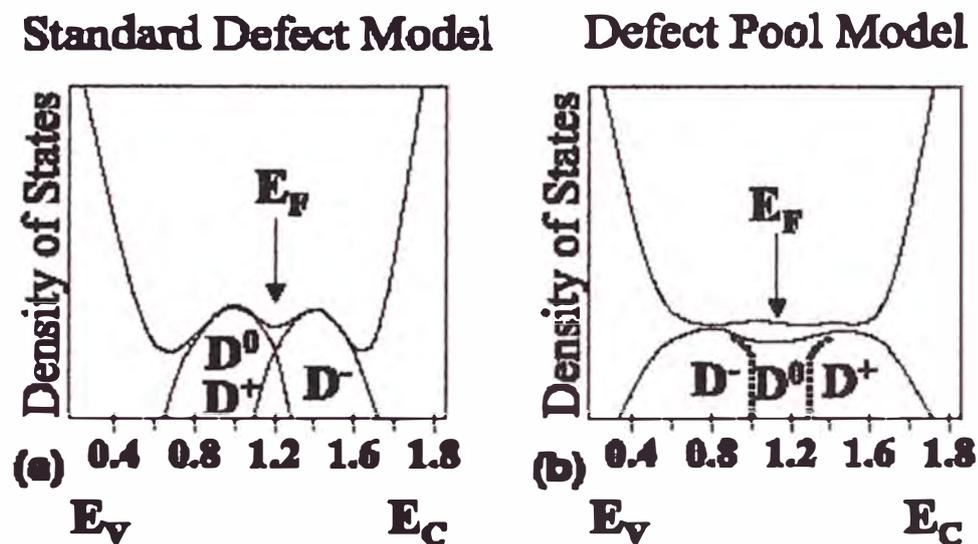


Fig. 2.8: Comparación de las interpretaciones de los “enlaces sueltos” en el Modelo Standard y el modelo “Defect Pool” [13]

La energía de transición $D^0+1e \rightarrow D^-$ requiere más energía que la transición $D^++1e \rightarrow D^0$ como es mencionado en *G.Mensing* [13]. La densidad de defectos neutrales D^0 es $< 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y aunque pueden existir otros defectos tales como impurezas residuales, los defectos “dangling bonds” es todo lo que es necesario para explicar la vasta mayoría de los datos experimentales.

En el modelo “Defect Pool” se observa tres regiones definidas para los defectos debido a enlaces sueltos con carga negativa, neutral y positiva, lo que en el modelo standard no se resuelve bien y preponderan los neutrales.

2.2.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE NIVELES EN LA DISCONTINUIDAD DE LAS BANDAS SEGÚN VARIAS REFERENCIAS.

- El resultado siguiente ha sido obtenido de *Fefer y Shapira “Direct Determination of the band-gap states in a-Si:H using surface photovoltage spectroscopy” (1995) [5]*

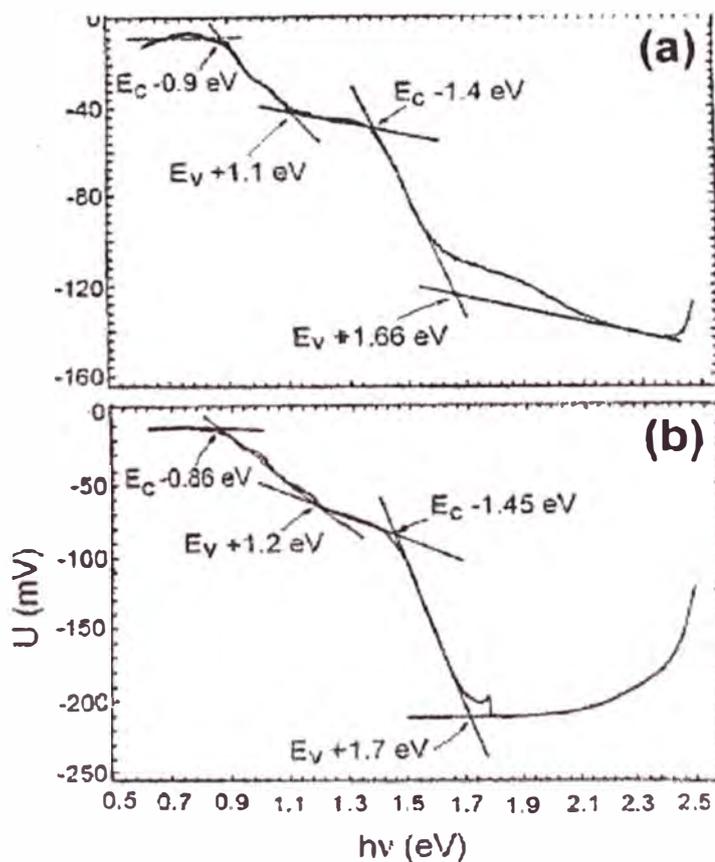


Fig. 2.9: Resultados obtenidos por espectroscopía de fotovoltaje superficial tomado de la ref. [5]

La parte (a) fue obtenido para material a-Si:H “device quality” o “intrínseco” sin dilución de H₂. El gráfico (b) fue obtenido con dilución de H₂, esto no produce cambios significativos en el espectro observado, indicando la naturaleza nativa o intrínseca de los estados-defecto electrónicos detectados.

□ En *G. Mensing et al. Journal of Non-Crystalline Solids 299-302 (2002) 621-625[13]*, « *Defect transition energies and the density of electronic states in a-Si:H* », podemos encontrar que hay dos procesos principales fotoluminiscentes en a-Si:H:

- ◆ El primer proceso que es dominante en a-Si:H intrínseco, genera un amplio espectro fotoluminiscente que hace picos entre 1.2 y 1.4eV. A este proceso le llama proceso fotoluminiscente en la cola de banda.
- ◆ El segundo proceso fotoluminiscente en a-Si:H es atribuida a recombinación radiativa entre defectos. Este proceso muestra un pico de baja energía con centro en 0.8eV en material no dopado y dopado tipo n, en material dopado tipo p en cambio es 0.9eV.

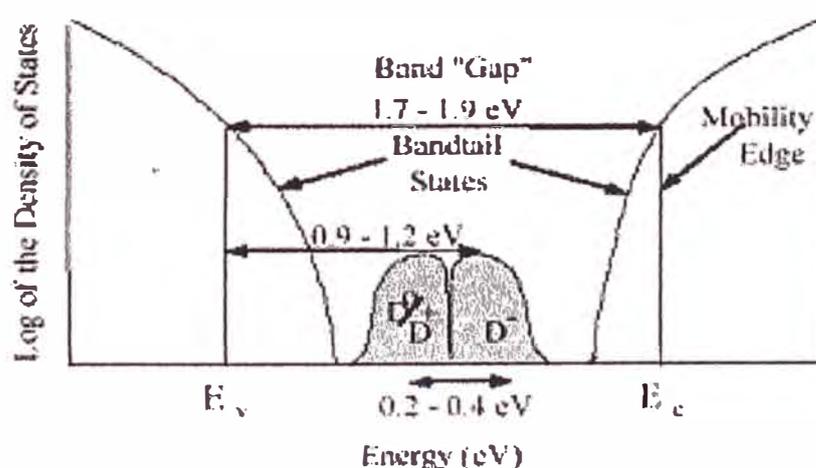


Fig. 2.10: Diagrama de bandas para el a-Si:H con resultados extraídos de G. Mensing [13] donde el “Band Gap” es la discontinuidad de las bandas.

Este gráfico resume el diagrama de energía para el a-Si: H con estados localizados que van entre ~ 0.9 a 1.2eV . Los estados producidos por los enlaces sueltos, ocupan una zona en la discontinuidad de las bandas que van de 0.2 a 0.4eV .

- En *Street et al. 1984*, vemos esto también con gráficos de intensidad de luminiscencia versus energía del fotón.

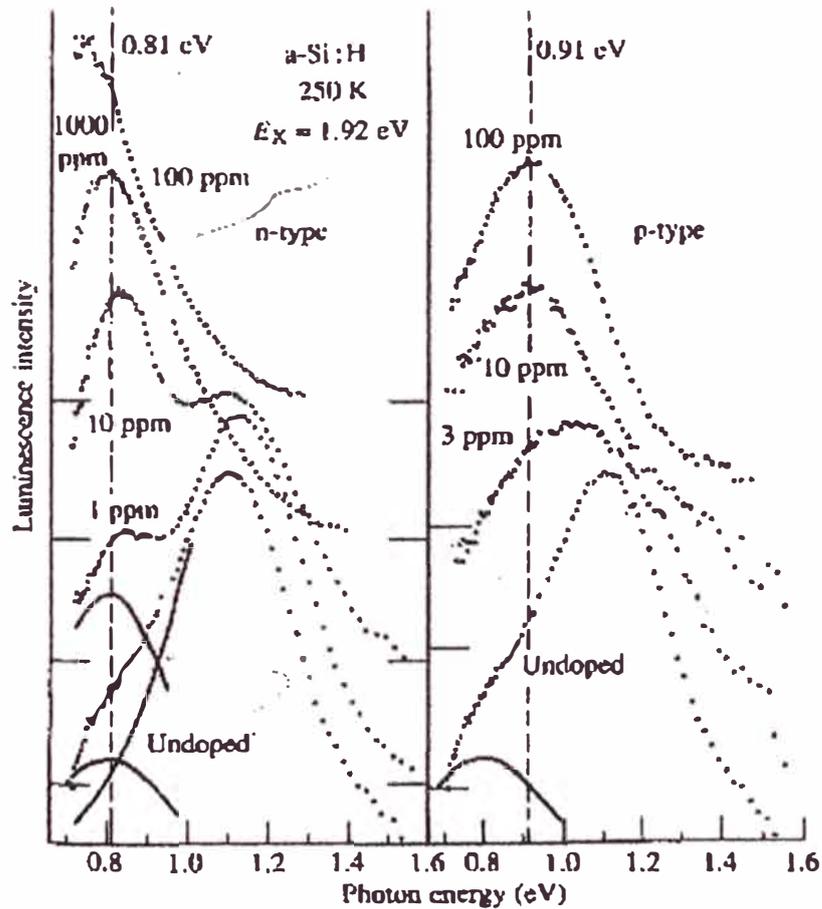


Fig. 2.11: Intensidades de luminiscencia para varias muestras dopadas y no dopadas según la energía del fotón obtenida de la referencia [24].

En este gráfico los picos de luminiscencia en a-Si: H tipo n y no dopado son similares en cuanto a posición energética, algo más de 0.8eV y en aproximadamente 1.2eV. . En el tipo p se manifiesta el pico en 0.9eV aproximadamente y no se manifiesta el pico de 1.2eV.

- *Durný et al.* de la referencia [20], presentaron en 1997 tres grupos de estados de energías medias de 0.63, 0.82, y 1.25eV.

- De acuerdo a *A. Bacioglu, Kodolbas, Öktü, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol 7, No 1 February 2005, p.499-52* [2], se presenta un pico luminiscente en 2.1eV en a-Si:H inactivo normalmente pero activado cuando hay concentración de oxígeno por óxidos en el material. También se tiene otro pico luminiscente, debido a transiciones localizadas de 1.85eV.

- De *J.M. Pearce, J. Deng, R.W. Collins and Wronsky, Applied Physics Letters Vol. 83, No. 18, November 2003* [12]; tenemos que tomando en cuenta la presencia de estados defecto inducidos por luz, se detectaron dos estados defecto inducidos por luz centrados en alrededor de 1.0 y 1.2eV desde el borde de la banda de conducción.

- Cabe mencionar, de acuerdo a la referencia [24] y [2], que a temperatura ambiente predominan, o son más probables, las transiciones no-radiativas (tienen tiempos de vida corto en comparación con las radiativas), en las que está involucrados estados defecto en a-Si:H. Por otro lado las recombinaciones radiativas o luminiscentes fueron obtenidas en bajas temperaturas en el rango de energías de 1.7-1.9eV, en altas temperaturas no son esperadas estas transiciones luminiscentes

2.2.3.1 RESUMEN

De acuerdo a *Fefer y Shapira (1995)* [5], que encuentra estados sub-gap de naturaleza nativa, como los llama, exceptuando una pequeña diferencia, y con los resultados de *Street (1984)* [24], *Mensing (2002)* [13], *J.M. Pearce (2004)* [35], *E.BelinFerre (2004)* [34], *Pincik (2003)* [36], *V. Nadazdy (2002)* [37] y *PA Ivanov (2000)* [38]; puede afirmarse esta naturaleza “nativa” o intrínseca de algunos estados en la discontinuidad en a-Si:H sin consideración del tratamiento a la que haya sido sometido la muestra, excepto la variación de la energía de discontinuidad óptica por concentración de hidrógeno y tratamiento termal ($\sim 1.7\text{-}2\text{eV}$) como se indica en Smets [23] y en la figura 2.10.

Teniendo en cuenta estos resultados obtenidos de la literatura internacional podemos bosquejar los niveles en la discontinuidad para el a-Si: H y en base a los resultados obtenidos en el Laboratorio de Optica UNI, para las condiciones de preparación de las muestras de A-Si:H descritas en [31] con una discontinuidad de 1.97eV .

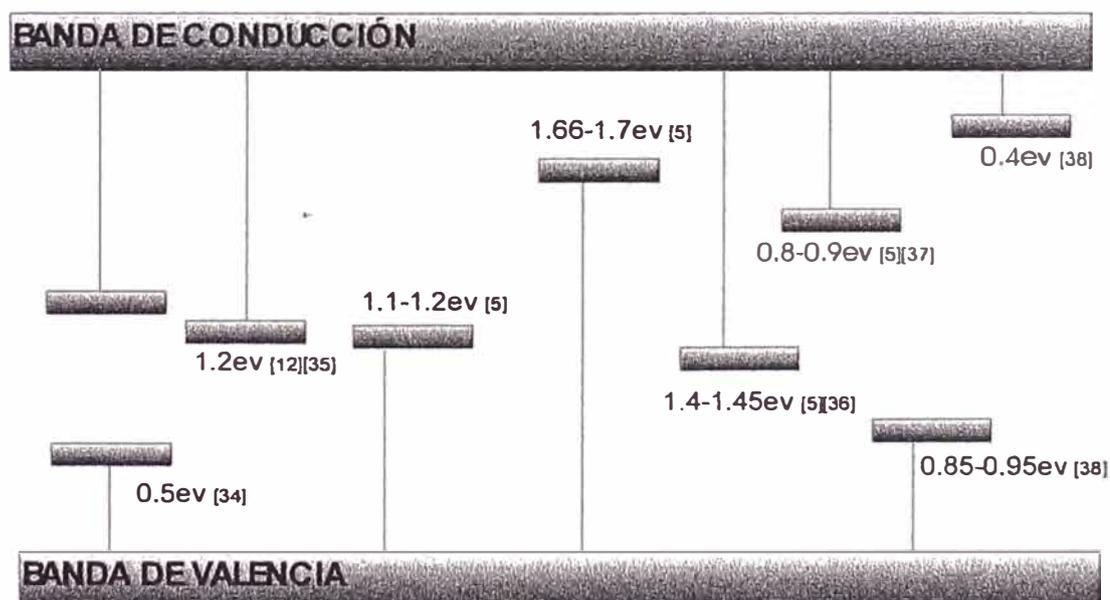


Fig. 2.12: Bosquejo resumen de energías en la discontinuidad para el silicio amorfo hidrogenado de acuerdo al modelo presentado en [30] y [31] del Laboratorio de Optica UNI y datos de publicaciones internacionales hasta el 2004.

2.3 ESTRUCTURA DEL SULFURO DE CADMIO

El CdS tiene una energía de discontinuidad de alrededor 2.4eV a temperatura ambiente; puede ser producido como un semiconductor tipo n ($>10^{18}$ electrones cm^{-3}).

El CdS se presenta en dos estructuras de cristal:

Como estructura del zinc blenda con una discontinuidad de 2.42 eV. a 300°K y una estructura de bandas directa.

También se presenta como estructura cristalina del wurzita, una discontinuidad de 2.42eV. a 300 °K y una estructura de bandas directa [25].

La zinc blenda tiene la geometría de la estructura del diamante con la particularidad que es binario en su composición molecular con dos átomos diferentes en la celda.

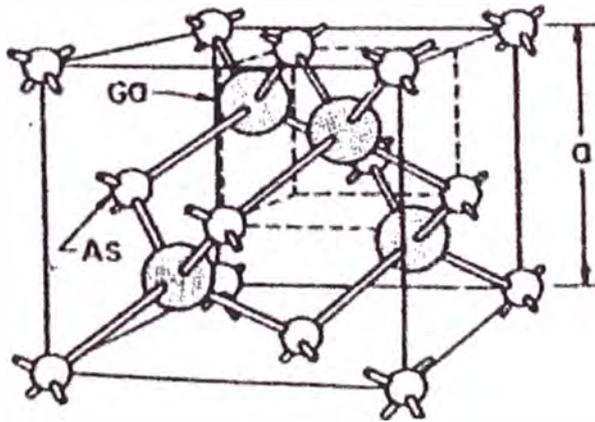


Fig. 2.13: La red zinc blenda de GaAs similar a la estructura del diamante [25]

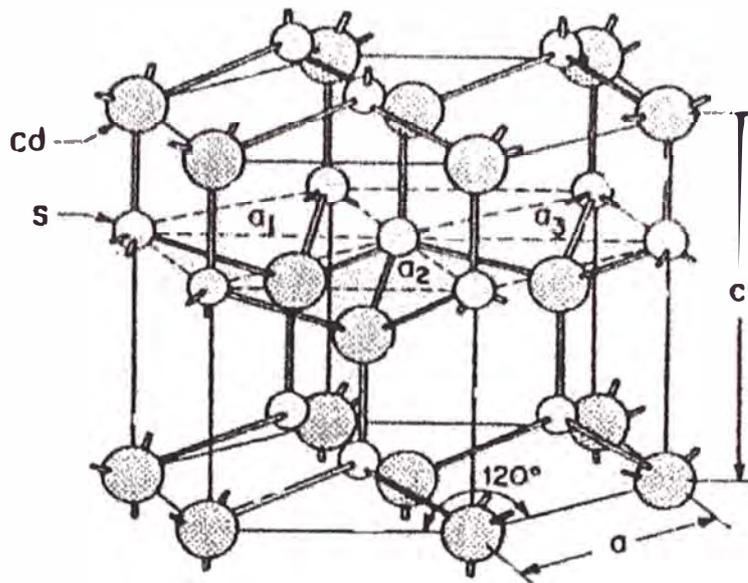


Fig. 2.14: Estructura wurzita para el CdS.[25]

La estructura wurzita forma parte de los sistemas hexagonales, esta estructura se puede interpretar como una rotación de los tetraedros de la estructura del zinc blenda, cambia la simetría cúbica por la hexagonal. Esta distorsión incrementa la energía de la discontinuidad.

2.4 ESTADOS EN LA DISCONTINUIDAD DE LAS BANDAS EN SULFURO DE CADMIO

- *De Physics and Chemistry of II – VI Compounds de Aven* se pueden extraer los siguientes datos de emisiones más característicos del CdS [1]:

En 77°K las emisiones más características en la fotoluminiscencia observada de CdS son una banda estrecha en 2.39eV la cual es debido a, presumiblemente, defectos nativos o intrínsecos. Se tiene una banda más amplia en 2.01 eV.

Una emisión en 2.51eV es observada en 77 °K en la fotoluminiscencia y electroluminiscencia del CdS.

Mediciones de 1965 sobre cristales de alta pureza que tenían concentraciones de portadores a temperatura ambiental en el orden 10^{15} cm^{-3} dieron un valor 0.024eV como un nivel de energía de ionización donador.

También por aquellos años se reportó un estado aceptor de 0.09eV bajo el borde de la banda de conducción, las cuales involucraban un defecto nativo en CdS y que dominan el comportamiento eléctrico en bajas temperaturas de cristales CdS.

Efectos de atrapamiento se observaron en mediciones de movilidad debido a niveles en 0.16eV debajo de la banda de conducción. Estos niveles son atribuidos también a defectos nativos o intrínsecos, probablemente vacancias de azufre ionizados en la estructura.

En 1965 Büget y Wright midieron la dependencia de la temperatura de la concentración de portadores en CdS tipo n y encontraron que esto estaba determinado por donadores desconocidos con energías de ionización de 0.45,

0.63 y 0.82eV en diferentes cristales. Encontraron que el nivel 0.45eV también actuó como una energía de atrapamiento en mediciones de corriente limitadas por carga espacial mientras que también fueron observados otros niveles de atrapamiento en 0.24eV y 0.16eV en el rango de temperaturas de 0 – 100 °C.

- De **J.Kokaj, A. Rakshani, *Journal of Physics D-Applied Physics, Vol 37, 14, pp 1970-1975, Año 2004*** [10], tenemos un nivel de 0.14eV debajo de la banda de conducción y también de 1.30eV debajo de la banda de conducción en CdS.
- En **Komin, Viswanathan, Tetali, Morel and Ferekides “*Deep Level Transient Spectroscopy of CdTe/CdS Thin Film Solar Cells*”, *University of South, Florida, Año 2001*** [29], aparece también un nivel de atrapamiento de 0.14eV debajo de la banda de conducción, así como también 0.73eV por encima de la banda de valencia, 0.32eV por encima de la banda de valencia.
- Según **Gilmore, Kaydanov, Ohno, Rose, “*Admittance Spectroscopy of Deep Levels in CdTe Solar Cells*”** [3], 2001, referencia a un estado de atrapamiento de 0.37eV por encima de la banda de valencia.
- De **Kaplan, *Turk J. Phy 24 (2000), 689-699*** [39] tenemos 0.24eV debajo de la BC y 0.07eV encima de la banda de valencia

2.4.1 RESUMEN

De esta manera, se puede hacer un bosquejo resumen de acuerdo a **Kaplan (2000)** [39], **Kokaj et. al. (2004)** [10], **V. Komin et.al. (2001)** [29], **A. Gilmore et.al. (2001)** [3].

En este bosquejo hemos considerado la energía de discontinuidad en el CdS de 2.38eV de acuerdo a la referencia [16] obtenido en la UNI y de la referencia [15] obtenido en México en el 2001.

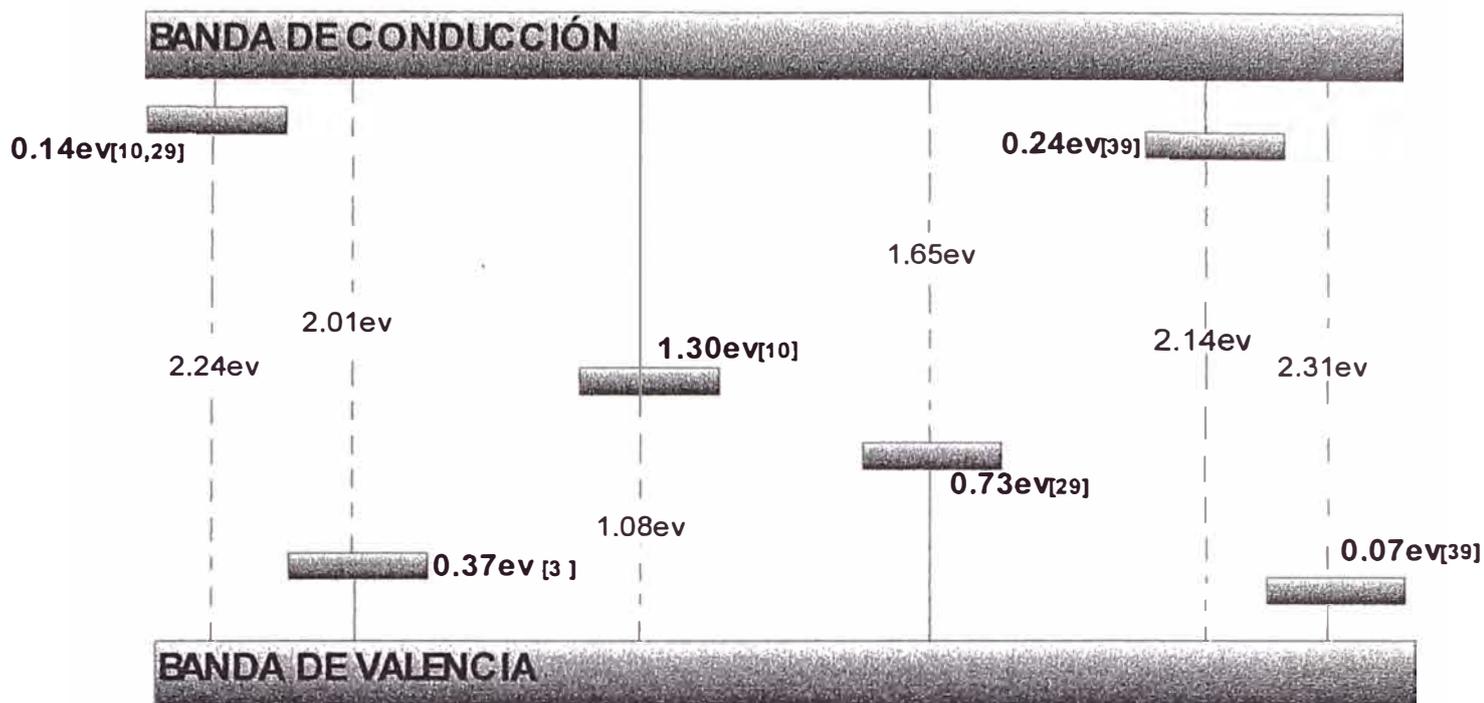


Fig. 2.15: Bosquejo resumen de energías en la discontinuidad para el sulfuro de cadmio de acuerdo al modelo presentado en las referencias [30] y [31], y a los datos obtenidos de publicaciones internacionales hasta el 2004

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 ELABORACIÓN DE LAS UNIONES DE SULFURO DE CADMIO Y SILICIO AMORFO HIDROGENADO

En esta sección se describen los métodos de deposición de las películas de óxido de estaño, sulfuro de cadmio, silicio amorfo hidrogenado y el contacto metálico.

Sobre un sustrato de vidrio, es depositado una capa de TO (tin oxide u óxido de estaño), con un espesor cercano a un micrómetro y 300Ω , empleando la técnica de spray pirólisis; sobre esta capa conductora de óxido de estaño es depositado una película de sulfuro de cadmio con un espesor cercano a $0.5\ \mu\text{m}$, formado ésta por evaporación en vacío; la película de silicio amorfo hidrogenado es formada por la técnica de descarga plasmática en un medio de hidrógeno; por otro lado la capa metálica es depositada por evaporación en vacío.

3.1.1 ELABORACION DE PELICULAS DELGADAS DE OXIDO DE ESTAÑO POR LA TECNICA DE SPRAY PIROLISIS [27]

Esta técnica produce una película sobre un sustrato mediante una reacción tratada térmicamente. Se coloca SnCl_4 en una solución de alcohol etanol la cual se pulveriza sobre un sustrato como, por ejemplo, vidrio a $350\ ^\circ\text{C}$, con un flujo de aire de 15 litros/minuto.

La reacción que tiene lugar es el siguiente:



El SnO_2 formado tiene un espesor de cerca de $1\ \mu\text{m}$ y su conductividad es tipo n

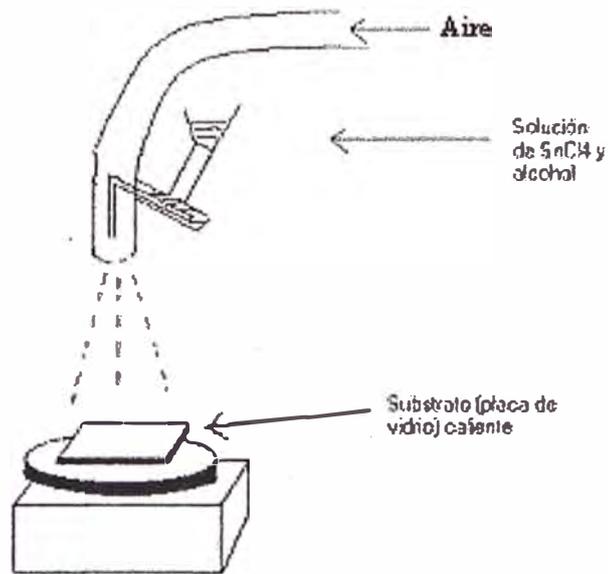


Fig. 3.1: Diagrama esquemático del equipo de deposición del óxido de estaño sobre un sustrato según [27]

3.1.2 ELABORACION DE LA PELICULA DE SULFURO DE CADMIO POR LA TÉCNICA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO[27]

En este procedimiento se evapora sulfuro de cadmio sobre el sustrato correspondiente formándose una película delgada en el tiempo estimado de deposición.

