



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**UNIDAD ZACATENCO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ELECTRÓNICA DEL ESTADO SÓLIDO**

**Modelo analítico de celdas solares de capa delgada
CdS/CdTe y optimización de parámetros para la obtención de
altas eficiencias**

T E S I S

Que presenta:

Ing. Armando Acevedo Luna

Para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN LA ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Director de tesis:

Dr. José Arturo Morales Acevedo

Ciudad de México

Julio, 2016

Agradecimientos

Agradezco a mi asesor, el Dr. Arturo Morales Acevedo por sus enseñanzas, guía y apoyo a lo largo de la maestría y por estar siempre pendiente de mi progreso como estudiante.

Agradezco a mis sinodales, el Dr. Velumani Subramaniam y el Dr. Mauricio Ortega por sus observaciones y consejos para redactar esta tesis.

Agradezco a la Ing. Rosa María Nava Sánchez por su apoyo durante la maestría y por darme la bienvenida al CINVESTAV.

Agradezco al Dr. Gaspar Casados Cruz por su ayuda durante las primeras etapas de la tesis.

Agradezco a mis compañeros de maestría por ayudarme, aconsejarme y ser de gran apoyo en este trayecto.

Agradezco a Yesenia y Erika por su oportuna ayuda en todo lo administrativo.

Agradezco a todos mis profesores y a todas las personas dentro de la SEES que me apoyaron en diversas ocasiones durante mis estudios de maestría.

Agradezco al CONACYT por la beca otorgada para poder estudiar este posgrado y al CINVESTAV por la formación que me ha brindado.

Dedicatoria

A Dios

A mis padres

A mis abuelos

A mis hermanos

A mis amigos

A mi archi

Índice

| | |
|--|------|
| Agradecimientos | iii |
| Dedicatoria | v |
| Índice | vii |
| Índice de figuras | ix |
| Índice de tablas | xi |
| Resumen | xiii |
| Abstract | xiv |
| Capítulo 1. Presentación de tesis | 1 |
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.2 Objetivos | 7 |
| 1.3 Motivación..... | 7 |
| Capítulo 2. Marco teórico..... | 9 |
| 2.1 Unión P-N | 9 |
| 2.2 Heterounión..... | 13 |
| 2.3 Celda solar | 15 |
| Capítulo 3. Modelado de celda solar de capa delgada y realización del programa de computadora..... | 23 |
| 3.1 Capa P+ en la parte trasera | 23 |
| 3.2 Análisis electrostático de la heterounión CdS/CdTe | 25 |
| 3.3 Cálculos para la fotocorriente..... | 29 |
| 3.4 Corriente de oscuridad | 31 |
| 3.4.1 Corriente por difusión en la región cuasi-neutra..... | 32 |
| 3.4.2 Corriente por recombinación en la zona desértica | 34 |
| 3.5 Parámetros de salida | 35 |
| 3.6 Condiciones de simulación y parámetros utilizados en el programa..... | 37 |

| | |
|--|----|
| 3.6.1 Constantes físicas..... | 37 |
| 3.6.2 Espectro solar | 38 |
| 3.6.3 Parámetros físicos de los materiales..... | 39 |
| 3.6.4 Propiedades ópticas | 39 |
| Capítulo 4. Resultados y discusión | 41 |
| 4.1 Corriente de corto circuito | 41 |
| 4.2 Voltaje de circuito abierto | 44 |
| 4.3 Factor de llenado..... | 46 |
| 4.4 Eficiencia..... | 48 |
| Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro..... | 51 |
| Bibliografía..... | 53 |
| Anexo A. Modelo analítico implementado en Mathcad..... | 57 |
| Anexo B. Condensado de parámetros eléctricos obtenidos | 75 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Producción mundial de energía primaria total de 1971 a 2013 | 1 |
| Figura 1.2. Producción mundial de energía primaria total en 2013 por fuente de generación | 2 |
| Figura 1.3. Producción de energía primaria en México en 2014..... | 3 |
| Figura 1.4. Generaciones de tecnologías fotovoltaicas..... | 4 |
| Figura 1.5. Estructura típica de una celda CdS/CdTe..... | 5 |
| Figura 2.1. Diagrama de bandas de energía de un material tipo P y N | 10 |
| Figura 2.2. Unión P-N en equilibrio termodinámico | 10 |
| Figura 2.3. Regiones desérticas en cada lado de la unión debido a la difusión de portadores..... | 11 |
| Figura 2.4. Análisis electrostático de homounión P-N. A) Densidad de carga. B) Campo eléctrico. C) Potencial eléctrico D) Diagrama de bandas..... | 13 |
| Figura 2.5. Diagrama de bandas de una heterounión en equilibrio. A) Semiconductores por separado. B) al momento de ser puestos en contacto . | 15 |
| Figura 2.6. Estructura básica de una celda solar | 16 |
| Figura 2.7. Esquema de operación de una celda solar analizada desde su diagrama de bandas | 17 |
| Figura 2.8. Celda Solar tipo N-P utilizada para la deducción de ecuaciones de corriente | 19 |
| Figura 2.9. Circuito equivalente básico de una celda solar | 20 |
| Figura 2.10. Curvas I-V y P-V características de una celda solar | 21 |
| Figura 3.1. Estructura de celda utilizada para crear el modelo analítico | 23 |
| Figura 3.2. Diagrama de bandas para una celda como la presentada en la Figura 3.1..... | 24 |
| Figura 3.3. Diagrama de bandas planas de una heterounión P-N | 25 |
| Figura 3.4. Ilustración de la zona desértica en celda de CdS/CdTe | 27 |
| Figura 3.5. Diferencia en la absorción de la luz entre homounión y heterounión | 30 |
| Figura 3.6. Trayectoria de fotones dentro de la celda a modelar | 31 |
| Figura 3.7. Espectro solar AM 1.5 global | 38 |
| Figura 3.8. Coeficientes de absorción para CdS y CdTe | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.1. Cantidad de fotones absorbidos vs. Posición dentro del CdTe | 42 |
| Figura 4.2. Corriente de corto circuito vs. Espesor de CdTe para $S_n=10^2\text{cm/s}$ | 43 |
| Figura 4.3. Corriente de corto circuito vs. Espesor de CdTe para $S_n=10^7\text{cm/s}$ | 43 |
| Figura 4.4. Voltaje de circuito abierto vs. Espesor de CdTe para $S_n=10^2\text{cm/s}$. | 45 |
| Figura 4.5. Voltaje de circuito abierto vs. Espesor de CdTe para $S_n=10^7\text{cm/s}$. | 45 |
| Figura 4.6. Factor de llenado vs. Espesor de CdTe para $S_n=10^2\text{cm/s}$ | 47 |
| Figura 4.7. Factor de llenado vs. Espesor de CdTe para $S_n=10^7\text{cm/s}$ | 47 |
| Figura 4.8. Eficiencia vs. Espesor de CdTe para $S_n=10^2\text{ cm/s}$ | 49 |
| Figura 4.9. Eficiencia vs. Espesor de CdTe para $S_n=10^7\text{ cm/s}$ | 50 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Parámetros físicos del CdS y CdTe utilizados en las simulaciones ... | 39 |
| Tabla 2. Valores máximos obtenidos para cada parámetro de salida simulado | 52 |
| Tabla 3. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{14}\text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{17}\text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^2\text{cm/s}$ | 75 |
| Tabla 4. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{14}\text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{18}\text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^2\text{cm/s}$ | 75 |
| Tabla 5. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{15}\text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{17}\text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^2\text{cm/s}$ | 76 |
| Tabla 6. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{15}\text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{18}\text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^2\text{cm/s}$ | 76 |
| Tabla 7. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{14}\text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{17}\text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^7\text{cm/s}$ | 76 |
| Tabla 8. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{14}\text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{18}\text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^7\text{cm/s}$ | 77 |
| Tabla 9. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{15}\text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{17}\text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^7\text{cm/s}$ | 77 |
| Tabla 10. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{15}\text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{18}\text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^7\text{cm/s}$ | 77 |

Resumen

En este trabajo se desarrolló un modelo analítico para describir y estudiar el funcionamiento de una celda solar de capa delgada tomando en cuenta los efectos asociados al hecho de tener una capa absorbente con dimensiones muy pequeñas (menos de $10\mu\text{m}$) en comparación con las celdas tradicionales de silicio. Este nuevo modelo permite tomar en cuenta efectos que no se contemplaban con las ecuaciones clásicas que describen el funcionamiento de una celda de homounión de base ancha como en el caso del silicio, e incluye algunas modificaciones en los cálculos para adaptarse mejor a lo que ocurre cuando se tiene una capa absorbente muy delgada, por ejemplo: la reducción de la zona desértica en la unión al ser polarizada directamente, la absorción de la luz reflejada en la parte trasera de la celda, y la reducción de la velocidad de recombinación efectiva en el contacto metálico posterior debido a la adición de una capa p+, un análisis más preciso de las corrientes de oscuridad debidas a la difusión y recombinación de los portadores y el cálculo del potencial electrostático formado en la heterounión tomando en cuenta las discontinuidades en las bandas debido a la diferencia de anchos de banda y afinidades electrónicas.

Aunque este modelo es aplicable para cualquier celda solar de capa delgada, se realizaron simulaciones para una celda de heterounión de CdS/CdTe ya que dentro de las celdas de capa delgada, las fabricadas con estos materiales son unas de las más prometedoras fuentes de energía para ser producidas. [1] [2].

Se obtuvieron las curvas I-V de una celda de CdS/CdTe/P+ variando los siguientes parámetros de fabricación: a) la concentración de impurezas en el CdS, b) la concentración de impurezas en el CdTe, c) la velocidad de recombinación efectiva en el contacto metálico posterior y d) el espesor de la capa absorbente de CdTe. Con estos resultados se obtuvieron los parámetros eléctricos de la celda: a) punto de máxima potencia, b) voltaje de circuito abierto, c) corriente de corto circuito, d) factor de llenado y e) eficiencia de conversión. De esta forma fue posible observar el comportamiento de estos parámetros eléctricos en función de los parámetros de fabricación y encontrar una configuración óptima que permitirá producir una celda solar con la mayor eficiencia posible.

Abstract

In this work, an analytical model to describe and study the operation of a thin-film solar cell was developed taking into account the associated effects of having an absorbent layer with very small dimensions (less than $10\mu\text{m}$) when compared to traditional silicon based cells. This new model allows to take into account effects that are not covered with the classical equations used to describe the operation of a conventional thick homojunction cell as in the case of silicon, and also includes some modifications to the calculations in order to better adapt the model to what really happens when a very thin absorbent layer is used in a solar cell, for example: the reduction of the depletion layer when forward biased, the absorption of the reflected light at the back of the cell, and the reduction on the effective surface recombination velocity on the rear metal contact due to the incorporation of a p^+ layer, a more accurate dark current analysis due to diffusion and recombination of carriers and the calculation of the built-in potential across the heterojunction taking into account the band discontinuities due to the difference of bandgaps and electron affinities.

Although this model is applicable to any thin-film solar cell, simulations for a heterojunction CdS/CdTe solar cell were performed, since thin-film solar cells manufactured with these materials are one of the most promising energy sources to be produced [1] [2].

I-V curves of a CdS/CdTe/ P^+ solar cell were obtained varying the following manufacturing parameters: a) the impurity concentration in the CdS, b) the impurity concentration in CdTe, c) the effective surface recombination velocity at the back metallic contact and d) the thickness of the CdTe absorber layer. With these results, the electric parameters of the cell were obtained: a) maximum power point, b) open-circuit voltage, c) short-circuit current, d) fill factor and e) efficiency. In this way, it was possible to observe the behavior of these electrical parameters as a function of the manufacturing parameters and find an optimal configuration that will allow to produce a solar cell with the highest possible efficiency.

Capítulo 1. Presentación de tesis

1.1 Introducción

Es un hecho que la demanda energética mundial se ha ido incrementando con el plazo de los años debido al constante aumento de la población y al estilo de vida cada vez más acelerado y consumista de nuestra sociedad, esto presenta un gran problema ya que cada vez resulta más difícil poder suplir la demanda energética mundial. Actualmente el consumo mundial de energía es más del doble que en los años 70's (Figura 1.1) y los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) constituyen más del 80% de la producción mundial energética [3] (Figura 1.2). Sin embargo, las reservas de combustibles de muchos países han caído sustancialmente en los últimos años y las cifras siguen disminuyendo; México pasó de tener 49.8 mil millones de barriles de petróleo en sus reservas en 1994 a 11.1 mil millones de barriles en 2014 [4], esto supone una reducción de un 448% en 20 años.

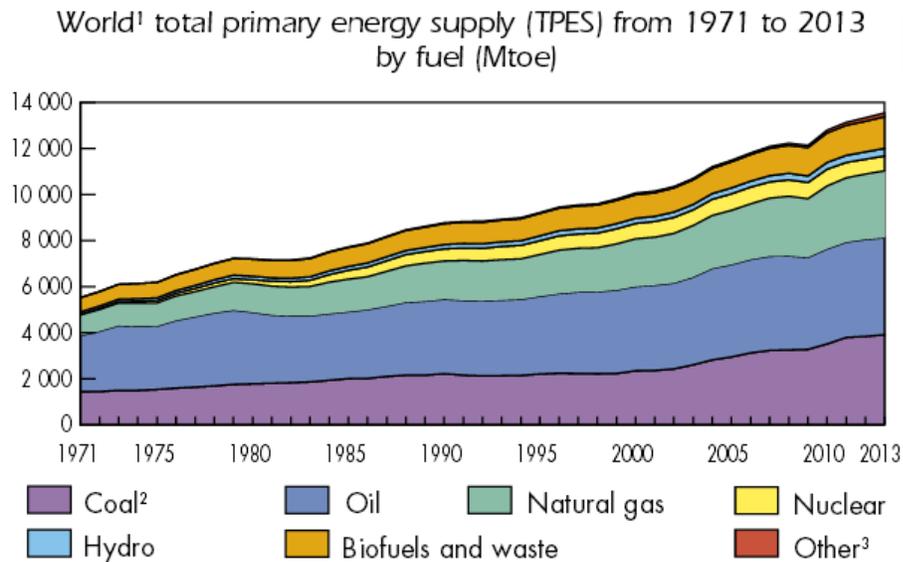


Figura 1.1. Producción mundial de energía primaria total de 1971 a 2013

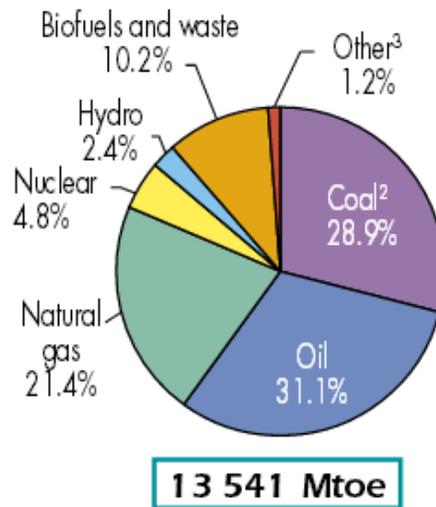


Figura 1.2. Producción mundial de energía primaria total en 2013 por fuente de generación

Aunado a esta problemática de agotamiento de los combustibles fósiles, se encuentra el aumento de emisiones de gases contaminantes; el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea informó que en el 2013 se emitieron 35.3 mil millones de toneladas de CO₂ [5]. Estos elevados niveles de contaminantes en la atmósfera han causado estragos en los últimos años y es un tema de primordial importancia en las agendas políticas de muchos países. Eventos como la Conferencia Internacional sobre Cambio Climático tienen como objetivo establecer medidas y estrategias entre distintos países para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global y a la mala calidad del aire en las grandes urbes.

Es en el marco de estas problemáticas que las energías renovables surgen como la solución a los estragos que la creciente demanda energética ha producido, principalmente la energía fotovoltaica, pues es una de las fuentes de energía más limpias y accesibles que existen, lo que explica el gran interés por desarrollar tecnologías fotovoltaicas cada vez más eficientes y de menor costo.

En el 2014 la capacidad instalada de paneles solares a nivel mundial era de 183 GW y la cifra sigue creciendo rápidamente, sobre todo en países europeos donde un buen porcentaje de la producción total de energía proviene de sistemas fotovoltaicos; por ejemplo, en ese mismo año la capacidad instalada en Alemania

era de 38 GW, lo que representa una producción energética del 7% de la demanda total del país [6]. Aunque Europa es el principal contribuyente de la capacidad instalada de energía fotovoltaica en el mundo, China y Taiwán son los países con mayor producción de paneles fotovoltaicos a nivel mundial [6].

En México, la aportación por parte de sistemas fotovoltaicos a la producción total de energía es aún pequeña comparada con otros países, en el 2014 sólo el 0.1% de la producción total primaria provenía de sistemas fotovoltaicos [7] (Figura 1.3). Con una capacidad instalada de 56 MW [8], sin embargo la perspectiva de crecimiento para las energías fotovoltaicas es muy prometedora, pues se espera tener una capacidad instalada adicional de 3,121 MW para el 2028 [9], lo que supone una generación adicional de energía de 5,216 GWh/año [8].

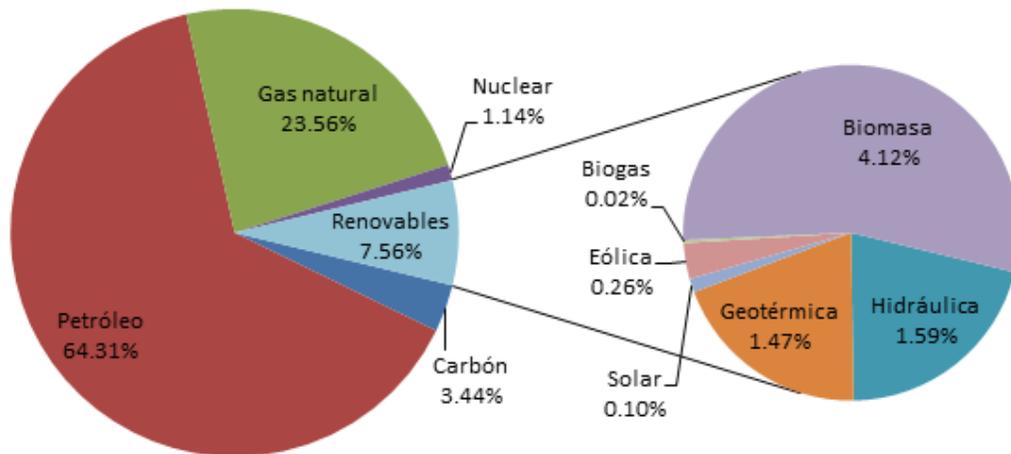


Figura 1.3. Producción de energía primaria en México en 2014

Como se mencionó anteriormente, los principales objetivos de la investigación sobre celdas solares son la reducción de costos de producción y el aumento en la eficiencia de conversión para lograr que la producción de energía a través de sistemas fotovoltaicos siga creciendo. Es por esto que las diferentes tecnologías de fabricación se han catalogado en 3 generaciones de acuerdo a la relación de su eficiencia con su costo (Figura 1.4).

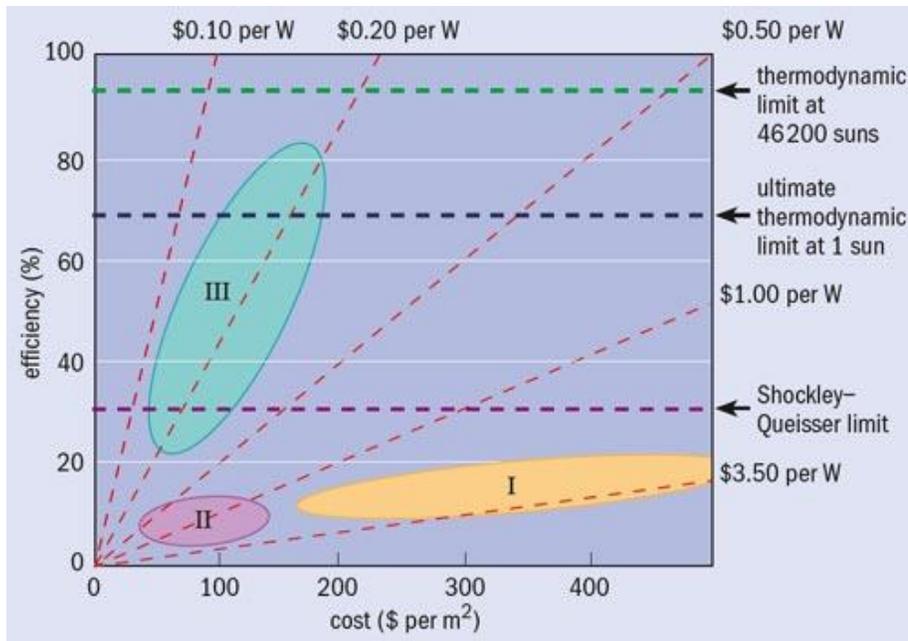


Figura 1.4. Generaciones de tecnologías fotovoltaicas

La primera generación comprende las celdas fabricadas con obleas de silicio y típicamente presentan eficiencias de entre un 15 y 20%, estas tecnologías son las que dominan el mercado de fotovoltaicos por su buena estabilidad y elevados tiempos de vida, sin embargo el incremento en su eficiencia y la reducción en sus costos de fabricación ya no pueden presentar mejoras significativas. [10]

En el extremo opuesto se encuentran las celdas pertenecientes a la tercera generación, que incluyen las celdas orgánicas y de polímeros, celdas de multiunión y de tecnologías emergentes como las perovskitas. Este tipo de celdas presentan altas eficiencias pero tienen la desventaja de ser muy costosas y difíciles de fabricar como en el caso de las celdas de multiunión o presentan mucha inestabilidad en su funcionamiento y tiempo de vida como en las celdas orgánicas.

