



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN

EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES

Utilización de Técnicas de Caracterización Eléctrica para el Estudio de la Eficiencia de Células Solares

Autora:

Ana Melissa Luo Tang

Tutores:

Dr. D. Luis Alberto Bailón Vega

Dra. Dña. Helena Castán Lanaspa

Valladolid, 5 de Julio de 2013

TÍTULO: Utilización de Técnicas de
Caracterización Eléctrica para el
Estudio de la Eficiencia de Células
Solares
(Use of Electric Characterization
Techniques for the Study of the
Efficiency of Solar Cells)

AUTORA: Ana Melissa Luo Tang

TUTORES: Luis Alberto Bailón Vega
Helena Castán Lanaspá

DEPARTAMENTO: Electricidad y Electrónica

TRIBUNAL

PRESIDENTE: Dr. D. Miguel López-Coronado

VOCAL: Dr. D. Salvador Dueñas Carazo

SECRETARIO: Dr. D. Héctor García García

FECHA: 5 de Julio de 2013

CALIFICACIÓN:

Resumen del TFM

La crisis energética debido al aumento en el consumo de energía y al inminente agotamiento de las fuentes fósiles ha llevado en los últimos años a la búsqueda de fuentes alternativas de energía, principalmente las fuentes de energía renovables, por ser inagotables y no contaminantes. Una de esas alternativas es el aprovechamiento de la energía solar, que se puede convertir en energía eléctrica a través de dispositivos semiconductores denominados células solares.

Sin embargo, las células solares deben tener el mayor rendimiento posible para poder justificar su instalación, rendimiento que se ve limitado por la presencia de defectos en la estructura de estos semiconductores, es por ello que el estudio de las características de estos dispositivos es muy importante para su mejora.

Este trabajo describe dos técnicas de caracterización eléctrica de células solares para detectar la presencia de tales defectos: la espectroscopía térmica de admitancia y el análisis de transitorios capacidad-tensión, desarrollados dentro del Grupo de Caracterización de Materiales y Dispositivos Electrónicos del Departamento de Electricidad y Electrónica de la Universidad de Valladolid, en donde se harán pruebas para obtener datos de medidas y generar gráficos para su análisis.

Palabras clave

Células solares, dispositivos semiconductores, eficiencia, espectroscopía térmica, análisis de transitorios, capacidad, conductancia.

Abstract

The energy crisis due to increased energy consumption and the imminent depletion of fossil fuels has led in recent years to the search for alternative energy sources, especially renewable energy sources, being inexhaustible and non-polluting. One such alternative is the use of solar energy, which can be converted into electricity through semiconductor devices called solar cells.

However, solar cells must have the best possible performance to justify its installation; performance that is limited by the presence of defects in the structure of these semiconductors, that is why the study of the characteristics of these devices is very important for their improvement.

This work describes two techniques for electrical characterization of solar cells to detect the presence of such defects: thermal admittance spectroscopy and analysis of capacity-voltage transients, developed within the Group of Characterization of Materials and Electronic Devices, Department of Electrical and Electronics from the University of Valladolid, where tests will be done to obtain measurement data and generate graphics for analysis.

Keywords

Solar cells, semiconductor devices, efficiency, thermal spectroscopy, transient analysis, capacitance, conductance.

Agradecimientos

A mis tutores Helena y Luis Alberto, de quienes siempre recibí su apoyo, orientación y confianza durante todo el proceso de elaboración de este trabajo y sin los cuales no hubiera podido terminar a tiempo.

A Eduardo, cuya ayuda en el Laboratorio de Caracterización fue indispensable para el desarrollo de este trabajo.

A mi familia, mis padres y hermanos, que me animaron a vivir esta aventura y tomar este Máster, y desde lejos siempre me han apoyado.

A todos mis amigos, que sin su presencia durante esta travesía no hubiera sido tan placentera.

A todos ellos, Gracias.

Índice General

Agradecimientos	vii
Índice General	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tablas	xiii
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.1.1. Crisis Energética	1
1.1.2. Alternativas	2
1.1.3. La Energía Solar Fotovoltaica como Alternativa	2
1.1.4. Descripción del Sistema Fotovoltaico	5
1.1.5. Tecnologías y Análisis de Eficiencias	5
1.1.6. Estudio de Características Eléctricas	7
1.2. Objetivos	8
1.2.1. Objetivo General	8
1.2.2. Objetivos Específicos	8
1.3. Metodología	8
2. Células Solares	9
2.1. Historia	9
2.2. Principios Básicos	10
2.2.1. Proceso de Fabricación	10
2.2.2. Principios de Funcionamiento	11
2.2.3. Estructuras de Células Solares	14