Básicamente se compone de una cámara de vacío en cuyo interior se encuentran un crisol con el material de CdS en polvo para ser calentado a una temperatura de cerca de 1000 °C para su evaporación.

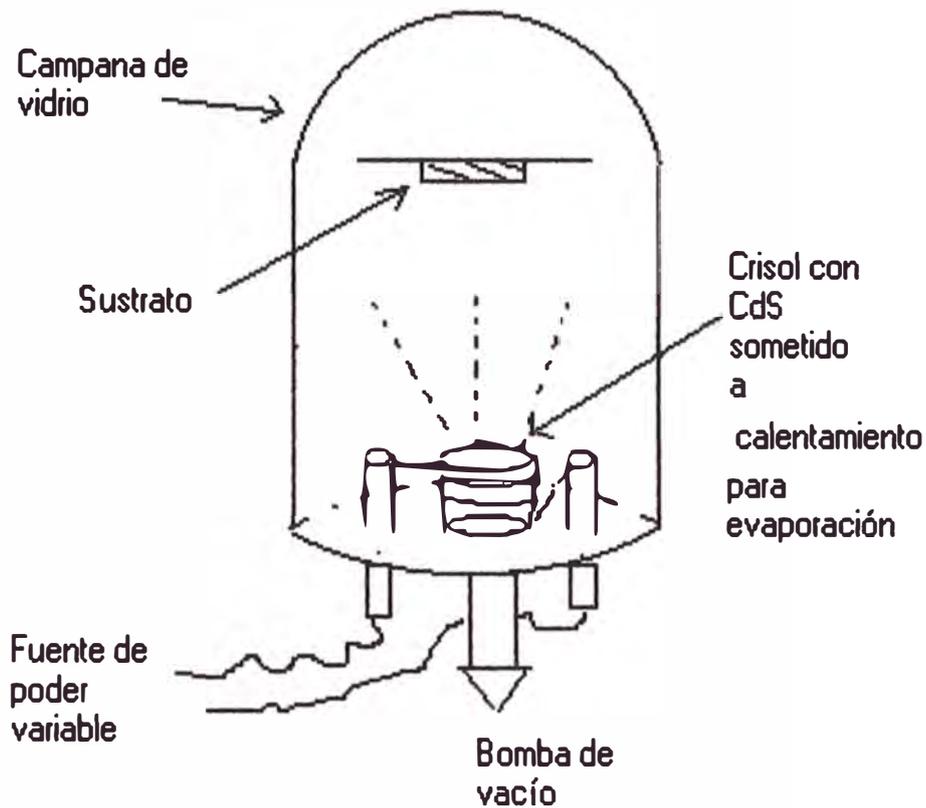


Fig. 3.2: Diagrama esquemático del equipo de evaporación al vacío de materiales en polvo usado para depositar las películas de CdS y de los contactos metálicos de acuerdo a la referencia [27].

El vacío adecuado para este sistema es aproximadamente de 10^{-4} Torr, y es aplicada una corriente de 40 A por una resistencia de tungsteno lo cual calienta el crisol con el CdS en polvo para ser evaporado y depositada sobre el sustrato. El espesor de la película depositada depende del tiempo de evaporación ($1 \mu\text{m}/\text{minuto}$) Ref. [27]. La película de CdS de cerca de $0.5 \mu\text{m}$, determinado por “espectros de transmisión” [27], es depositada sobre la capa conductiva de óxido de estaño. De acuerdo a [27] el carácter de este material es de tipo n

3.1.3 ELABORACION DE LA PELICULA DE SILICIO AMORFO HIDROGENADO POR LA TÉCNICA DE DESCARGA PLASMÁTICA. [7]

Una cámara de reacción, un sistema de vacío, un sistema de inyección de hidrógeno y una fuente de alta tensión son necesarios para implementar el sistema de elaboración de la película de silicio amorfo hidrogenado.

En la cámara de reacción se sitúan un ánodo y cátodo a una alta tensión, silicio policristalino es colocado sobre el ánodo y los substratos de vidrio sobre el cátodo.

Entre el cátodo y ánodo se sitúa un intenso campo eléctrico que producirá una descarga plasmática debido a la disrupción del hidrógeno inyectado en el medio. En la descarga electrones e iones son acelerados e interactúan con el silicio policristalino y generan especies derivadas del silicio como el silano SiH_4 , estos son transportados a la superficie del substrato en el cátodo, formándose una película de silicio amorfo hidrogenado a-Si : H. Los espesores que se obtienen para condiciones óptimas de elaboración van entre 0.1 y $5\mu\text{m}$. Para las muestras tratadas aquí, los espesores fueron de cerca de $1\mu\text{m}$, determinadas a partir de un “espectro de transmitancia” descrito en la referencia [7] y su conductividad eléctrica es de tipo p.

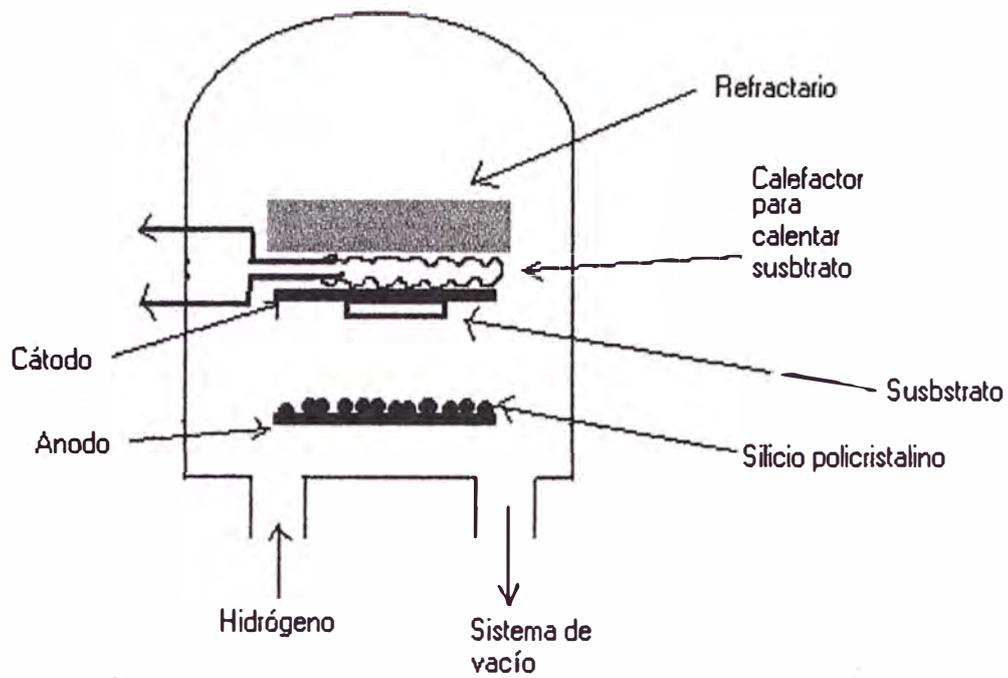


Fig 3.3: Diagrama esquemático del equipo de deposición de la película de silicio amorfo hidrogenado sobre un sustrato de acuerdo a la referencia [7]

3.2 OBTENCION DE LOS ESPECTROS DE FOTOCORRIENTE

Para obtener los espectros de fotocorriente se empleó el equipo de espectroscopia de fotocorriente que se compone básicamente de los siguientes elementos ilustrados en el diagrama según referencia [4].

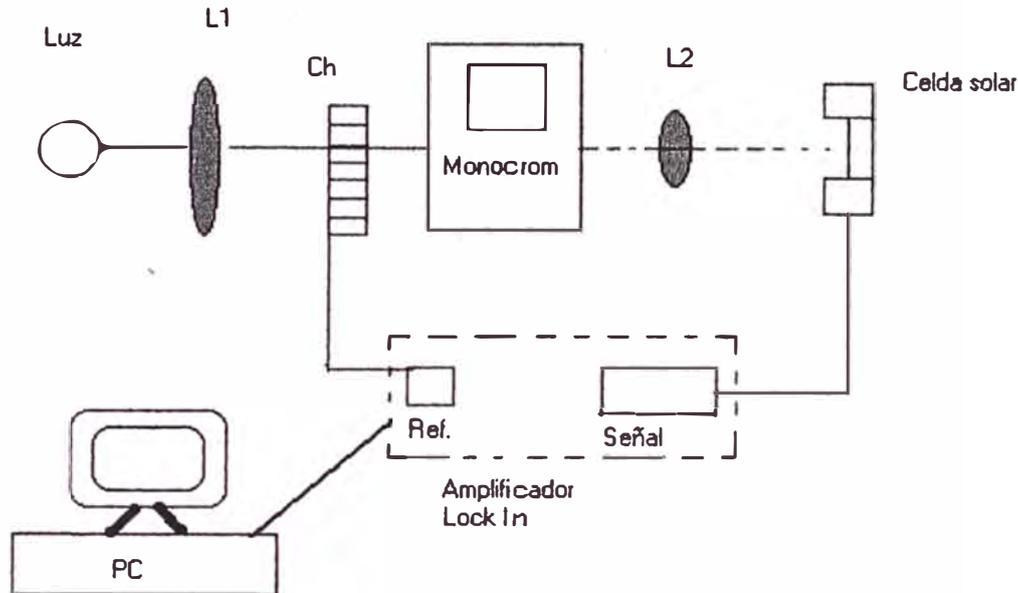


Fig. 3.4: Esquema del equipo de espectroscopia de fotocorriente de la UNI [4]

Una lámpara halógena de 300W, como fuente de luz blanca.

Un modulador mecánico o “Chopper”.

Un Monocromador Carl Zeiss / M4 Q IIS

La luz es concentrada a la entrada de un Monocromador, disponiéndose de una radiación monocromática cuyo rango de operación es de 0.7eV a 3eV, luego esta radiación es enfocada a la celda solar examinada, la fotocorriente producida es luego amplificada y digitalizada para su análisis y registro en una PC.

3.2.1 CONFIGURACION DE MUESTRAS Y TERMINOLOGIA USADA

Respecto a la configuración de las muestras para el análisis de fotocorriente espectral se disponen de dos modalidades, una denominada configuración de respuesta transversal de fotocorriente y otra de respuesta fotovoltaica, las cuales tienen las siguientes “geometrías”:

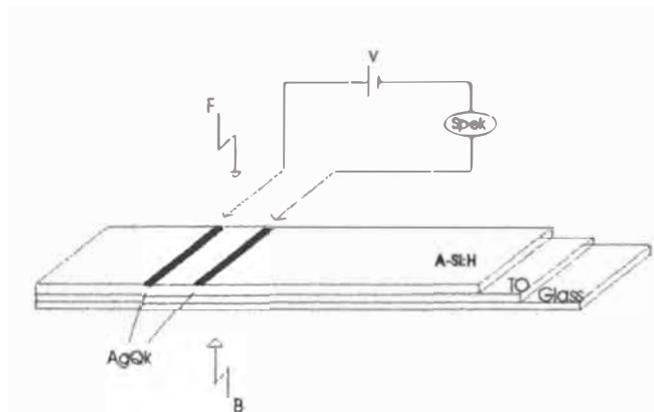


Fig. 3.5: Configuración de respuesta transversal, con incidencia de la luz frontal F o reversa denotada por B , en la figura.

Este tipo de configuración de contactos superficiales de plata permite detectar la respuesta del material CdS o A-Si:H en este ejemplo, sin mayor participación de los electrodos que componen la muestra.

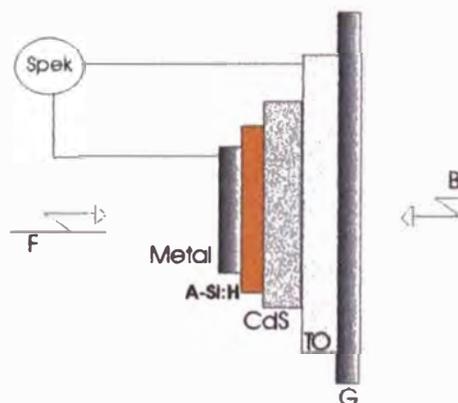


Fig. 3.6: Configuración de respuesta longitudinal, con incidencia de la luz frontal F o reversa denotada por B , en la figura.

Esta configuración longitudinal se denomina de respuesta fotovoltaica PV simplemente, en donde los electrodos participan con campos eléctricos interfaciales que permiten recolectar la carga fotogenerada por iluminación frontal F o reversa B.

En este caso no existe fuente de polarización externa y los fotoportadores liberados del material son canalizados por los campos eléctricos internos que se producen en las interfaces entre las películas.

3.3 EFICIENCIA CUÁNTICA

Cuando se incide una cantidad de fotones sobre un material, la absorción de la radiación por dicho material no genera una cantidad idéntica de portadores de carga.

Por lo que se define la eficiencia cuántica como la razón de fotoportadores liberados al número de fotones que hayan incidido sobre una muestra, y esta razón es menor que uno; una eficiencia idealizada del 100% o uno indicaría que toda la radiación incidente sobre la muestra libera la misma cantidad de fotoportadores que las de fotones incidentes.

Dicho en términos experimentales, la eficiencia cuántica para cada rango de energías del espectro, se determina por la corriente inducida por la luz dividida entre la

potencia de la luz incidente, $\eta = \frac{\text{intensidad_de_fotocorriente_inducida}}{\text{intensidad_de_la_señal_incidente}}$.

4 ANALISIS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

4.1 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LAS ENERGÍAS DE ACTIVACIÓN DE LAS MUESTRAS

Si se considera una energía de activación E_o (que es nuestro objetivo determinar), es decir, energía a partir del cual se producen transiciones electrónicas que pasan a formar parte del espectro de fotocorriente y consideramos que nuestras curvas experimentales se pueden aproximar por polinomios que dependen de la energía del fotón, asumiremos de acuerdo a [40], que la eficiencia cuántica está dada por:

$$\eta = \beta(E - E_o)^m \quad (4.1)$$

logaritmizando esta última expresión se obtiene:

$$\ln \eta = m \ln(E - E_o) + \ln \beta \quad (4.2)$$

la cual tiene forma de una recta $y = mx + b$.

Razón por la cual se hace un ajuste de mínimos cuadrados para hallar “m” y “b”.

Una vez determinado “m” y “b” se reproduce la curva experimental mediante la fórmula teórica:

$$\eta = \exp(\ln \beta) \exp[m \ln(E - E_o)] \quad (4.3)$$

Evidentemente que no toda la curva teórica encajará en la experimental:

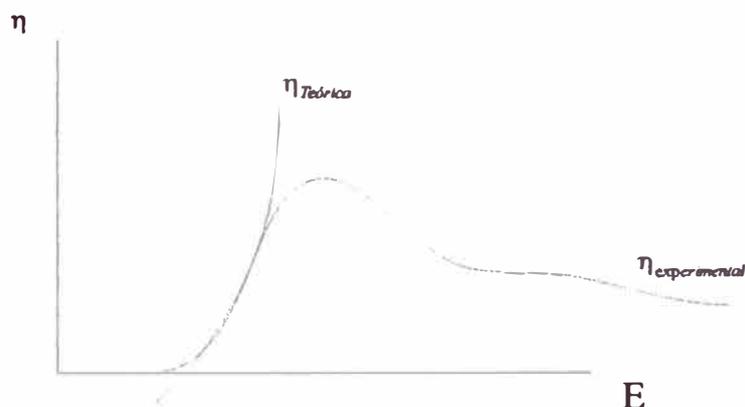


Fig.4.1: Encaje de las curvas teóricas sobre las experimentales para la determinación de las energías de activación en cada sector del espectro de fotocorriente

Por lo que sólo se ha resuelto para una parte de la curva que manifiesta este comportamiento para una determinada energía de activación y para un rango determinado de energías del fotón hasta que otra energía de activación sea manifiesta con mayor probabilidad de acuerdo con las condiciones de campos eléctricos presentes en la muestra.

El siguiente paso de la técnica consistirá en hallar una nueva activación quitando del análisis la anterior curva teórica, mediante diferencia simple $\eta_{\text{experimental}} - \eta_{\text{teórica}}$.

De este modo, para cada parte de la curva se hace el mismo procedimiento, por lo que la curva total puede expresarse como una suma: $\eta = \sum_i \beta_i (E - E_{oi})^{m_i}$.

4.2 ACERCA DE LOS ERRORES INVOLUCRADOS

De acuerdo a la referencia [30] el equipo de espectroscopia de fotocorriente opera con un rango de incertidumbre de $\pm 0.05\text{eV}$ para la determinación de los valores de energía.

Como puede observarse la cifra significativa del error se encuentra en las centésimas de electronvoltio, razón por la cual se expresará los valores de energía hasta el orden de los centésimos.

4.3 DETERMINACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE ENERGÍA PARA LAS MUESTRAS ANALIZADAS

Se trabajó con configuraciones de muestra del tipo Metal / a-Si:H / CdS / TO. Donde los contactos metálicos fueron Ag, Al, Cu, Au, Fe, In.

Para el bosquejo de los diagramas de energía se siguieron las pautas determinantes de la teoría de los contactos Metal / Semiconductor que, de acuerdo a las funciones trabajo del metal y del semiconductor tendremos un diagrama de energía para cada muestra.

De acuerdo a Sze [25] tenemos:

Tabla 4.1: Funciones trabajo de metales utilizados según [25]

Metal	Ag	Al	Cu	Au	Fe	In
Función trabajo ϕ_m (eV)	4.25	4.2	4.3	4.8	4.3	3.8

En el contacto Metal / a -Si:H tenemos que el semiconductor es de tipo p, por consiguiente, el nivel de Fermi correspondiente se sitúa muy cerca de la banda de valencia y se define la función trabajo del semiconductor como la energía necesaria para llevar un electrón desde el máximo de la banda de valencia hasta el nivel de vacío. De acuerdo al Apéndice I, $e\phi_s = e\chi_s + E_g$, con E_g el gap de energía del silicio amorfo hidrogenado.

- De acuerdo Sze[25], $\chi_{Si} = 4.15V$ y considerando para el silicio amorfo hidrogenado $E_g = [1.6eV, 2eV]$ de acuerdo a Street[24].

Considerando estos datos $\phi_m < \phi_s$, lo cual será graficado como se indica en el Apéndice I.

- En el contacto CdS / TO, el CdS y el TO son de tipo n, donde el $\chi_{\text{CdS}} = 4.32\text{V}$ según Street[24] y $\chi_{\text{TO}} = 4.49\text{V}$ según Diaz Delgado[19].

Por lo que tenemos prácticamente un contacto óhmico con una ligera barrera para los portadores mayoritarios del CdS al difundirse hacia el TO.

ESPECTRO 31N1
(PV) L / G / TO / CdS / a-Si:H / Au

31N1 PV

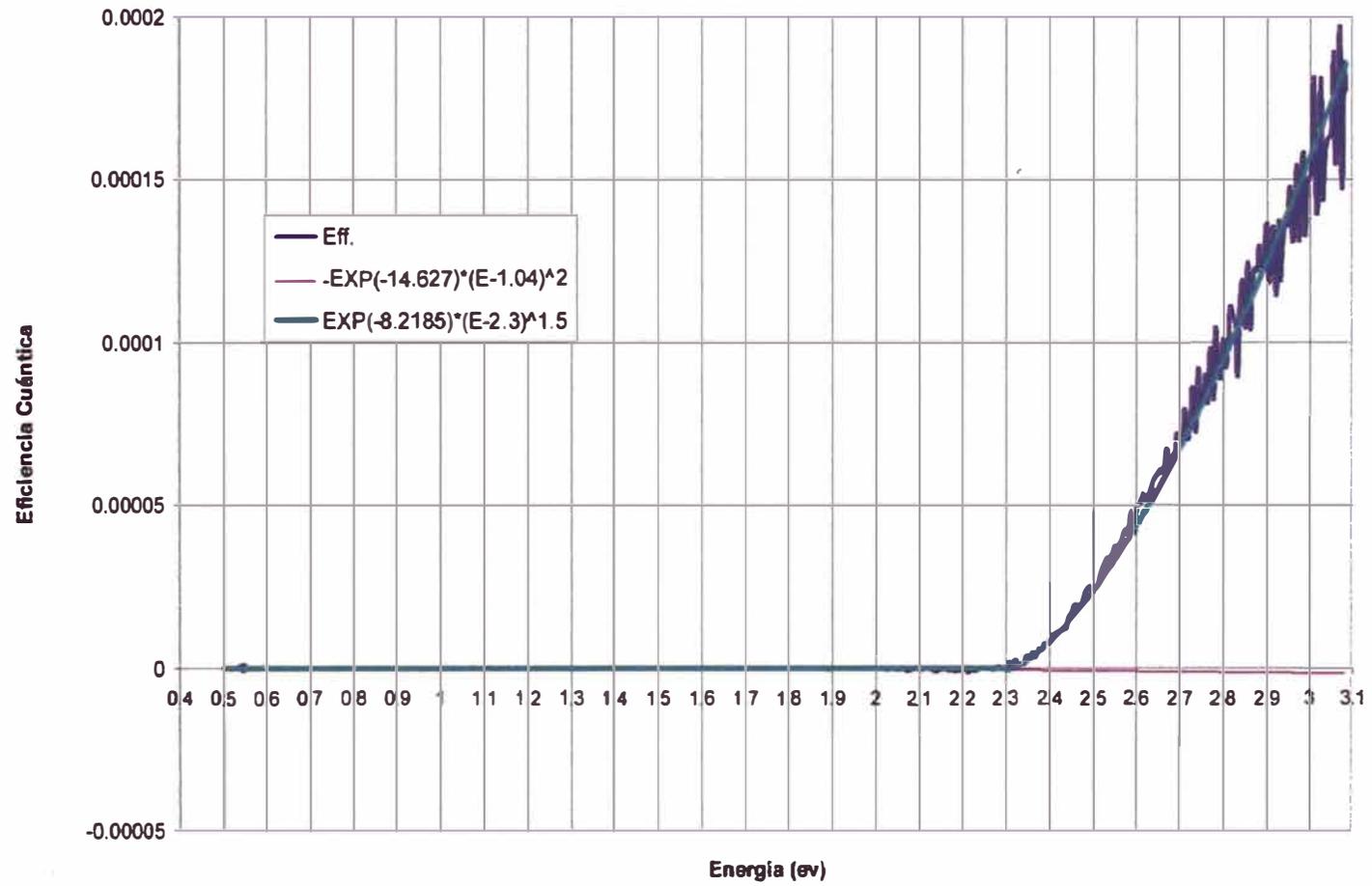


Fig.4.2: Espectro de fotocorriente de la muestra 31N1

RESULTADOS

De la linealización logarítmica de este espectro se observan las siguientes contribuciones a la curva de la eficiencia cuántica

$$\square \text{ Fotogeneración negativa : } n1 = - \exp(-14.6) * (h\nu - 1.04)^2 \quad (4.4)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n2 = + \exp(-8.22) * (h\nu - 2.30)^{1.5} \quad (4.5)$$

INTERPRETACIÓN

Este caso puede considerarse de trascendencia para el análisis de los otros casos debido a su simplicidad, pues básicamente toda la curva de eficiencia cuántica es reproducida por estas dos curvas de encaje. Cada curva es originada por la activación de un cierto nivel de energía de la muestra que tiene que ser identificada, luego ubicada determinando el campo eléctrico interfacial que colecta la carga que se refleja en el parámetro eficiencia cuántica.

- -1.04eV.

Esta transición es observada también en el caso de iluminación inversa 11D1 para este material y otro en la muestra con Fe 7N1 y con Ag 16N2.

Se tiene una referencia para CdS en [10] para un nivel trap de 1.30eV desde la banda de conducción, lo cual permitiría asumir a este nivel como el complemento 1.08eV. de 1.30eV, asumiendo una energía de discontinuidad para CdS de 2.38eV según [15] y [16]. Por lo cual la desviación correspondiente es de 3.7%

Para ubicar la región donde es colectada la carga, se tiene que considerar el hecho que la iluminación es por el lado del TO, que es el sentido de incidencia de la luz en el cual se produce la mayor eficiencia y por tanto la mayor actividad energética. El CdS es el primero en absorber la energía radiante, por lo que tiene mayor probabilidad de manifestar sus propiedades.

En a-Si:H, según la referencia [12] hay un nivel trap de 1.0eV que podría relacionarse al valor encontrado, pero ésta es menos probable frente a la mayor cercanía del CdS.

Se ubica la activación de este nivel de energía en la región de campo eléctrico a-Si: H/CdS por ser una fotogeneración negativa opuesta a la referencia asumida, en concordancia con la siguiente transición 2.30eV que es predominante para esta muestra.

- +2.30eV

Corresponde a un estado en CdS de 0.08eV desde la banda de valencia, lo cual concuerda con la referencia [39] en que detecta un estado de 0.07e desde la banda de valencia para el CdS. Por lo que aquí tenemos una manifestación de su complemento.

Se puede observar de su espectro fotovoltaico que es la transición que proporciona casi toda la eficiencia para esta muestra.

Se le ubica entonces en la región de mayor actividad o respuesta a la luz incidente como es la región de campo eléctrico CdS/TO que es por donde incide la luz.

Se tiene este valor de energía también en 11D1, 20 O2, 20 O1, 7N1, 30 O1, 19 O1.

Ambos resultados reflejan la presencia o actividad de dos campos eléctricos entre las interfaces de la muestra. Por otro lado no hay una manifestación de participación en la eficiencia del a-Si:H, salvo que proporciona un campo eléctrico distinto que probablemente determine la activación de ciertas energías como es el caso de la transición 1.04eV en CdS.