La segunda generación cae en el medio de las generaciones mencionadas. Dentro de esta categoría se encuentran las tecnologías de capa delgada como las basadas en silicio amorfo, CIGS y CdTe, las celdas de esta generación presentan eficiencias un poco más bajas que las de la primera generación, pero tienen la ventaja de utilizar una menor cantidad de material en su fabricación, lo que ayuda a disminuir sus costos de producción además de que pueden ser producidas por procesos más sencillos; por ejemplo, la capa de CdS se puede crecer mediante baño químico o

CVD (Chemical Vapor Deposition) a presión atmosférica mientras que el CdTe típicamente se deposita por CSS (Close-Spaced Sublimation) [11] [12]. Variando parámetros como temperatura, tiempo de depósito y concentración de los precursores utilizados se obtendrán distintos valores para los espesores e impurificaciones de las capas.

Este tipo de celdas se caracteriza principalmente por estar fabricadas con semiconductores de dimensiones muy pequeñas, del orden de $10\mu\text{m}$ o menos, las celdas fabricadas con CdS y CdTe son tal vez las más comunes dentro de esta categoría de celdas, su estructura típica suele ser como la mostrada en la Figura 1.5 [13].

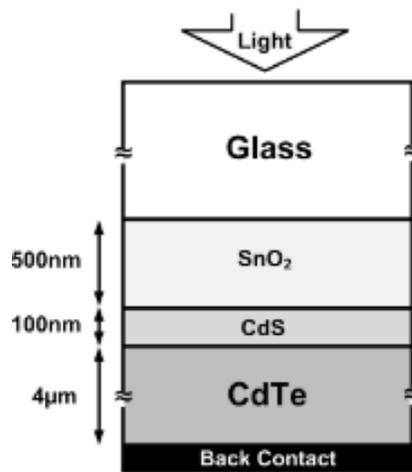


Figura 1.5. Estructura típica de una celda CdS/CdTe

(Imagen tomada de S. Khosroabadi y S. H. Keshmiri, «Design of a high efficiency ultrathin CdS/CdTe solar cell using back surface field and backside distributed Bragg reflector,» *Optics Express*, vol. 22, nº S3, 2014.)

Estas celdas de capa delgada poco a poco comienzan a ganar lugar en el mercado mundial de tecnologías fotovoltaicas dominado principalmente por las celdas de silicio, en el 2014 las celdas de capa delgada constituían el 9% de la producción total de celdas solares [6] y a principios del 2016 el precio por Watt pico para módulos de capa delgada rondaba los \$0.55 USD mientras el precio para los módulos de silicio policristalino era de \$0.52 USD [14]. En los últimos años se han logrado avances importantes que prevén un buen futuro para estas celdas y dan razón para pensar que estas celdas tienen el potencial de ser una tecnología líder

en fotovoltaicos; el récord actual de eficiencia para una celda de CdS/CdTe es de 22.1% y para una CIGS es de 22.3% [15] y recientemente se ha reportado una celda de CdS/CdTe con un voltaje de circuito abierto que supera la barrera de 1V [16].

Como es de esperarse, existe mucha investigación científica respecto a este tema, pues se pretende hacer estas celdas más rentables y poder obtener costos de producción de energía menores a los costos actuales con celdas de silicio, las cuales siguen dominando el mercado actual. No obstante, estas celdas presentan varias características que le otorgan ventajas sobre el silicio, por ejemplo: Estas celdas pueden ser fabricadas con procesos más sencillos y menos costosos que las del silicio y a temperaturas relativamente bajas [1], el CdTe es un material de bandas directas de manera que las transiciones ópticas son más probables que en el silicio, su coeficiente de absorción es mayor que en el silicio, permitiéndole absorber la misma cantidad de fotones que en el silicio en un espesor mucho menor, además su ancho de banda de $\sim 1.5\text{eV}$ es más adecuado para la absorción del espectro solar que la del silicio ($\sim 1.12\text{eV}$).

A diferencia de las celdas de primera generación, aún existe un gran potencial para hacer celdas de capa delgada con eficiencias mayores a las actuales, principalmente las tecnologías basadas en CdTe y CIGS. Para lograr este cometido es necesario encontrar métodos de fabricación que permitan tener una buena relación entre el costo de su producción y la calidad de las películas que aseguren lograr buenas eficiencias de conversión al mismo tiempo que no encarezcan su manufactura, además de esto, también es necesario realizar un análisis del funcionamiento de las celdas solares de este tipo para poder determinar los parámetros físicos tanto de los materiales a utilizar como de la estructura de la celda que permitan obtener las mejores eficiencias.

Es precisamente este último punto el tema a tratar en esta tesis, la cual está dividida en 5 capítulos para su mejor seguimiento.

El primer capítulo es la introducción de la tesis donde se exponen algunas cifras y datos relevantes al consumo energético en México y el mundo así como una breve descripción del estado actual de las tecnologías fotovoltaicas, cómo se categorizan en generaciones y algunas características de éstas. También es aquí donde se

presentan los objetivos que se pretenden cumplir con esta tesis y la motivación de la misma.

El segundo capítulo es el marco teórico, en donde se presentan algunos temas de importancia para el buen entendimiento del trabajo.

En el tercer capítulo se expone el trabajo de investigación realizado, la explicación del modelo analítico, así como los problemas y observaciones encontrados durante el proceso de modelado.

En el cuarto capítulo se encuentran los resultados obtenidos de las distintas simulaciones elaboradas para una celda de CdS/CdTe variando distintos parámetros de fabricación y la discusión de estos resultados para encontrar los valores óptimos para fabricar una celda de este tipo con la mejor eficiencia.

Por último se exponen las conclusiones de esta tesis así como las perspectivas de trabajo a futuro y posibles mejoras en el modelo analítico.

1.2 Objetivos

- Obtener un modelo analítico que describa el funcionamiento de una celda solar de capa delgada tomando en cuenta consideraciones omitidas en el análisis de celdas volumétricas convencionales.
- Encontrar los parámetros de fabricación óptimos para una celda de capa delgada de CdS/CdTe.
- Observar los efectos que implica tener una velocidad de recombinación baja en la parte posterior al incluir una capa p+.

1.3 Motivación

En la actualidad no existe en la literatura un análisis físico del funcionamiento de una celda solar de capa delgada que tome en cuenta los efectos que implica tener una capa absorbente demasiado delgada, llegando a ser el espesor de ésta incluso

menor a la extensión de la zona desértica formada en la unión, esto afecta el análisis electrostático del dispositivo así como los cálculos para obtener la fotocorriente debida a la absorción de los fotones incidentes y reflejados y las corrientes de oscuridad.

Un estudio que considere las implicaciones de una capa absorbente muy delgada permitirá conocer mejor el funcionamiento de la celda en cuestión, aunado a esto, un modelo analítico permite observar el panorama general de lo que ocurre con cada variable de la celda a diferencia de los análisis numéricos donde se tiene un esquema de caja negra en el que únicamente se introducen variables y se obtienen resultados.

En un modelo analítico es posible observar el efecto que una variable de entrada tiene en cada una de las ecuaciones que describen el comportamiento de la celda, analizar de qué forma es posible optimizar esa variable o analizar distintos escenarios con diferentes parámetros de fabricación y ver lo que sucede con cada uno de los parámetros de salida de la celda y por qué eso mejora o empeora el funcionamiento de la celda.

De esta manera será posible obtener un análisis más preciso que permita encontrar posibles mejoras en la optimización de los parámetros de fabricación que difieren de los obtenidos con los modelos analíticos convencionales.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Unión P-N

La unión P-N es la base de la electrónica y está presente en la mayoría de los dispositivos electrónicos. Una celda solar es un ejemplo de una unión P-N, es por eso que su entendimiento físico es de suma importancia para el desarrollo de esta tesis.

Para simplificar el estudio de la unión P-N, supondremos el caso más simple en el que el lado tipo P y el tipo N están fabricados del mismo material (homounión), ambos materiales tienen concentraciones de impurezas constantes y el cambio entre el material tipo P y N es abrupto.

Si se tuviera las dos regiones de la unión separadas, los diagramas de bandas de energía de cada material lucirían como se muestra en la Figura 2.1 [17].

Cuando se tienen los materiales por separado, el nivel de Fermi es distinto en cada uno de ellos como consecuencia de la diferencia del tipo de conductividad de estos dos materiales. Al poner en contacto el semiconductor tipo P con el tipo N, se forma la unión P-N. Para alcanzar el equilibrio térmico y mantener un nivel de Fermi constante en toda la estructura, electrones mayoritarios del lado N se difunden hacia el lado P y huecos mayoritarios del lado P se difunden hacia el lado N, como consecuencia de este intercambio de cargas, un campo eléctrico se genera en la vecindad de la unión y por lo tanto aparece un doblamiento de bandas en la estructura (Figura 2.2).

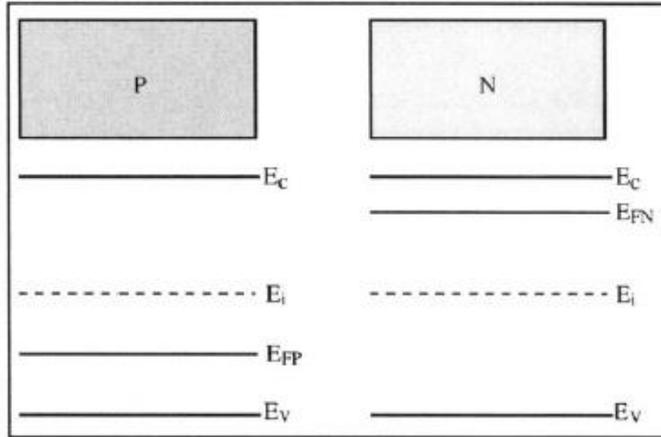


Figura 2.1. Diagrama de bandas de energía de un material tipo P y N

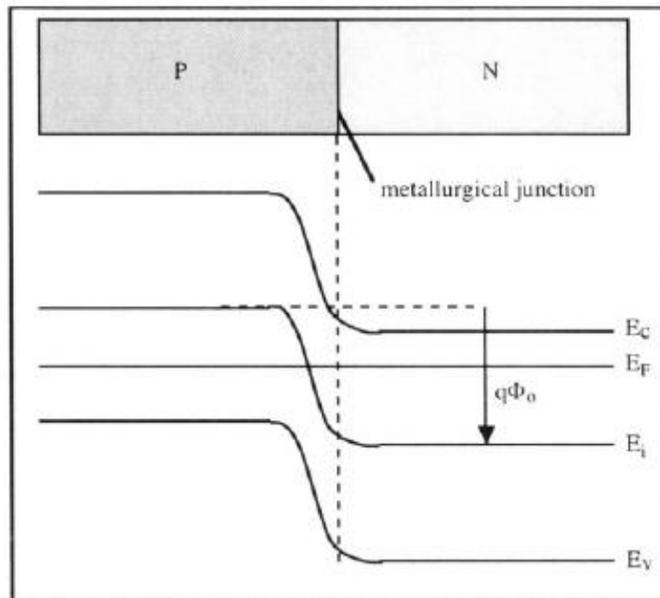


Figura 2.2. Unión P-N en equilibrio termodinámico

Las impurezas donoras en el lado N cuyos electrones se difundieron hacia el lado P de la unión quedan ionizadas como cargas positivas, de la misma forma, en la proximidad de la unión del lado P, las impurezas aceptoras quedan ionizadas negativamente. Esta región de la unión donde prácticamente no hay portadores libres y la densidad de carga está definida prácticamente en su totalidad por las impurezas ionizadas se denomina *zona desértica* (Figura 2.3). Esta suposición de ausencia de cargas móviles es fundamental para poder resolver la ecuación de

Poisson analíticamente y obtener las ecuaciones que describen el comportamiento electrostático de la unión P-N.

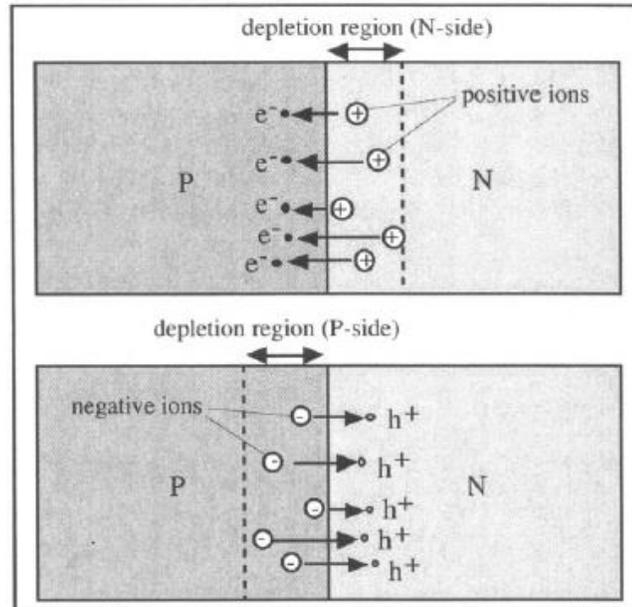


Figura 2.3. Regiones desérticas en cada lado de la unión debido a la difusión de portadores

Usando esta suposición y asumiendo que fuera de la zona desértica existe neutralidad de carga y por lo tanto el campo eléctrico en esas regiones es cero, se puede resolver la ecuación de Poisson para encontrar la expresión para la distribución del potencial eléctrico ($\phi(x)$) en las dos partes de la zona de deserción [18] (Ecuación 1 y 2).

$$\phi(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (x + x_p)^2 \quad \text{para } -x_p \leq x \leq 0 \quad (1)$$

$$\phi(x) = \phi(0) + \frac{qN_D}{\epsilon_s} \left(x_n - \frac{x}{2}\right)x \quad \text{para } 0 \leq x \leq x_n \quad (2)$$

$$\phi(0) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} x_p^2 \quad (3)$$

Donde q es la carga fundamental del electrón, N_A y N_D son las concentraciones de impurezas aceptoras en el material tipo P y de impurezas donoras en el material tipo N, respectivamente. x_n y x_p es la extensión de la zona desértica en el lado N y lado P, y ϵ_s es la permitividad eléctrica del material.

El potencial interconstruido a través de toda la unión es la suma de la contribución del potencial eléctrico formado en la parte P y el de la parte N (Ecuación 4).

$$\phi_{bi} = \frac{qN_A}{2\varepsilon_s} x_p^2 + \frac{qN_D}{2\varepsilon_s} x_n^2 \quad (4)$$

Utilizando las relaciones de Boltzman también se puede obtener el potencial interconstruido que es igual a la curvatura de las bandas de energía:

$$\phi_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (5)$$

En donde n_i es la concentración de portadores intrínseca del material, T es la temperatura y k es la constante de Boltzman.

Sabemos que existe neutralidad de carga entre las dos partes de la zona de deserción, es decir, el total de carga positiva del lado N de la zona de deserción es igual en magnitud al total de la carga negativa en el lado P:

$$qN_D x_n = qN_A x_p \quad (6)$$

Utilizando las ecuaciones 4-6, es posible obtener la extensión de la zona de deserción:

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \frac{\phi_{bi} N_D}{N_A(N_A + N_D)}} \quad (7)$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \frac{\phi_{bi} N_A}{N_D(N_A + N_D)}} \quad (8)$$

$$x_{zd} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(N_D + N_A)\phi_{bi}}{qN_A N_D}} \quad (9)$$

En la Figura 2.4 [18] se observa de manera gráfica los parámetros electrostáticos obtenidos de este análisis.

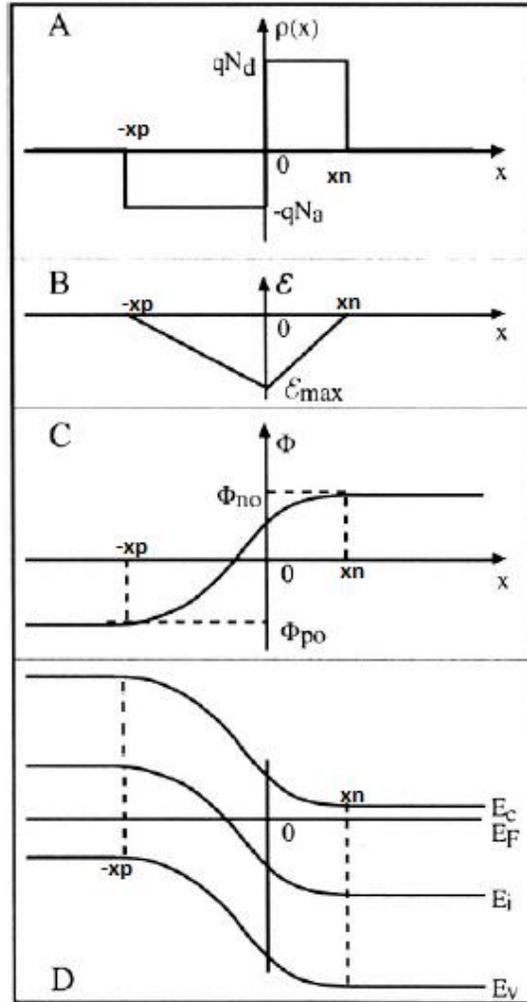


Figura 2.4. Análisis electrostático de homounión P-N. A) Densidad de carga. B) Campo eléctrico. C) Potencial eléctrico D) Diagrama de bandas

2.2 Heterounión

Una heterounión es una unión formada por dos semiconductores distintos. La diferencia entre el ancho de banda de los dos semiconductores otorga un grado de libertad adicional que permite darle nuevas características y aplicaciones a dispositivos electrónicos [18].

A diferencia de las homouniones, la presencia de dos materiales con distintos anchos de banda, afinidad electrónica y permitividad eléctrica hace que el análisis

de sus diagramas de energía sea distinto. El modelo de Anderson es una aproximación semiclásica que permite construir el diagrama de bandas de una heteroestructura donde las propiedades del semiconductor varían con la posición [19]. Este modelo toma como referencia el nivel de vacío (E_0) que es la energía requerida para liberar un electrón de un átomo en la superficie del semiconductor y la afinidad electrónica (χ) que es la energía de separación entre la banda de conducción del material y el nivel de vacío.

En la Figura 2.5 [19] se puede apreciar un diagrama de bandas de dos materiales distintos por separado y un diagrama de bandas usando el modelo de Anderson donde se aprecia cómo se modifican las bandas de conducción y valencia para alcanzar el equilibrio térmico (nivel de Fermi constante) al momento de ser puestos en contacto y formar la heterounión. Es relevante hacer notar las discontinuidades en las bandas de conducción y de valencia que aparecen debido a la diferencia de anchos de banda y afinidades electrónicas de los dos materiales, pues esto es un fenómeno característico de las heterouniones y tiene un papel importante en su análisis electrostático.

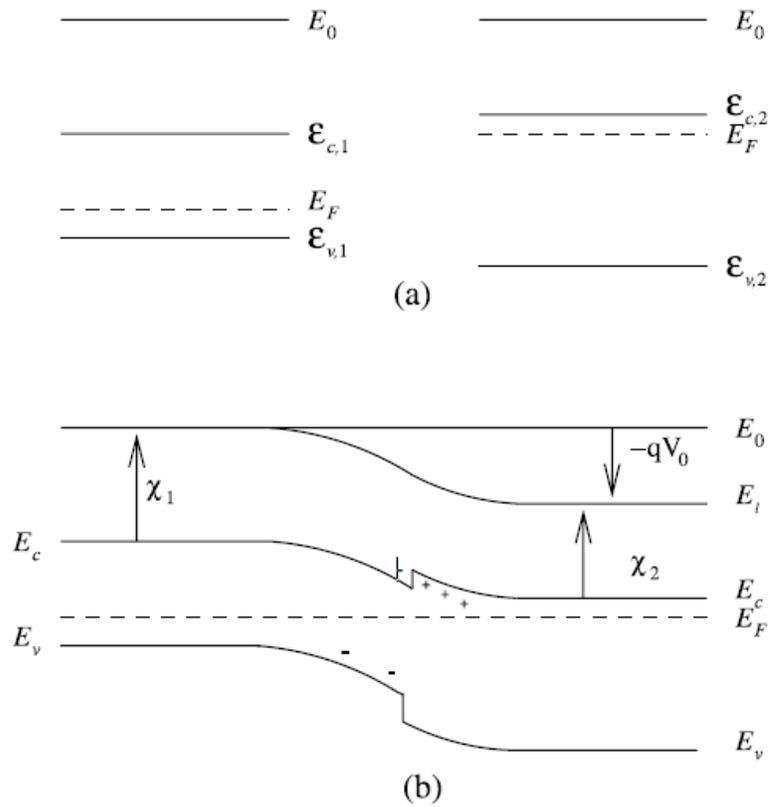


Figura 2.5. Diagrama de bandas de una heterounión en equilibrio. A) Semiconductores por separado. B) al momento de ser puestos en contacto

2.3 Celda solar

Una celda solar es un dispositivo fotovoltaico capaz de convertir la luz del sol en electricidad de forma directa. Su estructura básica es una unión P-N donde fotones provenientes de la radiación solar inciden sobre una cara de la celda para ser absorbidos por el material y así generar pares electrón-hueco que posteriormente serán colectados por los contactos metálicos que transportan la corriente al exterior para su utilización (Figura 2.6).