Índice General

2.2.4. Eficiencia	15
2.3. Generaciones de Células Solares	16
2.3.1. Primera Generación	16
2.3.2. Segunda Generación	17
2.3.3. Tercera Generación	17
2.3.4. Cuarta Generación	19
2.4. Mejoras Tecnológicas	20
3. Técnicas de Caracterización Eléctrica de Sustratos de Células Solares	23
3.1. Espectroscopía Térmica de Admitancia	23
3.1.1. Fundamento Teórico	23
3.1.2. Montaje y Equipos Utilizados	25
3.2. Técnica de Transitorios Capacidad – Tensión CVTT	27
3.2.1. Fundamento Teórico	27
3.2.2. Montaje y Equipos Utilizados	29
4. Experimentación y Resultados	31
4.1. Caracterización Inicial	31
4.2. Espectroscopía Térmica de Admitancia	36
4.3. Técnica de Transitorios Capacidad – Tensión CVTT	38
5. Conclusiones y Futuros Trabajos	41
Bibliografía	43

Índice de Figuras

1.1. Comparación de diferentes tecnologías para la producción de electricidad . . .	3
1.2. Capacidad de producción de sistemas fotovoltaicos a nivel global	4
2.1. Célula solar fotovoltaica y panel fotovoltaico	9
2.2. Proceso de fabricación de las células solares	11
2.3. Estructura de una célula solar fotovoltaica	11
2.4. Flujo de electrones y corriente en una célula solar	12
2.5. Descripción eléctrica de una unión PN	13
2.6. Esquema eléctrico equivalente de una célula solar	13
2.7. Característica I-V de una célula solar	14
2.8. Mecanismos de pérdidas en una célula solar	15
2.9. Irradiancia por unidad de longitud de onda sobre la Tierra	16
2.10. Estructura de una célula solar fotoelectroquímica	18
2.11. Estructura de una célula solar basada en polímeros	18
2.12. Estructura de las células solares basadas en tinte sensibilizado	19
2.13. Estructura de las células solares de cuarta generación	19
2.14. Principio de funcionamiento de las células multiunión	20
2.15. Concentradores fotovoltaicos	21
2.16. Cronología de las eficiencias de conversión en células solares	21
3.1. Características C-T y G-T a una frecuencia constante	24
3.2. Montaje Experimental de la Espectroscopía Térmica de Admitancia	26

Índice de Figuras

3.3. Equipos utilizados en la Espectroscopía Térmica de Admitancia	26
3.4. Diagramas esquemáticos de la Técnica de Transitorio CV	28
3.5. Montaje Experimental de la CVTT	29
3.6. Equipos utilizados en la CVTT	30
4.1. Representación de I-V de la muestra para distintas temperaturas	31
4.2. Gráfica de C-V para temperatura ambiente (T=300K)	32
4.3. Gráfica de G-V para temperatura ambiente (T=300K)	32
4.4. Gráfica de C-F para temperatura ambiente (T=300K)	33
4.5. Gráfica de G-F para temperatura ambiente (T=300K)	33
4.6. Gráfica de C-V para frecuencia = 30 kHz	34
4.7. Gráfica de G-V para frecuencia = 30 kHz	34
4.8. Gráfica de C-T para frecuencia = 30 kHz	35
4.9. Gráfica de G-T para frecuencia = 30 kHz	35
4.10. Gráfica de Capacidad-Temperatura para distintas frecuencias	36
4.11. Gráfica de Conductancia-Temperatura para distintas frecuencias	37
4.12. Gráfica para la obtención de ΔE_T del centro profundo	37
4.13. Curvas C-V para T = 80K con diferentes tiempos de emisión	38
4.14. Curvas C-V para T = 140K con diferentes tiempos de emisión	39

Índice de Tablas

1.1. Recursos energéticos disponibles en la naturaleza	2
1.2. Resumen de las tecnologías fotovoltaicas	6
1.3. Eficiencias actuales de los diferentes módulos fotovoltaicos comerciales . . .	6
1.4. Objetivos generales de tecnología	7
4.1. Máximos de Conductancia para una frecuencia medida	36

Capítulo 1

1. Introducción

El problema de la obtención de energía es sin duda uno de los problemas más importantes de la sociedad actual, cada año se observa un incremento en la demanda de energía y es inevitable que se llegue a una escasez de combustibles fósiles, siendo éstos la principal fuente de energía primaria. La crisis energética no es algo nuevo, y desde hace ya muchos años se busca una solución sostenible al agotamiento de las reservas de petróleo. Y todo esto está enmarcado en la idea de un posible cambio climático mundial. Es por ello que la energía solar se sitúa en una posición inmejorable debido a su potencial inagotable y los dispositivos capaces de convertir energía luminosa en energía eléctrica han ido creciendo en importancia. Las células fotovoltaicas o solares son un ejemplo de estos dispositivos, con los cuales se realizan investigaciones para lograr desarrollar células solares cada vez más eficientes y que puedan aprovechar la mayor parte posible del espectro solar.