En la siguiente tabla se resumen los valores encontrados en esta evaluación:

**TABLA 4.2: RESUMEN DE ENERGÍAS DE ACTIVACIÓN EN LA MUESTRA
31N1**

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel partici- pante eV</i>	<i>Nivel encontrado en Referencias / eV</i>
1	1.04	Fotogeneración des- tructiva	1.34	1.30 [10]
2	2.30	Constructiva	0.08	0.07 [39]

MODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 31N1

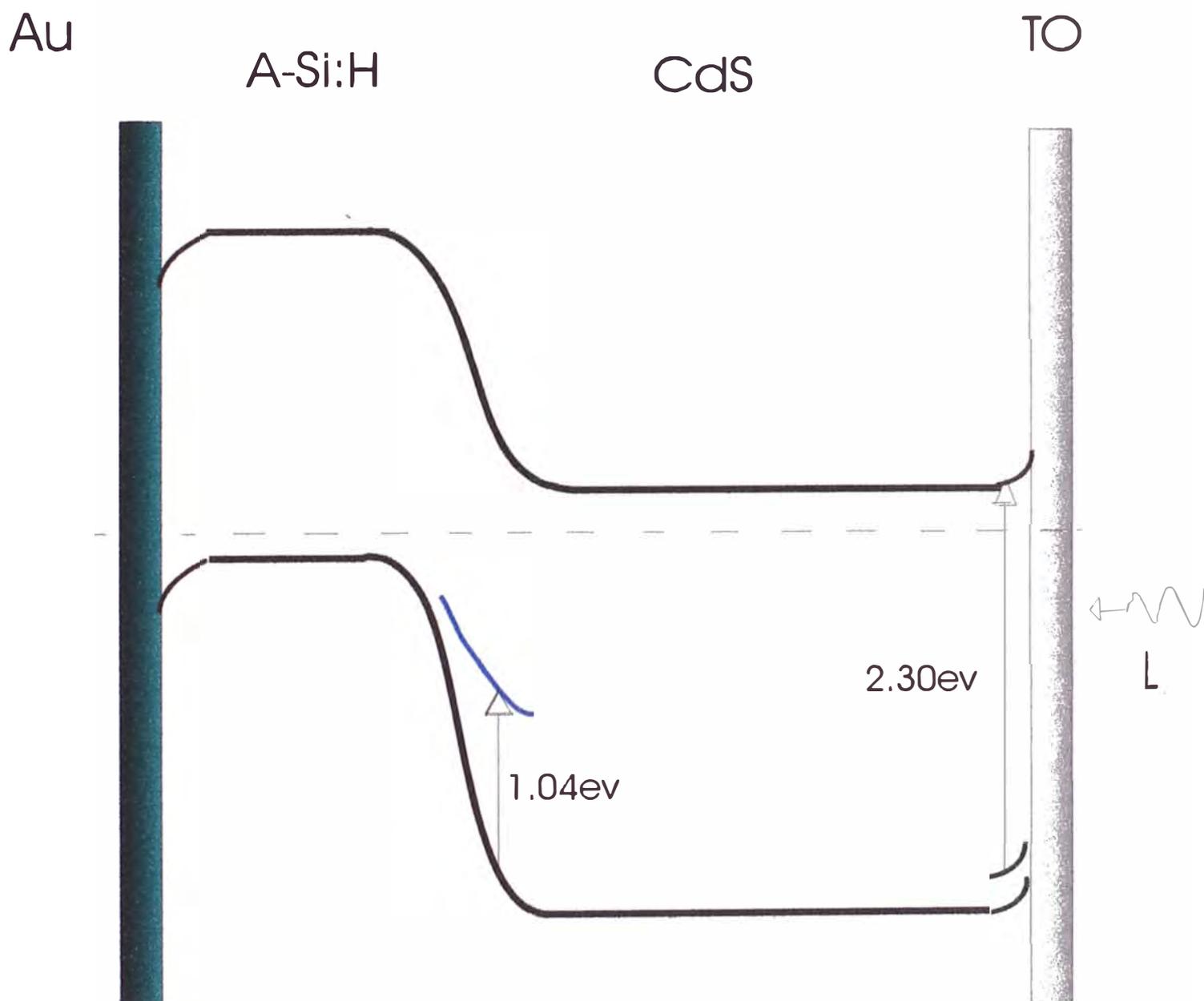


Fig. 4.3: Diagrama de energía obtenido para la muestra 31N1

ESPECTRO 11D1
(PV) L / Au / a-Si:H / CdS / TO

11D1 G/TO/CdS/a-Si:H/Au/Luz

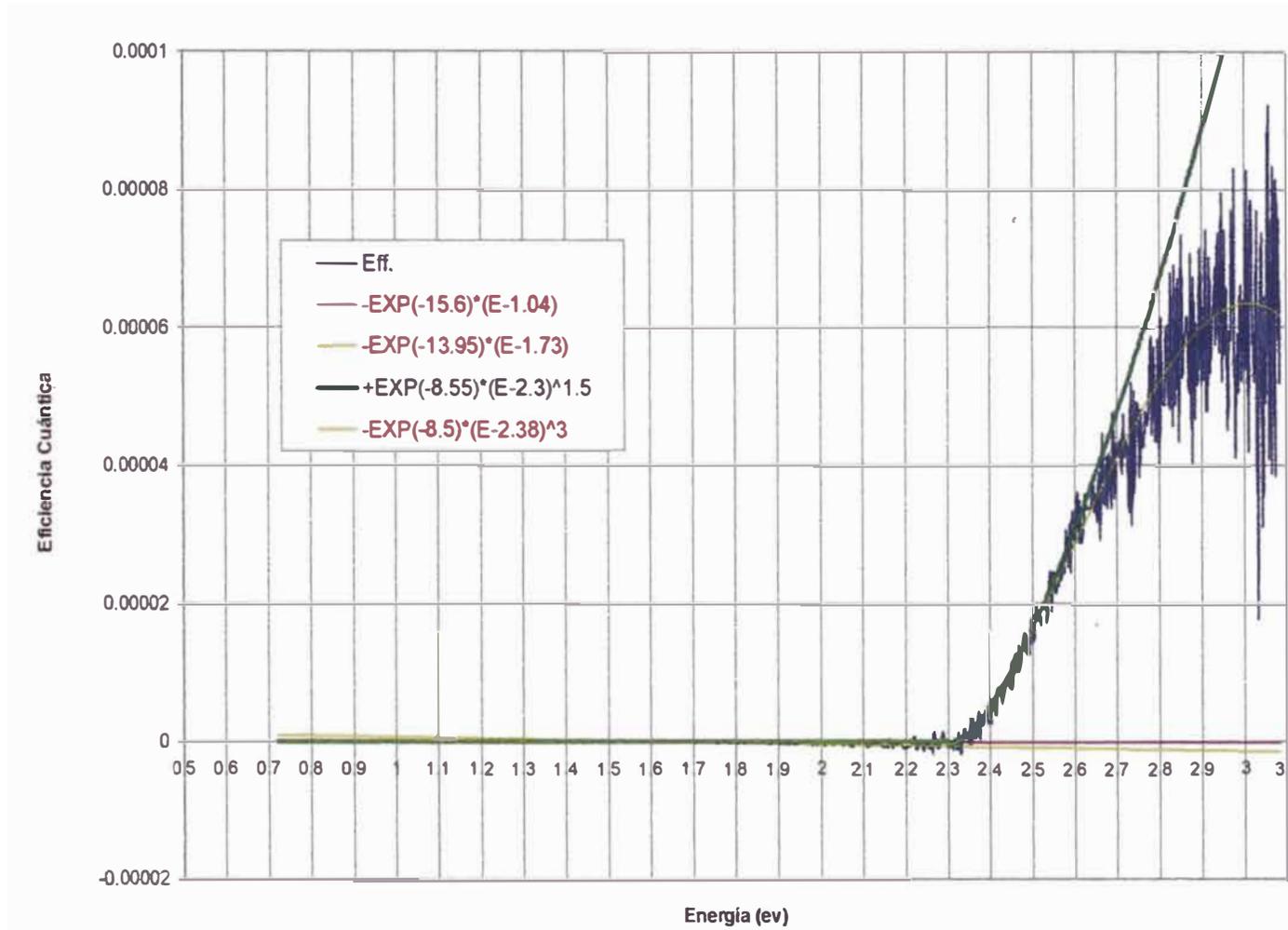


Fig.4.4: Espectro de fotocorriente de la muestra 11D1

RESULTADOS

De la linealización logarítmica de este espectro se observan las siguientes contribuciones a la curva de la eficiencia cuántica:

□ Fotogeneración negativa : $n1 = - \exp(-15.6) * (h\nu - 1.04)$ (4.6)

□ Fotogeneración negativa : $n2 = - \exp(-13.95) * (h\nu - 1.73)$ (4.7)

□ Fotogeneración positiva : $n3 = + \exp(-8.55) * (h\nu - 2.30)^{1.5}$ (4.8)

□ Amortiguamiento: $n4 = - \exp(-8.5) * (h\nu - 2.38)^3$ (4.9)

INTERPRETACIÓN

- -1.04eV

Se presenta esta transición nuevamente como en su caso complementario. Como ya se mencionó, existe una referencia en [10] a un nivel de 1.30eV desde la banda de conducción en CdS. Como en 31N1 la transición provoca una fotogeneración negativa.

En 31N1 se ubicó la transición en la región menos activa a-Si:H/CdS, por lo que en la actual muestra se le ubica también en dicha región de campo eléctrico, manteniendo así la coherencia de regiones activas y fotogeneración negativa.

- -1.73eV

Esta transición es de naturaleza destructiva en la muestra. Tenemos un referencia en [5] en A-Si:H por encima de la BV, pero de acuerdo a 7N1 (+1.68eV) y 7N2 (+1.7eV) como antecedentes, nos inclinamos a pensar que es la misma transición pero en CdS. No hay más referencias.

- +2.30eV

Esta transición se presenta también en su caso complementario 31N1, también como una fotogeneración positiva, por lo que se le ubica del mismo modo que el anterior en la región de campo eléctrico más activa CdS/TO, como también se observa en su espectro.

Corresponde a un estado superficial en CdS de 0.08eV desde la banda de conducción. Como también se mencionó en el caso complementario, hay una referencia en [39] para CdS.

- -2.38eV

Corresponde a la transición banda – banda del gap del CdS, sólo que con el carácter de amortiguamiento. Este comportamiento sugiere que la carga generada se recombina más rápidamente que lo que puede ser colectado por las regiones de campo eléctrico activas en la muestra.

En ambos casos complementarios, no se evidencia participación directa del a-Si:H, debido probablemente a la debilidad de sus señales que no pueden ser resueltos bajo las condiciones actuales.

TABLA 4.3: RESUMEN DE ENERGÍAS DE ACTIVACIÓN EN LA MUESTRA**11D1**

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel participante</i>	<i>Nivel encontrado en Referencias / eV</i>
1	1.04	Destructiva	1.34	1.30 [10]
2	1.73	Destructiva	_____	No referencias
3	2.30	Constructiva	0.08	0.07 [39]
4	2.38	Destructiva	2.38 gap	2.38 [15][16]

MODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 11D1

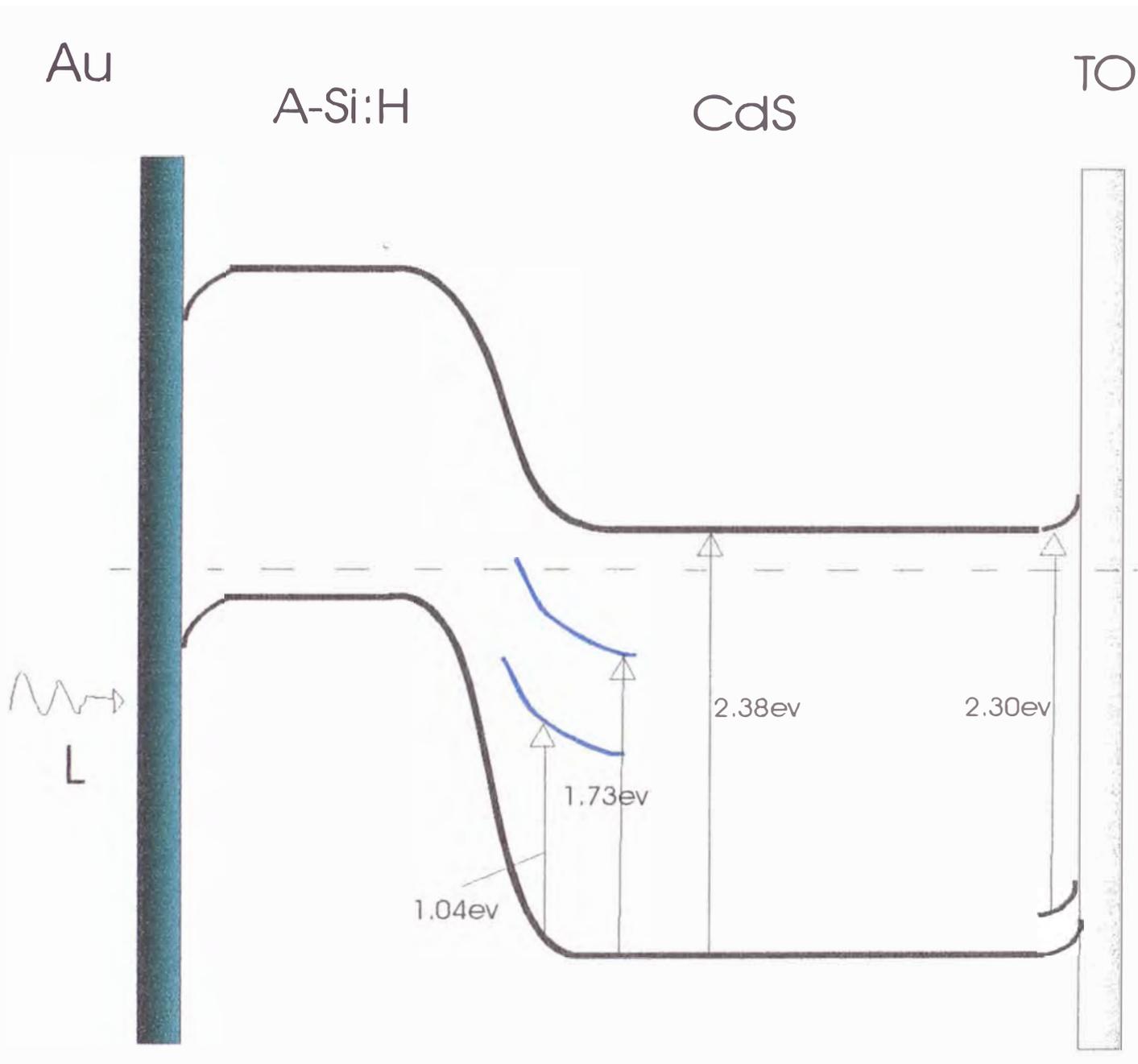


Fig. 4.5: Diagrama de energía obtenido para la muestra 11D1

ESPECTRO 30 O1
(PV) L / G / TO / CdS / a-Si:H / Ag

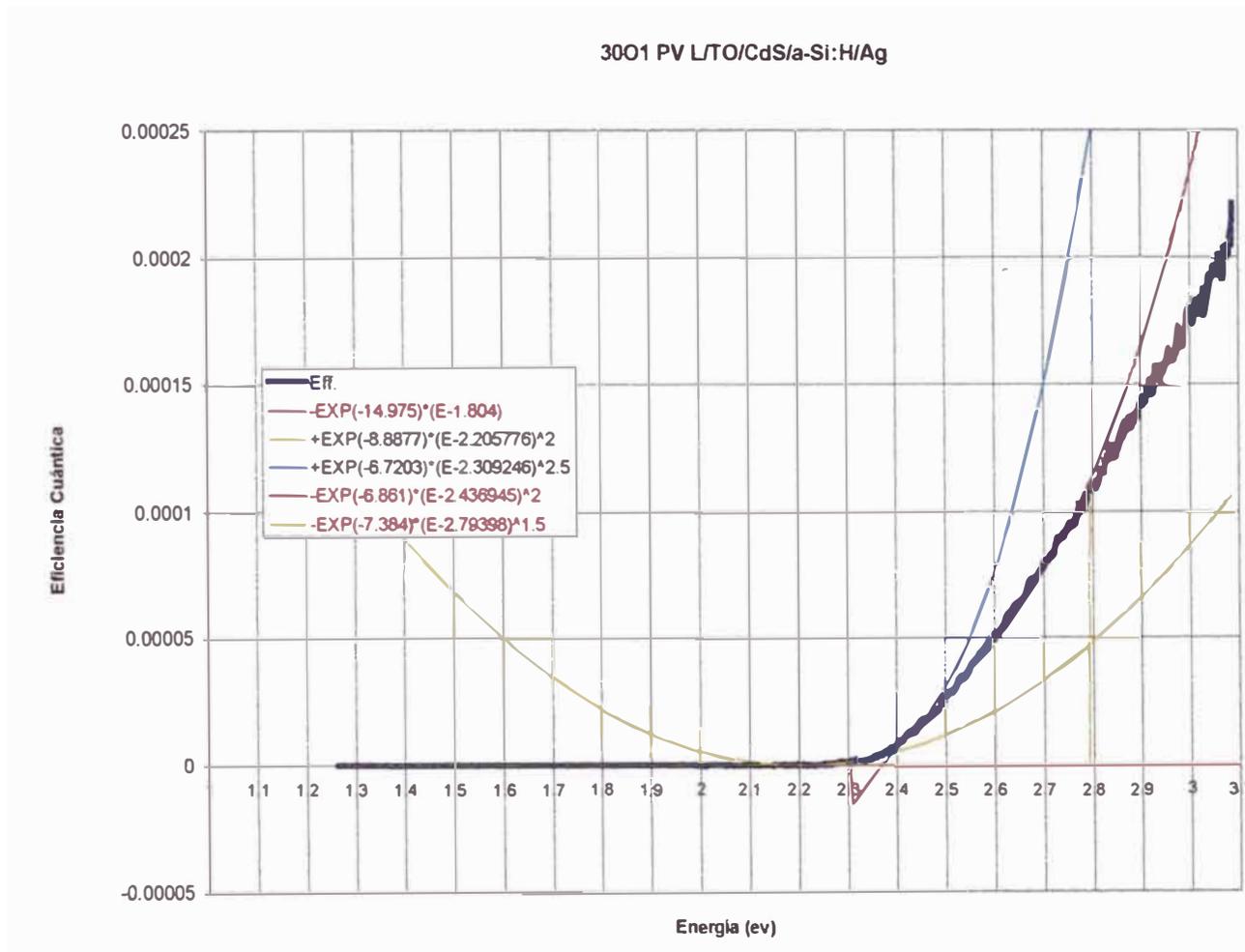


Fig.4.6: *Espectro de fotocorriente de la muestra 30 01*

RESULTADOS

De la linealización logarítmica de este espectro se observan las siguientes contribuciones a la curva de la eficiencia cuántica

□ Fotogeneración negativa : $n1 = - \exp(-14.98) * (hv - 1.80)$ (4.10)

□ Fotogeneración positiva : $n2 = + \exp(-8.89) * (hv - 2.21)^2$ (4.11)

□ Fotogeneración positiva : $n2 = + \exp(-6.72) * (hv - 2.31)^{2.5}$ (4.12)

□ Fotogeneración positiva : $n2 = - \exp(-6.86) * (hv - 2.44)^2$ (4.13)

□ Fotogeneración positiva : $n2 = - \exp(-7.38) * (hv - 2.79)^{1.5}$ (4.14)

INTERPRETACIÓN

- -1.80eV

Se presenta esta transición en los siguientes casos 26D1, 22D3, 20 O1, 19O1, 7N1.

En esta muestra, sin embargo, tiene carácter negativo que lo ubica en la región de campo opuesto a-Si:H/CdS. (Aquí se está considerando, que las absorciones importantes se llevan a cabo en la región CdS/TO, pues la radiación incide por este lado)

No hay otras referencias distintas a estas en CdS.

- +2.21eV

Corresponde a una fotogeneración en CdS debido a una transición a un nivel de 0.14eV desde la banda de conducción según [10] y [29], por lo que el nivel participante es aquí 0.17eV manifestándose con su complemento

Se presenta también en su caso complementario 16N2 pero como fotogeneración negativa. También se presenta en los casos 19 O1, 22D3 en CdS/TO; en 20 O1, 20 O3 y 26D1 en aSi:H/CdS.

En este caso se le ubica en CdS/TO.

- +2.31eV.

Como se mencionó ya en otros casos, esta transición corresponde a un nivel de 0.07eV encima de la banda de valencia según [39] manifestándose aquí como su complemento.

Similar a los casos 11D1, 20 O2, 20 O1, 7N1 y 31N1 en la región CdS/TO,

- -2.44eV

Como es mencionado en otros casos, puede referirse a un nivel luminiscente en CdS que amortigua la eficiencia debido a recombinaciones luminiscentes rápidas, se presenta también en 20 O2, 20O1, 19 O1; pero en 20 O3 se resuelven dos transiciones muy cercanas que no nos permite identificarla con la actual transición.

- -2.79eV

Se registra también en 19 O1, 20 O2, 20 O1, 20 O3, y aquí en 30 O1.

TABLA 4.4: RESUMEN DE ENERGÍAS EN LA MUESTRA 3001

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel partici- pante</i>	<i>Nivel Encontrado en Referencias / eV</i>
1	1.80	Constructiva	1.80	No hay Ref..
2	2.21	Constructiva	0.17 :Trap CdS	0.14 [10],[29]
3	2.31	Constructiva	0.08: Est. Sup. CdS	0.07 [39]
4	2.44	Destructiva	2.44 : Tran.Lum	No hay Referencias
5	2.79	Destructiva	2.79	No hay Ref..

MODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 3001

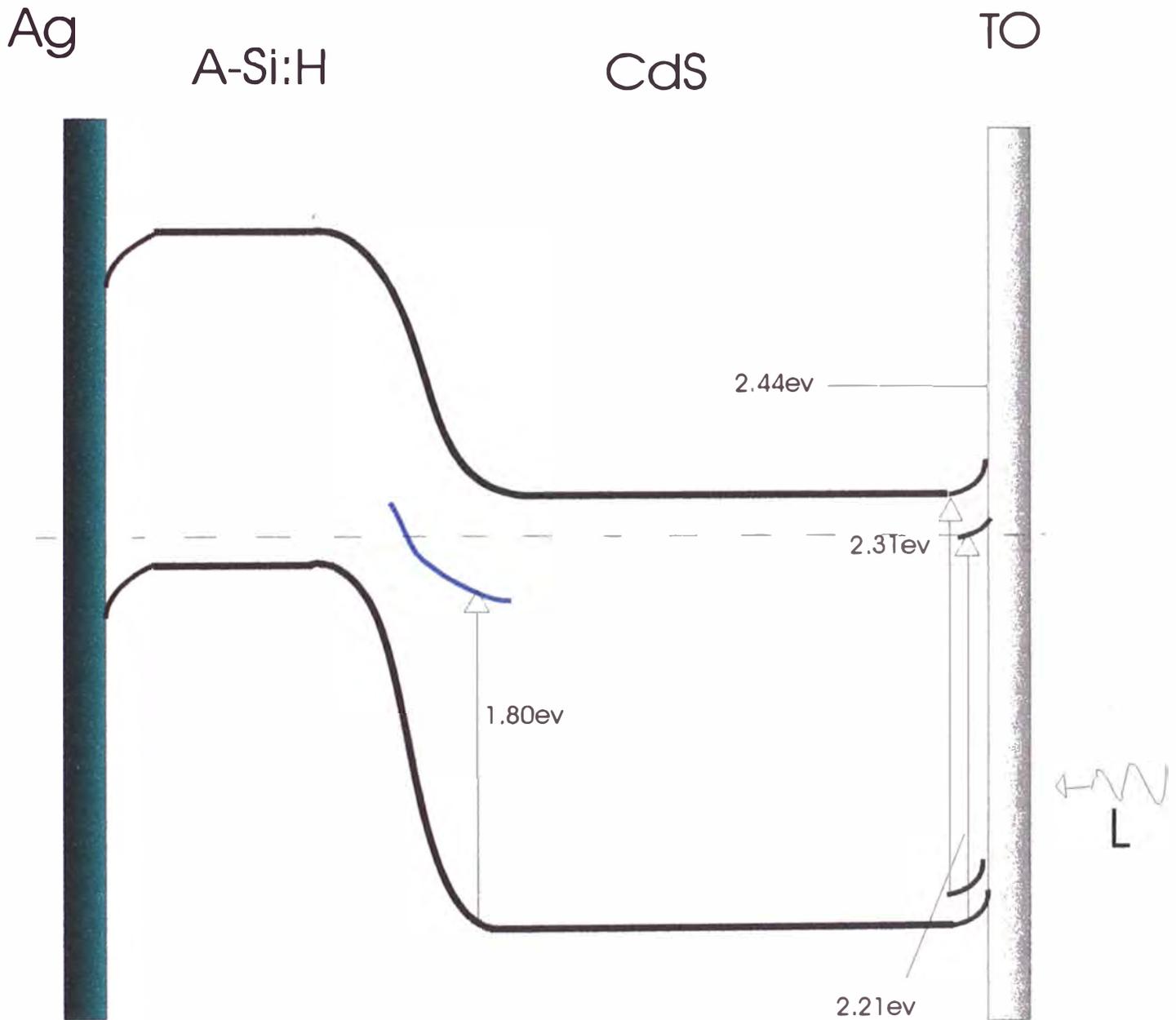


Fig. 4.7: Diagrama de energías obtenido para la muestra 3001

ESPECTRO 16N2
(PV) L / Ag / a-Si:H / CdS / TO

Q. Eff./L / Ag / a - Si:H / CdS / TO/G/ 16N2

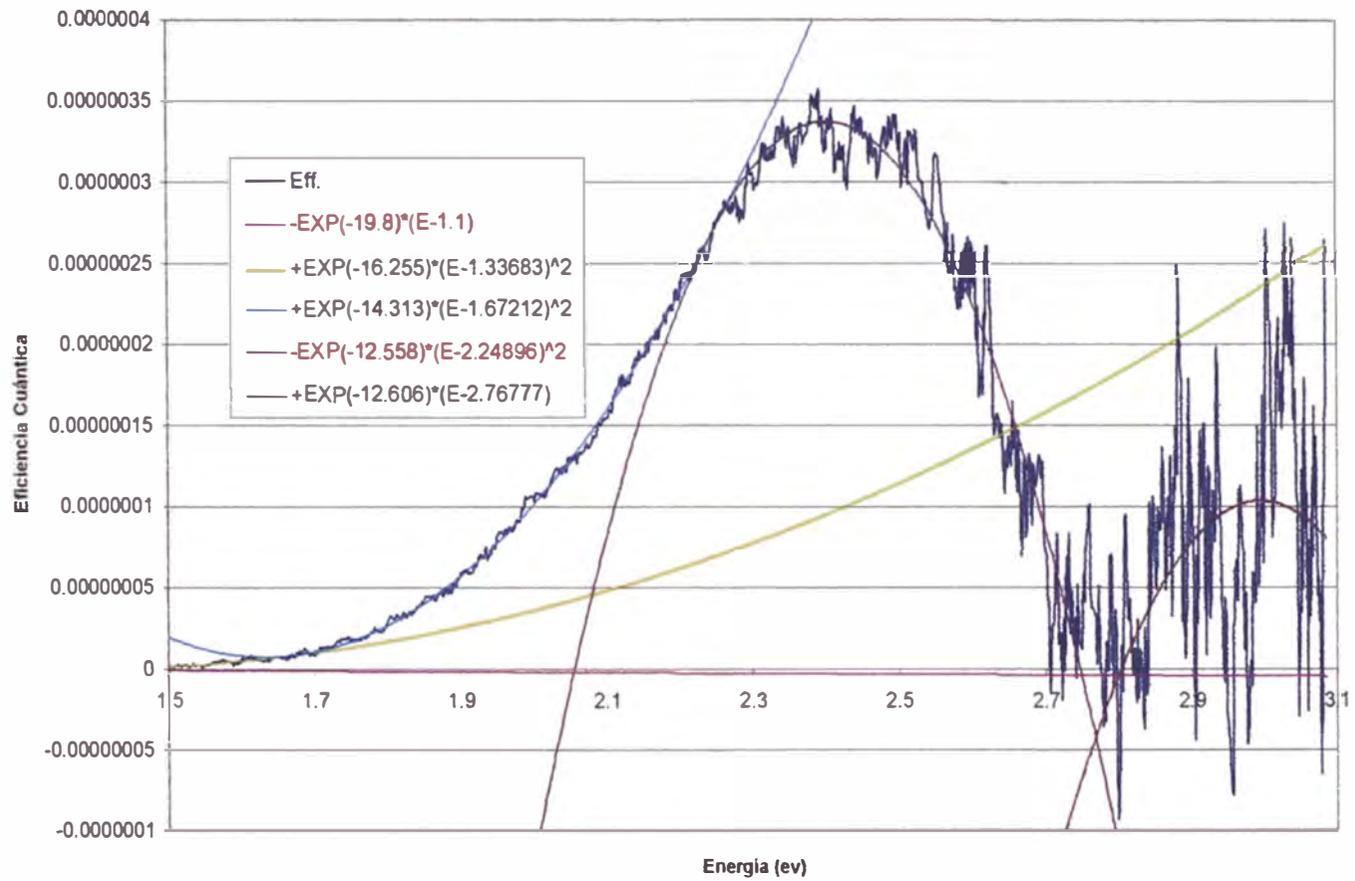


Fig.4.8: Espectro de fotocorriente muestra 16N2

RESULTADOS

De la linealización logarítmica de este espectro se observan las siguientes contribuciones a la curva de la eficiencia cuántica

Por tanto, de este espectro se observa:

□ Fotogeneración negativa : $n1 = -\exp(-15.5) \cdot (h\nu - 1.10)$ (4.15)

□ Fotogeneración positiva : $n2 = +\exp(-14.73) \cdot (h\nu - 1.34)^2$ (4.16)

□ Fotogeneración positiva : $n3 = +\exp(-8.76) \cdot (h\nu - 1.67)^2$ (4.17)

□ Fotogeneración negativa : $n4 = -\exp(-8.66) \cdot (h\nu - 2.25)^2$ (4.18)

□ Fotogeneración positiva : $n5 = +\exp(-4.97) \cdot (h\nu - 2.77)^2$ (4.19)

INTERPRETACIÓN

- -1.10eV

Este nivel corresponde al complemento de 1.08eV de la transición 1.30eV desde la banda de conducción según la referencia [10] en CdS.

Esta transición puede ser reconocida también en 11D1 y 31N1.

En todas estas situaciones se manifiesta en aSi:H/CdS.

En 7N1 se presenta como fotogeneración positiva y se le ubica en el lado de mayor eficiencia CdS/TO.

En el caso actual se le ubica en a-Si:H/CdS.

- +1.34eV.

Esta transición y 1.1eV pueden ser complementarios en el nivel 1.30eV de acuerdo a [10], sólo que éste está en un campo eléctrico opuesto distinto al del 1.1eV, como esta contribución es positiva, se le ubica en el lado de mayor eficiencia CdS/TO.

Esta transición se presenta también en 20 O2 y 19O1 en CdS/TO como un nivel trap 1.34eV desde la banda de valencia o 1.04eV desde la banda de conducción. En 11D1, 31N1 y 7N1 se manifiesta como su complementario.

Hay una referencia de 1.30eV desde la banda de valencia en [23, 20]. Se puede observar que en este caso se presentan ambas transiciones complementarias.

- +1.67eV

A pesar que en las referencias del a-Si:H hay una posibilidad en la referencia [5] para identificarlo como una manifestación en el silicio amorfo hidrogenado, el carácter altamente constructivo de esta contribución en la eficiencia nos inclina a decir que ésta tiene que producirse en el campo proporcionado por CdS/TO. Ahora en CdS hay una referencia en [29] para un nivel de atrapamiento de 0.73eV desde la banda de valencia, por lo cual, tenemos aquí la manifestación del complemento 1.65eV desde la banda de conducción.