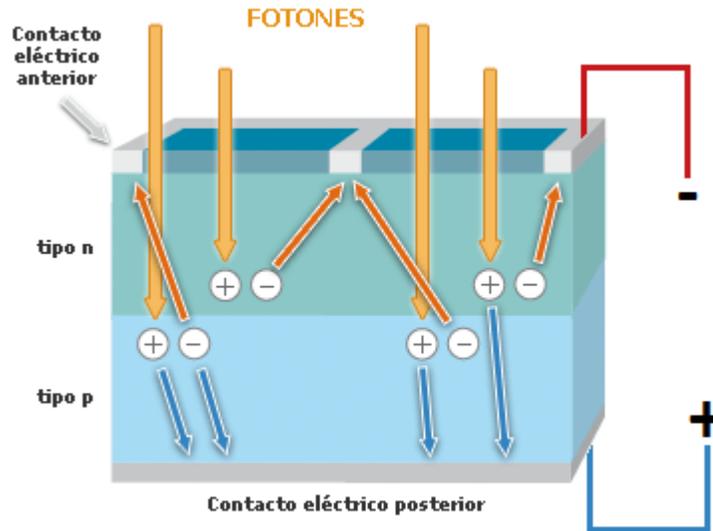


Figura 2.6. Estructura básica de una celda solar

El secreto de una celda para convertir luz en electricidad radica en el efecto fotoeléctrico que presentan los materiales semiconductores y en los fenómenos electrostáticos que ocurren en una unión P-N.

De la teoría de bandas de los semiconductores sabemos que si un fotón incide sobre un semiconductor con un ancho de banda menor a la energía de dicho fotón, éste puede ser absorbido haciendo que un electrón pase de la banda de valencia a la banda de conducción dejando un hueco tras de sí (par electrón-hueco). Una celda solar que es expuesta a la luz solar recibe una enorme cantidad de fotones que a su vez generan una gran cantidad de pares electrón-hueco, esto se traduce en un exceso de ambos tipos de portadores en el material, sin embargo el exceso de portadores mayoritarios será prácticamente nulo comparado con la gran cantidad de portadores que había en equilibrio y por lo tanto únicamente los portadores minoritarios son de relevancia.

Como se vio en la sección 2.1, en una unión P-N aparece un campo eléctrico como consecuencia de la diferencia de los niveles de Fermi de los dos materiales, es precisamente este campo eléctrico el que atrae a los portadores minoritarios generados en cada lado de la celda solar, haciendo que los electrones generados en el lado P sean arrastrados hacia el lado N y los huecos generados en el lado N se muevan hacia el lado P. Debido a que los portadores minoritarios de cada lado

son de carga opuesta pero se mueven en sentido contrario, el flujo de carga neto producido por la corriente de huecos tiene el mismo sentido que la corriente de electrones y por lo tanto la corriente total de la celda producida por la absorción de fotones es la suma de las dos, en la Figura 2.7 se puede apreciar gráficamente lo descrito [20].

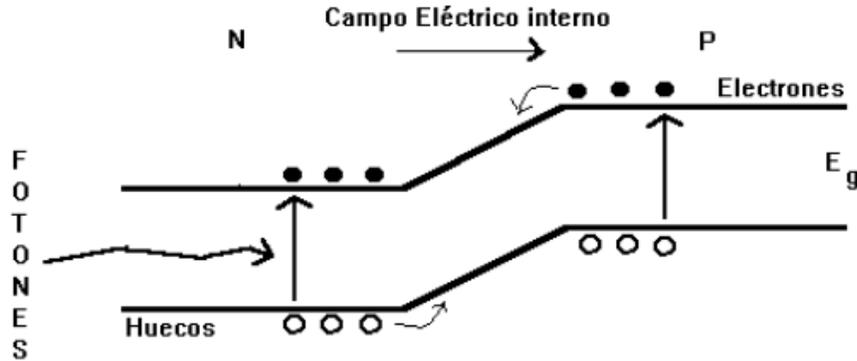


Figura 2.7. Esquema de operación de una celda solar analizada desde su diagrama de bandas

Es ahora pertinente conocer cuál es la magnitud de esta fotocorriente, para ello es necesario analizar cada región de la celda solar cuando se encuentra bajo iluminación: a) región cuasi-neutra en el lado N, b) zona desértica y c) región cuasi-neutra en el lado P. Realizar este análisis involucra las expresiones de generación por los fotones absorbidos en cada región, así como resolver las ecuaciones de transporte ambipolar de los portadores. Hovel [21] realiza este análisis para una celda de homounión como la que se muestra en la Figura 2.8 asumiendo que la unión P-N es abrupta, la celda está hecha de materiales volumétricos y las concentraciones de impurezas, movilidades y tiempos de vida en cada material son uniformes. La fotocorriente generada en la región cuasi-neutra del lado N por longitud de onda viene dada por:

$$J_p = \left[\frac{qF(1-R)\alpha L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \right] \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - \exp(-\alpha x_j) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \cosh \frac{x_j}{L_p} + \sinh \frac{x_j}{L_p} \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh \frac{x_j}{L_p} + \cosh \frac{x_j}{L_p}} - \alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right] \quad (10)$$

Donde F es la densidad del flujo de fotones por longitud de onda, R es la reflectancia por longitud de onda, Lp la longitud de difusión de los huecos, Dp el coeficiente de difusión, Sp la velocidad de recombinación superficial para los

huecos, α el coeficiente de absorción del material y x_j es la distancia desde la parte superior de la celda hasta la unión.

Para la zona desértica el cálculo de la fotocorriente es más sencillo; el campo eléctrico en esta región se puede suponer lo suficientemente intenso como para que todos los portadores generados sean barridos hacia afuera de la zona desértica casi inmediatamente de forma que no les da tiempo de recombinarse, es decir, todos los portadores generados en esta zona contribuirán con la corriente. Si suponemos que cada fotón con energía mayor o igual al ancho de banda del material produce un par electrón-hueco, entonces la densidad de corriente generada en esta zona es el número de fotones absorbidos por unidad de tiempo por unidad de área multiplicados por la carga del electrón:

$$J_{zd} = qF(1 - R) \exp(-\alpha x_j) [1 - \exp(-\alpha W)] \quad (11)$$

En donde W representa la longitud de la zona desértica.

Es importante mencionar que en este análisis la parte de la zona desértica del lado N es menospreciada ya que se supone que la concentración de impurezas en el lado N es mucho mayor que en el lado P y por lo tanto casi toda la extensión de la zona desértica se concentra en el lado P.

Por último se tiene la corriente de electrones debida a la absorción en la región cuasi-neutra tipo P, resolviendo la ecuación ambipolar se obtiene:

$$J_n = \frac{qF(1-R)\alpha L_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \exp[-\alpha(x_j + W)] \left[\alpha L_n - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} (\cosh \frac{H'}{L_n} - \exp(-\alpha H')) + \sinh \frac{H'}{L_n} + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh \frac{H'}{L_n} + \cosh \frac{H'}{L_n}} \right] \quad (12)$$

En donde las variables son las mismas mencionadas para la ecuación 10 pero con el subíndice 'n' que representa a los electrones en vez de huecos y la variable H' que es la longitud de la región cuasi-neutra en el material tipo P.

La fotocorriente total en corto circuito por longitud de onda es la suma de las ecuaciones 10, 11 y 12.

$$J_L = J_p + J_{zd} + J_n \quad (13)$$

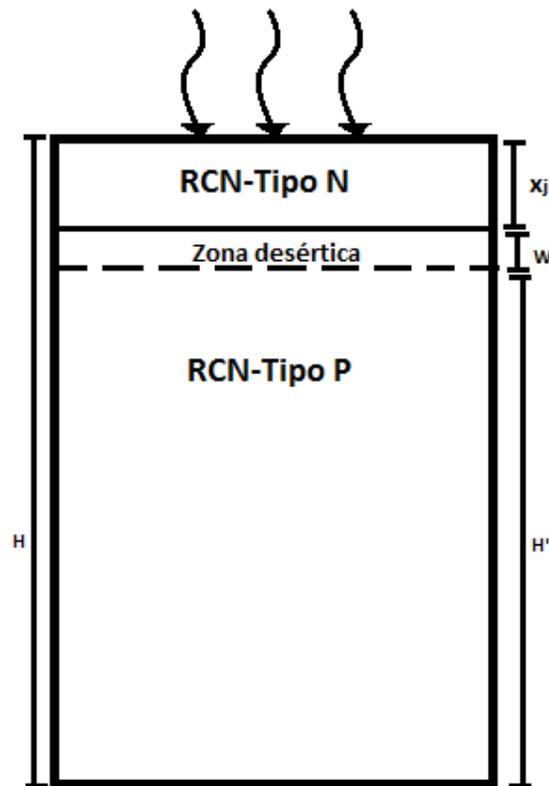


Figura 2.8. Celda Solar tipo N-P utilizada para la deducción de ecuaciones de corriente

Ya se vio lo que ocurre con la celda solar cuando está iluminada, sin embargo también es importante analizar qué es lo que sucede cuando la celda se encuentra en oscuridad ya que esto permitirá conocer qué tanto de la fotocorriente generada podrá ser utilizada a la salida.

Cuando se extrae corriente de la celda solar, ésta se polariza directamente y por lo tanto surge una corriente que va en sentido contrario a la extraída, a esta corriente se le conoce como *corriente de oscuridad*. Por lo tanto la corriente extraída de la celda es la fotocorriente menos la corriente de oscuridad si no se toman en cuenta los posibles efectos de las resistencias en serie y paralelo; es por esto que se desea tener la menor corriente de oscuridad posible para obtener más corriente a la salida y una eficiencia mayor.

Los principales mecanismos de transporte que contribuyen a esta corriente de oscuridad son por difusión de portadores en las regiones cuasi-neutras y por

recombinación de electrones y huecos en la zona desértica. Existen otros mecanismos como el tunelamiento de portadores a través de estados dentro de la banda prohibida, pero su contribución es mínima y por lo regular no es considerada en los cálculos [21].

Esta corriente de oscuridad está definida por:

$$J_{osc} = J_{00} \left[\exp\left(\frac{qV_j}{A_0 kT}\right) - 1 \right] \quad (14)$$

Donde J_{00} es una constante conocida como *corriente de saturación* la cuál toma en cuenta las contribuciones de los dos mecanismos de transporte principales, A_0 es el factor de idealidad de la celda que tiene un valor entre 1 y 2 dependiendo si el mecanismo dominante es el de difusión en la región cuasi-neutra o recombinación en la zona desértica, respectivamente y V_j es el voltaje de polarización directa de la celda.

Es relevante hacer notar que la ecuación 14 tiene la misma forma que la expresión para la corriente de un diodo, esto es porque el circuito equivalente más simple de una celda no es más que una fuente de corriente conectada a un diodo (Figura 2.9).

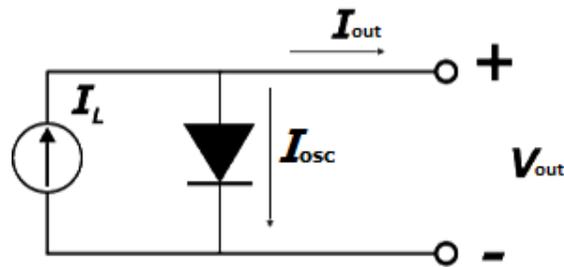


Figura 2.9. Circuito equivalente básico de una celda solar

Del circuito equivalente es fácil observar que:

$$I_{out} = I_L - I_{00} \left[\exp\left(\frac{qV_{out}}{A_0 kT}\right) - 1 \right] \quad (15)$$

Por lo tanto la corriente en corto circuito es:

$$I_{sc} = I_L \quad (16)$$

Y el voltaje de circuito abierto:

$$V_{oc} = A_o \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\left(\frac{I_{sc}}{I_{o0}} \right) + 1 \right) \quad (17)$$

Al graficar la ecuación 14 se obtiene la curva corriente-voltaje característica de una celda solar, a partir de la cual se puede encontrar la curva potencia-voltaje (Figura 2.10). Conociendo el punto de potencia máxima (P_{MAX}), la corriente de corto circuito y el voltaje de circuito abierto es posible calcular finalmente el *factor de llenado*, un parámetro muy importante de la celda que indica qué tan “cuadrada” es la curva I-V y da una idea de la calidad de la celda solar y está relacionado con su eficiencia.

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (18)$$

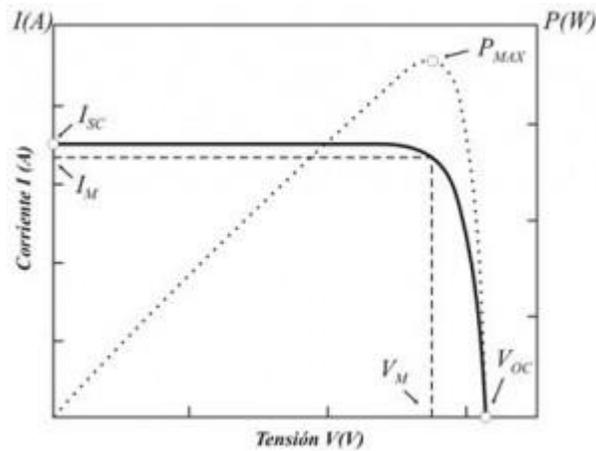


Figura 2.10. Curvas I-V y P-V características de una celda solar

Capítulo 3. Modelado de celda solar de capa delgada y realización del programa de computadora

Para la realización del modelo analítico de celdas de capa delgada se partió de la teoría explicada en el Capítulo 2, sin embargo las ecuaciones descritas ahí sufrieron varias modificaciones para adecuarse al funcionamiento de una celda como la mostrada en la Figura 3.1 que es la que se pretende modelar. A continuación se explican las consideraciones hechas para realizar este modelo analítico y cómo se diferencia de un modelo hecho para celdas convencionales de silicio.

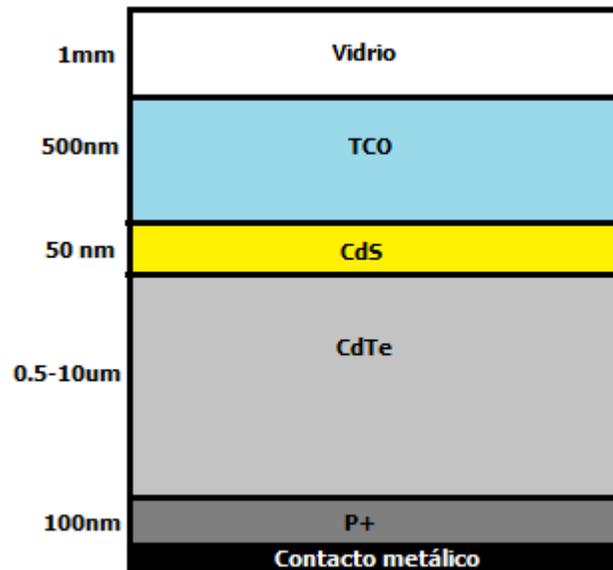


Figura 3.1. Estructura de celda utilizada para crear el modelo analítico

3.1 Capa P+ en la parte trasera

Lo primero que se puede notar en esta celda es que se incluye una capa de un material P+. Esta capa P+ aporta varias ventajas a la celda: ayuda a reducir la velocidad de recombinación superficial comparada con la que se tendría si el contacto metálico estuviera directamente sobre el CdTe, pues la barrera de potencial en la unión P-P+ actúa como una barrera reflectora de los electrones

minoritarios que tienden a moverse hacia el contacto metálico, de esta forma estos electrones reflejados pueden llegar a la unión CdS/CdTe y ser colectados para contribuir con la fotocorriente [22]. En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de bandas que se tendría para una estructura de este tipo donde se aprecia la barrera de potencial formada en la parte trasera.

Además de reducir la velocidad de recombinación en la parte posterior de la celda, la capa P+ que presenta una menor resistividad que la capa de CdTe sirve para poder fabricar un contacto óhmico de mejor calidad.

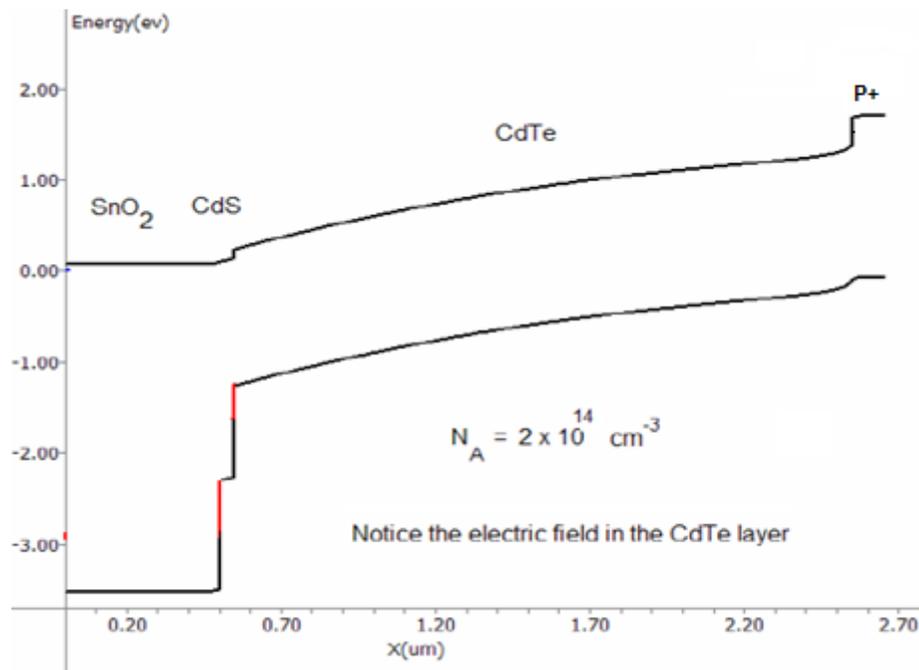


Figura 3.2. Diagrama de bandas para una celda como la presentada en la Figura 3.1

(Imagen tomada de "Morales-Acevedo A., *Design of very thin CdTe Solar Cells with high efficiency*, *Energy Procedia*. 2013")

La adición de esta capa P+ se puede modelar matemáticamente suponiendo una *velocidad de recombinación superficial efectiva* en la parte posterior de la celda, la cuál será menor que los valores típicos sin ella ($S_n \sim 10^7$ cm/s).

3.2 Análisis electrostático de la heterounión CdS/CdTe

El análisis electrostático de esta celda es una parte muy importante a considerar y tal vez la pieza clave de este modelo, pues como se menciona en la sección 2.2, este análisis es diferente al de una homounión y por ende, tanto el potencial de la unión como la extensión de la zona desértica tendrán distintas expresiones.

En este caso nos centraremos en una estructura donde el semiconductor cambia abruptamente en la unión ($x=0$). Es decir, se tiene un semiconductor de características constantes del lado izquierdo (CdS) y otro semiconductor constante del lado derecho (CdTe). Para comenzar el análisis supondremos que ambos materiales se encuentran separados en primera instancia mediante un diagrama de bandas planas (Figura 3.3) [23].

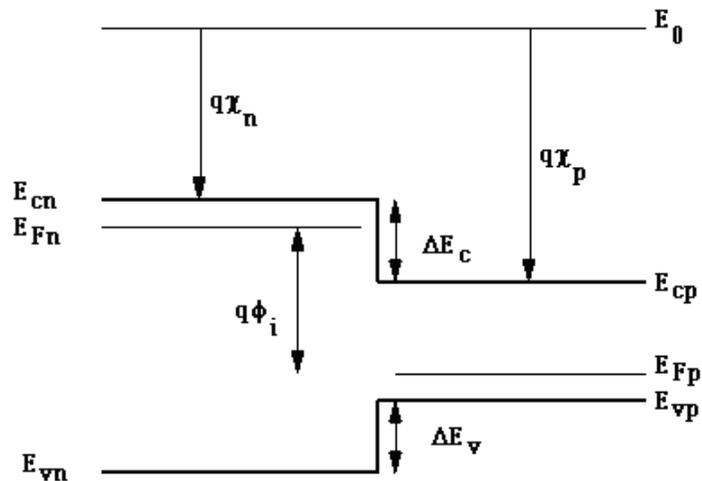


Figura 3.3. Diagrama de bandas planas de una heterounión P-N

Nos basaremos en la figura y supondremos que la discontinuidad en la banda de conducción ΔE_c es positiva si $E_{cn} > E_{cp}$ y que la discontinuidad en la banda de valencia ΔE_v es positiva si $E_{vp} > E_{vn}$.

El potencial interconstruido es la diferencia entre los niveles de Fermi de cada semiconductor en equilibrio térmico.

$$q\phi_i = E_{Fn} - E_{Fp} \quad (19)$$

Mediante un análisis visual a la Figura 3.3 es fácil observar que:

$$q\phi_i = \Delta E_c + (E_{cp} - E_{Fp}) - (E_{cn} - E_{Fn}) \quad (20)$$

$$q\phi_i = (E_{Fn} - E_{vn}) - (E_{Fp} - E_{vp}) - \Delta E_v \quad (21)$$

Las expresiones anteriores también pueden ser expresadas mediante la concentración efectiva de estados en la banda de conducción (N_c) y en la banda de valencia (N_v) de cada material y de sus concentraciones de impurezas (N_A y N_D):

$$q\phi_i = \Delta E_c + kT \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \frac{N_{cp}}{N_{cn}} \right) \quad (22)$$

$$q\phi_i = -\Delta E_v + kT \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \frac{N_{vn}}{N_{vp}} \right) \quad (23)$$

Combinando las ecuaciones 22 y 23 se obtiene el potencial eléctrico en la heterounión (Ecuación 24), el cuál es visiblemente diferente al calculado para el caso de la homounión (Ecuación 5).

$$q\phi_i = \frac{\Delta E_c - \Delta E_v}{2} + kT \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_{cp} N_{vn}}{N_{cn} N_{vp}} \right) \quad (24)$$

$$\Delta E_c = q(\chi_p - \chi_n) \quad (25)$$

$$\Delta E_v = \Delta E_g - \Delta E_c \quad (26)$$

Donde χ_p y χ_n son las afinidades electrónicas para el material tipo P y tipo N respectivamente y ΔE_g es la diferencia de ancho de banda prohibida entre los dos materiales.

Resolviendo la ecuación de Poisson para cada lado de la unión de la misma manera que en la sección 2.1, pero utilizando las permitividades eléctricas pertinentes en cada material, se llega a las siguientes expresiones para la extensión de la zona desértica:

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_p \varepsilon_n}{q} \frac{\phi_{bi} N_D}{N_A(N_A \varepsilon_p + N_D \varepsilon_n)}} \quad (27)$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_p\varepsilon_n}{q} \frac{\phi_{bi}N_A}{N_D(N_A\varepsilon_p+N_D\varepsilon_n)}} \quad (28)$$

$$x_{zd} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_p\varepsilon_n}{q} \frac{\phi_{bi}(N_D+N_A)^2}{N_A N_D(N_A\varepsilon_p+N_D\varepsilon_n)}} \quad (29)$$

En donde ε_p es la permitividad eléctrica del material tipo P y ε_n la del material tipo N.

En la Figura 3.4 se muestra una celda de CdS/CdTe donde se puede apreciar las zonas descritas en las ecuaciones anteriores.

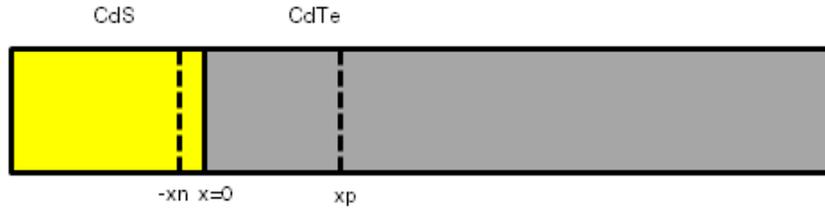


Figura 3.4. Ilustración de la zona desértica en celda de CdS/CdTe

Una vez realizado este análisis es posible calcular el potencial eléctrico de la unión, no obstante existe una consideración que no se ha tomado en cuenta hasta el momento, pues únicamente se han descrito uniones en equilibrio, sin embargo una celda solar en funcionamiento implica una polarización externa del dispositivo y por lo tanto ésta se encontrará fuera del equilibrio térmico. Si el voltaje no es muy elevado y la celda se encuentra en el régimen de bajo nivel de inyección, sólo es necesario considerar que la barrera de potencial formada en la unión se reduce en la misma cantidad que el voltaje aplicado, por lo tanto las ecuaciones 27-29 quedan como [18]:

$$x_p(V_j) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_p\varepsilon_n}{q} \frac{(\phi_{bi}-V_j)N_D}{N_A(N_A\varepsilon_p+N_D\varepsilon_n)}} \quad (30)$$

$$x_n(V_j) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_p\varepsilon_n}{q} \frac{(\phi_{bi}-V_j)N_A}{N_D(N_A\varepsilon_p+N_D\varepsilon_n)}} \quad (31)$$

$$x_{zd}(V_j) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_p\varepsilon_n}{q} \frac{(\phi_{bi}-V_j)(N_D+N_A)^2}{N_A N_D(N_A\varepsilon_p+N_D\varepsilon_n)}} \quad (32)$$

Donde V_j es el voltaje con el que se polariza la unión. Aunque esta suposición es válida tanto en homouniones como en heterouniones, en los modelos analíticos que

describen a las celdas de silicio [21] [24] no se contempla la reducción de la zona desértica cuando la unión es polarizada directamente, pues la extensión de ésta ya es de por sí muy pequeña comparada con las dimensiones totales de la celda, sin embargo en las celdas de capa delgada las dimensiones de los materiales son del orden de la zona desértica o incluso menores, de modo que cualquier cambio en la extensión de la zona desértica afecta considerablemente el comportamiento de la celda.

Ahora es necesario realizar una consideración más en cuanto al cálculo de la extensión de la zona desértica, la cual es muy sencilla pero de **vital importancia** ya que va a afectar a todos los cálculos subsecuentes. Debido a que se está trabajando con una celda solar donde la capa absorbente puede ser de dimensiones muy pequeñas (hasta $0.5\mu\text{m}$), es posible obtener valores de la ecuación 30 que sean mayores que el espesor mismo de la capa de CdTe, algo que físicamente no tiene sentido, de modo que las ecuaciones 30, 31 y 32 no tienen validez para el caso en el que x_p de la ecuación 30 sea mayor que el espesor del CdTe (W_{CdTe})¹, en vez de utilizar esas ecuaciones, es pertinente limitar el ancho de la zona desértica en el lado P al espesor de la capa de CdTe y la parte de la zona desértica del lado N se obtiene mediante el principio de neutralidad de carga (Ecuación 6), por lo tanto las nuevas ecuaciones para la zona desértica en el caso en el que $x_p > W_{\text{CdTe}}$ quedan como:

$$x_{p1} = W_{\text{CdTe}} \quad (33)$$

$$x_{n1} = \frac{N_A}{N_D} x_{p1} \quad (34)$$

$$x_{zd1} = x_{p1} + x_{n1} \quad (35)$$

El subíndice '1' es para diferenciar estas expresiones de sus análogas.

Estas suposiciones conllevan a una implicación muy importante, pues ahora **el ancho de la zona desértica dependerá del voltaje de polarización y su extensión estará limitada por el espesor de la capa de CdTe.**

¹ El caso en el que x_n es mayor al espesor del CdS no se puede presentar ya que en estas celdas la impurificación del lado N siempre es mayor a la del lado P y por lo tanto la mayor parte de la zona desértica recae en el lado P, es por eso que este escenario no es tomado en cuenta en el modelo.

En resumen, las ecuaciones 30-32 se utilizarán en el modelo siempre y cuando $x_p < W_{CdTe}$ y las ecuaciones 33-35 para el caso contrario.

3.3 Cálculos para la fotocorriente

Después de haber calculado el potencial en la unión, la extensión de la zona desértica y haber considerado una velocidad de recombinación superficial menor en la parte trasera, es posible calcular la corriente generada debido a la absorción de fotones o fotocorriente.

Para calcular esta fotocorriente, es necesario utilizar las ecuaciones 10-11, pero realizando algunas modificaciones:

En primer lugar, el análisis de la celda no se divide en tres partes, sino en cuatro; es decir, se considera también la parte de la zona desértica que se encuentra del lado N. Aunque ésta es por lo general muy pequeña comparada con las dimensiones de una celda de silicio, en las celdas de capa delgada ya no lo es tanto y es conveniente tomarla en cuenta, es por eso que para efectos de precisión, también se consideró la contribución de la corriente generada en esa parte de la zona desértica y al mismo tiempo se tomó en cuenta la extensión de esta región para disminuirla a la región cuasi-neutra en el lado N (en las expresiones del Capítulo 2 se desprecia esta longitud y se supone que la región cuasi neutra del lado N es igual al espesor del material tipo N).

Como segunda consideración, es necesario notar que debido a todo lo mencionado en la sección anterior, en este tipo de celdas se puede presentar el caso en el que la zona desértica abarque la totalidad de la capa de CdTe y por lo tanto, no existirá una región cuasi-neutra en este material. Esto quiere decir que la totalidad de la fotocorriente generada en la capa absorbente de CdTe ocurrirá en la región desértica y por consecuencia, la corriente en la región cuasi-neutra descrita en la ecuación 12 no existirá. Es por esto que para este caso, la corriente asociada a la generación en la región cuasi-neutra del lado P será cero.

Adicionalmente es necesario recalcar que se está trabajando con una heterounión y las propiedades en cada material son diferentes, por este motivo el coeficiente de absorción no es uno solo, sino que cambia de un material a otro y esto afectará a la forma en la que los fotones son absorbidos, para ilustrar este punto, se tomará como ejemplo la Figura 3.5.

De la figura se puede visualizar por qué la expresión para la cantidad de fotones absorbidos por una homounión de longitud x es distinta a la de una heterounión de la misma dimensión. Pues aunque la luz recorre la misma distancia a través de ambas uniones, en una heterounión se debe dividir su trayectoria total en dos secciones, una para cada coeficiente de absorción. Por lo tanto es necesario adecuar este concepto en las ecuaciones 10-12 y utilizar los coeficientes de absorción correspondientes a cada material así como la longitud que la luz recorrió en cada uno de estos.

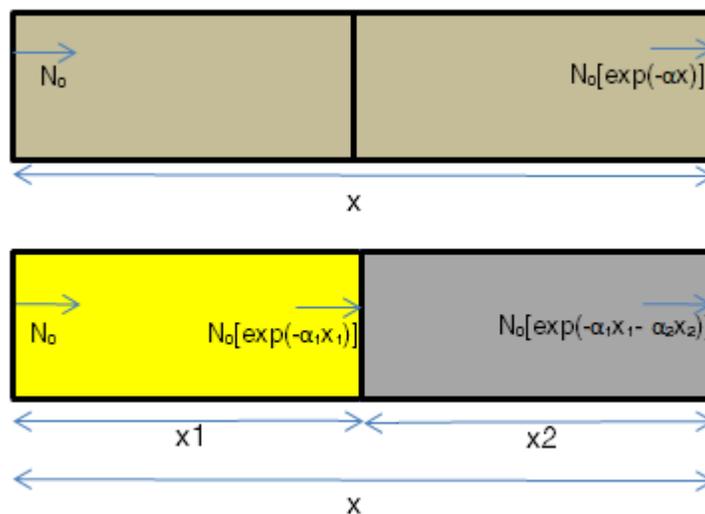


Figura 3.5. Diferencia en la absorción de la luz entre homounión y heterounión

Por último, hay que considerar la absorción de los fotones reflejados en el contacto metálico posterior, pues a diferencia de las celdas volumétricas donde prácticamente toda luz es absorbida por el material y a la parte posterior ya no llegan fotones, en celdas de CdS/CdTe, existe la posibilidad de que una cantidad considerable de fotones no hayan logrado ser absorbidos por la fina capa de CdTe

en el primer trayecto², pero al ser reflejados por el contacto metálico, puedan ser absorbidos por el material en su 'regreso' hacia el exterior de la celda. Aunque la mayor parte de los fotones reflejados serán absorbidos por la capa de CdTe, en el modelo también se incluye la contribución de la luz reflejada absorbida por las otras 3 regiones de la celda, que aunque son contribuciones mínimas, ayudan a obtener resultados de corrientes más precisos. La Figura 3.6 describe la trayectoria de la luz a través de la celda considerada en este modelo y las 4 regiones en que se divide la celda para el análisis de fotocorriente.

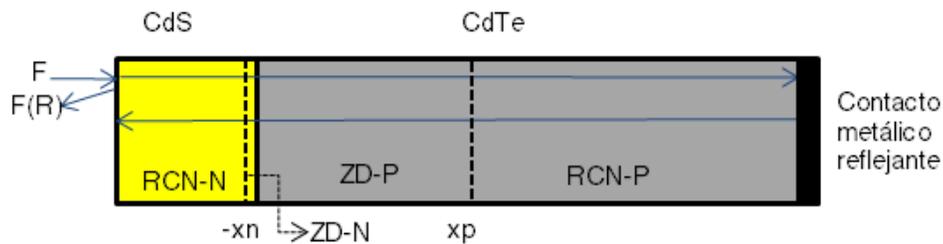


Figura 3.6. Trayectoria de fotones dentro de la celda a modelar

Es interesante observar que ahora todas las ecuaciones de fotocorriente para las 4 regiones en las que se dividió la celda para su análisis dependen indirectamente de V_j y W_{CdTe} a través de la dependencia directa de la extensión de la zona desértica con estas variables.

3.4 Corriente de oscuridad

Como se explicó en la sección 2.3, el análisis de la celda en oscuridad es tan importante como su estudio bajo iluminación, pues la corriente de oscuridad influye en los valores de salida de la celda. En esa misma sección se expone la ecuación 14 que describe el valor de esta corriente, sin embargo, no será utilizada en este modelo, pues el término J_{00} y A_0 son constantes que se obtienen de forma experimental para ajustar los valores de las corrientes debidas a los dos mecanismos principales (por difusión en las regiones cuasi-neutras y por

² En el Capítulo 4 se muestra una gráfica del porcentaje de fotones absorbidos por el CdTe en función de la longitud recorrida dentro del material.

recombinación en la zona de deserción) en una sola ecuación exponencial, además de que como se mostrará a continuación, ahora la corriente de saturación ya no es constante y depende del voltaje aplicado (V_j) y de la extensión de la región de deserción. Es por esto que es necesario calcular las corrientes debidas a cada mecanismo de transporte por separado y sumarlas para obtener la corriente total de oscuridad.

Además de este cambio en las expresiones para calcular la corriente de oscuridad, cabe mencionar que si se utiliza una baja velocidad de recombinación superficial efectiva en la parte posterior de la celda, debido a la adición de la capa P+, también disminuirá esta corriente de oscuridad, mejorando considerablemente el voltaje de circuito abierto y el factor de llenado.

3.4.1 Corriente por difusión en la región cuasi-neutra

La corriente por difusión en las zonas cuasi-neutras consiste en la inyección de electrones mayoritarios del lado N que sobrepasan la barrera de potencial hacia el lado P, ahí se difunden hacia la parte trasera, donde eventualmente se recombinan en el volumen o en la superficie. De manera similar, huecos del lado P migran al lado N donde se recombinan. Nuevamente, el comportamiento de estas corrientes está determinado por sus ecuaciones de transporte ambipolar.

Comenzaremos el análisis considerando la región cuasi-neutra del material tipo N (CdS) con impurificación uniforme, su ecuación ambipolar queda como:

$$\frac{\partial^2 \delta p}{\partial^2 x} - \frac{\delta p}{L_p^2} = 0 \quad (36)$$

Donde δp es el exceso de huecos en un punto específico del material.

Las condiciones en cada una de las fronteras de la región son:

$$D_p \frac{\partial \delta p}{\partial x} = S_p \delta p \quad \text{en } x=0 \quad (37)$$

$$\delta p = p_0 \left[\exp\left(\frac{qV_j}{kT}\right) - 1 \right] \quad \text{en } x = W_{\text{CdS}} - x_n \quad (38)$$

Donde p_0 es la concentración de huecos en equilibrio, W_{CdS-x_n} es la extensión de la región cuasi-neutra en la capa de CdS y S_p es la velocidad de recombinación superficial para huecos en la parte frontal de la celda. La ecuación 37 indica que los portadores en exceso se difunden y recombinan en la superficie de la capa N, la ecuación 38 es la cantidad de portadores en exceso en el límite con la zona desértica.

Resolviendo la ecuación 36 y aplicando las condiciones de frontera, se obtiene el exceso de huecos en función de la distancia:

$$\delta p(x) = \frac{p_0 \left[\exp\left(\frac{qV_j}{kT}\right) - 1 \right]}{\frac{D_p}{L_p S_p} \cosh\left(\frac{W_{CdS-x_n}}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{W_{CdS-x_n}}{L_p}\right)} \left[\frac{D_p}{L_p S_p} \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) \right] \quad (39)$$

Como en la región cuasi-neutra no existe campo eléctrico, la única componente de corriente es por difusión:

$$J_p(x) = -qD_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (40)$$

Suponiendo que el valor de la corriente es igual en cualquier punto de la región cuasi-neutra, se evalúa la expresión anterior en el borde de la región cuasi-neutra y la zona desértica del CdS:

$$J_p(V_j) = -\frac{qD_p}{L_p} \frac{n_{iCdS}^2}{N_D} \frac{\left[\sinh\left(\frac{W_{CdS-x_n}}{L_p}\right) + \frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{W_{CdS-x_n}}{L_p}\right) \right]}{\cosh\left(\frac{W_{CdS-x_n}}{L_p}\right) + \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{W_{CdS-x_n}}{L_p}\right)} \left[\exp\left(\frac{qV_j}{kT}\right) - 1 \right] \quad (41)$$

La ecuación 41 es la corriente de oscuridad debida a la difusión de huecos en la región-cuasi-neutra del lado N. Una expresión similar es la que se obtiene para la corriente de electrones en el lado P, la corriente de oscuridad total debido a la difusión en las regiones-cuasi-neutras es:

$$J_{dif(V_j)} = \left[\frac{qD_p}{L_p} \frac{n_{iCdS}^2}{N_D} \frac{\left[\sinh\left(\frac{W_{CdS-x_n}}{L_p}\right) + \frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{W_{CdS-x_n}}{L_p}\right) \right]}{\cosh\left(\frac{W_{CdS-x_n}}{L_p}\right) + \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{W_{CdS-x_n}}{L_p}\right)} \right. \quad (42)$$

$$\left. + \frac{qD_n}{L_n} \frac{n_{iCdTe}^2}{N_A} \frac{\left[\sinh\left(\frac{W_{CdTe-x_p}}{L_n}\right) + \frac{S_n L_n}{D_n} \cosh\left(\frac{W_{CdTe-x_p}}{L_n}\right) \right]}{\cosh\left(\frac{W_{CdTe-x_p}}{L_n}\right) + \frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{W_{CdTe-x_p}}{L_n}\right)} \right] \left[\exp\left(\frac{qV_j}{kT}\right) - 1 \right]$$

A todo el término que multiplica la exponencial se le conoce como *corriente de saturación* (J_0), como se mencionó anteriormente, esta corriente de saturación es una constante en las ecuaciones que describen las celdas de silicio, sin embargo como se puede apreciar de la ecuación anterior, esta corriente de saturación depende de los términos x_n y x_p que a su vez dependen del voltaje de la unión y están limitados por el espesor de la capa del CdTe, de modo que en este modelo no se puede hablar de la corriente de saturación como una constante.

Adicionalmente, es importante recalcar que esta corriente es debida a la difusión de portadores en las zonas cuasi-neutras y como se ha venido mencionando, se puede presentar el caso en que la región desértica abarque la totalidad de la capa de CdTe, eliminando por completo la región cuasi-neutra tipo P, en este escenario la única componente de corriente en el material tipo P será la de recombinación en la zona desértica que se explica en el siguiente apartado, de modo que la ecuación para la corriente por difusión cuando x_p de la ecuación 30 sea mayor que W_{CdTe} queda como:

$$J_{dif(V_j)} = \left[\frac{qD_p n_{iCds}^2}{L_p N_D} \frac{\left[\sinh\left(\frac{W_{Cds} - x_n}{L_p}\right) + \frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{W_{Cds} - x_n}{L_p}\right) \right]}{\cosh\left(\frac{W_{Cds} - x_n}{L_p}\right) + \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{W_{Cds} - x_n}{L_p}\right)} \right] \left[\exp\left(\frac{qV_j}{kT}\right) - 1 \right] \quad (43)$$

3.4.2 Corriente por recombinación en la zona desértica

Aunque la aportación de este mecanismo no es tan importante como el de corriente por difusión en celdas de silicio [21], para celdas de capa delgada puede ocurrir lo contrario, pues como se ha dicho repetidas veces, la zona desértica puede abarcar la totalidad de la capa absorbente y por lo tanto la corriente de oscuridad en este caso se deberá exclusivamente a la recombinación de electrones y huecos dentro de esta región en el material tipo P.

Como se mencionó anteriormente, cuando una unión P-N es polarizada directamente, electrones del lado N son inyectados hacia el lado P y huecos del lado

P migran hacia el lado N a través de la barrera de potencial, sin embargo algunos de estos portadores se recombinan dentro de la zona de deserción al cruzar la unión, esta corriente de recombinación fue descrita primeramente por Sah, Noyce y Schockley. [21] [25], sin embargo, la ecuación que ellos proponen es una ecuación compleja que a su vez dependen de otras expresiones que incluyen integrales que se resuelven numéricamente, es por eso que en este trabajo se decidió optar por otro modelo descrito por Sze y Lee [26] que simplifica la teoría de Sah, Noyce y Schockley para poder realizar cálculos de forma analítica.³

$$J_{rec}(V_j) = \frac{qn_{iCdTe}x_p}{\sqrt{\tau_{nCdTe}\tau_{pCdTe}}} \exp\left(\frac{qV_j}{2KT}\right) \quad (44)$$

Donde τ_{nCdTe} y τ_{pCdTe} son los tiempos de vida de electrones y de huecos en el CdTe, respectivamente.

Finalmente, la corriente total de oscuridad es la suma de la contribución de los dos mecanismos de transporte involucrados.

$$J_{osc}(V_j) = J_{dif}(V_j) + J_{rec}(V_j) \quad (45)$$

3.5 Parámetros de salida

Después de todas las expresiones involucradas en el modelo analítico, llegamos finalmente a la obtención de la curva corriente-voltaje de la celda, comúnmente llamada curva I-V. Esta gráfica son los puntos de la corriente de salida (I_{out}) en función del voltaje de polarización (V_j); a partir de aquí es posible determinar la corriente de corto circuito, el voltaje de circuito abierto y el punto de potencia máxima.

³ Estrictamente hablando, ésta ecuación únicamente toma en cuenta la corriente por recombinación en la zona desértica del lado P, sin embargo la contribución de esta corriente en el lado N es prácticamente nula y es justificable utilizar esta ecuación para la corriente de recombinación total en la zona desértica.

Estos parámetros junto con el factor de llenado y la eficiencia de conversión son los que se buscan obtener al final ya que prácticamente describen todas las características de funcionamiento de la celda.

Como era de esperarse, las ecuaciones para la corriente de salida y para el voltaje de circuito abierto expuestas en el Capítulo 2 no son las utilizadas en este modelo debido a todas las modificaciones que se han realizado a las variables contenidas en esas expresiones; aun así, la lógica y el significado físico de estos dos parámetros sigue siendo el mismo.

Como no se están considerando efectos de resistencias en la celda, la corriente de salida es simplemente la corriente generada por la absorción de fotones menos la corriente de oscuridad:

$$J_{out}(V_j) = J_L(V_j) - J_{osc}(V_j) \quad (46)$$

El voltaje de circuito abierto se obtendría de igualar la ecuación 46 a cero y despejar V_j . Debido a la forma tan complicada que presenta ahora nuestra ecuación para la corriente de salida y la dependencia de prácticamente todas las variables que la componen con el mismo voltaje de polarización, no se puede obtener una expresión explícita para encontrar V_{oc} sino que es necesario graficar la ecuación 46 y encontrar el punto de corte con el eje de las abscisas o bien utilizar algún método iterativo para encontrar el cambio de signo en la corriente de salida.