También hay manifestaciones en 20 O2, 7N1 en CdS/TO,

- -2.25eV

En las referencias tenemos un nivel en CdS de 0.14eV desde la banda de conducción de acuerdo a [10] y[29]. Por lo que, tenemos aquí una manifestación de su complemento 2.24eV desde la banda de valencia. Por su contribución negativa se le sitúa en la región a-Si:H / CdS

Se presenta también en los casos:

19 O1 en CdS/TO.

En 20 O1, 30 O1, 19 O1, 7N1, 20 O2, y 20 O3.

TABLA 4.5: RESUMEN DE ENERGÍAS EN LA MUESTRA 16N2

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel participante</i>	<i>Nivel Encontrado en Referencias / eV</i>
1	1.1	Constructiva	1.28 : Trap CdS	1.30 [10]
2	1.34	Constructiva	1.34 : Trap CdS	1.30 [10]
3	1.67	Constructiva	0.71eV: Trap CdS	0.73 [29]
4	2.25	Constructiva	0.13: Trap CdS	0.14 [10][29]
5	2.77	Constructiva	2.77	No hay referencias

MODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 16N2

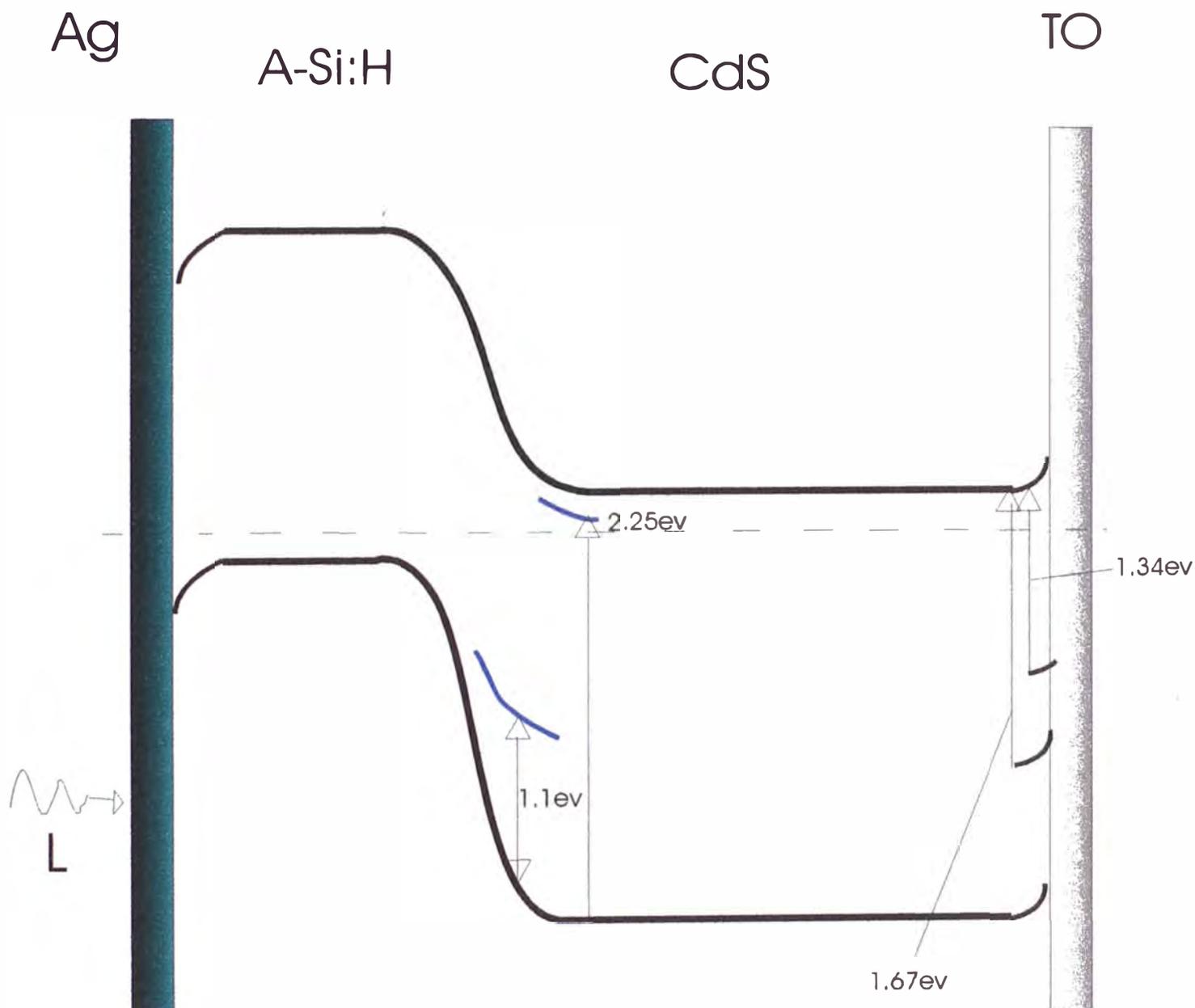


Fig. 4.9: Diagrama de energías obtenido para la muestra 16N2

ESPECTRO 7N1
(PV) L / TO / CdS / a-Si : H / Fe

7N1 PV LTO/CdS/a-Si:H/Fe

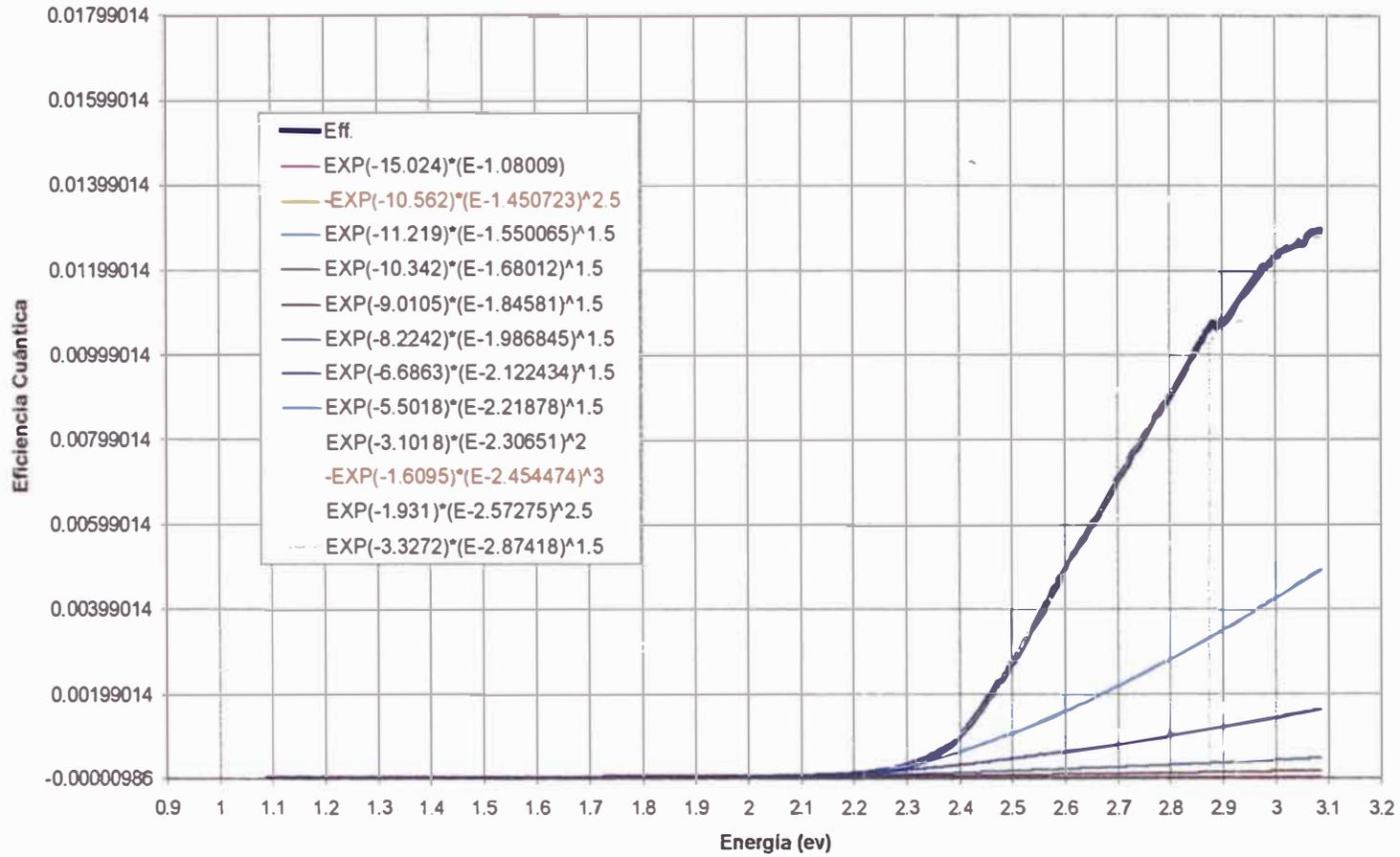


Fig.4.10: Espectro de fotocorriente de la muestra 7N1

RESULTADOS

Se observan las siguientes contribuciones a la curva de la eficiencia cuántica:

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n1 = +\exp(-15.024) \cdot (h\nu - 1.08) \quad (4.20)$$

$$\square \text{ Fotogeneración negativa : } n2 = -\exp(-10.562) \cdot (h\nu - 1.45)^{2.5} \quad (4.21)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n3 = +\exp(-11.219) \cdot (h\nu - 1.55)^{1.5} \quad (4.22)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n4 = +\exp(-10.342) \cdot (h\nu - 1.68)^{1.5} \quad (4.23)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n5 = +\exp(-9.0105) \cdot (h\nu - 1.85)^{1.5} \quad (4.24)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n6 = +\exp(-8.2242) \cdot (h\nu - 1.99)^{1.5} \quad (4.25)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n7 = +\exp(-6.6863) \cdot (h\nu - 2.12)^{1.5} \quad (4.26)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n8 = +\exp(-5.5018) \cdot (h\nu - 2.22)^{1.5} \quad (4.27)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n9 = +\exp(-3.1018) \cdot (h\nu - 2.31)^2 \quad (4.28)$$

$$\square \text{ Amortiguamiento: } n10 = -\exp(-1.6095) \cdot (h\nu - 2.45)^3 \quad (4.29)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n11 = +\exp(-1.931) \cdot (h\nu - 2.57)^{2.5} \quad (4.30)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n12 = +\exp(-3.3272) \cdot (h\nu - 2.87)^{1.5} \quad (4.31)$$

INTERPRETACIÓN

Salvo 1.45eV, y 1.85eV, que podrían bien pertenecer a A-Si:H, todas las demás energías ya son familiares con el CdS, de acuerdo a las referencias.

- +1.08eV

Coincide plenamente con el complemento del nivel 1.30eV debajo de la banda de conducción de la referencia [10].

Se presenta también en los casos con Au pero como fotogeneración negativa opuesto a la región de campo eléctrico activa CdS/TO, en este caso se muestra como fotogeneración positiva.

- -1.45eV

De acuerdo a [5], en el silicio amorfo hidrogenado hay una transición de 1.45eV debajo de la banda de conducción.

De lo que se puede estar seguro es que la contribución negativa a la eficiencia determina que esta transición se encuentre en la región de campo opuesto a la región de mayor actividad, por lo que, se le ubica en A-Si:H / CdS.

Casos en que se presenta:

En 20 O1 como 1.43eV en a-Si:H/CdS.

- +1.55eV

De esta contribución constructiva no se puede decir nada más que su ubicación es en el lado del CdS / TO de la mayor eficiencia.

Esta transición también se presenta en los siguientes casos:

En 20 O3 en a-Si:H/CdS.

En 19 O1 en CdS/TO.

- +1.68eV

Con el antecedente predominante que se reveló en 16N2, la probabilidad mayor se inclina a que es el complemento del nivel 0.73eV por encima de la banda de valencia en CdS [29].

Se debe mencionar que también hay un nivel en A-Si:H de 1.7eV según [5].

En el caso actual también se ubicará en CdS/TO.

- +1.85eV

Aparece también en 30 O1 con Ag, no hay más referencias, pero lo que tenemos aquí es una contribución constructiva, que lo descarta de la región A-Si:H / CdS, por lo que necesariamente lo situamos en CdS / TO, como nivel en CdS.

- +1.99eV

Por ser una contribución positiva se le sitúa en CdS / TO, por lo cual es un estado subgap en CdS. De acuerdo a [3] hay un nivel en CdS de 0.37eV por encima de la banda de valencia.

Así, esta contribución es el complemento 2.01eV desde la banda de conducción tomando en cuenta nuestra energía de discontinuidad en CdS de 2.38eV [15][16].

- +2.12eV

Es nivel correspondería al complemento 2.14eV del nivel entrampamiento de 0.24eV según [39]. Se le ubica también en CdS / TO.

- +2.22eV

Junto con el nivel 2.31eV proporcionan la mayor contribución a la eficiencia. Otra vez se manifiesta como complemento al nivel 0.14eV debajo de la BC [10] y [29].

- +2.31eV

Gran contribuyente a la eficiencia. Se manifiesta nuevamente el nivel 0.07eV por encima de la banda de valencia según [39].

- -2.45eV

Puede referirse a un nivel luminiscente como en 20 O2, 20O1, 19 O1; en 20 O3 se resuelven dos transiciones muy cercanas que no nos permite identificar la actual transición.

- +2.57eV

Se manifiesta también en 19 O1, 20 O2 con signos contrarios. Como en los casos anteriores corresponde a una transición luminiscente de carácter constructiva, razón por la cual no hay amortiguamiento en la eficiencia, antes bien,

la carga en transición es colectada antes que tenga lugar un proceso de recombinación luminiscente.

- +2.87eV

Se presenta también en 19 O1, 20 o2 con signo contrario. Aquí también sucede como en el caso anterior.

TABLA 4.6: RESUMEN DE ENERGÍAS EN LA MUESTRA 7N1

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel participante</i>	<i>Nivel Encontrado en Referencias / eV</i>
1	1.08	Constructiva	1.30 : Trap CdS	1.30 [10]
2	1.45	Constructiva	1.45 en A-Si:H	1.45 [5]
3	1.55	Constructiva	1.55 en CdS	No Referencias
4	1.68	Constructiva	0.70 : trap CdS	0.73 [29] en CdS [5] en A-Si:H
5	1.85	Constructiva	1.85 en CdS	No Referencias
6	1.99	Constructiva	0.39 en CdS	0.37 [3]
7	2.12	Constructiva	0.26 en CdS	0.24 [39]
8	2.22	Constructiva	0.16 en CdS	0.14 [10][29]
9	2.31	Constructiva	0.07 en CdS	0.07 [39]
10	2.45	Destruyctiva	Tran. Lum..	-----
11	2.57	Constructiva	Tran.Lum.	-----
12	2.87	Constructiva	Tran.Lum.	-----

MODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 7N1

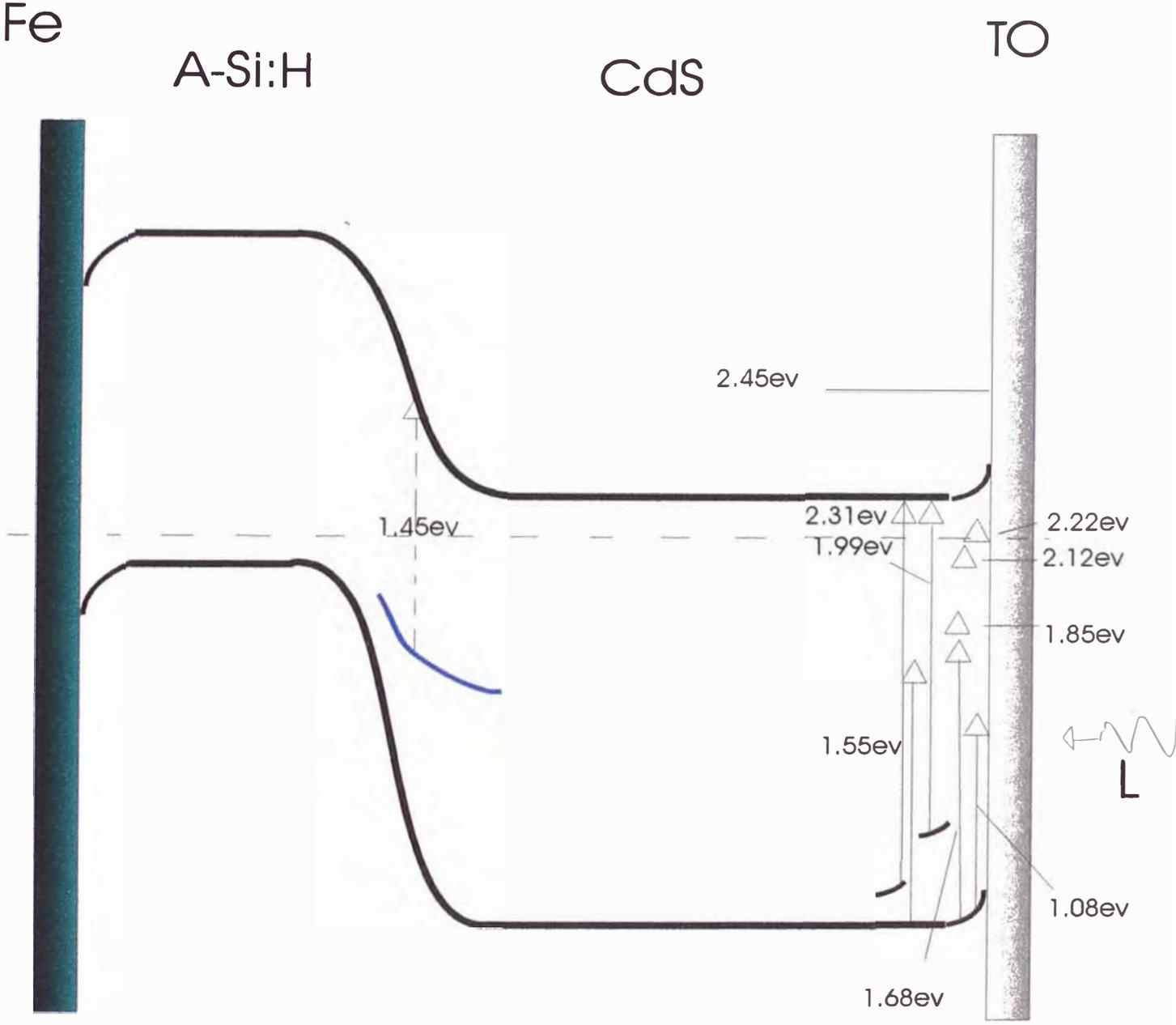


Fig. 4.11: Diagrama de energía para la muestra 7N1

ESPECTRO 7N2
(PV) L / Fe / a-Si:H / CdS / TO

Q. Eff./Luz/Fel/a-Si:H/CdS/TO/G/7N2

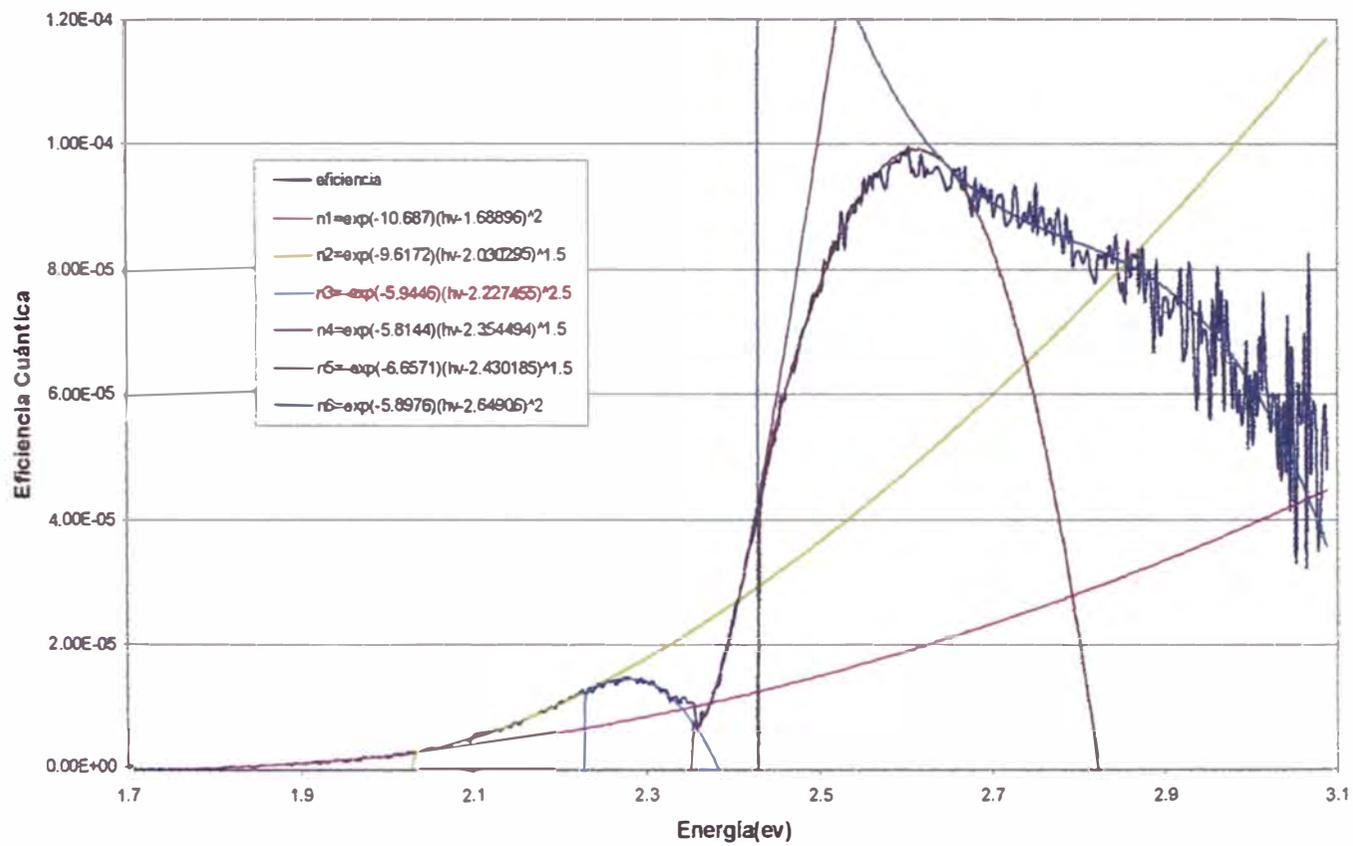


Fig.4.12:Espectro de fotocorriente de la muestra 7N2

RESULTADOS

Se observan las siguientes contribuciones a la curva de eficiencia cuántica:

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n1 = + \exp(-10.67) * (h\nu - 1.69)^2 \quad (4.32)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n2 = + \exp(-9.62) * (h\nu - 2.03)^{1.5} \quad (4.33)$$

$$\square \text{ Fotogeneración negativa : } n3 = - \exp(-5.94) * (h\nu - 2.23)^{2.5} \quad (4.34)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n4 = + \exp(-5.81) * (h\nu - 2.35)^{1.5} \quad (4.35)$$

$$\square \text{ Amortiguamiento : } n5 = - \exp(-6.66) * (h\nu - 2.43)^{1.5} \quad (4.36)$$

$$\square \text{ Fotogeneración positiva : } n6 = + \exp(-5.90) * (h\nu - 2.65)^2 \quad (4.37)$$

INTERPRETACIÓN

- +1.7eV

Esta transición es de naturaleza constructiva en la muestra. Tenemos una referencia en [5] en A-Si:H por encima de la BV; pero predomina el hecho que aparece en el espectro complementario 7N1, donde se dijo que esta transición es el complemento del nivel 0.73eV por encima de la banda de valencia en CdS [29].

Manteniendo la coherencia con 7N1 y 16N2 se le ubica también en CdS/TO.

- +2.03eV

Se le ubica en CdS / TO en coherencia con su complemento 7N1.

Según la referencia [3] hay un nivel de 0.37eV por encima de la BV, lo cual indica que estamos detectando su transición complementaria.

- -2.23eV

También se manifiesta en su caso complementario 7N1, pero aquí es una contracorriente que debe originarse en un campo opuesto a donde se atribuye mayor eficiencia. Se le ubica en A-Si:H / CdS.

Otra vez se manifiesta como complemento al nivel 0.14eV debajo de la BC [10] y [29].

Aparecen también en 20 O1, 20 O3 en a-Si:H/CdS

- +2.35eV

Se presenta dudas si se refiere a la transición 2.30eV (con lo cual aparentemente guardaría coherencia con el espectro complementario 7N1) o 2.38eV en CdS, por su carácter positivo se le ubica en la región CdS/TO.

- -2.43eV

Se presenta también en 7N1 como amortiguamiento a la eficiencia.

- 2.65eV

También se presenta en 20 O1.