Las expresiones para calcular la corriente de corto circuito y el factor de llenado siguen siendo las mismas expuestas en el Capítulo 2. Adicionalmente, la eficiencia de conversión se puede encontrar a través de la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{inc}} \quad (47)$$

Donde P_{inc} es la potencia de la radiación solar que incide sobre la celda.

3.6 Condiciones de simulación y parámetros utilizados en el programa

Las ecuaciones mostradas con anterioridad en este capítulo constituyen el modelo analítico de la celda de capa delgada, éstas se implementaron en un programa realizado en Mathcad para que de esta forma fuera posible obtener los parámetros de salida descritos en la sección anterior de manera sencilla introduciendo únicamente los parámetros físicos de la celda, el programa ya incluye todas las constantes necesarias para realizar las simulaciones y de manera automática utiliza las ecuaciones pertinentes para los casos en los que $x_p > W_{CdTe}$.

En este programa, que se muestra en el Anexo A. Modelo analítico implementado en Mathcad, se encuentran todas las ecuaciones mostradas de forma explícita y no únicamente las curvas I-V y P-V, pues es interesante conocer qué es lo que sucede con cada una de las variables involucradas en el cálculo de los parámetros de salida de la celda, de esta manera se puede rastrear qué es lo que está provocando que algún parámetro de salida tenga un valor muy alto o muy bajo y poder atacar específicamente ese punto para mejorar el funcionamiento final de la celda.

Los parámetros utilizados en este programa para resolver las ecuaciones se mencionan a continuación.

3.6.1 Constantes físicas

Las constantes físicas utilizadas fueron:

$$\epsilon_0 = 8.854 * 10^{-4} \frac{F}{cm}$$

$$q = 1.60218 * 10^{-19} C$$

$$K = 1.38065 * 10^{-23} \frac{J}{K}$$

$$T = 300K$$

$$h = 6.62607 * 10^{-34} J \cdot s$$

$$c = 2.998 * 10^8 \frac{m}{s}$$

3.6.2 Espectro solar

La American Society for Testing and Materials (ASTM) define dos y únicamente dos distribuciones de irradiancia espectral solar sobre la tierra como estándares para las mediciones de fotovoltaicos [27], estas distribuciones son la *directa* y *global* y están contenidas en el documento ASTM G-173-03 [28]. De estos dos espectros, el utilizado fue el global total (Figura 3.7), pues este espectro incluye tanto la componente de incidencia normal de la radiación como la radiación difusa. Para realizar los cálculos en el programa, se utilizó una función de ajuste de curva para poder tratar al espectro como una función continua y no como una sucesión de puntos, lo que hace que los cálculos sean un poco más precisos.

Las condiciones en que este espectro fue obtenido se pueden encontrar en la página del Public Domain Aeronautical Software (PDAS) [29].

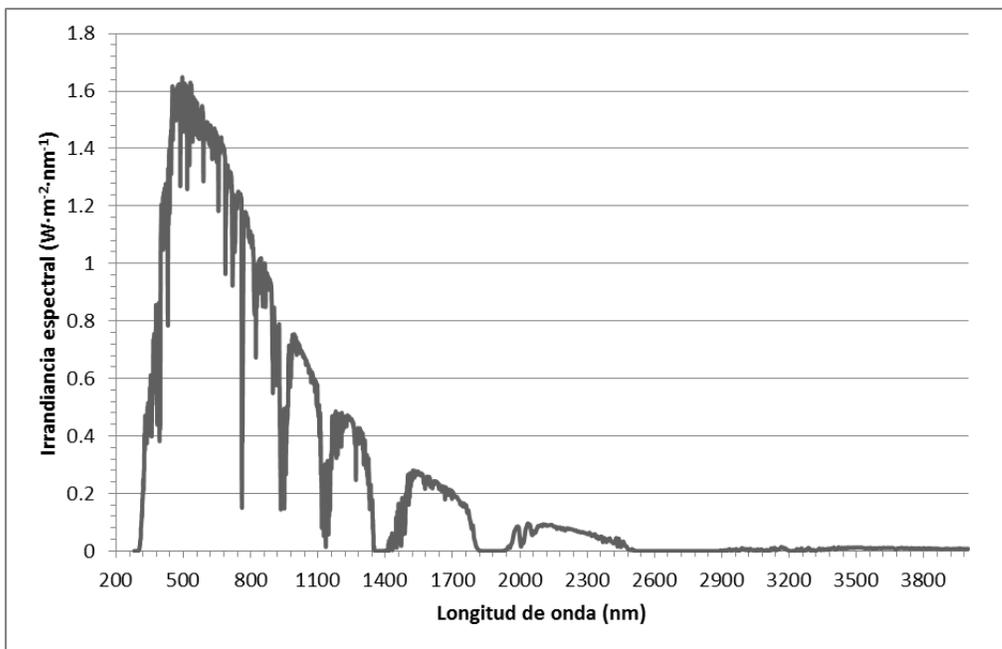


Figura 3.7. Espectro solar AM 1.5 global

3.6.3 Parámetros físicos de los materiales

La siguiente tabla muestra los parámetros físicos del CdS y CdTe utilizados, estos fueron obtenidos de varios documentos científicos [1] [13] [30] [31].

| | CdS | CdTe |
|--|---------------------|---------------------|
| ϵ | 9.35 | 10.3 |
| $\chi(\text{eV})$ | 4.3 | 4.28 |
| $\mu_n(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$ | 10 | 100 |
| $\mu_p(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$ | 10 | 60 |
| $N_A, N_D(\text{cm}^{-3})$ | variable | variable |
| $E_g(\text{eV})$ | 2.42 | 1.5 |
| $N_c(\text{cm}^{-3})$ | $2.4 \cdot 10^{18}$ | $8 \cdot 10^{17}$ |
| $N_v(\text{cm}^{-3})$ | $1.8 \cdot 10^{19}$ | $1.8 \cdot 10^{19}$ |
| $\tau_n(\text{ns})$ | 10^4 | 1 |
| $\tau_p(\text{ns})$ | 0.1 | 10^3 |
| $E_T - E_i(\text{eV})$ | 0.1 | 0.1 |
| $W(\text{nm})$ | 50 | variable |
| $S(\text{cm/s})$ | 10^7 | variable |

Tabla 1. Parámetros físicos del CdS y CdTe utilizados en las simulaciones

3.6.4 Propiedades ópticas

Los coeficientes de absorción para el CdS y CdTe utilizados son los obtenidos por Dubrovskii [32] y se muestran en la Figura 3.8. Al igual que con el espectro solar, se utilizó una función de ajuste de curva para poder tener los perfiles de los coeficientes de absorción de forma continua.

En cuanto a la reflectividad de la celda, se consideró que muy poca luz incidente es reflejada hacia el exterior y para facilitar los cálculos, esta reflectancia se consideró como cero. Para el caso de la reflectividad del contacto metálico en la parte trasera,

se busca que este metal sea lo más reflejante posible para efectos de mejoramiento en la fotocorriente, es por eso que se consideró una reflectancia igual a 1.

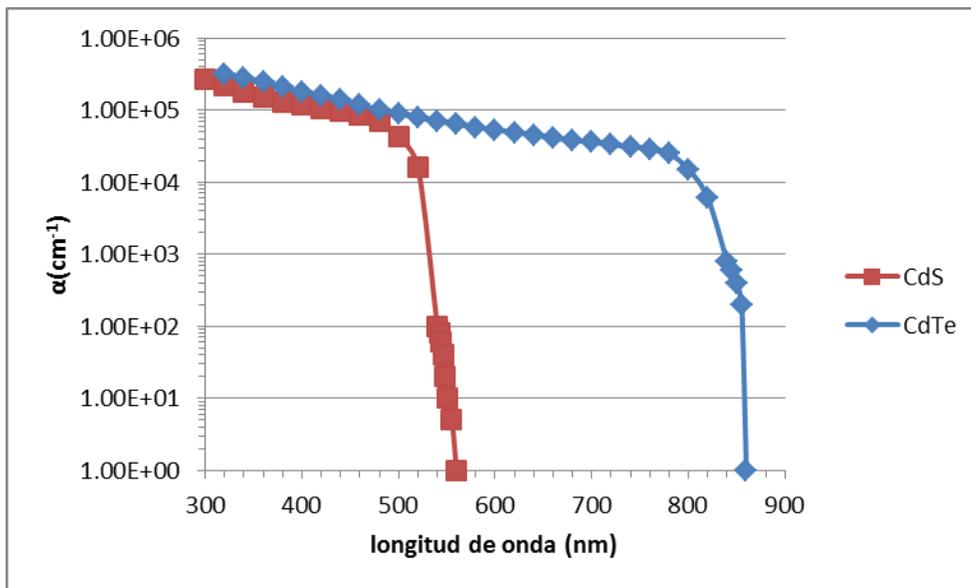


Figura 3.8. Coeficientes de absorción para CdS y CdTe

Capítulo 4. Resultados y discusión

Con los parámetros y condiciones descritas en la sección anterior se realizaron simulaciones para encontrar las curvas I-V y a partir de ellas, los demás parámetros de salida. Se variaron cuatro parámetros: las concentraciones de impurezas en el CdS y CdTe (N_D y N_A), el espesor de la capa de CdTe (W_{CdTe}) y la velocidad de recombinación superficial efectiva en la parte posterior de la celda (S_n) para emular el caso en el que se tiene una capa P+ y el caso en el que no.

Los datos en bruto de los resultados obtenidos se encuentran en el Anexo B, sin embargo en este capítulo se expondrá el análisis de 4 parámetros importantes en función de las variables mencionadas y se harán observaciones interesantes de lo que sucede con cada uno de estos parámetros.

4.1 Corriente de corto circuito

En la Figura 4.2 se puede observar la corriente de corto circuito en función del espesor de la capa de CdTe para una velocidad de recombinación de 10^2 cm/s. La tendencia general de las curvas es que la corriente aumenta conforme aumenta el espesor de la capa de CdTe, pues es razonable pensar que mientras más gruesa sea la capa, será capaz de absorber más fotones y tener una fotocorriente mayor, esto es en parte cierto, sin embargo en la Figura 4.1 se muestra graficado el porcentaje de fotones absorbidos por la capa de CdTe en función de la distancia recorrida por la luz dentro del material, donde se aprecia que en tan solo $1\mu\text{m}$ ya se absorbió el 95% de los fotones, así que para espesores muy pequeños (menores a $1\mu\text{m}$) la corriente de corto circuito sí irá disminuyendo; sin embargo la mayor corriente no se obtiene a espesores muy grandes, sino en espesores entre el rango de 1 y $3\mu\text{m}$ dependiendo del perfil de impurificación de los materiales, esto se debe a que con estos espesores la absorción es mayor que en una capa de $0.5\mu\text{m}$ y al mismo tiempo la región de carga espacial (y por ende el campo eléctrico) se extiende sobre toda el material, lo que ocasiona que prácticamente la totalidad de

los pares electrón-hueco generados sean colectados y contribuyan a la fotocorriente, algo que no sucede con espesores mayores.

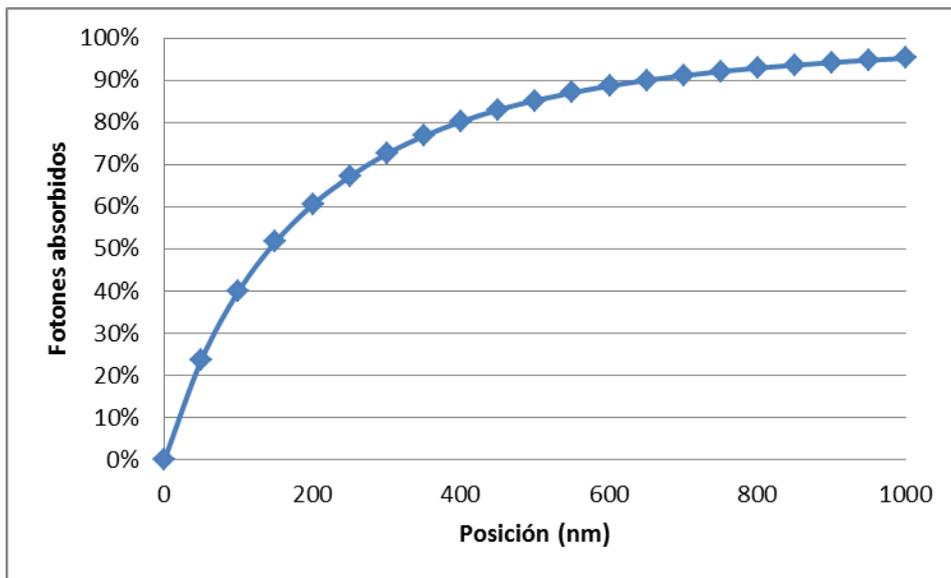


Figura 4.1. Cantidad de fotones absorbidos vs. Posición dentro del CdTe

También es pertinente señalar que después de 3 μm de espesor, la corriente permanece casi constante, esto se debe a que a esos espesores prácticamente el 100% de los fotones incidentes sobre el CdTe ya fueron absorbidos.

Comparando ambas gráficas se ve claramente que son muy similares, esto se debe a que una velocidad de recombinación alta no afecta significativamente el valor de la fotocorriente en este tipo de celdas [33], pues la mayor parte de los fotones se absorben en la región de carga espacial donde se tiene un fuerte campo eléctrico que ayuda a colectar a los electrones. El efecto de la velocidad de recombinación es más evidente en la corriente de oscuridad, la cual no afecta el valor de la corriente de corto circuito.

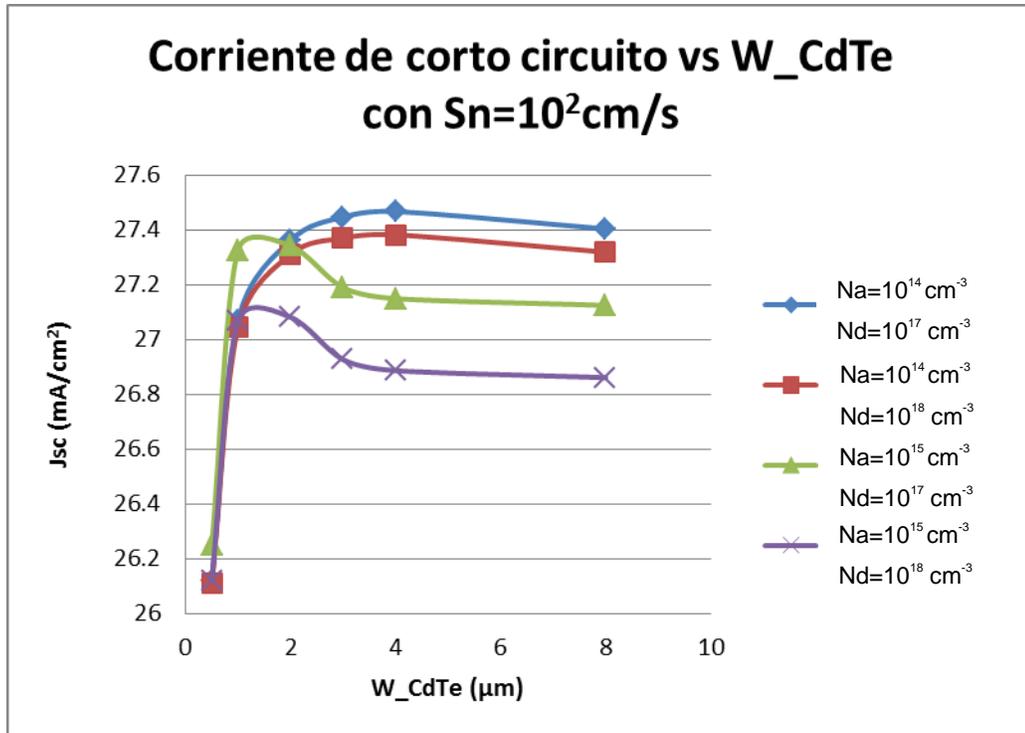


Figura 4.2. Corriente de corto circuito vs. Espesor de CdTe para Sn=10²cm/s

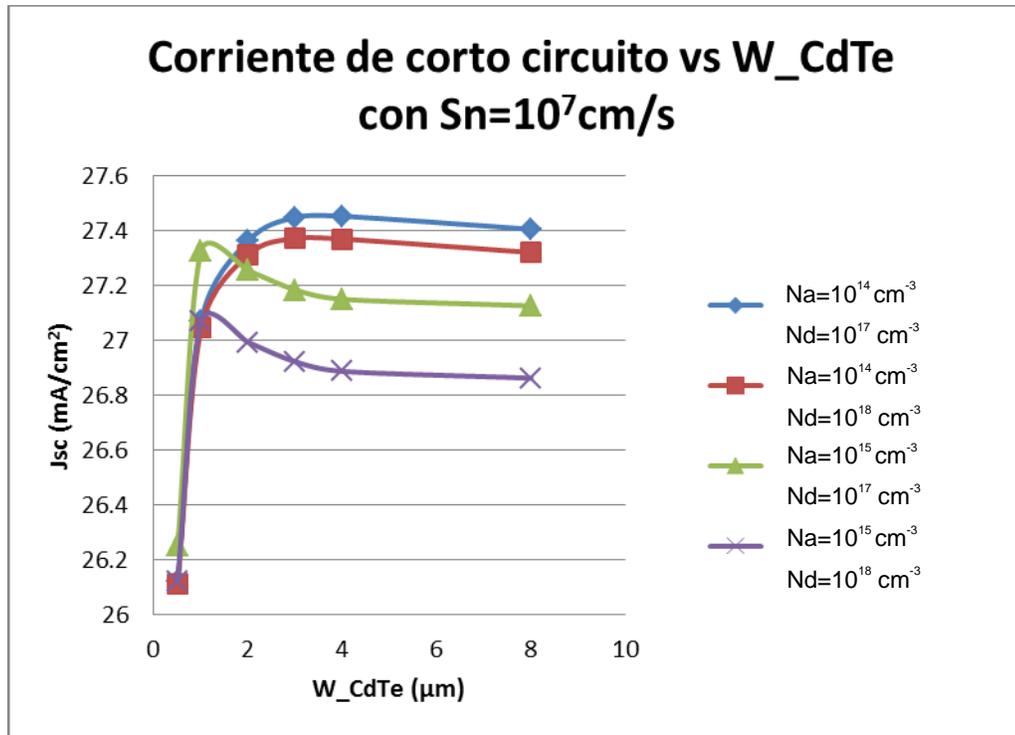


Figura 4.3. Corriente de corto circuito vs. Espesor de CdTe para Sn=10⁷cm/s

4.2 Voltaje de circuito abierto

Caso contrario a la corriente de corto circuito, cuando se tiene una baja velocidad de recombinación en la parte trasera de la celda, el voltaje de circuito abierto aumenta conforme el espesor de la capa de CdTe se reduce, esto es de esperarse ya que si se tiene una capa muy delgada, todo el material, o la mayor parte de éste estará dentro de la zona desértica como se ha venido mencionando, esto se traduce en que la componente de corriente de oscuridad más importante será la debida a la recombinación de portadores en la región de carga espacial, pues la debida a la difusión hacia el contacto metálico será mínima y por lo tanto se necesitará de un mayor voltaje para que la corriente de oscuridad pueda contrarrestar la corriente de iluminación. Por el otro lado, cuando no se introduce una capa P+ en la parte posterior, se tiene una velocidad de recombinación alta y en este caso el voltaje de circuito abierto aumentará conforme se tenga una capa de CdTe más gruesa (Figura 4.5).

Al igual que en la corriente de corto circuito, el voltaje de circuito abierto permanece sin cambios después de 3 μm sin importar la velocidad de recombinación o el perfil de impurificación, pues con espesores mayores y a voltajes altos, la corriente de oscuridad está dominada principalmente por la corriente de difusión en la región cuasi-neutra y la corriente de saturación de esta componente en este caso sí permanece relativamente constante ya que la región desértica es pequeña comparada con el espesor del material.

De la Figura 4.4 y Figura 4.5 se puede apreciar que para espesores mayores a 3 μm , el voltaje de circuito abierto es muy similar para cada perfil de impurificación sin importar la velocidad de recombinación superficial en la parte trasera, pues el voltaje de circuito abierto depende en gran medida del valor de la corriente de oscuridad que va a contrarrestar a la corriente de iluminación hasta igualarla en magnitud y tener una corriente nula a la salida (circuito abierto). Cuando se tiene espesores gruesos, los efectos de la recombinación en la superficie son menores, pues los portadores en exceso están más lejos de la superficie trasera y por ende la velocidad de recombinación no juega un papel tan importante en este caso.

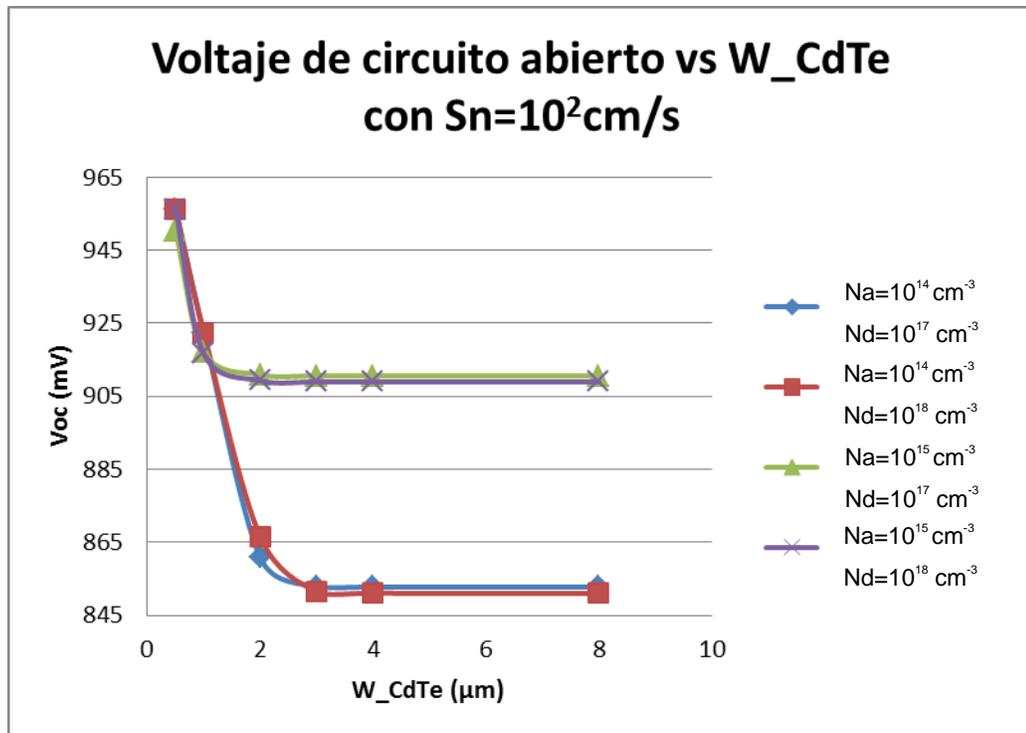


Figura 4.4. Voltaje de circuito abierto vs. Espesor de CdTe para Sn=10²cm/s

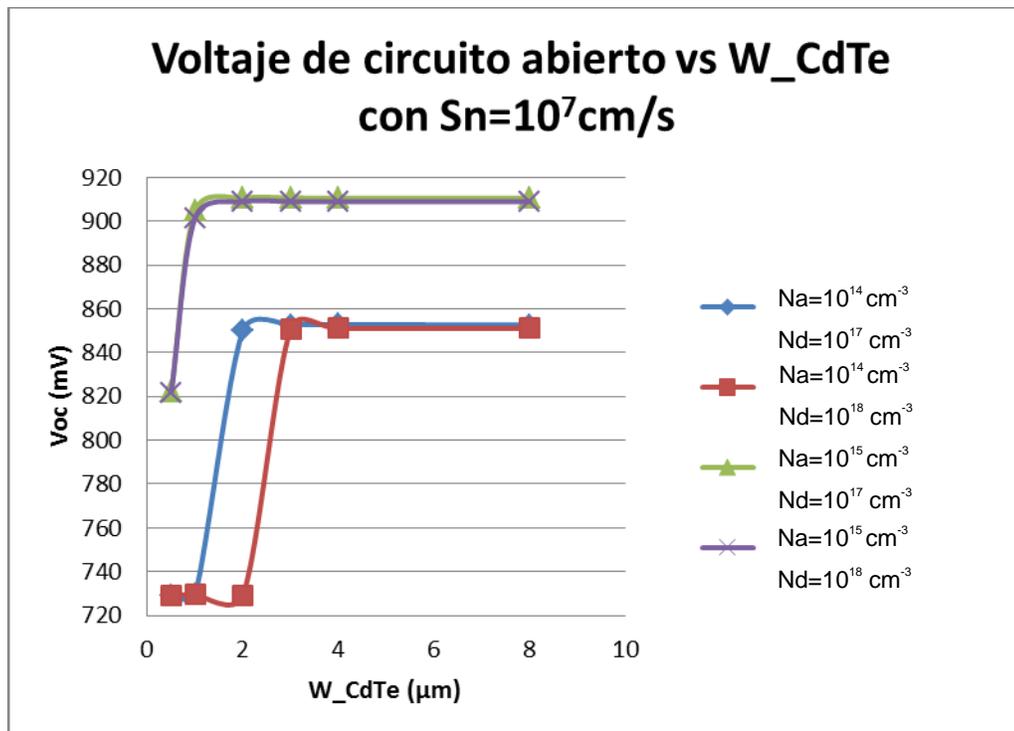


Figura 4.5. Voltaje de circuito abierto vs. Espesor de CdTe para Sn=10⁷cm/s

4.3 Factor de llenado

Como se explicó en el Capítulo 2, el factor de llenado es un parámetro importante de una celda solar que está muy relacionado con el voltaje de circuito abierto.

De la Figura 4.6 y Figura 4.7 se aprecia que para espesores pequeños existen fluctuaciones en el factor de llenado para ambas velocidades de recombinación. Estas variaciones se deben a diversos factores; recordemos que en el factor de llenado están involucradas las demás variables discutidas y por lo tanto el análisis de este comportamiento es más complejo de explicar, pues no se le puede atribuir específicamente a una sola causa. Sin embargo es pertinente hacer notar que la corriente de oscuridad juega un papel importante en el valor del voltaje de circuito abierto y éste a su vez en el valor del factor de llenado, de tal suerte que el factor de llenado se verá afectado por la corriente de oscuridad y por la forma en la que contribuyan sus dos componentes.

Cuando se tienen espesores bajos, tanto la corriente debida a la recombinación en la zona desértica como la debida a la difusión de los portadores en las regiones cuasi-neutras participan de manera casi equitativa en la corriente de oscuridad total.

Por el otro lado, para espesores grandes (mayores a $3 \mu\text{m}$) los valores permanecen casi constantes pues en este caso la corriente de difusión en las regiones cuasi-neutras es la que domina, además es importante notar que los valores son casi iguales para cada perfil de impurificación sin importar la velocidad de recombinación, tal como sucede en el comportamiento del V_{oc} . Lo que reafirma la importante correlación que tienen estos dos parámetros.

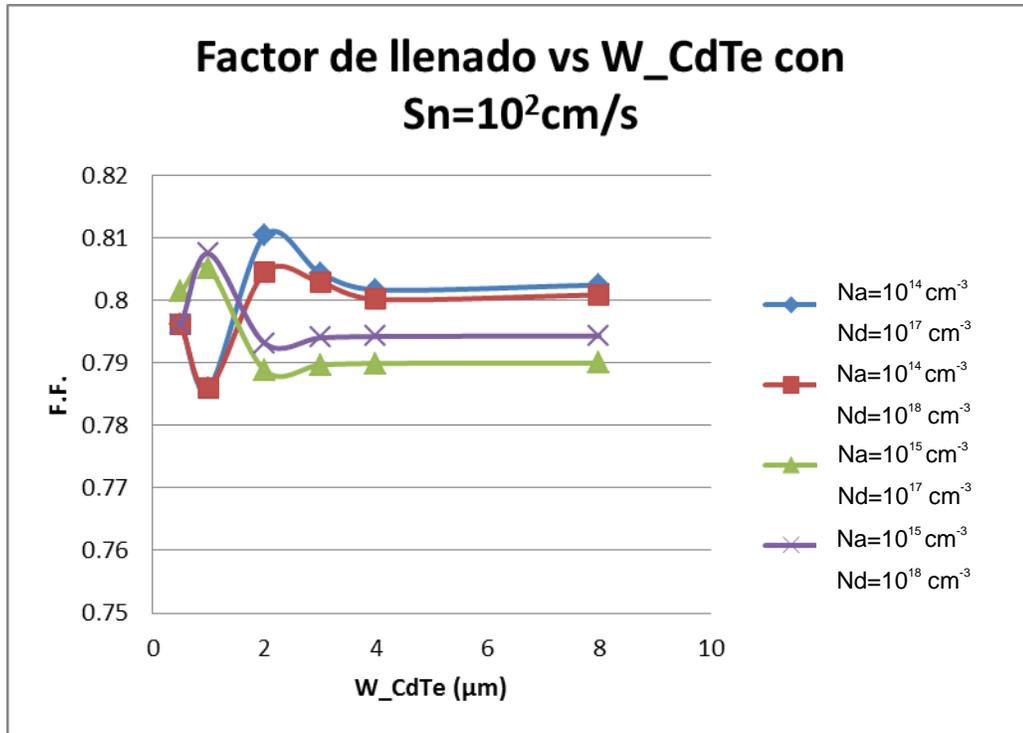


Figura 4.6. Factor de llenado vs. Espesor de CdTe para Sn=10²cm/s

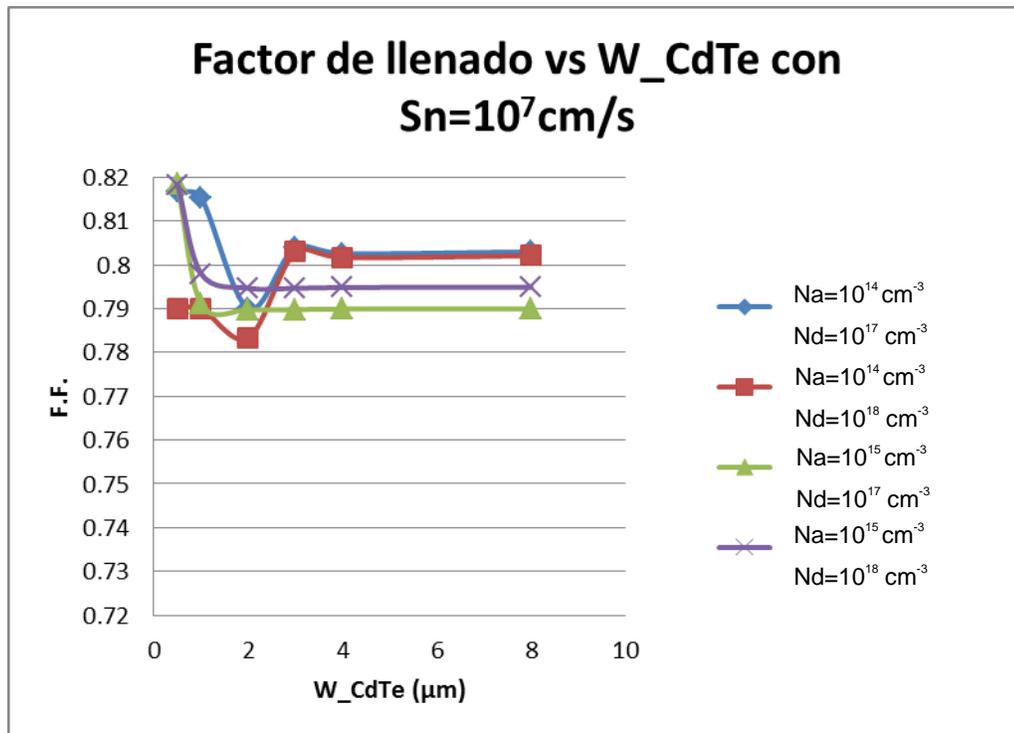


Figura 4.7. Factor de llenado vs. Espesor de CdTe para Sn=10⁷cm/s

4.4 Eficiencia

La eficiencia es uno de los parámetros más importantes y su mejoramiento es uno de los objetivos principales de la investigación de fotovoltaicos, pues se desea aprovechar al máximo la energía proveniente del sol.

En la Figura 4.8 y Figura 4.9 se presentan las eficiencias en función del espesor del CdTe para velocidades de recombinación trasera de 10^2 y 10^7 cm/s respectivamente. Como se puede notar en la Figura 4.8, las eficiencias más altas se obtienen a menores espesores, esto concuerda con lo descrito con anterioridad por algunos autores [22] [33], donde a diferencia de las celdas de CdS/CdTe que no incluyen una capa P+ y presentan una mayor velocidad de recombinación en la parte posterior (Figura 4.9), las mejores eficiencias se obtienen con mayores espesores [34], esto se debe principalmente a que en las celdas de capa delgada la recombinación de los portadores está dominada mayoritariamente por la recombinación superficial más que la volumétrica, y al tener velocidades de recombinación superficial altas (cuando no se tiene una capa P+), los efectos en espesores muy delgados son más notorios, pues muchos de los electrones generados no logran cruzar la unión para ser colectados debido a la fuerte recombinación superficial en la parte trasera.

En cuanto a la absorción de los fotones incidentes, se podría llegar a pensar que una capa muy delgada del material absorbería muy poco de la luz incidente, sin embargo como se mostró anteriormente en la Figura 4.1, en $0.5\mu\text{m}$ del CdTe ya se absorbió el 85% de la luz que incide en él, además de que como ya se mencionó en la sección 3.3, al tener un contacto altamente reflejante en la parte trasera, el material es capaz de absorber la mayoría de los fotones reflejados, de modo que la fotocorriente debida a la absorción en el CdTe se ve muy ligeramente afectada.

También es interesante observar que para una velocidad de recombinación baja ($S_n=10^2$ cm/s) y un CdTe muy impurificado ($N_A=10^{15}$), la eficiencia parece disminuir debajo de $1\mu\text{m}$, esto está relacionado con lo expuesto para el factor de llenado, pues el voltaje de potencia máxima ya no aumenta mucho debajo de $1\mu\text{m}$ porque las expresiones exponenciales en las variables que definen el valor de V_{max} varían

muy poco con espesores pequeños, sin embargo la corriente que se tiene a este voltaje sí disminuye ligeramente con el espesor, haciendo que la potencia máxima disminuya y con ésta, la eficiencia.

Más interesante aun es observar el comportamiento de la eficiencia cuando se tiene una velocidad de recombinación de 10^7 cm/s y perfiles de impurificación ($N_A=10^{15}$, $N_D=10^{17}$) y ($N_A=10^{15}$, $N_D=10^{18}$), pues los valores de las eficiencias son prácticamente idénticos, lo que supone que si se tiene una impurificación alta en el CdTe ($N_A=10^{15}$), la impurificación en el CdS esencialmente no afecta en la eficiencia de conversión a menos que se tengan velocidades de recombinación bajas.

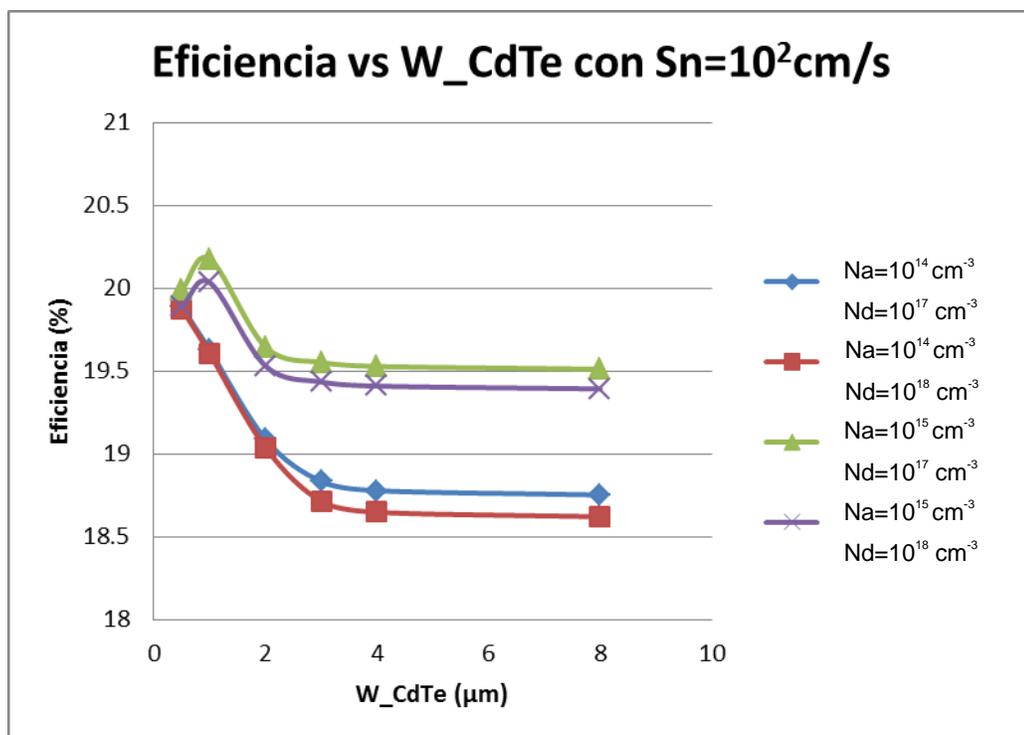


Figura 4.8. Eficiencia vs. Espesor de CdTe para $S_n=10^2$ cm/s

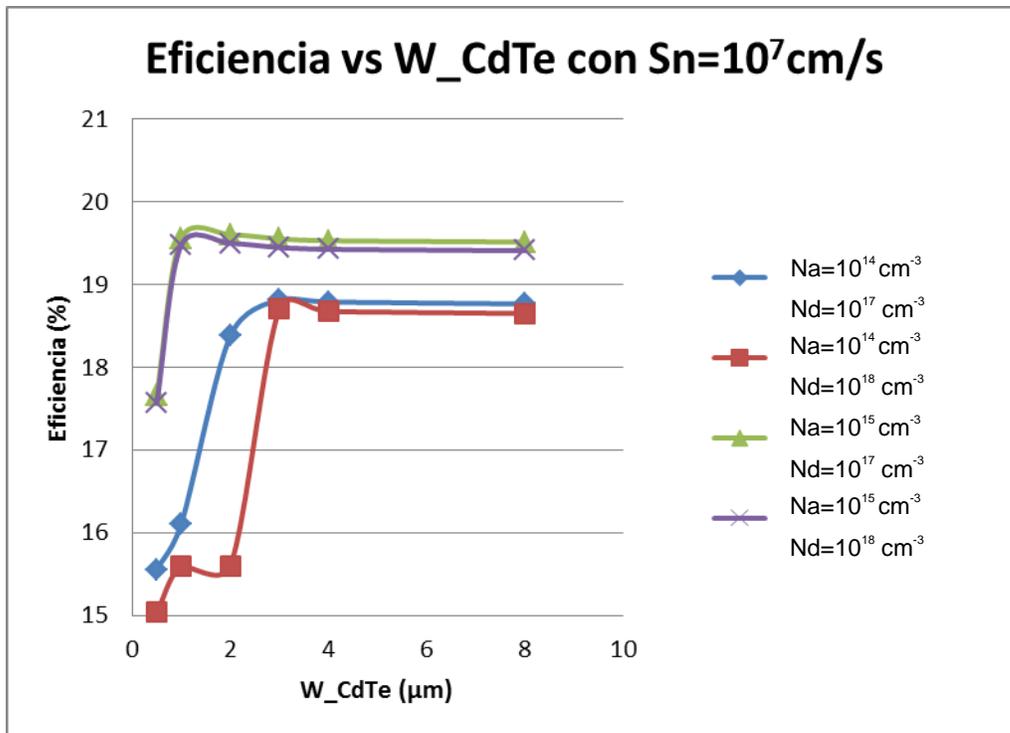


Figura 4.9. Eficiencia vs. Espesor de CdTe para $Sn=10^7$ cm/s

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo se formuló un modelo analítico para describir el funcionamiento de una celda solar de CdS/CdTe/P+ a partir de las ecuaciones utilizadas para celdas solares convencionales pero modificándolas para tomar en cuenta los efectos que implica tener una capa absorbente delgada.

Todas estas modificaciones contribuyen a edificar un modelo más enfocado a las celdas de capa delgada, así se obtienen resultados más veraces que se adecuan mejor a lo que sucede en el mundo real.

Tal vez la modificación con más repercusión en el modelo es la consideración de que la zona desértica no es un valor constante, sino que depende del voltaje en la unión y está limitada por el espesor de la capa de CdTe. Esta suposición hace que ahora todas las demás variables calculadas sean sensibles a la variación de la extensión de la zona desértica y por tanto también tengan cierta dependencia con el voltaje de la unión y el espesor de la capa de CdTe.

Se vio que en las celdas de capa delgada llega a suceder que la extensión de la zona desértica puede abarcar la totalidad del espesor de la capa absorbente, esto es deseable ya que de esta forma el campo eléctrico formado dentro de la zona de deserción se extiende sobre todo el material, lo que se traduce en una probabilidad de colección muy alta para todos los pares electrón-hueco generados en esta zona. En este caso, el valor específico de la velocidad de recombinación superficial en la parte trasera no tiene ningún efecto sobre el valor de la fotocorriente, pues se asume que el campo eléctrico es lo suficientemente intenso como para arrastrar a todos los portadores hacia el otro lado de la unión.

La corriente de corto circuito más alta obtenida fue de 27.468 mA/cm^2 , esto es casi el 95% de la corriente máxima teórica que se podría obtener con el espectro AM1.5 en una celda de CdTe que es de 28.986 mA/cm^2 . Este valor y los más altos obtenidos para cada parámetro se encuentran condensados en la Tabla 2, donde observamos que para obtener la mejor eficiencia es necesario tener un espesor de la capa de CdTe de $1 \text{ }\mu\text{m}$ con impurificación alta ($N_A=10^{15}$), mientras que la impurificación del CdS es mejor mantenerla baja ($N_A=10^{17}$) y es preciso adicionar

una capa P+ en la parte trasera para tener una baja velocidad de recombinación superficial. De nueva cuenta, esto concuerda con lo establecido por otros autores [22] [33].

Finalmente se puede concluir que el modelo elaborado, cumple su objetivo y aporta resultados fiables que obedecen a los fenómenos físicos que se presentan en las celdas de capa delgada y se puede utilizar para simular el comportamiento de una celda solar dadas ciertas condiciones de manera analítica, de forma que el usuario pueda ver exactamente qué sucede con cada parámetro de la celda y obtener un mejor entendimiento de su funcionamiento, a diferencia de los modelos numéricos.