TABLA 4.7: RESUMEN DE ENERGÍAS EN LA MUESTRA 7N2

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel participante</i>	<i>Nivel Encontrado en Referencias / eV</i>
1	1.7	Constructiva	0.68 en CdS	0.73 [29]
2	2.03	Constructiva	0.35 en CdS	0.37 [3]
3	2.23	Constructiva	0.15 : Trap.	0.14eV [10][29]
4	2.35	Constructiva	Sin comentario	Sin comentario
5	2.43	Destructiva	2.43 : Tran.Lum.	Sin comentario
6	2.65	Destructiva	Tran.Lum. CdS	Sin comentario

MODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 7N2

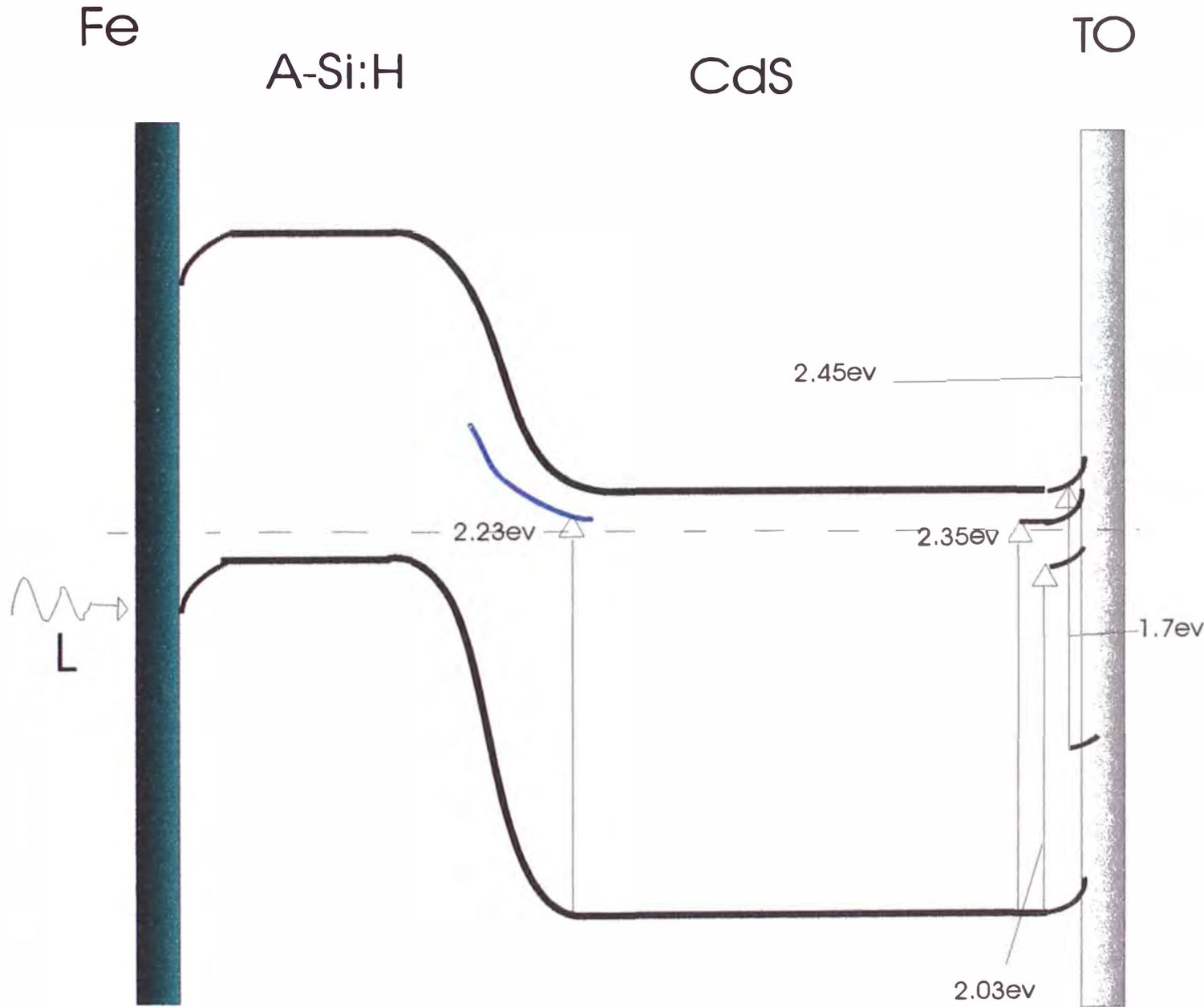


Fig. 4.13: Diagrama de energías obtenida para la muestra 7N2

ESPECTRO 20 O2
(PV) L / TO / CdS / a-Si : H / Al

2002 PV LTO/CdS/a-Si:H/Al

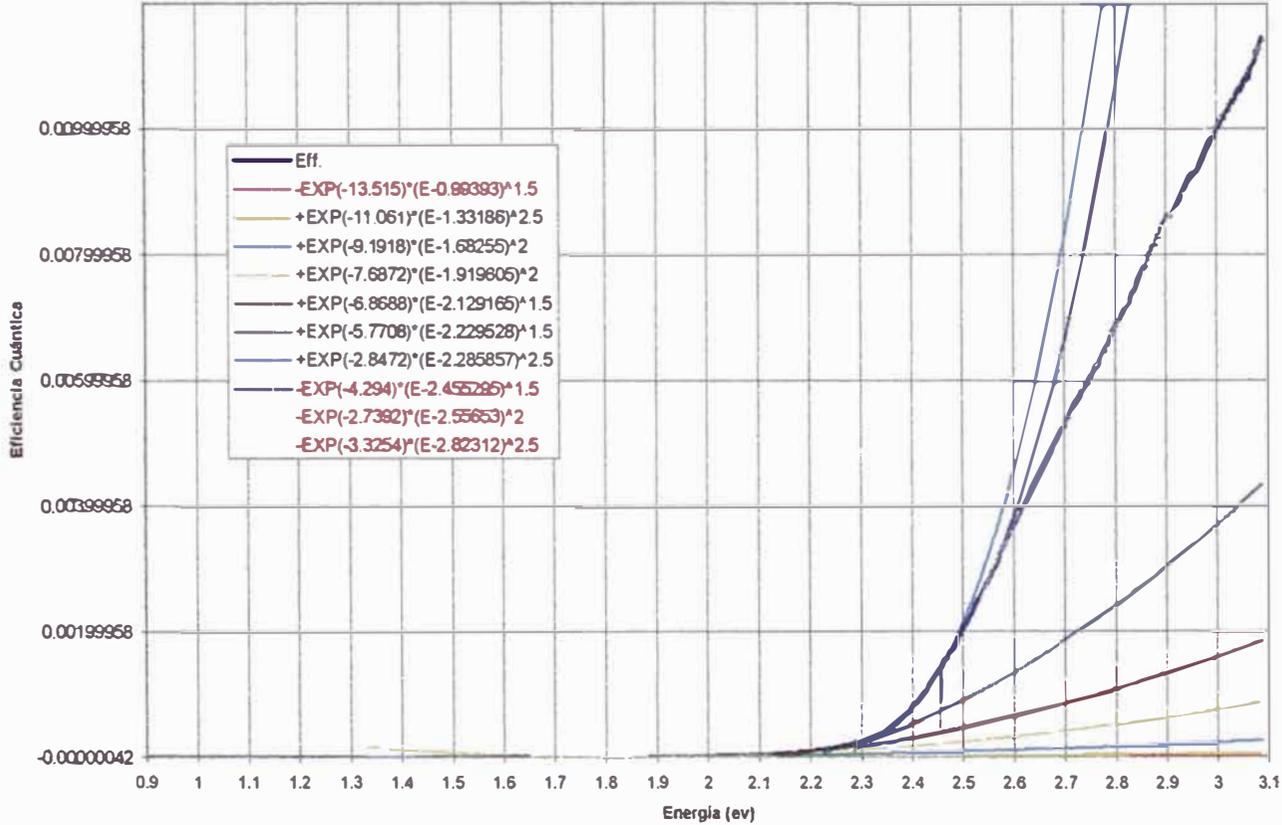


Fig.4.14:Espectro de fotocorriente de la muestra 2002

RESULTADOS

Tenemos aquí las siguientes contribuciones:

- Fotogeneración negativa : $n1 = -\exp(-13.515) \cdot (h\nu - 0.99)^{1.5}$ (4.38)
- Fotogeneración positiva : $n2 = +\exp(-11.061) \cdot (h\nu - 1.33)^{2.5}$ (4.39)
- Fotogeneración positiva : $n3 = +\exp(-9.1918) \cdot (h\nu - 1.68)^2$ (4.40)
- Fotogeneración positiva : $n4 = +\exp(-7.6872) \cdot (h\nu - 1.92)^2$ (4.41)
- Fotogeneración positiva : $n5 = +\exp(-6.8688) \cdot (h\nu - 2.13)^{1.5}$ (4.42)
- Fotogeneración positiva : $n6 = +\exp(-5.7708) \cdot (h\nu - 2.23)^{1.5}$ (4.43)
- Fotogeneración positiva : $n7 = +\exp(-2.8472) \cdot (h\nu - 2.29)^{2.5}$ (4.44)
- Fotogeneración negativa : $n8 = -\exp(-4.294) \cdot (h\nu - 2.46)^{1.5}$ (4.45)
- Fotogeneración positiva : $n9 = +\exp(-2.7392) \cdot (h\nu - 2.56)^2$ (4.46)
- Fotogeneración positiva : $n10 = +\exp(-3.3254) \cdot (h\nu - 2.82)^{2.5}$ (4.47)

INTERPRETACIÓN

- -0.99eV

Es una contribución negativa a la eficiencia, por lo que se le ubica en A-Si:H / CdS.

En las referencias para CdS no encontramos un nivel cercano a ésta. Pero en A-Si: H hay una referencia en [12] para un nivel 1.0eV.

- +1.33eV

Esta contribución la reconocemos con el nivel 1.30eV [10] desde la BC en CdS. Se le ubica en la región de mayor eficiencia CdS / TO.

Se presenta también con Cu en 19 O1 para la misma configuración reversa.

También se presenta en los casos 31N1, 11D1 en la forma del complementario 1.04eV desde la banda de valencia pero en a-Si:H/CdS.

- +1.68eV

Como en los casos 7N2, 7N1,16N2, lo relacionamos al complemento del nivel 0.73eV por encima de la banda de valencia en CdS [29].

- 1.92eV

No lo identificamos con ninguna referencia, pero por su contribución positiva lo ubicamos en la región del CdS / TO.

- 2.13eV

Esta transición ya es muy conocida en CdS, correspondería al complemento 2.14eV del nivel de atrapamiento de 0.24eV según [39] en CdS. Se le ubica también en CdS / TO.

- +2.23eV

Tiene una importante contribución a la eficiencia y junto con el nivel 2.29eV proporcionan la mayor contribución a la eficiencia.

Otra vez se manifiesta como complemento al nivel 0.14eV debajo de la banda de conducción [10] y [29].

- +2.29eV

Este nivel es un gran contribuyente a la eficiencia. Se manifiesta nuevamente el nivel 0.07eV por encima de la banda de valencia según [39].

- -2.46eV

A partir de esta transición se produce un amortiguamiento en la eficiencia de 20 O2, lo asociamos a pérdida de energía por rápidas recombinaciones luminiscentes.

TABLA 4.8: RESUMEN DE ENERGÍAS EN LA MUESTRA 20 O2

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel participante</i>	<i>Nivel Encontrado en Referencias / eV</i>
1	0.99	Constructiva	0.99 en A-Si:H	1.0 eV [12]
2	1.33	Constructiva	1.33 en CdS	1.30 eV [10]
3	1.68	Constructiva	0.70 en CdS	0.73eV [29]
4	1.92	Constructiva	—	No Referencias
5	2.13	Constructiva	0.25 en CdS	0.24 [39]
6	2.23	Constructiva	0.15 : Trap.CdS	0.14 [10][29]
7	2.29	Constructiva	0.07 en CdS	0.09 [39]
8	2.46	Destruccion	2.47 Tran.Lum.	No Referencias
9	2.56	Destruccion	Tran.Lum.	No Referencias
10	2.82	Destruccion	Tran.Lum.	No Referencias

MODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 2002

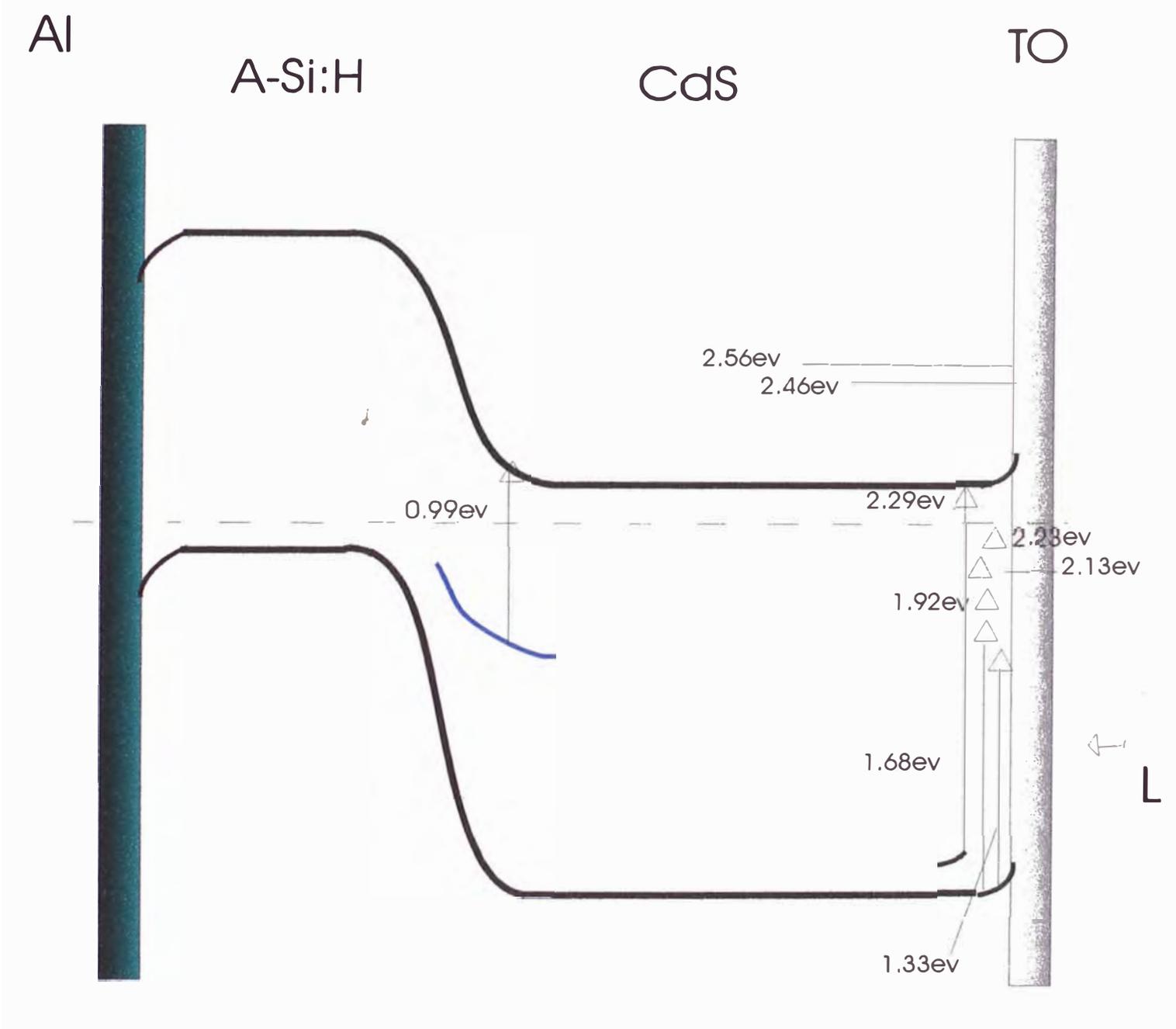


Fig. 4.15: Diagrama de energía para la muestra 2002

ESPECTRO 20 O3
(PV) L / Al / a-Si:H / CdS / TO

2003 PV L/AI/a-Si:H/CdS/TO

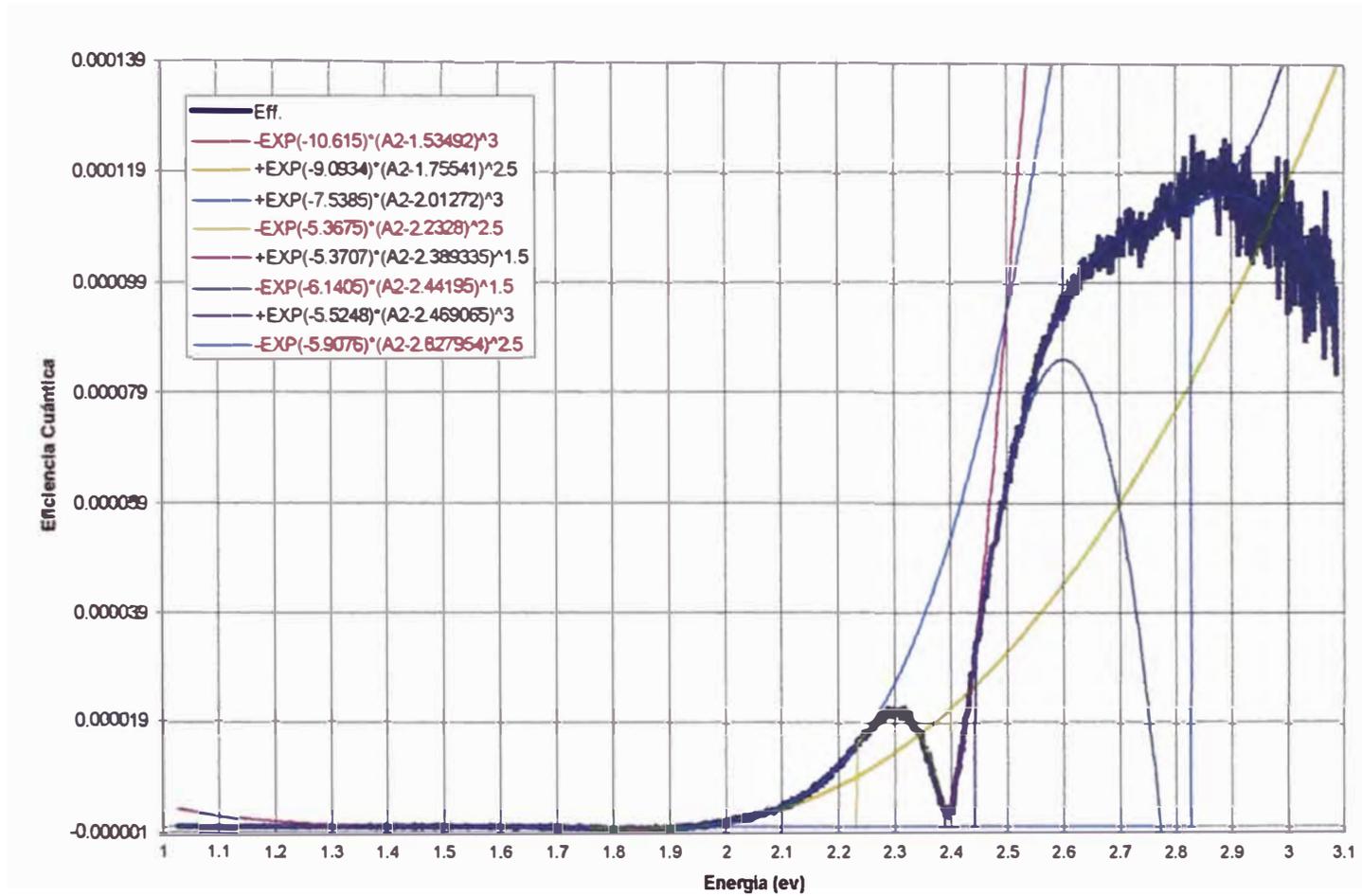


Fig.4.16: Espectro de fotocorriente de la muestra 2003

RESULTADOS

- Fotogeneración negativa : $n1 = -\exp(-10.615) \cdot (h\nu - 1.53)^3$ (4.48)
- Fotogeneración positiva : $n2 = +\exp(-9.0934) \cdot (h\nu - 1.76)^{2.5}$ (4.49)
- Fotogeneración positiva : $n3 = +\exp(-7.5385) \cdot (h\nu - 2.01)^3$ (4.50)
- Fotogeneración negativa : $n4 = -\exp(-5.3675) \cdot (h\nu - 2.23)^{2.5}$ (4.51)
- Fotogeneración positiva : $n5 = +\exp(-5.3707) \cdot (h\nu - 2.39)^{1.5}$ (4.52)
- Fotogeneración negativa: $n6 = -\exp(-6.1405) \cdot (h\nu - 2.44)^{1.5}$ (4.53)
- Fotogeneración positiva $n7 = +\exp(-5.5248) \cdot (h\nu - 2.47)^3$ (4.54)
- Fotogeneración negativa $n8 = -\exp(-5.9076) \cdot (h\nu - 2.83)^{2.5}$ (4.55)

INTERPRETACIÓN

- 1.53eV

Se produce un caso similar en 19 O1 en que se le ubica en CdS/TO, pero aquí en 20 O3 es negativo, por lo que se le ubica en la región de campo eléctrico opuesto a-Si:H/CdS. No hay más referencias.

- +1.76eV

No hay referencias respecto a esta transición, se le ubica tentativamente en CdS / TO por la alta eficiencia de la región.

- 2.01eV

Según la referencia [3] hay un nivel de 0.37eV por encima de la banda de valencia en CdS, lo cual indica que estamos detectando su transición complementaria.

- -2.23eV

Esta misma transición se manifiesta en el espectro complementario 20 O2, pero aquí es una contracorriente, razón por la cual se le ubica en A-Si:H / CdS.

Esta transición es complemento al nivel 0.14eV debajo de la banda de conducción en CdS [10] y [29].

- +2.39eV

Corresponde a la transición de la discontinuidad del CdS, según las referencias [15] y [16].

Esta transición es la más contribución da a la eficiencia para esta muestra. No se ha presentado en otros casos en unión con silicio amorfo hidrogenado.

TABLA 4.9: RESUMEN DE ENERGÍAS EN LA MUESTRA 2003

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel participante</i>	<i>Nivel Encontrado en Referencias / eV</i>
1	1.53	Destructiva	En CdS	No referencias
2	1.76	Constructiva	En CdS	No referencias
3	2.01	Constructiva	0.37 en CdS	0.37 [3]
4	2.23	Destructiva	0.15 en CdS	0.14 [10] [29]
5	2.39	Constructiva	2.39 Gap CdS	2.38 [15] [16]
6	2.44	Destructiva	Tran. Lum.	No referencias
7	2.47	Constructiva	Tran. Lum.	No referencias
8	2.83	Destructiva	Tran. Lum.	No referencias

MODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 2003

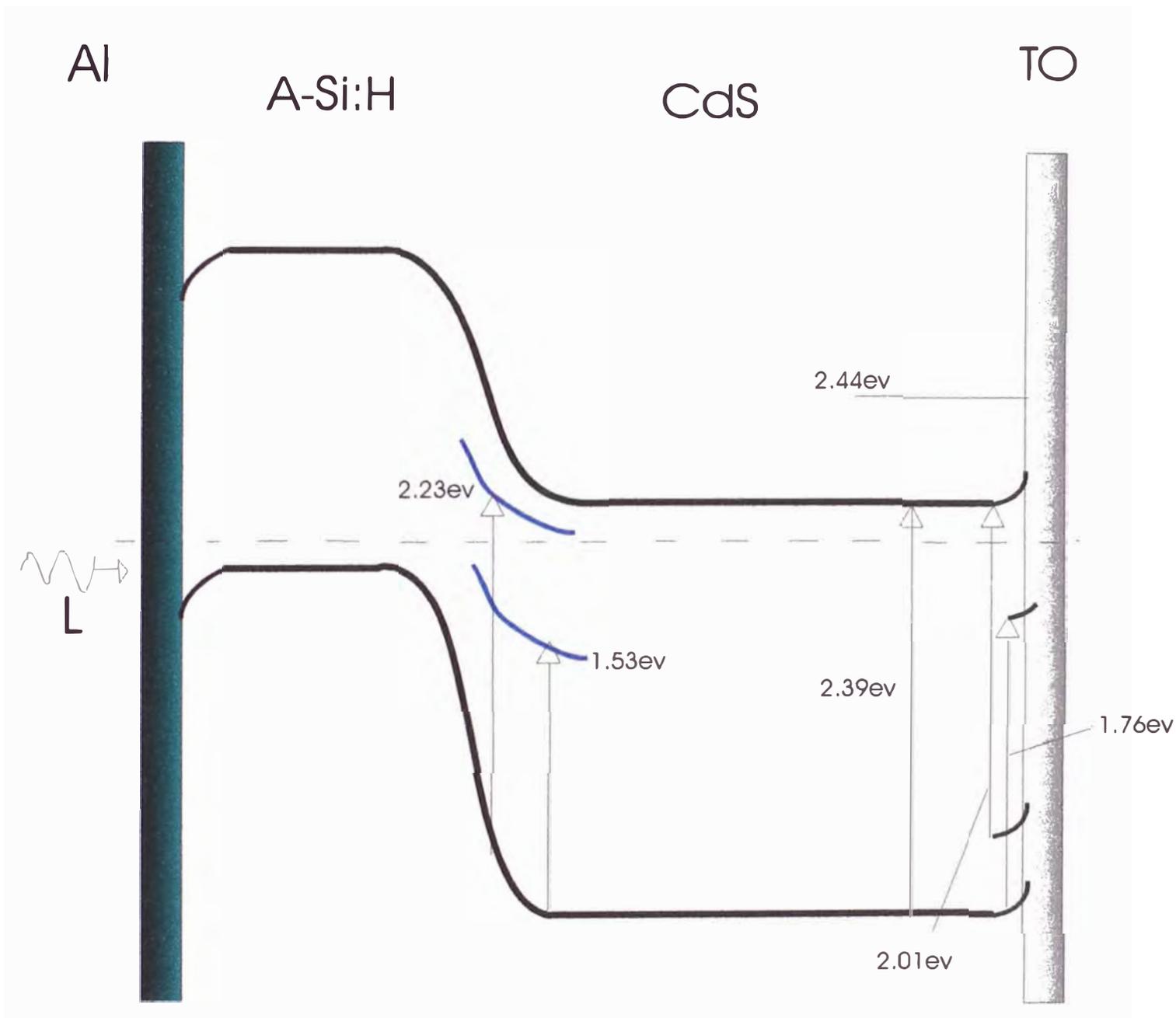


Fig. 4.17: Diagrama de energías obtenido para la muestra 2003

ESPECTRO 19 01
(PV) L / TO / CdS / a-Si : H / Cu

1901 PV LTO/CdS/a-Si:H/Cu

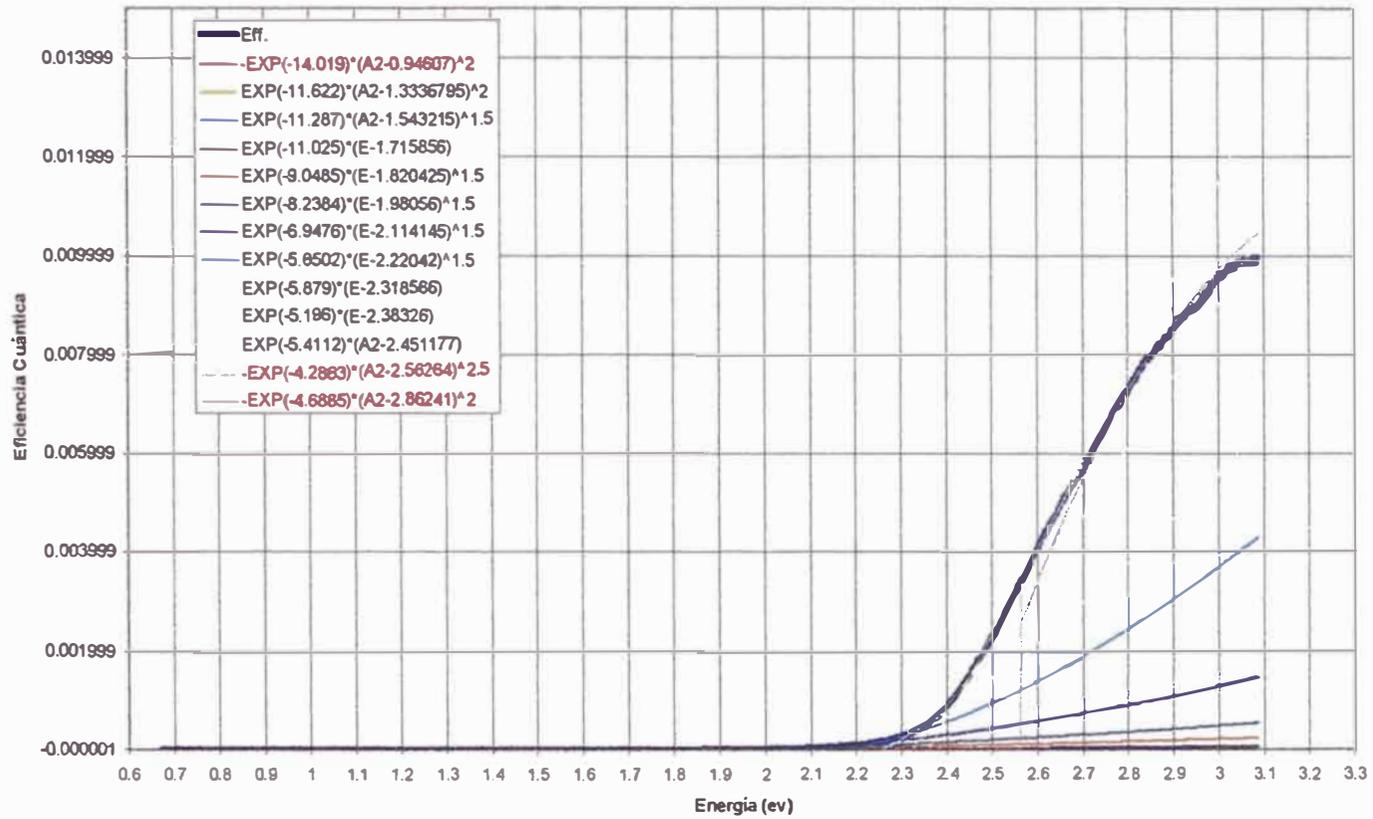


Fig.4.18: Espectro de fotocorriente de la muestra 1901

RESULTADOS

- Fotogeneración negativa : $n1 = -\exp(-14.019) \cdot (h\nu - 0.94607)^2$ (4.56)
- Fotogeneración positiva : $n2 = +\exp(-11.622) \cdot (h\nu - 1.33)^2$ (4.57)
- Fotogeneración positiva : $n3 = +\exp(-11.287) \cdot (h\nu - 1.54)^{1.5}$ (4.58)
- Fotogeneración positiva : $n4 = +\exp(-11.025) \cdot (h\nu - 1.72)$ (4.59)
- Fotogeneración positiva : $n5 = +\exp(-9.0485) \cdot (h\nu - 1.82)^{1.5}$ (4.60)
- Fotogeneración positiva : $n6 = +\exp(-8.2384) \cdot (h\nu - 1.98)^{1.5}$ (4.61)
- Fotogeneración positiva : $n7 = +\exp(-6.9476) \cdot (h\nu - 2.11)^{1.5}$ (4.62)
- Fotogeneración positiva : $n8 = +\exp(-5.6502) \cdot (h\nu - 2.22)^{1.5}$ (4.63)
- Fotogeneración positiva : $n9 = +\exp(-5.879) \cdot (h\nu - 2.32)$ (4.64)
- Fotogeneración positiva : $n10 = +\exp(-5.196) \cdot (h\nu - 2.38)$ (4.65)
- Fotogeneración positiva : $n11 = +\exp(-5.4112) \cdot (h\nu - 2.45)$ (4.66)
- Amortiguamiento : $n12 = -\exp(-4.2863) \cdot (h\nu - 2.56)^{2.5}$ (4.67)
- Amortiguamiento : $n13 = -\exp(-4.6885) \cdot (h\nu - 2.86)^2$ (4.68)

INTERPRETACIÓN

- -0.95 eV.

Es una contribución negativa a la eficiencia, por lo que se le ubica en A-Si:H / CdS. En 20 O1 se presenta un nivel 0.99eV, la cual podría ser ésta, pero no podemos decir nada más. Por otro lado en 20 O1 se observa claramente que junto al nivel 1.43eV forman el gap del CdS, por lo que se atribuirá este nivel al CdS.

- +1.33eV

Como en 20 O2, esta contribución la reconocemos con el nivel 1.30eV [10] desde la BC en CdS. Se le ubica en la región de mayor eficiencia CdS / TO.

- +1.54eV

No hay una referencia para este valor, pero al ser su contribución positiva para la actual configuración de muestra tentativamente lo situamos en CdS / TO.

- +1.72eV

También se registra en 11D1 pero la respuesta de la configuración con Au la sitúa en la región de campo eléctrico opuesto a-Si:H/CdS.

En este caso 19 O1 se tiene una contribución positiva que permite situarlo en la región predominante CdS/TO.

- +1.82eV

No hay referencias previas a esta transición positiva, ni otros casos en que se manifieste, se le ubica tentativamente en la región activa para incidencia reversa CdS/TO.

- +1.98eV

Como en 20 O3, según la referencia [3] hay un nivel de 0.37eV por encima de la BV en CdS, lo cual indica que estamos detectando su transición complementaria.

- +2.11eV

Esta contribución correspondería al complemento 2.14eV del nivel trap de 0.24eV según [39] en CdS. Se le ubica también en CdS / TO..

- +2.22eV

Tiene una importante contribución a la eficiencia, se manifiesta como complemento al nivel 0.14eV debajo de la banda de conducción [10] y [29].

- +2.32eV

Se manifiesta nuevamente el nivel 0.07eV por encima de la BV según [39].

- +2.38eV

Se presenta aquí como una energía de activación de fotogeneración, corresponde a la transición banda-banda en Cd según [15] y [16]

- +2.45eV

Se manifiesta aquí como fotogeneración positiva, que la transición sea positiva indica que la carga es arrastrada por el campo eléctrico de la región CdS/TO antes que pueda recombinarse en el material y manifestar luminiscencia.

TABLA 4.10: RESUMEN DE ENERGÍAS EN LA MUESTRA 19 O1

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel participante</i>	<i>Nivel Encontrado en Referencias / eV</i>
1	0.95	Constructiva	En CdS	No referencias.
2	1.33	Constructiva	1.33 en CdS	1.30 [10].
3	1.54	Constructiva	En CdS	No referencias
4	1.72	Constructiva	_____	No referencias
5	1.82	Constructiva	_____	No Referencias
6	1.98	Constructiva	0.40 en CdS	0.37 [3]
7	2.11	Constructiva	0.27 en CdS	0.24eV [39]
8	2.22	Constructiva	0.16 en CdS	0.14 [10][29]
9	2.32	Constructiva	0.06 en CdS	0.07 [39]
10	2.38	Constructiva	2.38 gap del CdS	2.38 [15] [16]
11	2.45	Constructiva	Tran. Lum.	No referencias
12	2.56	Destructiva	Tran. Lum.	No referencias
13	2.86	Destructiva	Tran. Lum.	No referencias

MODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 19 01

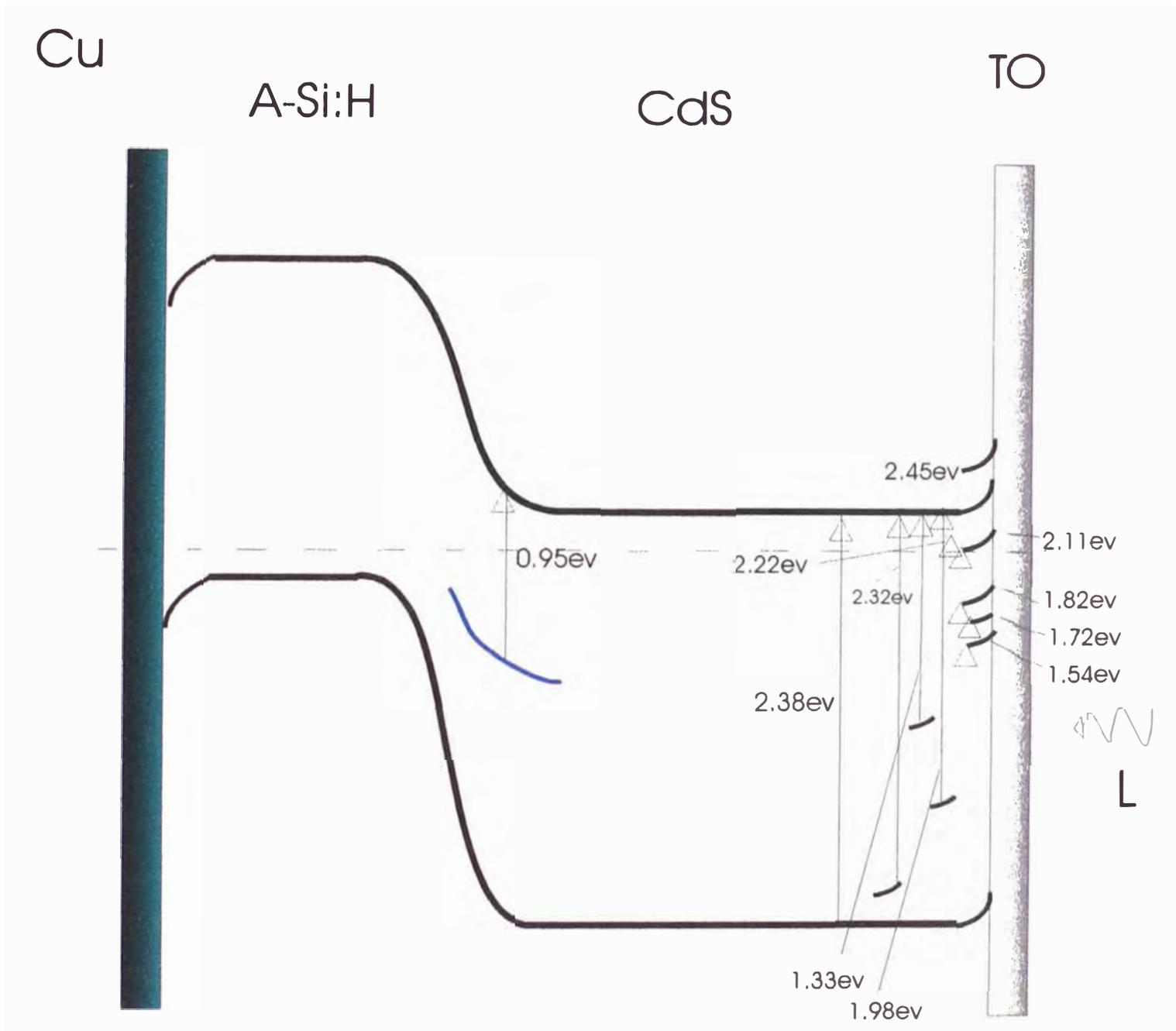


Fig. 4.19: Diagrama de energía para la muestra 1901

ESPECTRO 20 O1
(PV) L / Cu / a-Si:H / CdS / TO

20 01 PV L/Cu/a-Si:H/CdS/TO

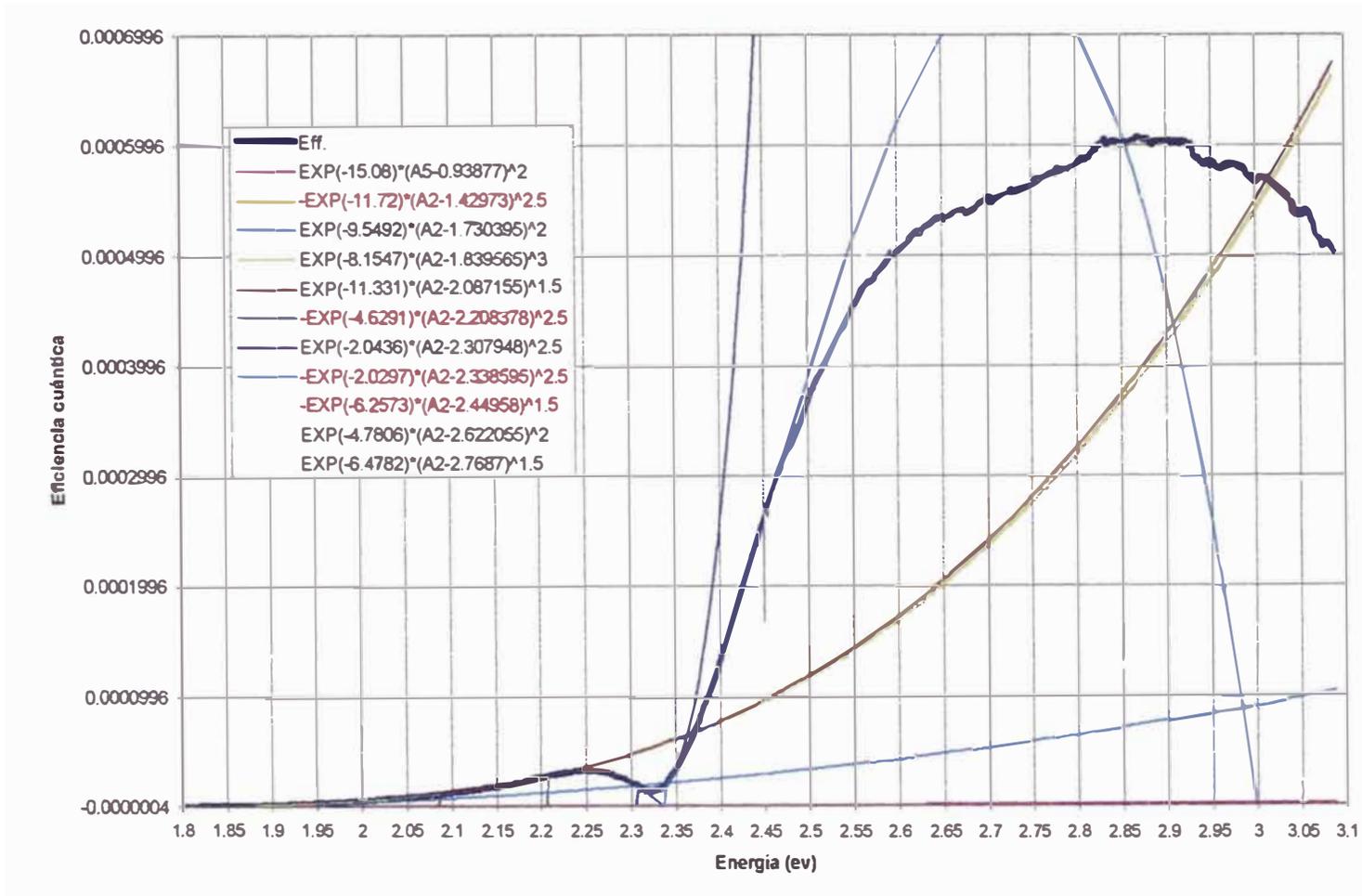


Fig.4.20: Espectro de fotocorriente de la muestra 2001

RESULTADOS

- Fotogeneración positiva : $n1 = +\exp(-15.08) \cdot (h\nu - 0.94)^2$ (4.69)
- Fotogeneración negativa : $n2 = -\exp(-11.72) \cdot (h\nu - 1.43)^{2.5}$ (4.70)
- Fotogeneración positiva : $n3 = +\exp(-9.5492) \cdot (h\nu - 1.73)^2$ (4.71)
- Fotogeneración positiva : $n4 = +\exp(-8.1547) \cdot (h\nu - 1.84)^3$ (4.72)
- Fotogeneración positiva : $n5 = +\exp(-11.331) \cdot (h\nu - 2.09)^{1.5}$ (4.73)
- Fotogeneración negativa: $n6 = -\exp(-4.6291) \cdot (h\nu - 2.21)^{2.5}$ (4.74)
- Fotogeneración positiva $n7 = +\exp(-2.0436) \cdot (h\nu - 2.31)^{2.5}$ (4.75)
- Fotogeneración negativa $n8 = -\exp(-2.0297) \cdot (h\nu - 2.34)^{2.5}$ (4.76)
- Amortiguamiento : $n9 = -\exp(-6.2573) \cdot (h\nu - 2.45)^{1.5}$ (4.77)
- Fotogeneración positiva : $n10 = +\exp(-4.7806) \cdot (h\nu - 2.62)^2$ (4.78)
- Fotogeneración positiva : $n11 = +\exp(-6.4782) \cdot (h\nu - 2.77)^{1.5}$ (4.79)

INTERPRETACIÓN

- +0.94eV

Se presenta nuevamente esta transición como en su caso complementario 19O1, sólo que esta vez su carácter es de una fotogeneración positiva.

Se le ubica esta vez en la región más activa CdS/TO para mantener la coherencia.

- -1.43eV

Esta transición, con el nivel 0.94, forman el gap del CdS; esto apoya la hipótesis que es un nivel de atrapamiento en CdS.

- +1.73eV

Se presenta también en su caso complementario 19 O1 ubicándose en CdS/TO. No hay referencias.

- +1.84eV

Se presenta también en su caso complementario 19 O1, no hay otra referencia para este caso, se le ubica también en CdS/TO.

- +2.09eV

En el caso complementario para esta muestra se obtuvo un valor 2.11 eV, lo cual podría indicarse que se trata del mismo nivel, de este modo, esta contribución correspondería al complemento 2.14eV del nivel de atrapamiento de 0.24eV según [1] en CdS. Se le ubica también en CdS / TO..

- -2.21eV

En el caso complementario también aparece como +2.22eV, se manifiesta como complemento al nivel 0.14eV debajo de la banda de conducción [10] y [29].

- +2.31eV

Se manifiesta aquí nuevamente el nivel 0.07eV por encima de la banda de valencia según [39].

- -2.34eV

Es una fotogeneración negativa que no se observa fácilmente en otros casos, debido probablemente a su carácter débil que no es fácilmente resuelto.

- -2.45eV

Aparece también en el caso complementario 19 O1, pero aquí se presenta como amortiguamiento.

TABLA 4.11: RESUMEN DE ENERGÍAS EN LA MUESTRA 20 O1

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel participante</i>	<i>Nivel Encontrado en Referencias / eV</i>
1	0.94	Constructiva	0.95 en CdS	No ref.
2	1.43	Destructiva	0.95 en CdS	No ref.
3	1.73	Constructiva	_____	No ref.
4	1.84	Constructiva	_____	No ref.
5	2.09	Constructiva	0.29 en CdS	0.24 [39]
6	2.21	Destructiva	0.17 : Trap CdS	0.14 [10] [29]
7	2.31	Constructiva	0.07 en CdS	0.07 [39]
8	2.34	Destructiva	En CdS	No ref.
9	2.45	Destructiva	Tran.Lum.	No Ref.
10	2.62	Constructiva	Tran.Lum.	No Ref.
11	2.77	Constructiva	Tran.Lum.	No Ref.

ODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 20 01

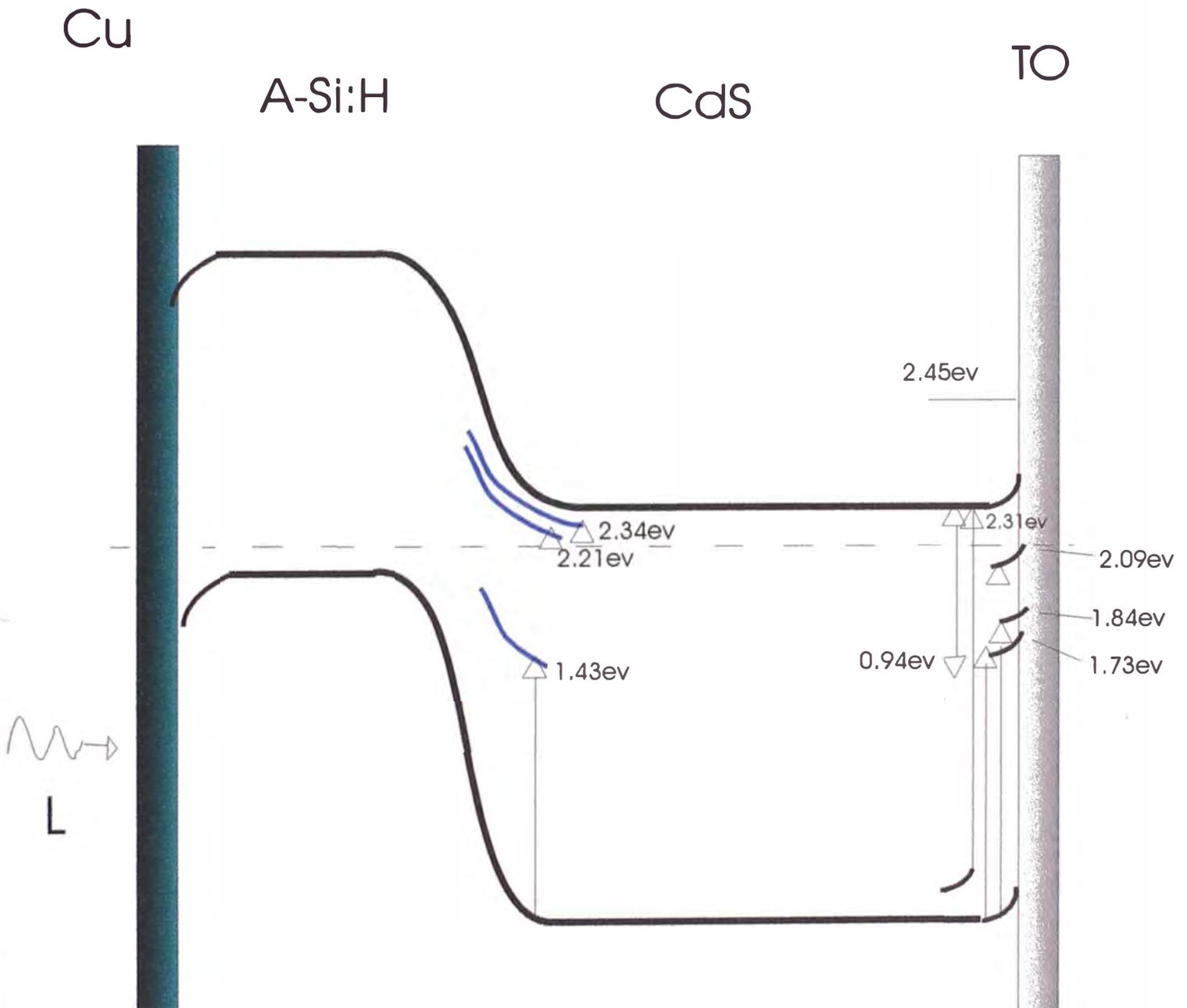


Fig. 4.21: Diagrama de energía para la muestra 2001

ESPECTRO 22D3
(PV) L / TO / CdS / a-Si : H / In

Q. Eff./Luz/G/To/CdS/a-Si:H/In/22D3

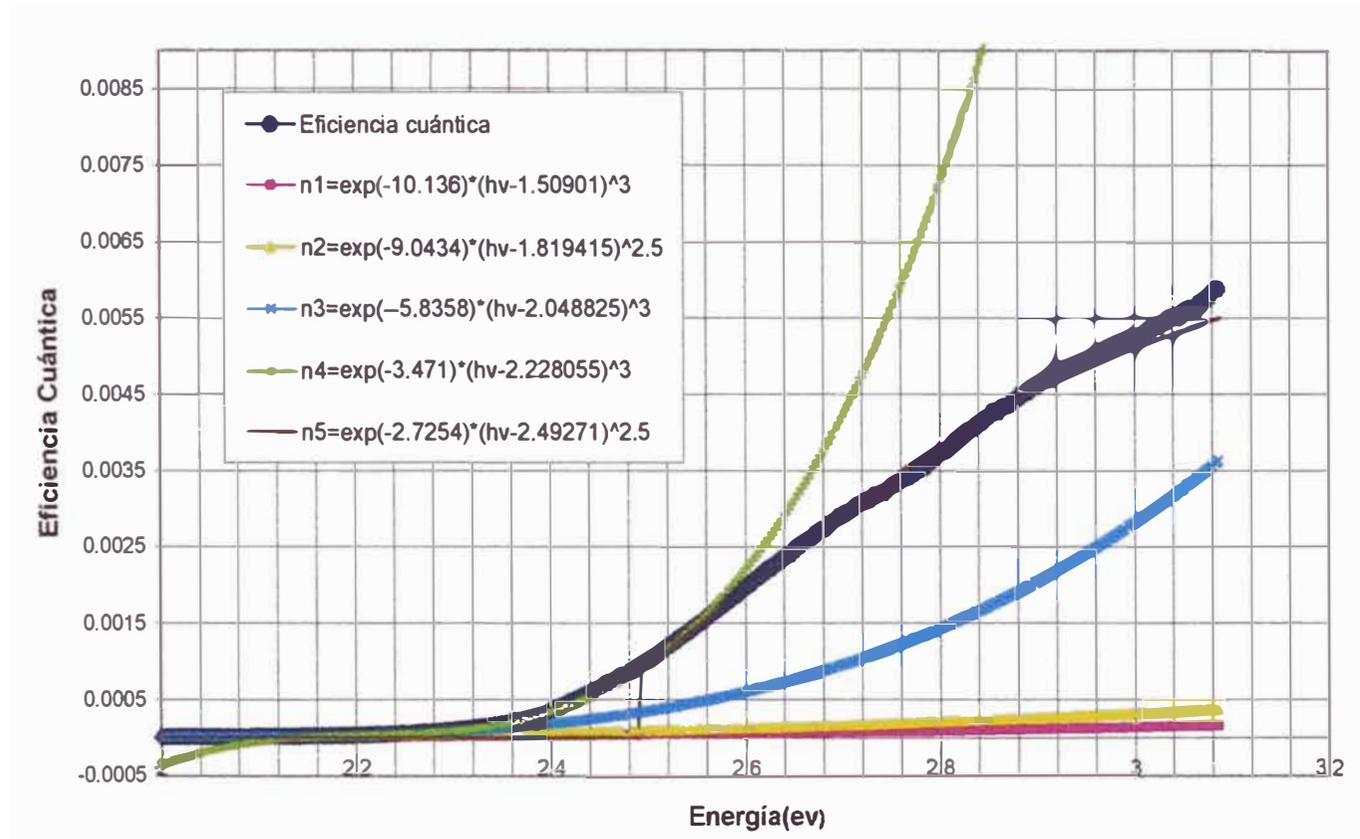


Fig.4.22: Espectro de fotocorriente de la muestra 22D3

RESULTADOS

- Fotogeneración negativa : $n1 = -\exp(-10.136) \cdot (h\nu - 1.50901)^3$ (4.80)
- Fotogeneración positiva : $n2 = +\exp(-9.0434) \cdot (h\nu - 1.819415)^{2.5}$ (4.81)
- Fotogeneración positiva : $n3 = +\exp(-5.8358) \cdot (h\nu - 2.048825)^3$ (4.82)
- Fotogeneración positiva : $n4 = +\exp(-3.471) \cdot (h\nu - 2.228055)^3$ (4.83)
- Fotogeneración positiva : $n5 = +\exp(-2.7254) \cdot (h\nu - 2.49271)^{2.5}$ (4.84)

INTERPRETACIÓN

- +1.51eV
Este valor aparece en su complementario 26D1; también en 19 O1, 20 O3, 7N1,
El carácter positivo presentado aquí lo ubica en CdS/TO.
- +1.82eV
Se presenta nuevamente como los casos: 7N1, 19 O1, 20 O1, 22D1 en la posición CdS/TO. También se presenta en su caso complementario 26D1.
- +2.05eV
En su caso complementario se manifiesta como 2.08eV.
En la muestra actual se le ubica en CdS/TO.
- +2.23eV
En el caso complementario aparece como foto generación negativa, se manifiesta como complemento al nivel 0.14eV debajo de la BC [10] y [29].

TABLA 4.12: RESUMEN DE ENERGÍAS EN LA MUESTRA 22D3

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel participante</i>	<i>Nivel Encontrado en Referencias / eV</i>
1	1.51	Constructiva	En CdS	No referencias
2	1.82	Constructiva	—	No referencias
3	2.05	Constructiva	En CdS	No referencias
4	2.23	Constructiva	0.15 en CdS	0.14 [10][29]
5	2.49	Constructiva	Tran. Lum.	No referencias

MODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 22D3

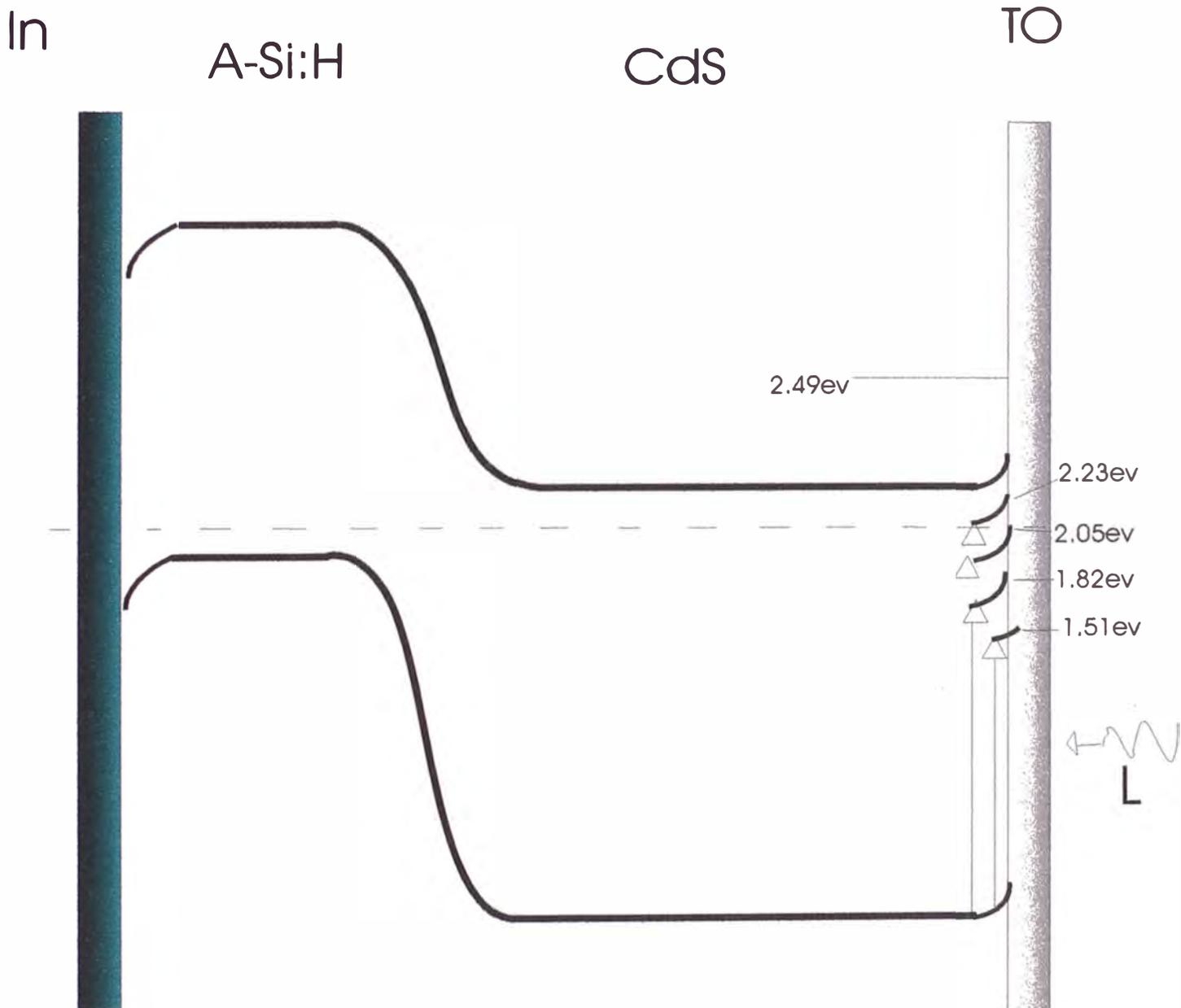


Fig. 4.23: Diagrama de energías obtenido para la muestra 22D3

ESPECTRO 26D1
(PV) L / In / a-Si:H / CdS / TO

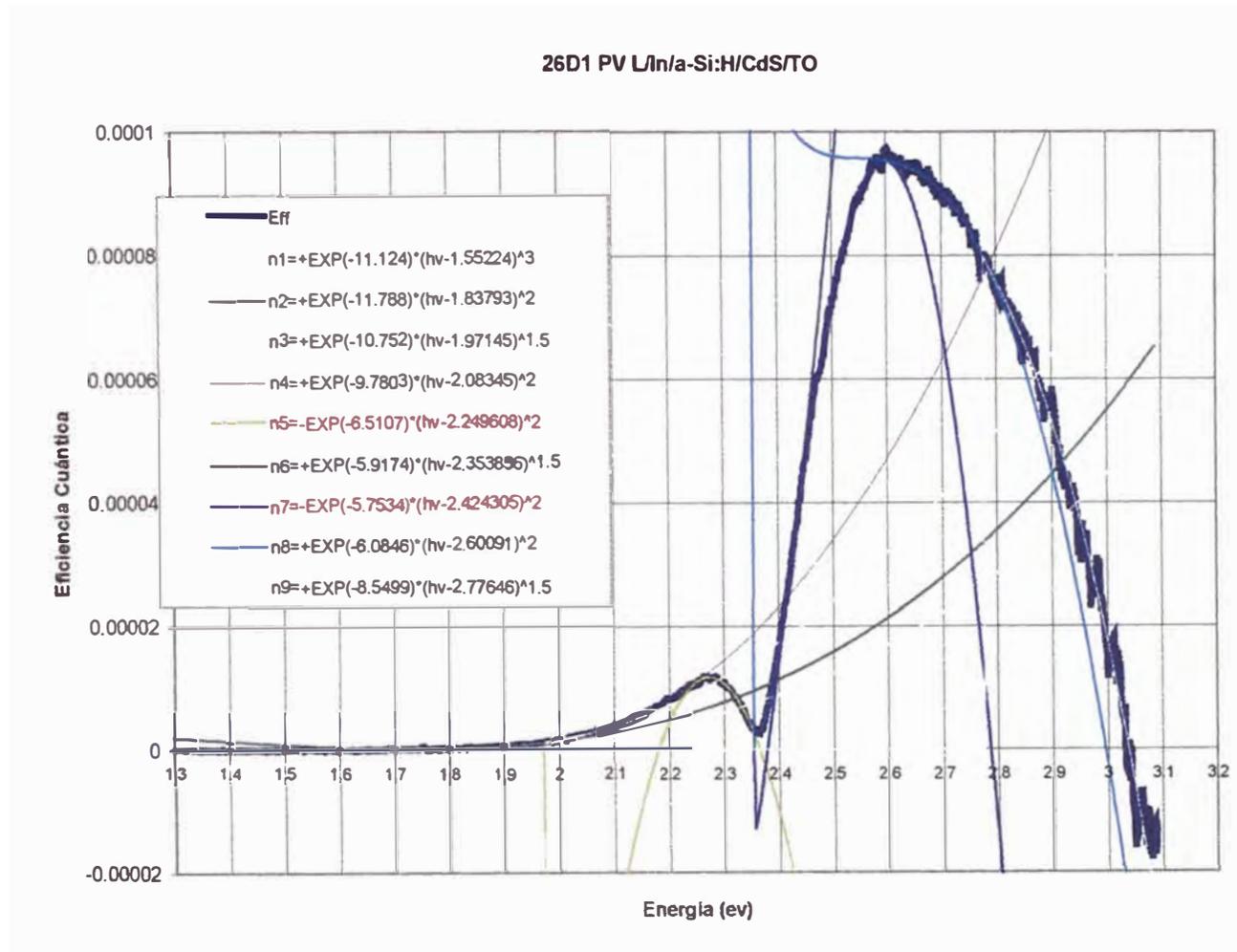


Fig.4.24: Espectro de fotocorriente de la muestra 26D1

RESULTADOS

De la linealización logarítmica de este espectro se observan las siguientes energías de activación de la curva de eficiencia cuántica:

- Fotogeneración positiva: $n1 = +\exp(-11.124) \cdot (h\nu - 1.55224)^3$ (4.85)

- Fotogeneración positiva : $n2 = +\exp(-11.788) \cdot (h\nu - 1.83793)^2$ (4.86)

- Fotogeneración positiva : $n3 = +\exp(-10.752) \cdot (h\nu - 1.97145)^{1.5}$ (4.87)

- Fotogeneración positiva : $n4 = +\exp(-9.7803) \cdot (h\nu - 2.08345)^2$ (4.88)

- Fotogeneración negativa : $n5 = -\exp(-6.5107) \cdot (h\nu - 2.249608)^2$ (4.89)

- Fotogeneración positiva : $n6 = +\exp(-5.9174) \cdot (h\nu - 2.353856)^{1.5}$ (4.90)

- Fotogeneración negativa : $n7 = -\exp(-5.7534) \cdot (h\nu - 2.424305)^2$ (4.91)

- Fotogeneración positiva : $n8 = +\exp(-6.0846) \cdot (h\nu - 2.60091)^2$ (4.92)

- Fotogeneración positiva : $n9 = +\exp(-8.5499) \cdot (h\nu - 2.77646)^{1.5}$ (4.93)

INTERPRETACIÓN

- +1.55eV
Aparece también 7N1, 19 O1, 20 O3 y en 22D3.
- +1.84eV
Aparece también 30 O1, 19 O1, 20 O1, 7N1 y en 22D3. Este nivel está por determinarse si pertenece al CdS o al A-Si:H
- +1.97eV
Se refiere al nivel 0.37eV desde la banda de valencia según [3].
- +2.08eV.
Podría tratarse del complemento 2.14eV del nivel de atrapamiento de 0.24eV según [39] en CdS. Se le ubica también en CdS / TO
- -2.25eV
Aquí es una contracorriente de poca intensidad, se manifiesta como complemento al nivel 0.14eV debajo de la BC [10] y [29].

- +2.35

Esta transición es la que más contribuye a la eficiencia para esta configuración de muestra.

TABLA 4.13: RESUMEN DE ENERGÍAS EN LA MUESTRA 26 D1

<i>No</i>	<i>Transición eV.</i>	<i>Tipo de Transición</i>	<i>Nivel participante</i>	<i>Nivel Encontrado en Referencias / eV</i>
1	1.55	Constructiva	En CdS	No referencias
2	1.84	Constructiva	—	No referencias
3	1.97	Constructiva	0.41 en CdS	0.37 [3]
4	2.08	Constructiva	0.30 en CdS	0.24 [39]
5	2.25	Destruyctiva	0.13 en CdS	0.14 [10] [29]
6	2.35	Constructiva	En CdS	No referencias
7	2.42	Destruyctiva	Tran. Lum.	No referencias

MODELO DE DIAGRAMA ENERGETICO PARA EL ESPECTRO 26D1

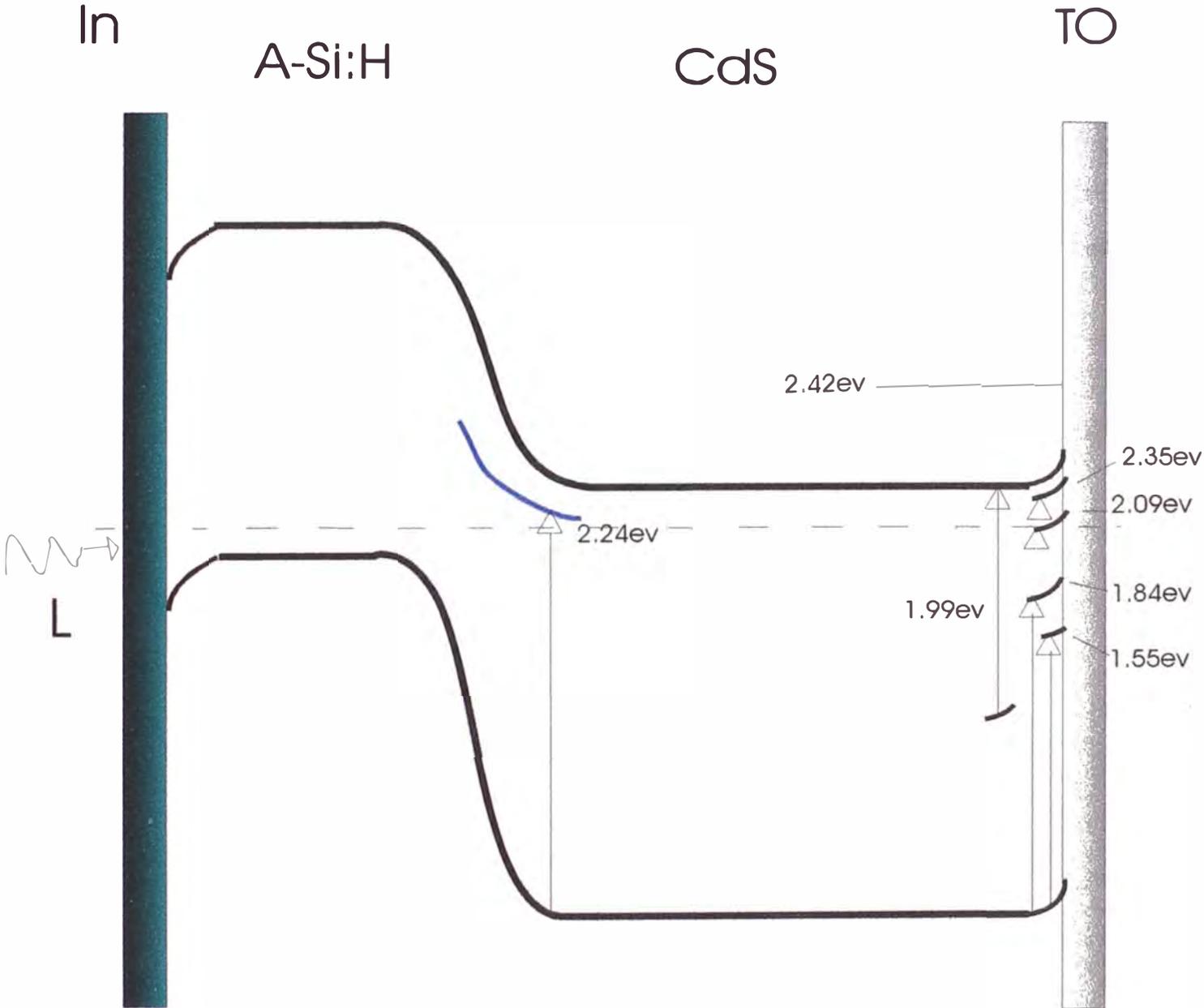


Fig. 4.25: Diagrama de energías obtenido para la mue tra 26D1

4.3.1 RESUMEN GENERAL

Construiremos ahora una tabla con los resultados obtenidos con el fin de sistematizar la información y correlacionarla con los datos obtenidos de trabajos internacionales y los obtenidos también en el laboratorio de Optica de la UNI para valores que no se han reportado en la literatura internacional pero que se manifiestan mediante la técnica de espectroscopia de fotocorriente, esto se hizo tanto para el CdS como para el silicio amorfo hidrogenado.

Se detalla entonces las columnas REFERENCIA EN CdS y REFERENCIA EN A-Si:H, la columna NIVEL PARTICIPANTE se refiere a los resultados extraídos de las muestras.

TABLA 4.14: RESUMEN GENERAL DE ENERGIAS OBTENIDAS CON TODAS LAS MUESTRAS.

En la tabla indicamos:

F: Frontal

R: Posterior

No	REFERENCIA EN CdS	REFERENCIA EN A-Si:H	NIVEL PAR- TICIPANTE	TRANSICION (ev)	Media de Tran- sición	Fre- cuen- cia	ORIGEN	MUESTRA	CONFIGURACION	
1			0.95	0.94			CdS/TO	20 O1	L/Cu	F
2			0.95	-0.95			a-Si:H/CdS	19 O1	L/G.../Cu	R
3		1.0 [12]	0.99	-0.99	0.96	3	a-Si:H/CdS	20 O2	L/G.../Al	R
4	1.30[10]		1.34	-1.04			a-Si:H/CdS	31N1	L/G.../Au	R
5	1.30[10]		1.34	-1.04			a-Si:H/CdS	11D1	L/Au...	F
6	1.30 [10]		1.30	1.08			CdS/TO	7N1	L/G.../Fe	R
7	1.30 [10]		1.28	-1.10	1.07	4	a-Si:H/CdS	16N2	L/Ag	F
8	1.30 [10]		1.33	1.33			CdS/TO	19 O1	L/G.../Cu	R
9	1.30 [10]		1.33	1.33			CdS/TO	20 O2	L/G.../Al	R
10	1.30 [10]		1.34	1.34	1.33	3	CdS/TO	16N2	L/Ag	F
11			0.95	-1.43			a-Si:H/CdS	20 O1	L/Cu	F
12		1.45 [5]	1.45	-1.45	1.44	2	a-Si:H/CdS	7N1	L/G.../Fe	R
13				-1.53			a-Si:H/CdS	20 O3	L/Al	F
14				1.54			CdS/TO	19 O1	L/G.../Cu	R
15				1.51			CdS/TO	22D3	L/G.../In	R
16				1.55			CdS/TO	7N1	L/G.../Fe	R
17				1.55	1.54	5	CdS/TO	26D1	L/In	F
18	0.73 [29]		0.71	1.67			CdS/TO	16N2	L/Ag	F
19	0.73 [29]		0.70	1.68			CdS/TO	20 O2	L/G.../Al	R
20	0.73[29]	1.70 [5]	0.70	1.68			CdS/TO	7N1	L/G.../Fe	R
21	0.73[29]	1.70 [5]	0.68	1.70	1.68	4	CdS/TO	7N2	L/Fe	F
22				1.72			CdS/TO	19 O1	L/G.../Cu	R
23				-1.73			a-Si:H/CdS	11D1	L/Au...	F

No	REFERENCIA EN CdS	REFERENCIA EN A-Si:H	NIVEL PAR- TICIPANTE	TRANSICION (ev)	Media de Tran- sición	Fre- cuen- cia	ORIGEN	MUESTRA	CONFIGURACION	
24				1.73			CdS/TO	20 O1	L/Cu	F
25				1.76	1.74	4	CdS/TO	20 O3	L/Al	F
26			1.80	-1.80			a-Si:H/CdS	30 O1	L/G.../Ag	R
27				1.82			CdS/TO	19 O1	L/G.../Cu	R
28				1.84			CdS/TO	20 O1	L/Cu	F
29				1.82			CdS/TO	22D3	L/G.../In	R
30				1.84			CdS/TO	26D1	L/In	F
31			1.85	1.85	1.83	6	CdS/TO	7N1	L/G.../Fe	R
32				1.92	1.92	1	CdS/TO	20 O2	L/G.../Al	R
33	0.37 [3]		0.40	1.98			CdS/TO	19 O1	L/G.../Cu	R
34	0.37 [3]		0.39	1.99			CdS/TO	7N1	L/G.../Fe	R
35	0.37 [3]		0.41	1.97			CdS/TO	26D1	L/In	F
36	0.37 [3]		0.37	2.01			CdS/TO	20 O3	L/Al	F
37	0.37 [3]		0.35	2.03			CdS/TO	7N2	L/Fe	F
38				2.05	2.01	6	CdS/TO	22D3	L/G.../In	R
39	0.24 [39]		0.29	2.09			CdS/TO	20 O1	L/Cu	F
40	0.24 [39]		0.30	2.08			CdS/TO	26D1	L/In	F
41	0.24 [39]		0.27	2.11			CdS/TO	19 O1	L/G.../Cu	R
42	0.24 [39]		0.26	2.12			CdS/TO	7N1	L/G.../Fe	R
43	0.24 [39]		0.25	2.13	2.11	5	CdS/TO	20 O2	L/G.../Al	R
44	0.14 [10][29]		0.17	-2.21			a-Si:H/CdS	20 O1	L/Cu	F
45	0.14 [10][29]		0.17	2.21			CdS/TO	30 O1	L/G.../Ag	R
46	0.14 [10][29]		0.16	2.22			CdS/TO	19 O1	L/G.../Cu	R

No	REFERENCIA EN CdS	REFERENCIA EN A-Si:H	NIVEL PAR- TICIPANTE	TRANSICION (ev)	Media de Tran- sición	Fre- cuen- cia	ORIGEN	MUESTRA	CONFIGURACION
47	0.14 [10][29]		0.16	2.22			CdS/TO	7N1	L/G.../Fe R
48	0.14 [10][29]		0.15	2.23			CdS/TO	20 O2	L/G.../Al R
49	0.14 [10][29]		0.15	-2.23			a-Si:H/CdS	20 O3	L/Al F
50	0.14 [10][29]		0.15	-2.23			a-Si:H/CdS	7N2	L/Fe F
51	0.14 [10][29]		0.15	2.23			CdS/TO	22D3	L/G.../In R
52	0.14 [10][29]		0.13	-2.25			a-Si:H/CdS	26D1	L/In F
53	0.14 [10][29]		0.13	-2.25	2.23	10	a-Si:H/CdS	16N2	L/Ag F
54	0.07[39]		0.09	2.29			CdS/TO	20 O2	L/G.../Al R
55	0.07[39]		0.08	2.30			CdS/TO	31N1	L/G.../Au R
56	0.07 [39]		0.08	2.30			CdS/TO	11D1	L/Au... F
57	0.07 [39]		0.07	2.31			CdS/TO	20 O1	L/Cu F
58	0.07 [39]		0.07	2.31			CdS/TO	7N1	L/G.../Fe R
59	0.07 [39]		0.08	2.31			CdS/TO	30 O1	L/G.../Ag R
60	0.07 [39]		0.06	2.32	2.31	7	CdS/TO	19 O1	L/G.../Cu R
61			---	-2.34			a-Si:H/CdS	20 O1	L/Cu F
62			---	2.35			CdS/TO	7N2	L/Fe F
63				2.35	2.35	3	CdS/TO	26D1	L/In F
64	Gap [15][16]		2.38	-2.38			a-Si:H/CdS	11D1	L/Au... F
65	Gap [15][16]		2.38	2.38			CdS/TO	19 O1	L/G.../Cu R
66	Gap [15][16]		2.39	2.39	2.38	3	CdS/TO	20 O3	L/Al F
67				-2.44				20 O3	L/Al F
68				-2.44				30 O1	L/G.../Ag R
69				2.45				19 O1	L/G.../Cu R

No	REFERENCIA EN CdS	REFERENCIA EN A-Si:H	NIVEL PAR- TICIPANTE	TRANSICION (ev)	Media de Tran- sición	Fre- cuen- cia	ORIGEN	MUESTRA	CONFIGURACION
70				-2.45				20 O1	L/Cu F
71				-2.43				7N2	L/Fe R
72				-2.45				7N1	L/G../Fe F
73				-2.49				22D3	L/G../In R
74				-2.46				20 O2	L/G../Al R
75				2.44	2.45	9		20 O3	L/Al F
76				-2.56				19 O1	L/G../Cu R
77				-2.56				20 O2	L/G../Al R
78				2.57	2.56	3		7N1	L/G../Fe R
79				2.62				20 O1	L/Cu F
80				-2.65				7N2	L/Fe F
81				2.60	2.62	3		26D1	L/In F
82				2.77				20 O1	L/Cu F
83				2.77				16N2	L/Ag F
84				-2.79				30 O1	L/G../Ag R
85				2.77	2.78	4		26D1	L/In F
86				-2.82				20 O2	L/G../Al R
87				-2.83				20 O3	L/Al F
88				-2.86				19 O1	L/G../Cu R
89				2.87	2.85	4		7N1	L/G../Fe R

Considerando todas las muestras y observando la ocurrencia de cada nivel energético resuelto mediante esta técnica, podemos obtener una representación gráfica de las activaciones más importantes.

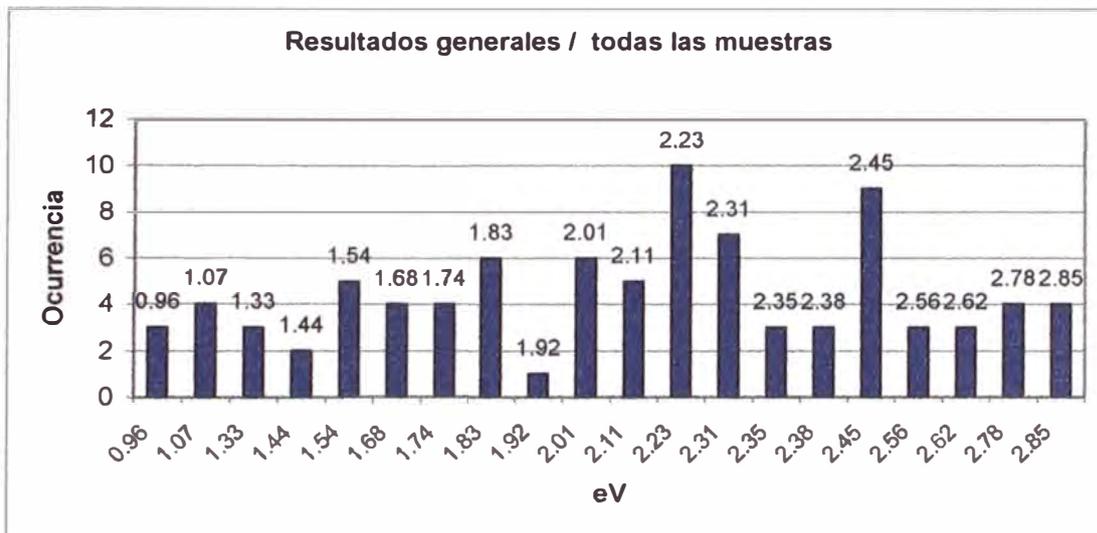


Fig. 4.26: Resultados generales donde pueden observarse todas las activaciones encontradas

Una representación porcentual del mismo gráfico nos da:

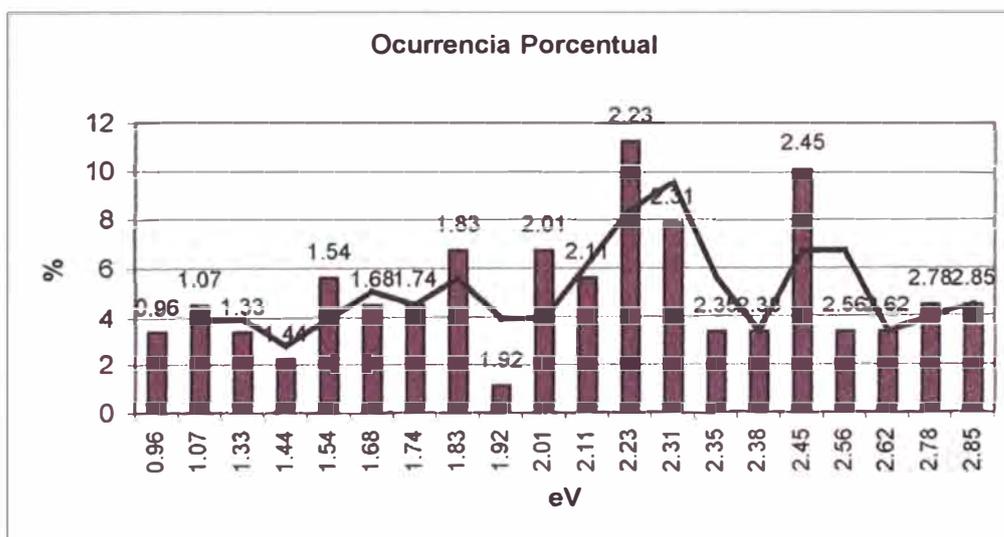


Fig. 4.27: Similar al gráfico 4.26 pero indicando la ocurrencia porcentual de las activaciones.

Aquí se le ha añadido una línea de tendencia para ayudarnos a visualizar los niveles predominantes o de mayor probabilidad para estas muestras.

De acuerdo al análisis efectuado, algunas activaciones energéticas se realizan en el campo eléctrico de la interface CdS / TO y otras en a-Si:H / CdS por lo cual puede hacerse una representación según el lugar de ocurrencia de la activación, por lo que se obtiene:

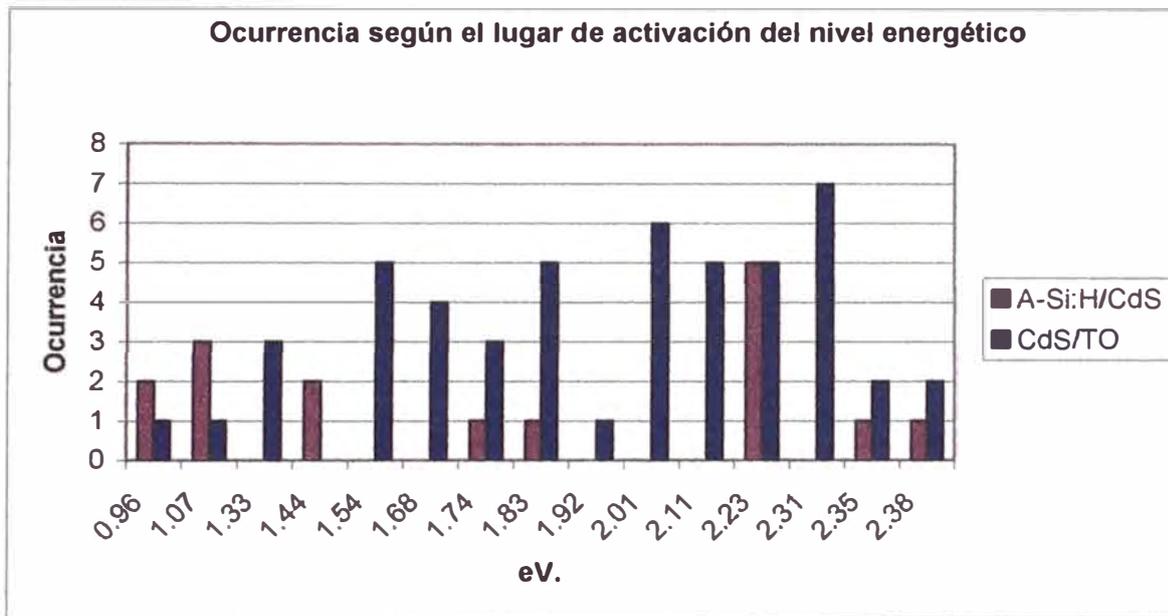


Fig. 4.28: La mayoría de activaciones se produjeron en la región CdS/TO como se indica en este gráfico.

Un cuadro consolidado de todas estas experiencias es la siguiente:

TABLA 4.15: CONSOLIDACIÓN DE RESULTADOS

REFERENCIA EN CdS (eV)	REFERENCIA EN A-Si:H (eV)	NIVEL PARTICIPANTE (eV)	Media de Transición (eV)	Frecuencia	Ocurrencia %	a-Si:H / CdS	CdS / TO
	1.0 [12]		0.96	3	3	2	1
1.30 [10]		1.31	1.07	4	4	3	1
1.30 [10]		1.33	1.33	3	3	0	3
			1.44	2	2	2	0
			1.54	5	6	0	5
0.73[29]	1.70 [5]	0.7	1.68	4	4	0	4
			1.74	4	4	1	3
			1.83	6	7	1	5
			1.92	1	1	0	1
0.37 [3]		0.37	2.01	6	7	0	6
0.24[39]		0.27	2.11	5	6	0	5
0.14 [10][29]		0.15	2.23	10	11	5	5
0.07 [39]		0.07	2.31	7	8	0	7
			2.35	3	3	1	2
Gap [15][16]		2.38	2.38	3	3	1	2
			2.45	9	10		
			2.56	3	3		
			2.62	3	3		
			2.78	4	4		
			2.85	4	4		

Como se observa de los gráficos, hay una presencia mayor de activaciones en la interfase del a-Si:H/CdS para energías menores de 1.33eV.

El 18% de los casos involucran activaciones en la interface del A-Si:H / CdS, y un 56% a la interface CdS / TO, un 26% restantes son energías superiores a 2.4eV superando al gap estimado del CdS.

También puede observarse de la tabla, que la mayor desviación de los valores referenciales, bajo este método de espectroscopia de fotocorriente, es de $\pm 0.03\text{eV}$.

5 CONCLUSIONES

Se puede observar de las distintas muestras, que hay una fuerte manifestación de las señales del sulfuro de cadmio, predominando éstas sobre las del silicio amorfo hidrogenado, que por consiguiente son débiles ante estas señales.

La mayoría de energías obtenidas son niveles intrabanda en CdS o sus complementos, salvo la energía 1.54 eV. que se documenta como energía del A-Si:H en las publicaciones, pero no hay aún seguridad de esto en nuestro caso. Representan aproximadamente el 6% de los casos tratados.

De todo esto se puede afirmar que no hay una manifestación directa del a-Si:H en la respuesta de las muestras. Esto es probablemente a una baja resolución en la detección de las débiles señales generadas por la película de a-Si: H, ante la predominante manifestación de las transiciones del CdS.