Aunque el modelo es completamente funcional, es pertinente mencionar que se puede trabajar más en él para incluir aspectos menores que por lo pronto se han omitido, pero que harían del modelo uno más completo y robusto, por ejemplo:

- Incluir el efecto del campo eléctrico adicional debido a la capa P+ con datos específicos del material a utilizar
- Incluir efectos de resistencia en serie y paralelo
- Tomar en cuenta las propiedades ópticas del vidrio y TCO
- Obtener ecuaciones que describan la absorción en la región desértica considerando que existe una pequeña parte de portadores que se recombinarán en la superficie

| | Valor | N_A | N_D | S_n | W_{CdTe} |
|------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------|
| Jsc | 27.468 mA/cm ² | 10^{14} cm^{-3} | 10^{17} cm^{-3} | 10^2 cm/s | 4 μm |
| Voc (mV) | 956.421 mV | 10^{14} cm^{-3} | 10^{17} cm^{-3} | 10^2 cm/s | 0.5 μm |
| F.F. | .818 | 10^{15} cm^{-3} | 10^{17} cm^{-3} | 10^7 cm/s | 0.5 μm |
| Eficiencia | 20.178 % | 10^{15} cm^{-3} | 10^{17} cm^{-3} | 10^2 cm/s | 1 μm |

Tabla 2. Valores máximos obtenidos para cada parámetro de salida simulado

Bibliografía

- [1] H. Fardi y F. Buny, «Characterization and Modeling of CdS/CdTe Heterojunction Thin-Film Solar Cell for High Efficiency Performance,» *International Journal of Photoenergy*, vol. 2013, pp. 1-6, 2013.
- [2] A. Morales-Acevedo, «Physical basis for the design of CdS/CdTe thin film solar cells,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n° 90, pp. 678-685, 2006.
- [3] International Energy Agency, «Key World Energy Statistics,» OECD/IEA, 2015.
- [4] British Petroleum , «BP Statistical Review of World Energy June 2015,» BP, 2015.
- [5] Joint Research Centre, «EDGAR-Emission Database for Global Atmospheric Research,» European Comission, 2013. [En línea]. Available: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu>. [Último acceso: 7 Mayo 2016].
- [6] Fraunhofer ISE, «Photovoltaics Report,» 2016.
- [7] SENER, «Sistema de Información Energética (SIE),» 2016. [En línea]. Available: <http://sie.energia.gob.mx>. [Último acceso: 7 Mayo 2016].
- [8] F. Carrasco, «MESA 1: SITUACIÓN DEL SECTOR DE RENOVABLES EN MÉXICO,» SENER, México, 2015.
- [9] ProMéxico, «Sector de Energías Renovables en México,» ProMexico-Mexico Investment Map, 2014. [En línea]. Available: <http://mim.promexico.gob.mx>. [Último acceso: 7 Mayo 2016].
- [10] M. Vesterager, «Solar cells-the three generations,» plasticphotovoltaics.org, 2013. [En línea]. Available: <http://plasticphotovoltaics.org>. [Último acceso: 8 Mayo 2016].
- [11] D. H. Rose y et.al., «Fabrication Procedures and Process Sensitivities fo rCdS/CdTe Solar Cells,» *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND*

APPLICATIONS, nº 7, pp. 331-340, 1999.

- [12] K. Yamamoto y et.al., «Fabrication of CdS/CdTe solar cells with transparent p-type conductive BaCuSeF back contact,» *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 54, 2015.
- [13] S. Khosroabadi y S. H. Keshmiri, «Design of a high efficiency ultrathin CdS/CdTe solar cell using back surface field and backside distributed Bragg reflector,» *Optics Express*, vol. 22, nº S3, 2014.
- [14] PVinsights, «PVinsights-Grid the World,» 2016. [En línea]. Available: <http://pvinsights.com/>. [Último acceso: 8 Mayo 2016].
- [15] National Renewable Energy Laboratory, «Research Cell Efficiency Records,» NREL, 2016. [En línea]. Available: <http://www.nrel.gov/ncpv/>. [Último acceso: 8 Mayo 2016].
- [16] J. Burst y Et.Al., «CdTe solar cells with open-circuit voltage breaking the 1 V barrier,» *Nature Energy*, nº 1, 2016.
- [17] J.-P. Colinge y C. A. Collinge, *Physics of Semiconductor Devices*, New York: Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [18] S. Sze y K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [19] P. Roblin y H. Rohdin, *High-Speed Heterostructure Devices*, New York: Cambridge University Press, 2002.
- [20] A. Morales-Acevedo, *La Electricidad que Viene del Sol: Una Fuente de Energía Limpia*, México, D.F.: Grupo Editorial Iberoamérica, 1996.
- [21] H. J. Hovel, *Semiconductors and Semimetals. Volume 11: Solar Cells*, New York: Academic Press, 1975.
- [22] A. Morales-Acevedo, «Design of very thin CdTe Solar Cells with high

efficiency,» *Energy Procedia*, vol. 00, nº 00, 2013.

- [23] B. Ven Zeghboreck, «Principles of Semiconductor Devices,» University of Colorado, 2011. [En línea]. Available: <http://ecee.colorado.edu/~bart/>. [Último acceso: 11 Mayo 2016].
- [24] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*, New Jersey: Prentice-Hall, 1982.
- [25] C.-T. Sah, R. N. Noyce y W. Shockley, «Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junctions Characteristics,» *Proceedings of the IRE*, pp. 1228-1243, 1957.
- [26] S. Sze y M. Lee, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 2012: John Wiley & Sons.
- [27] National Renewable Energy Laboratory, «Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5,» NREL, [En línea]. Available: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>. [Último acceso: Mayo 19 2016].
- [28] American Society for Testing and Materials, «Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface,» ASTM, [En línea]. Available: <http://www.astm.org/Standards/G173.htm>. [Último acceso: 19 Mayo 2016].
- [29] Public Domain Aeronautical Software, «Properties Of The U.S. Standard Atmosphere 1976,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.pdas.com/atmos.html>. [Último acceso: 19 Mayo 2016].
- [30] S. Khosroabadi, S. Keshmiri y S. Marjani, «Design of a high efficiency CdS/CdTe solar cell with optimized step doping, film thickness, and carrier lifetime of the absorption layer,» *J. Europ. Opt. Soc. Rap.*, vol. 9, pp. 1-6, 2014.
- [31] R. Ahrenkiel, B. Keyes y L. Wang, «Minority-Carrier Lifetime of Polycrystalline CdTe in CdS/CdTe Solar Cells,» *Proceedings of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 940-945, 1991.

- [32] G. Dubrovskii, «Optical Properties of CdTe,» *Soviet. Phys. Solid State*, vol. 3, p. 1305, 1961.
- [33] N. Amin, K. Sopian y M. Konagai, «Numerical modeling of CdS/CdTe and CdS/CdTe/ZnTe solar cells as a function of CdTe thickness,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, pp. 1202-1208, 2007.
- [34] A. Morales-Acevedo, «Thin film CdS/CdTe solar cells: Research perspectives,» *Solar Energy*, vol. 80, pp. 675-681, 2006.
- [35] S. Choo, «Carrier Generation-Recombination in the Space-Charge Region of an Asymmetrical p-n Junction,» *Solid-State Electronics* , vol. 11, pp. 1069-1077, 1968.

Anexo A. Modelo analítico implementado en Mathcad

Modelo analítico para celdas de capa delgada de CdS/CdTe/P+

Armando Acevedo Luna

Constantes

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \frac{F}{cm}$$

$$q := 1.60218 \cdot 10^{-19} \cdot C$$

$$eV := q \cdot V$$

$$k_B := 1.38065 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$$

$$T := 300 \cdot K$$

$$h := 6.62607 \times 10^{-34} \cdot J \cdot s$$

$$c = 2.998 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

Cálculos para el espectro solar

$$\left(\begin{array}{c} \lambda_{AM1.5} \\ dP_{d\lambda_{AM1.5}} \end{array} \right) :=$$

| Longitud de onda (λ) [nm] | Irradiancia espectral AM 1.5 global ($dP/d\lambda$) [$W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$] |
|-------------------------------------|--|
| 280.0 | 4.7309E-23 |
| 280.5 | 1.2307E-21 |
| 281.0 | 5.6895E-21 |

$$dP_{d\lambda}(\lambda) := \text{linterp} \left(\lambda_{AM1.5} \cdot nm, dP_{d\lambda_{AM1.5}} \cdot \frac{W}{m^2 \cdot nm}, \lambda \right)$$

$$dN_{d\lambda}(\lambda) := \frac{\lambda \cdot dP_{d\lambda}(\lambda)}{h \cdot c}$$

Datos para la capa de CdS:

Datos para la capa de CdTe:

$$\epsilon_{\text{CdS}} := 9.35 \cdot \epsilon_0$$

$$\chi_{\text{CdS}} := 4.3 \cdot \text{eV}$$

$$\mu_{\text{n_CdS}} := 10 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$\mu_{\text{p_CdS}} := 10 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$N_{\text{d_CdS}} := 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$E_{\text{g_CdS}} := 2.42 \cdot \text{eV}$$

$$N_{\text{c_CdS}} := 2.4 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$N_{\text{v_CdS}} := 1.8 \cdot 10^{19} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$\tau_{\text{n_CdS}} := 10^4 \text{ ns}$$

$$\tau_{\text{p_CdS}} := 0.1 \text{ ns}$$

$$E_{\text{t_Ei_CdS}} := .1 \text{ eV}$$

$$W_{\text{CdS}} := 50 \cdot \text{nm}$$

$$D_{\text{p_CdS}} := \mu_{\text{p_CdS}} \cdot \frac{k_{\text{B}} \cdot T}{q} = 0.259 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$S_{\text{p_CdS}} := 1 \cdot 10^7 \cdot \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$\epsilon_{\text{CdTe}} := 10.3 \cdot \epsilon_0$$

$$\chi_{\text{CdTe}} := 4.28 \cdot \text{eV}$$

$$\mu_{\text{n_CdTe}} := 100 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$\mu_{\text{p_CdTe}} := 60 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$N_{\text{a_CdTe}} := 10^{15} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$E_{\text{g_CdTe}} := 1.5 \cdot \text{eV}$$

$$N_{\text{c_CdTe}} := 8 \cdot 10^{17} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$N_{\text{v_CdTe}} := 1.8 \cdot 10^{19} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$\tau_{\text{n_CdTe}} := 1 \text{ ns}$$

$$\tau_{\text{p_CdTe}} := 10^3 \text{ ns}$$

$$E_{\text{t_Ei_CdTe}} := .1 \text{ eV}$$

$$D_{\text{n_CdTe}} := \mu_{\text{n_CdTe}} \cdot \frac{k_{\text{B}} \cdot T}{q} = 2.585 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$S_{\text{n_CdTe}} := 1 \cdot 10^2 \cdot \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Longitud de difusión

$$L_{\text{p_CdS}} := \sqrt{\tau_{\text{p_CdS}} \cdot D_{\text{p_CdS}}} = 0.051 \cdot \mu\text{m}$$

$$L_{\text{n_CdTe}} := \sqrt{\tau_{\text{n_CdTe}} \cdot D_{\text{n_CdTe}}} = 0.508 \cdot \mu\text{m}$$

Propiedades ópticas

$$\begin{pmatrix} \lambda_{\text{abs_CdS}} \\ \text{abs_CdS} \end{pmatrix} :=$$

| Longitud de onda (λ) [nm] | Coefficiente de absorción (α) [cm^{-1}] |
|-------------------------------------|---|
| 300 | 2.70E+05 |
| 320 | 2.20E+05 |
| 340 | 1.80E+05 |
| 360 | 1.50E+05 |
| 380 | 1.30E+05 |

$$\begin{pmatrix} \lambda_{\text{abs_CdTe}} \\ \text{abs_CdTe} \end{pmatrix} :=$$

| Longitud de onda (λ) [nm] | Coefficiente de absorción (α) [cm^{-1}] |
|-------------------------------------|---|
| 320 | 3.10E+05 |
| 340 | 2.80E+05 |
| 360 | 2.50E+05 |
| 380 | 2.10E+05 |
| 400 | 1.80E+05 |

$$\alpha_{\text{CdS}}(\lambda) := \text{linterp}(\lambda_{\text{abs_CdS}} \cdot \text{nm}, \text{abs_CdS} \cdot \text{cm}^{-1}, \lambda)$$

$$\alpha_{\text{CdTe}}(\lambda) := \text{linterp}(\lambda_{\text{abs_CdTe}} \cdot \text{nm}, \text{abs_CdTe} \cdot \text{cm}^{-1}, \lambda)$$

$$R(\lambda) := 0$$

$$R_m(\lambda) := 1$$

Análisis electrostático

$$n_{i_CdS} := \sqrt{N_{c_CdS} \cdot N_{v_CdS} \cdot e^{\frac{-E_{g_CdS}}{k_B \cdot T}}} = 0.031 \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$n_{i_CdTe} := \sqrt{N_{c_CdTe} \cdot N_{v_CdTe} \cdot e^{\frac{-E_{g_CdTe}}{k_B \cdot T}}} = 9.544 \times 10^5 \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$V_{bi_1} := \frac{(\chi_{\text{CdTe}} - \chi_{\text{CdS}}) - [|E_{g_CdTe} - E_{g_CdS}| - (\chi_{\text{CdTe}} - \chi_{\text{CdS}})]}{2q} + \frac{k_B \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{N_{d_CdS} \cdot N_{a_Cd}}{n_{i_CdS} \cdot n_{i_Cd}} \right)$$

$$x_{p_1}(V_j) := \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_{\text{CdS}} \cdot \epsilon_{\text{CdTe}} \cdot N_{d_CdS} \cdot (V_{bi_1} - V_j)}{q \cdot N_{a_CdTe} \cdot (\epsilon_{\text{CdS}} \cdot N_{d_CdS} + \epsilon_{\text{CdTe}} \cdot N_{a_CdTe})}}$$

$$x_{pp_1}(V_j, W_{\text{CdTe}}) := \begin{cases} \text{return } x_{p_1}(V_j) & \text{if } x_{p_1}(V_j) < W_{\text{CdTe}} \\ W_{\text{CdTe}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{\mu_{\text{CdTe}}}{q} + \frac{k_{\text{B}} T}{2q} \cdot \ln\left(\frac{N_{\text{c_CdTe}} \cdot N_{\text{v_CdS}}}{N_{\text{c_CdS}} \cdot N_{\text{v_CdTe}}}\right) = 1.204 \text{ V}$$

$$x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}) := \frac{N_a_{CdTe}}{N_d_{CdS}} \cdot x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe})$$

Cálculo de corrientes

$$J_{Lmax} := q \left(\int_{300nm}^{\frac{h \cdot c}{Eg_{CdTe}}} dN_{d\lambda(\lambda)} d\lambda \right) = 28.986 \cdot \frac{mA}{cm^2}$$

Absorción de fotones incidentes

$$J_{L1_CdS}(V_j, W_{CdTe}) := q \cdot \left[\int_{300nm}^{\frac{h \cdot c}{Eg_{CdS}}} \left[\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot dN_{d\lambda(\lambda)} \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot \frac{Lp_{CdS}}{(\alpha_{CdS}(\lambda)^2 \cdot Lp_{CdS}^2 - 1)} \right] \right]$$

$$J_{L1_rce_n}(V_j, W_{CdTe}) := q \cdot \left[\int_{300nm}^{\frac{h \cdot c}{Eg_{CdS}}} dN_{d\lambda(\lambda)} \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot e^{-\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot (W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}))} \right]$$

$$J_{L1_rce_p}(V_j, W_{CdTe}) := q \cdot \left[\int_{300nm}^{\frac{h \cdot c}{Eg_{CdTe}}} dN_{d\lambda(\lambda)} \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot e^{-\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot W_{CdS}} \cdot \left[1 - e^{-\alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot W_{CdTe}} \right] \right]$$

$$J_{L1_CdTe}(V_j, W_{CdTe}) := q \cdot \left[\int_{300nm}^{\frac{h \cdot c}{Eg_{CdTe}}} \left[\alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot dN_{d\lambda(\lambda)} \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot e^{-\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot W_{CdS} - \alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot W_{CdTe}} \right] \right]$$

Absorción de fotones reflejados en el contacto posterior

$$\left[\frac{\left(\frac{Sp_{CdS} \cdot Lp_{CdS}}{Dp_{CdS}} + \alpha_{CdS}(\lambda) \cdot Lp_{CdS} \right) - e^{-\left[-\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot (W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe})) \right]}}{\frac{Sp_{CdS} \cdot Lp_{CdS}}{Dp_{CdS}} \cdot \sinh \left[\frac{(W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}))}{Lp_{CdS}} \right]} + \left[\frac{Sp_{CdS} \cdot Lp_{CdS}}{Dp_{CdS}} \right. \right.$$

$$\left. \left. \Gamma_e \right] \left[1 - e^{-\left(-\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}) \right)} \right] d\lambda \right]$$

$$\left. e(\lambda) \cdot x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe}) \right] d\lambda$$

$$\Gamma_e(\lambda) \cdot x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe}) \cdot \frac{Ln_{CdTe}}{(\alpha_{CdTe}(\lambda)^2 \cdot Ln_{CdTe}^2 - 1)} \left[\alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot Ln_{CdTe} - \frac{Sn_{CdTe} \cdot Ln_{CdTe}}{Dn_{CdTe}} \right] \cos$$

$$\frac{\left[\cosh\left[\frac{(W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}))}{Lp_CdS}\right] + \sinh\left[\frac{(W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}))}{Lp_CdS}\right] \right] - \alpha_{CdS}(\lambda) \cdot Lp_CdS \cdot e^{-\frac{(W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}))}{Lp_CdS}}}{\cosh\left[\frac{(W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}))}{Lp_CdS}\right]}$$

$$\frac{\left[\frac{(W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe}))}{Ln_CdTe} - e^{-\alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot (W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe}))} \right] + \sinh\left[\frac{(W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe}))}{Ln_CdTe}\right]}{\frac{Sn_CdTe \cdot Ln_CdTe}{Dn_CdTe} \cdot \sinh\left[\frac{(W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe}))}{Ln_CdTe}\right] + \cosh\left[\frac{(W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe}))}{Ln_CdTe}\right]}$$

$$\left[-\alpha_{\text{CdS}}(\lambda) \cdot (W_{\text{CdS}} - x_{\text{nn}_1}(V_j, W_{\text{CdTe}})) \right] d\lambda$$

$$\left[\frac{x_{\text{pp}_1}(V_j, W_{\text{CdTe}})}{\text{Ln}_{\text{CdTe}}} + \alpha_{\text{CdTe}}(\lambda) \cdot \text{Ln}_{\text{CdTe}} \cdot e^{-\alpha_{\text{CdTe}}(\lambda) \cdot (W_{\text{CdTe}} - x_{\text{pp}_1}(V_j, W_{\text{CdTe}}))} \right] d\lambda$$

$$\left[\frac{V_{\text{CdTe}} - x_{\text{pp}_1}(V_j, W_{\text{CdTe}})}{\text{Ln}_{\text{CdTe}}} \right]$$

$$J_{L2_CdS}(V_j, W_{CdTe}) := q \cdot \int_{300nm}^{\frac{h \cdot c}{Eg_CdS}} \left[\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot dN_d\lambda(\lambda) \cdot R_m(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot e^{-\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot (W_{CdS} + W_{CdTe})} \right]$$

$$J_{L2_rce_n}(V_j, W_{CdTe}) := q \cdot \int_{300nm}^{\frac{h \cdot c}{Eg_CdS}} dN_d\lambda(\lambda) \cdot R_m(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot e^{-\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot W_{CdS} - \alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot W_{CdTe}}$$

$$J_{L2_rce_p}(V_j, W_{CdTe}) := q \cdot \int_{300nm}^{\frac{h \cdot c}{Eg_CdTe}} dN_d\lambda(\lambda) \cdot R_m(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot e^{-\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot W_{CdS} - \alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot W_{CdTe}}$$

$$J_{L2_CdTe}(V_j, W_{CdTe}) := q \cdot \int_{300nm}^{\frac{h \cdot c}{Eg_CdTe}} \left[\alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot dN_d\lambda(\lambda) \cdot R_m(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot e^{-\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot W_{CdS} - \alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot W_{CdTe}} \right]$$

$$J_{L1}(V_j, W_{CdTe}) := J_{L1_CdS}(V_j, W_{CdTe}) + J_{L1_rce_n}(V_j, W_{CdTe}) + J_{L1_rce_p}(V_j, W_{CdTe}) + J_{L1_CdTe}(V_j, W_{CdTe})$$

$$J_{L2}(V_j, W_{CdTe}) := J_{L2_CdS}(V_j, W_{CdTe}) + J_{L2_rce_n}(V_j, W_{CdTe}) + J_{L2_rce_p}(V_j, W_{CdTe}) + J_{L2_CdTe}(V_j, W_{CdTe})$$

$$J_L(V_j, W_{CdTe}) := J_{L2}(V_j, W_{CdTe}) + J_{L1}(V_j, W_{CdTe})$$

Corriente de oscuridad

Corriente de inyección

$$\left[\frac{\text{CdS} + x_{\text{nn}_1}(V_j, W_{\text{CdTe}}) - \alpha_{\text{CdTe}}(\lambda)(2W_{\text{CdTe}})}{(\alpha_{\text{CdS}}(\lambda)^2 \cdot L_{\text{p_CdS}}^2 - 1)} \cdot \frac{L_{\text{p_CdS}}}{\left(\frac{S_{\text{p_CdS}} \cdot L_{\text{p_CdS}}}{D_{\text{p_CdS}}} + \alpha_{\text{CdS}} \right)} \right]$$

$$\left[e(\lambda)(2W_{\text{CdTe}}) \cdot \left[1 - e^{-\alpha_{\text{CdS}}(\lambda) \cdot x_{\text{nn}_1}(V_j, W_{\text{CdTe}})} \right] d\lambda \right]$$

$$\left[\text{Te}(\lambda)(2W_{\text{CdTe}} - x_{\text{pp}_1}(V_j, W_{\text{CdTe}})) \cdot \left[1 - e^{-\alpha_{\text{CdTe}}(\lambda) \cdot x_{\text{pp}_1}(V_j, W_{\text{CdTe}})} \right] d\lambda \right]$$

$$\left[\frac{\text{CdS} - \alpha_{\text{CdTe}}(\lambda) W_{\text{CdTe}}}{(\alpha_{\text{CdTe}}(\lambda)^2 \cdot L_{\text{n_CdTe}}^2 - 1)} \cdot \frac{L_{\text{n_CdTe}}}{\left[\alpha_{\text{CdTe}}(\lambda) \cdot L_{\text{n_CdTe}} - \frac{S_{\text{n_CdTe}} \cdot L_{\text{n_CdTe}}}{D_{\text{n_CdTe}}} \right]_{\text{co}}} \right]$$

$$\text{CdTe}(V_j, W_{\text{CdTe}})$$

$$\text{CdTe}(V_j, W_{\text{CdTe}})$$

$$\frac{(\lambda \cdot L_{p_CdS}) \cdot e^{-\left[-\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot (W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe})) \right]} \left[\frac{S_{p_CdS} \cdot L_{p_CdS}}{D_{p_CdS}} \cdot \cosh \left[\frac{(W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}))}{L_{p_CdS}} \right] \right]}{\frac{S_{p_CdS} \cdot L_{p_CdS}}{D_{p_CdS}} \cdot \sinh \left[\frac{(W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}))}{L_{p_CdS}} \right] + \cosh \left[\frac{(W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}))}{L_{p_CdS}} \right]}$$

$$\frac{\sinh \left[\frac{(W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe}))}{L_{n_CdTe}} \right] \cdot e^{-\left[-\alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot (W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe})) \right]} + \sinh \left[\frac{(W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe}))}{L_{n_CdTe}} \right]}{\frac{S_{n_CdTe} \cdot L_{n_CdTe}}{D_{n_CdTe}} \cdot \sinh \left[\frac{(W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe}))}{L_{n_CdTe}} \right] + \cosh \left[\frac{(W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe}))}{L_{n_CdTe}} \right]}$$

$$\frac{W_{CdTe}}{Ln_{CdTe}} \left] + \sinh \left[\frac{(W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe}))}{Lp_{CdS}} \right] \right] - \alpha_{CdS}(\lambda) \cdot Lp_{CdS} \cdot e^{\left[-\alpha_{CdS}(\lambda) \cdot (W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe})) \right]}$$

$$\left. \frac{\left[\frac{x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe})}{Ln_{CdTe}} \right] + \alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot Ln_{CdTe} \cdot e^{\left[-\alpha_{CdTe}(\lambda) \cdot (W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe})) \right]}}{\left[\frac{W_{CdTe} - x_{pp_1}(V_j, W_{CdTe})}{Ln_{CdTe}} \right]} \right] d\lambda$$

$$J_{01}(V_j, W_{CdTe}) := q \cdot \frac{Dp_{CdS} \cdot ni_{CdS}^2}{Lp_{CdS} \cdot Nd_{CdS}} \cdot \left[\frac{\left(\frac{Sp_{CdS} \cdot Lp_{CdS}}{Dp_{CdS}} \right) \cosh\left(\frac{W_{CdS} - xnn_1(V_j, W_{CdTe})}{Lp_{CdS}} \right) + \left(\frac{Sp_{CdS} \cdot Lp_{CdS}}{Dp_{CdS}} \right) \sinh\left(\frac{W_{CdS} - xnn_1(V_j, W_{CdTe})}{Lp_{CdS}} \right)}{\left(\frac{Sp_{CdS} \cdot Lp_{CdS}}{Dp_{CdS}} \right) \cosh\left(\frac{W_{CdS} - xnn_1(V_j, W_{CdTe})}{Lp_{CdS}} \right) + \left(\frac{Sp_{CdS} \cdot Lp_{CdS}}{Dp_{CdS}} \right) \sinh\left(\frac{W_{CdS} - xnn_1(V_j, W_{CdTe})}{Lp_{CdS}} \right)} \right]$$

$$J_0(V_j, W_{CdTe}) := \begin{cases} q \cdot \frac{Dp_{CdS} \cdot ni_{CdS}^2}{Lp_{CdS} \cdot Nd_{CdS}} \cdot \left[\frac{\left(\frac{Sp_{CdS} \cdot Lp_{CdS}}{Dp_{CdS}} \right) \cosh\left(\frac{W_{CdS} - xnn_1(V_j, W_{CdTe})}{Lp_{CdS}} \right) + \left(\frac{Sp_{CdS} \cdot Lp_{CdS}}{Dp_{CdS}} \right) \sinh\left(\frac{W_{CdS} - xnn_1(V_j, W_{CdTe})}{Lp_{CdS}} \right)}{\left(\frac{Sp_{CdS} \cdot Lp_{CdS}}{Dp_{CdS}} \right) \cosh\left(\frac{W_{CdS} - xnn_1(V_j, W_{CdTe})}{Lp_{CdS}} \right) + \left(\frac{Sp_{CdS} \cdot Lp_{CdS}}{Dp_{CdS}} \right) \sinh\left(\frac{W_{CdS} - xnn_1(V_j, W_{CdTe})}{Lp_{CdS}} \right)} \right] \\ J_{01}(V_j, W_{CdTe}) \text{ otherwise} \end{cases}$$

$$J_{dif}(V_j, W_{CdTe}) := J_0(V_j, W_{CdTe}) \cdot \left[e^{\left(\frac{q \cdot V_j}{k_B \cdot T} \right)} - 1 \right]$$

Corriente de recombinación en la región de carga espacial

$$J_{rec}(V_j, W_{CdTe}) := \frac{q \cdot ni_{CdTe} \cdot xpp_1(V_j, W_{CdTe})}{\sqrt{\tau p_{CdTe} \cdot \tau n_{CdTe}}} \cdot e^{\left(\frac{q \cdot V_j}{2k_B \cdot T} \right)}$$

Corriente de oscuridad total

$$J_{osc}(V_j, W_{CdTe}) := J_{dif}(V_j, W_{CdTe}) + J_{rec}(V_j, W_{CdTe})$$

Análisis de curva I-V

$$I_{out}(V_j, W_{CdTe}) := J_L(V_j, W_{CdTe}) - J_{osc}(V_j, W_{CdTe})$$

$$I_{sc}(W_{CdTe}) := J_L(0V, W_{CdTe})$$

$$V_{oc}(W_{CdTe}) := \text{root}(I_{out}(V_j, W_{CdTe}), V_j, .760V, 1.08V)$$

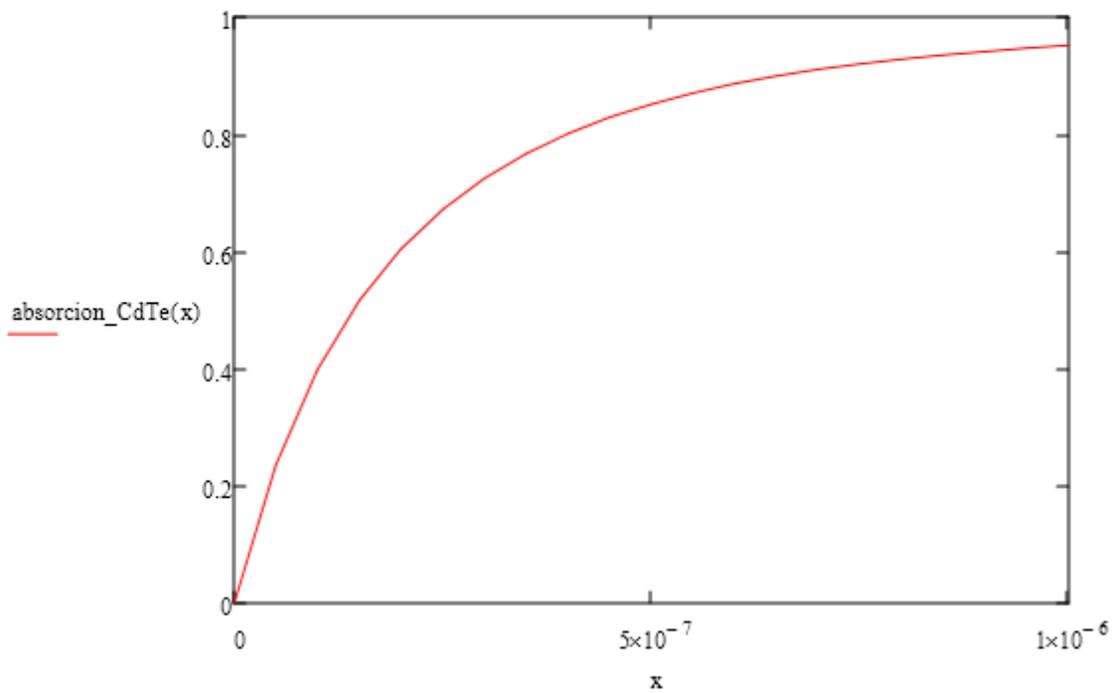
$$\frac{\sinh\left(\frac{W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe})}{L_{p_{CdS}}}\right)}{\cosh\left(\frac{W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe})}{L_{p_{CdS}}}\right)} + q \cdot \frac{D_{n_{CdTe}} \cdot n_{i_{CdTe}}^2}{L_{n_{CdTe}} \cdot N_{a_{CdTe}}} \left[\left(\frac{S_{n_{CdTe}} \cdot L_{n_{CdTe}}}{D_{n_{CdTe}}}\right) \cosh\left(\frac{W_{CdTe} - x}{L_{n_{CdTe}}}\right) + \left(\frac{S_{n_{CdTe}} \cdot L_{n_{CdTe}}}{D_{n_{CdTe}}}\right) \sinh\left(\frac{W_{CdTe} - x}{L_{n_{CdTe}}}\right) \right]$$

$$\frac{\sinh\left(\frac{W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe})}{L_{p_{CdS}}}\right)}{\cosh\left(\frac{W_{CdS} - x_{nn_1}(V_j, W_{CdTe})}{L_{p_{CdS}}}\right)} \quad \text{if } x_{p_1}(V_j) > W_{CdTe}$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{xpp_1(V_j, W_CdTe)}{Ln_CdTe} + \sinh\left(\frac{W_CdTe - xpp_1(V_j, W_CdTe)}{Ln_CdTe}\right) \\ & \frac{xpp_1(V_j, W_CdTe)}{Ln_CdTe} + \cosh\left(\frac{W_CdTe - xpp_1(V_j, W_CdTe)}{Ln_CdTe}\right) \end{aligned} \right]]$$

$$\text{absorción}_{\text{CdTe}}(x) := \frac{\int_{300\text{nm}}^{\frac{h \cdot c}{E_{g_CdTe}}} (1 - R(\lambda)) \cdot dN_{d\lambda}(\lambda) \cdot e^{(-\alpha_{\text{CdS}}(\lambda) \cdot W_{\text{CdS}})} \cdot (1 - e^{-\alpha_{\text{CdTe}}(\lambda) \cdot x}) d\lambda}{\int_{300\text{nm}}^{\frac{h \cdot c}{E_{g_CdTe}}} (1 - R(\lambda)) \cdot dN_{d\lambda}(\lambda) \cdot e^{(-\alpha_{\text{CdS}}(\lambda) \cdot W_{\text{CdS}})} d\lambda}$$

$x := 0\text{nm}, 50\text{nm} \dots 1000\text{nm}$



Anexo B. Condensado de parámetros eléctricos obtenidos

$$S_n = 10^2 \text{ cm/s}$$

| | | $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ | | $V_{bi} = 1.085V$ $X_p = 3.513 \mu\text{m}$ | | | |
|----------------------------|-------------|---|------------|---|------------|------------|--|
| | | $W_{\text{CdTe}} (\mu\text{m})$ | | | | | |
| | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | |
| Pmax (mW/cm ²) | 19.8891 | 19.6264 | 19.0875 | 18.83325 | 18.7785 | 18.75225 | |
| Voc (mV) | 956.421 | 922.426 | 860.84 | 852.997 | 852.761 | 852.721 | |
| Jsc (mA/cm ²) | 26.121 | 27.069 | 27.362 | 27.448 | 27.468 | 27.405 | |
| Vmax (mV) | 820 | 800 | 750 | 750 | 750 | 750 | |
| Jmax (mA/cm ²) | 24.255 | 24.533 | 25.45 | 25.111 | 25.038 | 25.003 | |
| FF | 0.796115774 | 0.78602598 | 0.81036145 | 0.80439074 | 0.80169012 | 0.80244748 | |
| Eficiencia (%) | 19.8891 | 19.6264 | 19.0875 | 18.83325 | 18.7785 | 18.75225 | |

Tabla 3. Parámetros eléctricos para ($N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ y $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) con $S_n = 10^2 \text{ cm/s}$

| | | $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ | | $V_{bi} = 1.145V$ $X_p = 3.609 \mu\text{m}$ | | | |
|----------------------------|------------|---|------------|---|------------|------------|--|
| | | $W_{\text{CdTe}} (\mu\text{m})$ | | | | | |
| | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | |
| Pmax (mW/cm ²) | 19.87844 | 19.6064 | 19.03725 | 18.71325 | 18.648 | 18.62025 | |
| Voc (mV) | 956.396 | 922.377 | 866.524 | 851.507 | 851.073 | 851.024 | |
| Jsc (mA/cm ²) | 26.109 | 27.044 | 27.311 | 27.371 | 27.383 | 27.32 | |
| Vmax (mV) | 820 | 800 | 750 | 750 | 750 | 750 | |
| Jmax (mA/cm ²) | 24.242 | 24.508 | 25.383 | 24.951 | 24.864 | 24.827 | |
| FF | 0.79607559 | 0.78599262 | 0.80442584 | 0.80291641 | 0.80017397 | 0.80087181 | |
| Eficiencia (%) | 19.87844 | 19.6064 | 19.03725 | 18.71325 | 18.648 | 18.62025 | |

Tabla 4. Parámetros eléctricos para ($N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ y $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) con $S_n = 10^2 \text{ cm/s}$

| | | $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ | | $V_{bi} = 1.145V$ $X_p = 1.135 \mu\text{m}$ | | | |
|----------------------------|----------|---|---------|---|---------|---------|--|
| | | $W_{\text{CdTe}} (\mu\text{m})$ | | | | | |
| | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | |
| Pmax (mW/cm ²) | 19.99406 | 20.1784 | 19.6464 | 19.5536 | 19.5296 | 19.5128 | |
| Voc (mV) | 950.398 | 917.112 | 910.916 | 910.669 | 910.629 | 910.602 | |
| Jsc (mA/cm ²) | 26.249 | 27.326 | 27.342 | 27.19 | 27.15 | 27.125 | |
| Vmax (mV) | 820 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | |

| | | | | | | |
|----------------------------|-------------|-----------|------------|-----------|------------|------------|
| Jmax (mA/cm ²) | 24.383 | 25.223 | 24.558 | 24.442 | 24.412 | 24.391 |
| FF | 0.801461591 | 0.8051713 | 0.78881357 | 0.7896906 | 0.78991805 | 0.78998937 |
| Eficiencia (%) | 19.99406 | 20.1784 | 19.6464 | 19.5536 | 19.5296 | 19.5128 |

Tabla 5. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{15}\text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{17}\text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^2\text{cm/s}$

| | | | | | | |
|----------------------------|--|-----------------------------|--|-----------|------------|------------|
| | $N_A=10^{15}\text{cm}^{-3}$ | $N_D=10^{18}\text{cm}^{-3}$ | $V_{bi}=1.204\text{V}$ $X_p=1.17\mu\text{m}$ | | | |
| | W_CdTe (μm) | | | | | |
| | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 |
| Pmax (mW/cm ²) | 19.8891 | 20.036 | 19.532 | 19.4352 | 19.4104 | 19.3936 |
| Voc (mV) | 956.421 | 916.664 | 909.295 | 909.013 | 908.971 | 908.943 |
| Jsc (mA/cm ²) | 26.121 | 27.069 | 27.082 | 26.927 | 26.887 | 26.861 |
| Vmax (mV) | 820 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 |
| Jmax (mA/cm ²) | 24.255 | 25.045 | 24.415 | 24.294 | 24.263 | 24.242 |
| FF | 0.79611577 | 0.80747416 | 0.79316068 | 0.7940191 | 0.79422236 | 0.79432752 |
| Eficiencia (%) | 19.8891 | 20.036 | 19.532 | 19.4352 | 19.4104 | 19.3936 |

Tabla 6. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{15}\text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{18}\text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^2\text{cm/s}$

$S_n=10^7\text{cm/s}$

| | | | | | | |
|----------------------------|--|-----------------------------|---|------------|-----------|------------|
| | $N_A=10^{14}\text{cm}^{-3}$ | $N_D=10^{17}\text{cm}^{-3}$ | $V_{bi}=1.085\text{V}$ $X_p=3.513\mu\text{m}$ | | | |
| | W_CdTe (μm) | | | | | |
| | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 |
| Pmax (mW/cm ²) | 15.552 | 16.1046 | 18.37584 | 18.817375 | 18.7891 | 18.765175 |
| Voc (mV) | 729.047 | 729.66 | 850.059 | 852.633 | 852.753 | 852.72 |
| Jsc (mA/cm ²) | 26.121 | 27.069 | 27.362 | 27.448 | 27.452 | 27.405 |
| Vmax (mV) | 600 | 600 | 720 | 725 | 725 | 725 |
| Jmax (mA/cm ²) | 25.92 | 26.841 | 25.522 | 25.955 | 25.916 | 25.883 |
| FF | 0.816659317 | 0.81537462 | 0.7900422 | 0.80405582 | 0.8026177 | 0.80300151 |
| Eficiencia (%) | 15.552 | 16.1046 | 18.37584 | 18.817375 | 18.7891 | 18.765175 |

Tabla 7. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{14}\text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{17}\text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^7\text{cm/s}$

| | | Na=10¹⁴ cm⁻³ | | Nd=10¹⁸ cm⁻³ | | Vbi=1.145V Xp=3.609um | |
|---------------------------------|------------|---|------------|---|------------|------------------------------|--|
| | | W_CdTe (μm) | | | | | |
| | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | |
| Pmax (mW/cm²) | 19.87844 | 19.747 | 19.03725 | 18.7601 | 18.7079 | 18.68035 | |
| Voc (mV) | 956.396 | 922.377 | 862.103 | 851.385 | 851.07 | 851.024 | |
| Jsc (mA/cm²) | 26.109 | 27.044 | 27.311 | 27.371 | 27.381 | 27.32 | |
| Vmax (mV) | 820 | 775 | 750 | 725 | 725 | 725 | |
| Jmax (mA/cm²) | 24.242 | 25.48 | 25.383 | 25.876 | 25.804 | 25.766 | |
| FF | 0.79607559 | 0.79162907 | 0.80855107 | 0.80504191 | 0.80280571 | 0.80345675 | |
| Eficiencia (%) | 19.87844 | 19.747 | 19.03725 | 18.7601 | 18.7079 | 18.68035 | |

Tabla 8. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{14} \text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{18} \text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^7 \text{cm/s}$

| | | Na=10¹⁵ cm⁻³ | | Nd=10¹⁷ cm⁻³ | | Vbi=1.145V Xp=1.135um | |
|---------------------------------|------------|---|------------|---|------------|------------------------------|--|
| | | W_CdTe (μm) | | | | | |
| | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | |
| Pmax (mW/cm²) | 19.99406 | 20.1056 | 19.6392 | 19.5536 | 19.5296 | 19.5128 | |
| Voc (mV) | 936.45 | 915.255 | 910.87 | 910.668 | 910.629 | 910.602 | |
| Jsc (mA/cm²) | 26.249 | 27.326 | 27.328 | 27.189 | 27.15 | 27.125 | |
| Vmax (mV) | 820 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | |
| Jmax (mA/cm²) | 24.383 | 25.132 | 24.549 | 24.442 | 24.412 | 24.391 | |
| FF | 0.813399 | 0.80389414 | 0.78896828 | 0.78972051 | 0.78991805 | 0.78998937 | |
| Eficiencia (%) | 19.99406 | 20.1056 | 19.6392 | 19.5536 | 19.5296 | 19.5128 | |

Tabla 9. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{15} \text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{17} \text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^7 \text{cm/s}$

| | | Na=10¹⁵ cm⁻³ | | Nd=10¹⁸ cm⁻³ | | Vbi=1.204V Xp=1.17um | |
|---------------------------------|------------|---|------------|---|-----------|-----------------------------|--|
| | | W_CdTe (μm) | | | | | |
| | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 8 | |
| Pmax (mW/cm²) | 19.8891 | 19.9712 | 19.535425 | 19.4494 | 19.425375 | 19.408325 | |
| Voc (mV) | 956.421 | 914.437 | 909.239 | 909.011 | 908.971 | 908.943 | |
| Jsc (mA/cm²) | 26.121 | 27.069 | 27.068 | 26.926 | 26.887 | 26.861 | |
| Vmax (mV) | 820 | 800 | 775 | 775 | 775 | 775 | |
| Jmax (mA/cm²) | 24.255 | 24.964 | 25.207 | 25.096 | 25.065 | 25.043 | |
| FF | 0.79611577 | 0.80682279 | 0.79375896 | 0.7946305 | 0.7948351 | 0.79493063 | |
| Eficiencia (%) | 19.8891 | 19.9712 | 19.535425 | 19.4494 | 19.425375 | 19.408325 | |

Tabla 10. Parámetros eléctricos para ($N_A=10^{15} \text{cm}^{-3}$ y $N_D=10^{18} \text{cm}^{-3}$) con $S_n=10^7 \text{cm/s}$