Se puede observar la predominancia de las transiciones en el CdS, el 64% de las energías encontradas son mayores de 2eV; y si tenemos en cuenta el gap en el silicio amorfo hidrogenado de 1.97eV, esto puede descartar 6 de 10 niveles encontrados como pertenecientes al silicio amorfo hidrogenado.

Puede también argüirse que la predominancia de los niveles intrabanda del CdS es debido a su naturaleza cristalina dejando “firmas” bien claras debido a su estructura ordenada, a diferencia de la naturaleza amorfa del silicio en la muestra que está formado por una cola de estados cercanos a las bandas de conducción y valencia y una densidad de estados en el gap debido a una multiplicidad de defectos tipo “dangling bond” predominantemente.

La presencia del a-Si:H determina un campo eléctrico adicional que promueve que ciertas transiciones se manifiesten cuando antes no lo hacían, como es el caso de las transiciones 0.95eV y 1.43eV, 1.08 y 1.30eV, 1.68eV, 1.70eV, 2.35eV, 2.45eV, todas en CdS.

Teniendo en cuenta los valores de los niveles participantes obtenidos de las referencias y comparándolas con las energías obtenidas para nuestras muestras, se observa una desviación máxima de $\pm 0.03\text{eV}$, dándonos un buen indicador de confianza a la técnica de espectroscopia de corriente.

Por otro lado, tenemos que para energías mayores a 2eV los errores obtenidos son menores al 4%. Para menores a 2eV tenemos valores referenciales con menos cifras significativas, que en la comparación con las nuestras, incrementa el error debido a falta de precisión en la obtención de la energía. Pero si tenemos en cuenta los valores complementarios para las discontinuidades de energía asumidas, los errores no pasan el 2.3%, afianzando el valor asumidos, para la discontinuidad de la energía en CdS.

Alrededor del 70% de las transiciones ubicadas en a-Si:H / CdS se originaron cuando la incidencia fue directa, por el lado del metal de menor eficiencia cuántica.

Mencionando a la técnica de espectroscopia de fotocorriente, puede afirmarse una vez más, su confiabilidad debido a que resuelve transiciones en CdS cuando está en unión con A-Si:H en concordancia con publicaciones internacionales que emplea-

ron métodos más sofisticados, costosos y exigentes tanto para el material de sulfuro de cadmio como para el silicio amorfo hidrogenado.

Una mayor resolución en las energías podrá ayudarnos a determinar o resolver niveles de señal más débil.

- [6] Fernández Enver “Elaboración y caracterización física de películas delgadas de semiconductor de silicio amorfo hidrogenado”
Tesis de Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería (2000)
- [7] Fernandez Enver, Eyzaguirre Carmen, Valera Anibal
“Elaboración y caracterización física de películas semiconductoras de silicio amorfo”
Tecnica, Vol. 9 N° 01, Págs. 69 – 79, 1999 UNI.
- [8] Hennig et al “Electronic structure of dangling bonds in amorphous silicon studied via a density – matrix funtional method”.
Physical Review B 66, 195213 (2002)
- [9] Jasprit Singh “Semiconductor Devices: Basic Principles”
Jhon Wiley, 2001.
- [10] J. Kokaj, A. E. Rakhshani “Photocurrent spectroscopy of solution-grown CdS films annealed in CdCl₂ vapour”
Journal of Physics D: Appl. Phys. 37 p. 1970-1975, (2004)

**Sociedad Mexicana de Ciencias de Superficie y
Vacío, Vol.13, p. 130-133, Diciembre 2001**

- [16] Oscar Varas “Caracterización Óptica del Sulfuro de Cadmio”
Tesis de Licenciatura UNI – FC, 1987
- [17] Omar M.A. “Elementary Solid State Physics – Principles and
Applications”
Addison – Wesley Publishing Company (1975)
- [18] Pankove Jaques I. “Optical Processes in Semiconductors”
Dover Publications Inc N.Y. (1971)
- [19] R. Diaz Delgado Tin Oxide Gas Sensors: An Electrochemical
Approach.
Tesis Doctoral en Ciencias Químicas,
Universidad de Barcelona, 2002
- [20] R. Durný, V. Nádaždy, I. Thurzo, E. Pincik
Faculty of Chemistry, Technical University Of
Brno, 1997
- [21] Shalimova “Física de los Semiconductores”
Mir, Moscú 1975.

- [22] Schumm et al. “Nonequilibrium occupancy of tail states and defects in a-Si:H: Implications for defect structure”.
Physical Review B volume 48, number 19, 15 November 1993-I
- [23] Smets Arno “Growth Related Material Properties of a-Si:H”,
Tesis Doctoral en Física Aplicada, Eindhoven University of Technology, 2002
- [24] Street R.A. “Hydrogenated Amorphous Silicon”
Cambridge Solid State Series, 1991
- [25] Sze S.M. “Physics of Semiconductor Devices”
Jhon Wiley & Sons (1981)
- [26] Vaillant et al. “Recombination at dangling bonds and steady-state photoconductivity in a-Si:H”.
Physical Review B, volume 34, number 6, 15 September 1986
- [27] Valera Aníbal “Energía Solar Básica I”.
Universidad Nacional de Ingeniería, 1993.

- [28] Valera Anibal “Conversión Fotovoltaica”.
Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de
Ingeniería, 1986.
- [29] V. Komin, V. Viswanathan, B.Tetali, D.L. Morel, and C.S. Ferekides
“Deep Level Transient Spectroscopy of
CdTe/CdS Thin Film Solar Cells”
Department of Electrical Engineering
Center for Clean Energy and Vehicles
University of South Florida, NREL, DIC 2001
- [30] Valera Anibal “Espectroscopia de Fotocorriente aplicada a
semiconductores de película delgada: CdS”
Informe Proyecto UNI-CONCYTEC 114 - 2001
- [31] Valera Anibal, Valentin Siu
“Photocurrent spectroscopy applied to thin film
solar cells based on hydrogen amorphous silicon
(a-Si:H)”
Reporte interno del Laboratorio de Optica, UNI -
FC
- [32] Wright D.H. “Semiconductors”
Science Paperbacks Mathuen & Co LTD, 1966

- [33] NREL
Large-Scale PV Module Manufacturing Using
Ultra-Thin. Annual Subcontract Report - National
Renewable Energy Laboratory, 1 October 2003–
30 September 2004
www.nrel.gov/docs/fy05osti/37738.pdf
- [34] E BelinFerre, AG LaRoque, MF Fontaine, J Thirion, M Brinza
“X ray spectroscopy of the valence band
electronic structure in high-deposition-rate a-
Si:H.”
**Journal of Non-Crystalline Solids, 2004, vol
338-40 pp 240-243.**
- [35] CR Wronski, Pearce, Deng, Vlahos, Collins
“Intrinsic and light induced gap states in a-Si:H
materials and solar cells – effects of
microstructure.”
Thin Solid Films, 2004, vol 451-52, pp 470-475.
- [36] Pincik, Kobayashi, Gleskova, Kucera, Ortega, Jergel, Falcony, Brunner
“Photoluminescence properties of a-Si:H based
thin films and corresponding solar cells”
**Thin Solid Films, 2003, vol 433, Iss 1-2, pp
344-351.**

[37] Nadazdy, Durny, Thurzo, Pincik, Nishida, Shimizu, Kumeda

“Correlation between the results of charge deep level transient spectroscopy and ESR techniques for undoped hydrogenated amorphous silicon”

Physical Review B, 2002, Vol 6619, Iss 19, pp 5511.

[38] PA Ivanov, Konkov, El Terukov

“Current-voltage characteristics of electroluminescent Me/(A-Si:H):Er/c-Si structures prepared by magnetron sputtering”

Semiconductors, 2000, Vol 34, Iss 5, pp 598-602.

[39] Kaplan, Özsan

“Radioluminescent Properties of CdS (Ag) Crystals”

Turk Journal Physics 24 (2000), 689-699.

[40] Kane, Evan O.

“Theory of photoelectric emission from semiconductors”

Physical Review, Vol 127, N°1 July 1, 1962, p. 131

APÉNDICES

APÉNDICE I

CONTACTO METAL - SEMICONDUCTOR

UNIONES METAL - SEMICONDUCTOR TIPO N

Consideremos un contacto entre un metal y un semiconductor tipo N. Se presenta dos posibilidades entre las funciones trabajo de ambos materiales, o que $\phi_m > \phi_s$ o que $\phi_m < \phi_s$.

Donde ϕ_m es la función trabajo del metal y ϕ_s del semiconductor.

Considerando el caso $\phi_M > \phi_S$:

- Para este caso el nivel de Fermi del metal se ubica por debajo del nivel de Fermi del semiconductor tipo n. Por lo tanto los electrones mayoritarios del semiconductor pueden transitar hacia el lado del metal debido a estados de energía superiores que están más cerca del nivel del vacío que los del metal, hasta un momento de saturación electrostática que forma una zona de depleción o región de agotamiento en el lado del semiconductor que polariza negativamente al metal y positiviza la región del semiconductor, siendo esta mayoritariamente negativa.
- Esto determina que electrones postreros ya no puedan transitar hacia el lado del metal que ahora es negativo. Se establece de esta manera un campo eléctrico en esta zona y una diferencia de potencial de contacto.
- Esta configuración se asemeja al formado por una unión pn. Las uniones pn se caracterizan por ser rectificantes de las polarizaciones. Por tanto tenemos aquí una unión metal – semiconductor n de tipo rectificante.

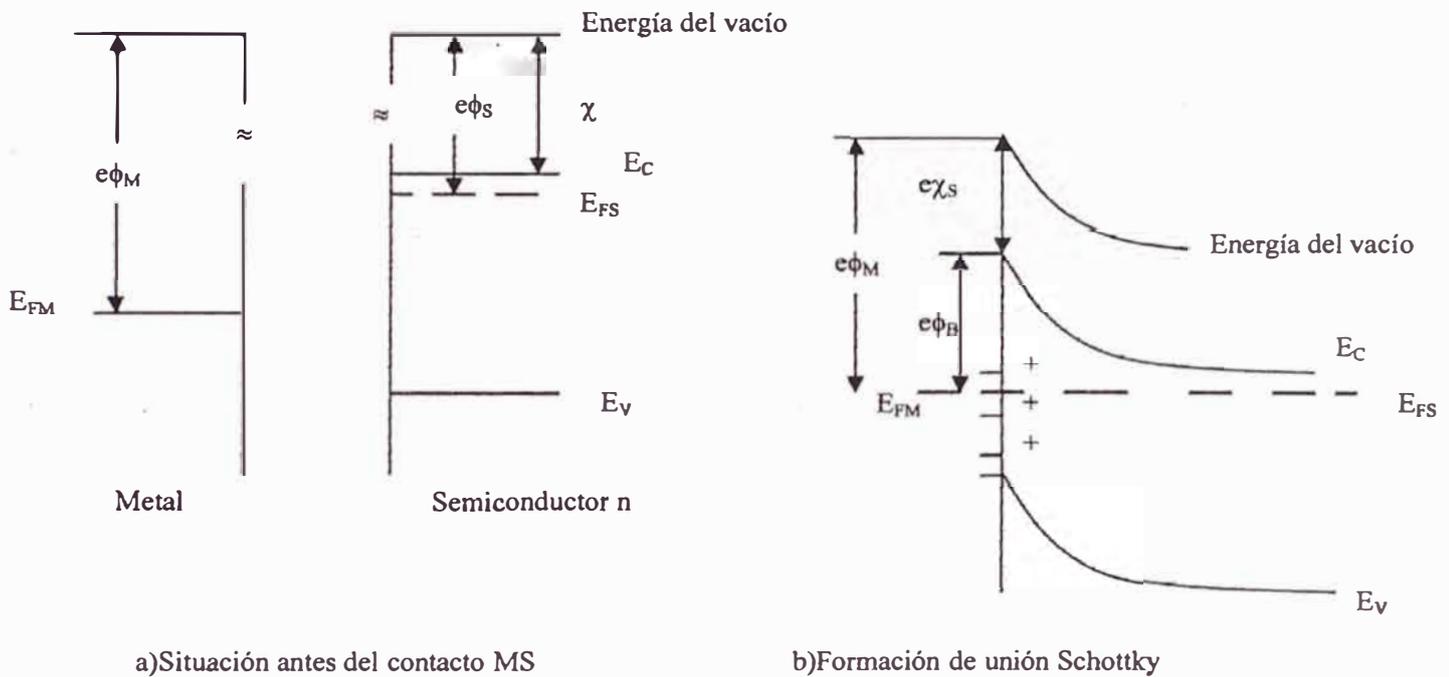


Fig. 1.1: Formación de la unión Schottky metal – semiconductor tipo N para $\phi_M > \phi_S$

La altura de la barrera es definida como la diferencia entre la energía de Fermi del metal y el borde de la banda de los portadores mayoritarios:

$$\phi_B = \phi_M - \chi_S \quad \text{Semiconductor tipo n}$$

Ecuación 1.1

Considerando el caso $\phi_M < \phi_S$:

- Para este caso los electrones del metal fluirán del metal al semiconductor hasta un punto en que se establece el equilibrio y la región del semiconductor cercana a la interface de contacto se carga negativamente y del lado del metal es ahora positiva.
- Por lo tanto los electrones, que son los portadores mayoritarios del semiconductor, si pueden acceder a la zona metálica con la relativa facilidad de un contacto óhmico.

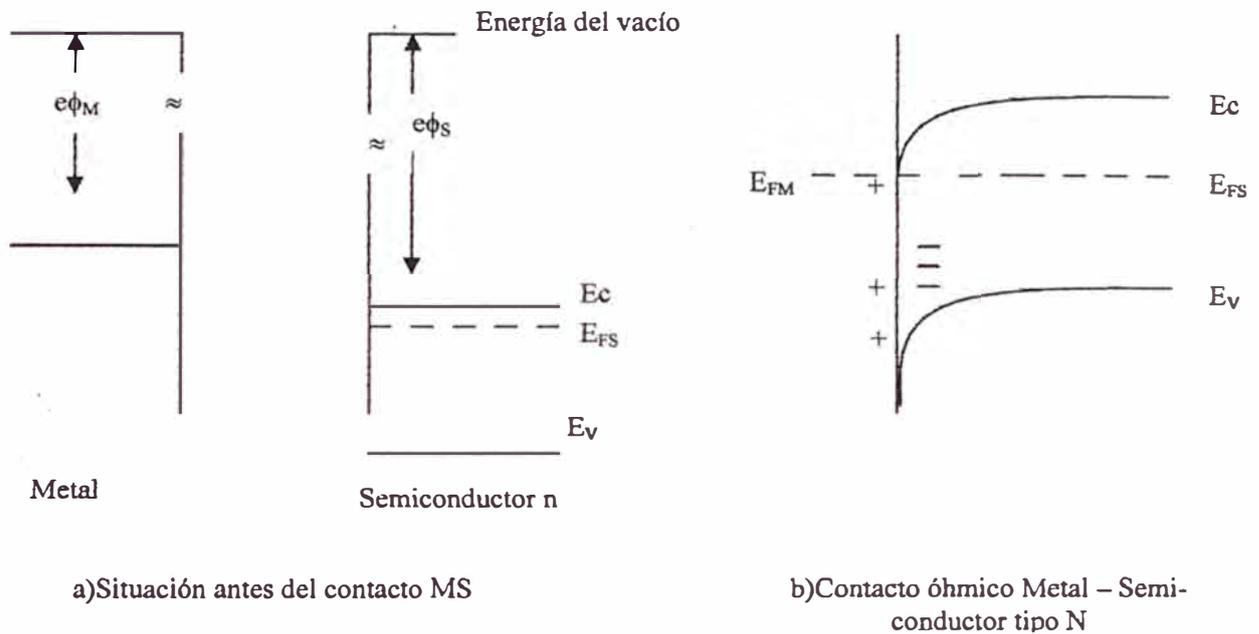
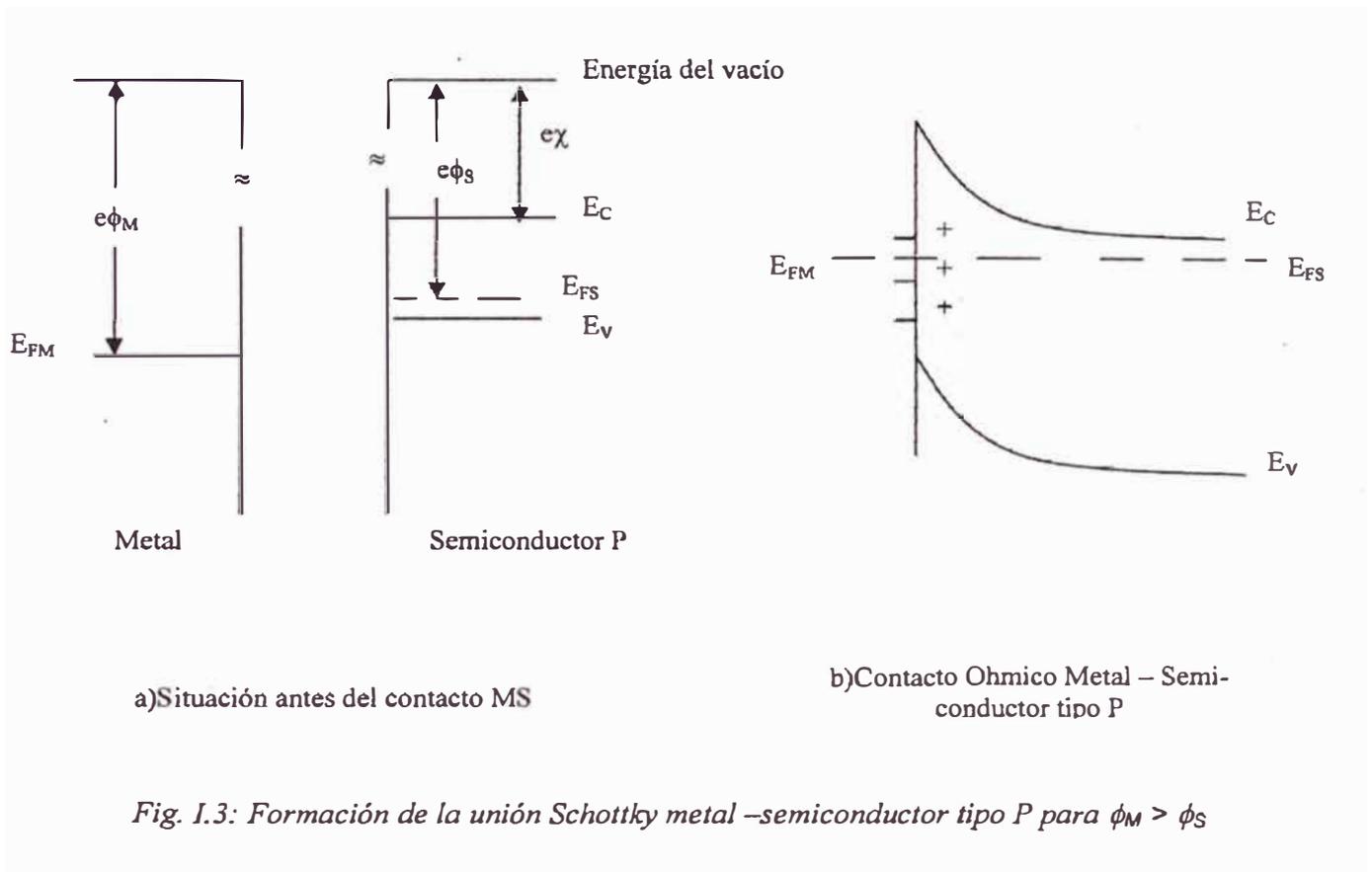


Fig. 1.2: Formación de la unión Schottky metal – semiconductor tipo N para $\phi_M < \phi_S$

UNIONES METAL - SEMICONDUCTOR TIPO P

Considerando el caso $\phi_M > \phi_S$:

- Los portadores minoritarios del semiconductor podrán fluir desde el semiconductor al metal pues ésta tiene una función trabajo más profunda y pueden ocupar los niveles energéticos superiores al nivel del Fermi del metal hasta que se produce una zona de agotamiento en el semiconductor polarizando positivamente la región y negativamente al metal.
- En la zona de depleción tenemos una carga positiva en un medio de portadores mayoritarios positivos. Por lo tanto los electrones del metal pueden fluir óhmicamente en este contacto óhmico.



Considerando el caso $\phi_M < \phi_S$:

- En este caso los electrones del metal fluyen hacia el semiconductor hasta el equilibrio en que se produce una zona de agotamiento de huecos en el semiconductor polarizándose negativamente y la región del metal positivamente.
- De este modo tenemos en el semiconductor una polarización negativa en un bulk de portadores mayoritarios positivos, situación que se asemeja a las uniones pn rectificantes; tenemos pues aquí una unión rectificante.

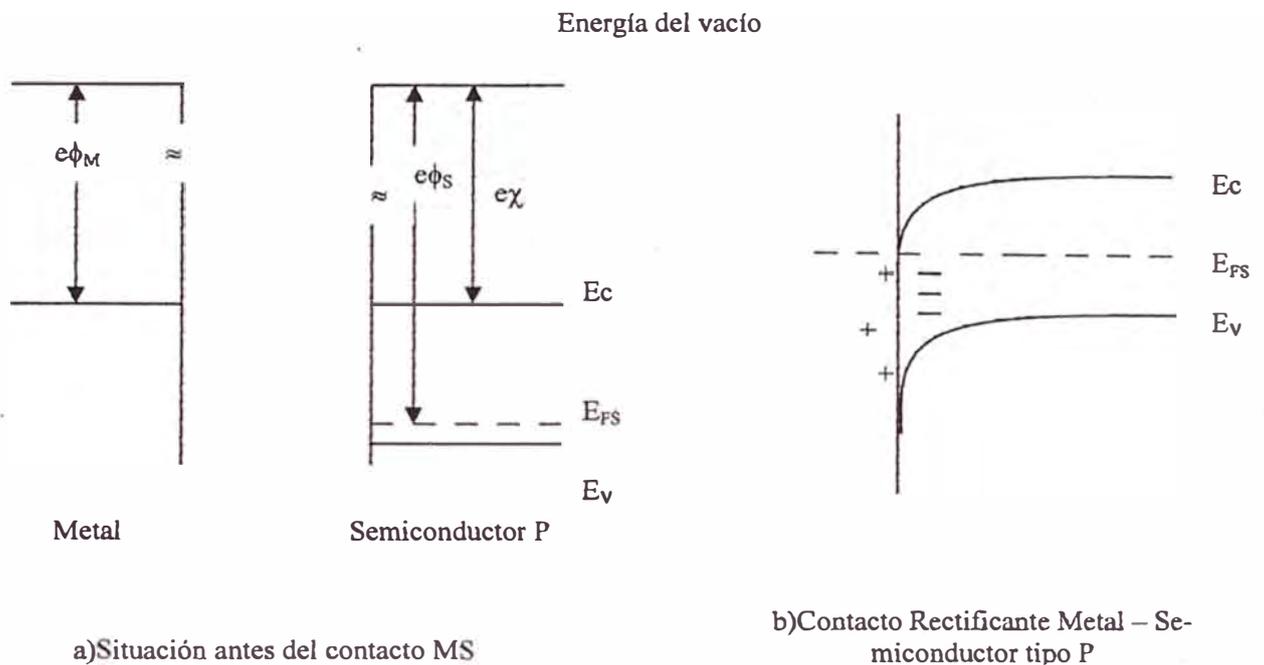


Fig. 1.4: Formación de la unión Schottky metal – semiconductor tipo P para $\phi_M < \phi_S$

Ahora la altura de la barrera es dada por la diferencia entre el borde de la banda de valencia y la energía de Fermi del metal:

$$\phi_B = \frac{E_g}{e} + \chi_S - \phi_M \quad \text{Semiconductor tipo p}$$

Ecuación 1.2

de donde también podemos inferir que la función trabajo del semiconductor puede obtenerse de:

$$\phi_s \approx \chi + \frac{E_g}{e}$$

Ecuación 1.3

O lo que es lo mismo:

$$e\phi_s \approx e\chi + E_g \quad (1.4)$$

Es decir puede ser definida al nivel de Fermi del semiconductor tipo P o al máximo de la banda de valencia.

APÉNDICE II

RECOMBINACION DE PORTADORES DE CARGA CREADAS POR ILUMINACION

El proceso llamado efecto fotoeléctrico interno se produce cuando se ilumina un material y los fotones incidentes arrancan electrones y los llevan a estados de conducción.

En materiales semiconductores como el silicio amorfo hidrogenado la iluminación crea electrones y huecos que pueblan los estados extendidos y localizados en los bordes de las bandas. Ahora la capacidad para sostener a una gran cantidad de portadores por un tiempo de vida suficientemente largo antes de que se produzcan recombinaciones es un parámetro sensitivo en la distribución y densidad de los estados gap en un material semiconductor destinado a usos fotovoltaicos.

EL PROCESO DE LA RECOMBINACION

Hay dos pasos secuenciales que se involucra en un proceso de recombinación que tiene que ser considerado.

- Un electrón o hueco excitado por la luz primero pierde su energía por muchas transiciones dentro de la banda extendida a donde fue excitada, en esta situación se producen decrementos de energía pequeños pero frecuentes, a este proceso se le llama “termalización”.
- El proceso de termalización disminuye fuertemente en los bordes de la banda, en los estados - cola localizados de las bandas, por la disminución de la densidad de estados localizados.
- Y eventualmente el electrón completa el proceso de recombinación haciendo una transición a un hueco con liberación de energía.

TIPOS DE RECOMBINACION

Una recombinación puede ser:

- Radiativa o
- No-Radiativa.

Una recombinación radiativa es acompañada con la emisión de un fotón que puede ser detectado como un fenómeno de luminiscencia del material.

Por otro lado la recombinación no-radiativa, involucra la generación de los llamados fonones por absorción en la red cristalina o estructura del material donde se produce la recombinación. También es posible la excitación de un tercer portador en la banda, lo cual es llamado un proceso Auger en la red.

De acuerdo a Street [14] los mecanismos de recombinación que operan en a-Si:H son los mismos que en el semiconductor cristalino, “la presencia del desorden aparentemente no conduce a ningún nuevo proceso, pero influencia en qué mecanismos se aplican y su contribución relativa en diferentes mediciones”.

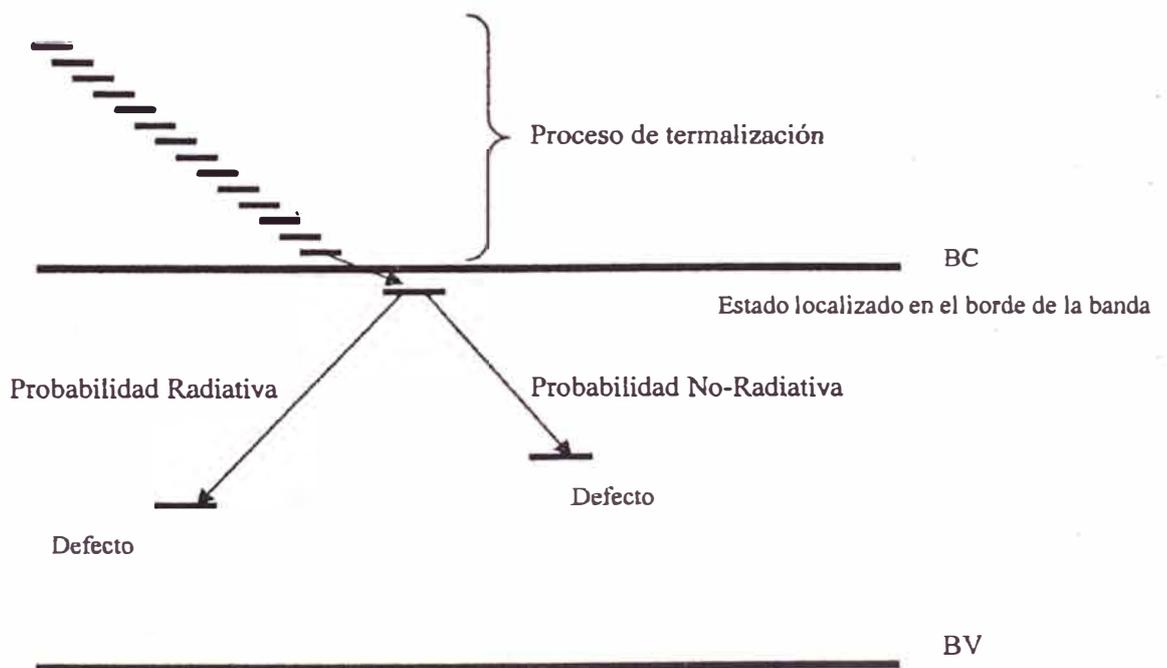


Fig.II.1: Aquí podemos observar las dos parte del proceso de recombinación, y la probabilidad que sea radiativa o no-radiativa.