1.1. Motivación

1.1.1. Crisis Energética

A escala mundial, el sistema actual energético se basa en el consumo de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) como principales fuentes de energía primaria, aproximadamente 80%, los cuales al ritmo en que se consumen, conducen al agotamiento de sus reservas y suponen una amenaza para nuestro hábitat y el medio ambiente ya que inciden en el cambio climático y en el calentamiento de la tierra, produciendo efectos como la sequía, migraciones, aumento del nivel del mar, precipitaciones anormales, extinciones de especies y fusiones de los hielos [1].

La falta de regularización, la privatización de los sistemas de suministro de energía y la introducción de políticas energéticas en manos de las leyes del mercado, promueven a los productores a aumentar sus beneficios, vendiendo más y más cantidad de energía y disminuyendo su disposición a la conservación de la misma, donde su único límite son las leyes sobre contaminación. Por otra parte, los usuarios se muestran reacios a instalar sistemas de ahorro de energía. Sin duda,

Capítulo 1. Introducción

debido a los recursos limitados de combustible y los niveles crecientes de la población, el problema del uso eficiente de energía requiere una respuesta urgente.

Las tendencias actuales en el suministro y uso de energía son claramente insostenibles, económica, ambiental y socialmente. Sin una acción decisiva las emisiones de dióxido de carbono debido a la producción de energía usando combustibles fósiles será más del doble para el año 2050 y el aumento en la demanda de petróleo incrementará las preocupaciones sobre la seguridad de abastecimiento.

1.1.2. Alternativas

La principal alternativa a esta problemática es la diversificación de las fuentes de energía y la optimización del actual consumo energético. Las fuentes de energía renovables (sol, agua, viento) aprovechan los recursos de la naturaleza para producir energía que no varía el ecosistema, no produce contaminación, y sobre todo, son inagotables. La Tabla 1.1 muestra los principales recursos de energía disponibles en la naturaleza [2].

Recursos	Q/año*	KWh/año	SERPYP/año**
Energía solar recibida en la atmósfera exterior	5300	1.55×10^{18}	1
Energía solar recibida sobre la superficie de la Tierra	2500	7.3×10^{17}	0.47
Energía hidráulica	0.009	2.5×10^{12}	1.6×10^{-6}
Energía geotérmica	0.78	2.3×10^{14}	1.5×10^{-4}
Energía eólica	89	2.6×10^{16}	1.7×10^{-2}
Fotosíntesis	1.2	3.5×10^{14}	2.3×10^{-4}

* 1 Q = 1018 Btu = 1.05×10^{21} J = 2.92×10^{14} Kw

** 1 SERPY (Solar Energy Received Per Year) = 5300 Q

Tabla 1.1. Recursos energéticos disponibles en la naturaleza

1.1.3. La Energía Solar Fotovoltaica como Alternativa

La energía solar es la fuente de energía más abundante en la Tierra. La cantidad de energía solar que incide en la superficie terrestre en una hora es la misma que puede consumir toda la actividad humana en un año. Por lo tanto, la luz que recibimos del Sol supone una fuente ilimitada para producir electricidad. El término 'fotovoltaico' engloba al conjunto de las tecnologías que permiten la conversión directa de esta inagotable fuente de energía en electricidad, mediante un dispositivo electrónico llamado 'célula solar'.

En los últimos años se han hecho muchos estudios para cuantificar diversos aspectos ligados a la generación de energía y no considerados actualmente en su contabilidad. El gráfico de la Figura 1.1 muestra los resultados del estudio comparativo, realizado por Meridian Co., entre cinco tecnologías de producción de

electricidad: una fotovoltaica, una nuclear y tres de combustión de carbón; cuyas cifras demuestran lo siguiente [1]:

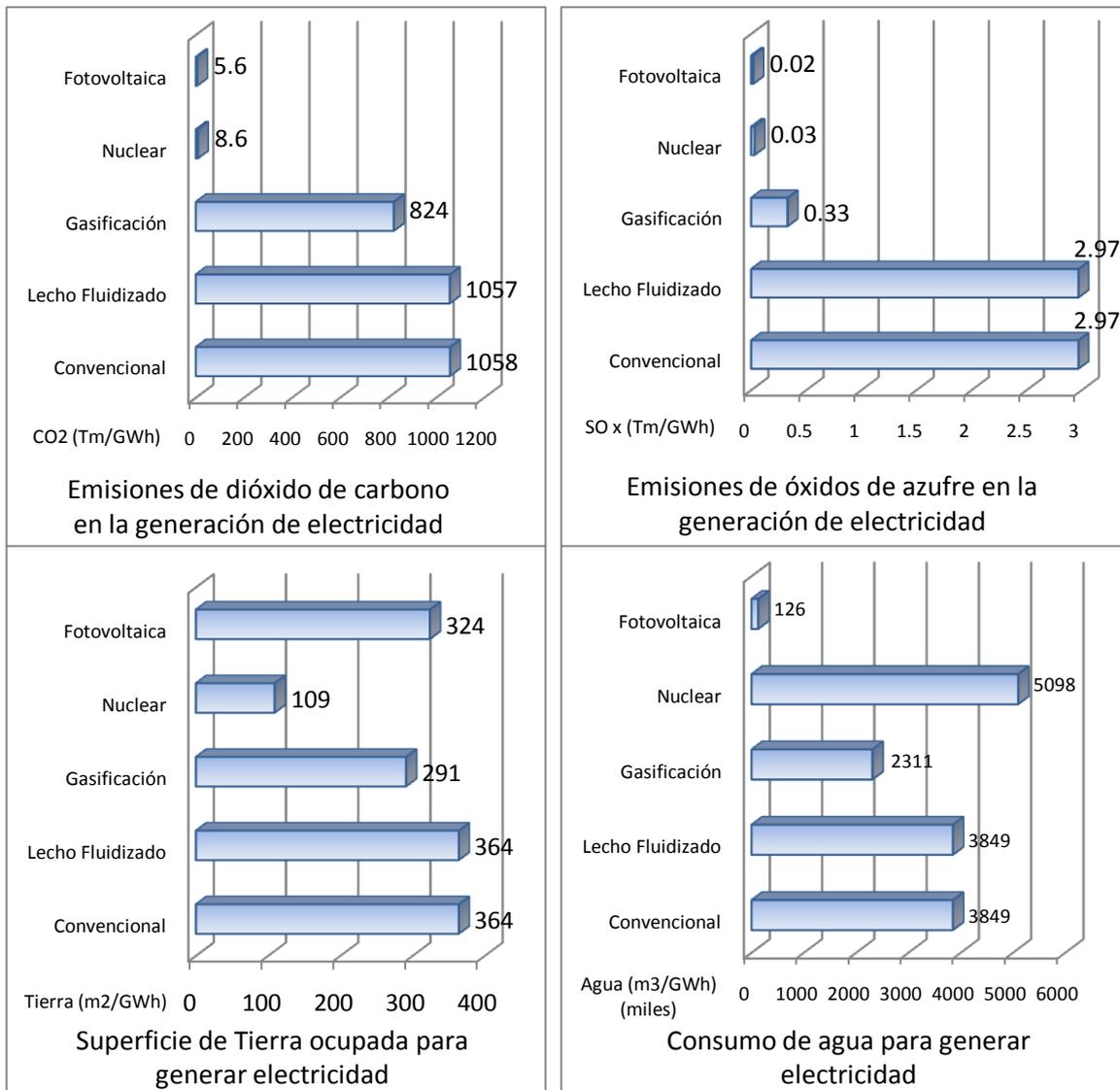


Figura 1.1. Comparación de diferentes tecnologías para la producción de electricidad

- La combustión del carbón está fatalmente ligada al incremento del efecto invernadero. Las tecnologías de ‘combustión limpia’ sólo constituyen una respuesta al problema de la lluvia ácida, pero no al de las emisiones de CO₂.
- El uso masivo de la energía nuclear conlleva una enorme acumulación de residuos radiactivos para cuyo almacenaje futuro en condiciones de absoluta seguridad, no existen soluciones que disfruten de aceptación general. Por otro lado, supondría un gran consumo de agua, que impide su utilización en amplias zonas del planeta.
- La energía solar fotovoltaica es intrínsecamente no contaminante. Además, no requiere agua en su operación y no plantea problemas específicos de ocupación de espacio.

Capítulo 1. Introducción

El mercado global de los sistemas fotovoltaicos ha ido creciendo significativamente en la última década, con un crecimiento promedio anual del 40%. Esto debido a regímenes muy fuertes, en la implementación de leyes y medidas para la reducción de las emisiones de gases creadores de efecto invernadero, de cuatro principales países: Alemania, España, Japón y Estados Unidos, que representan casi el 80% de la capacidad de producción de sistemas fotovoltaicos a nivel global. También es importante mencionar que, como se muestra en la Figura 1.2, otros países como Australia, China, Corea, Francia, Grecia, India, Italia y Portugal están sobresaliendo debido a los nuevos regímenes y a esquemas de apoyo económico [3].

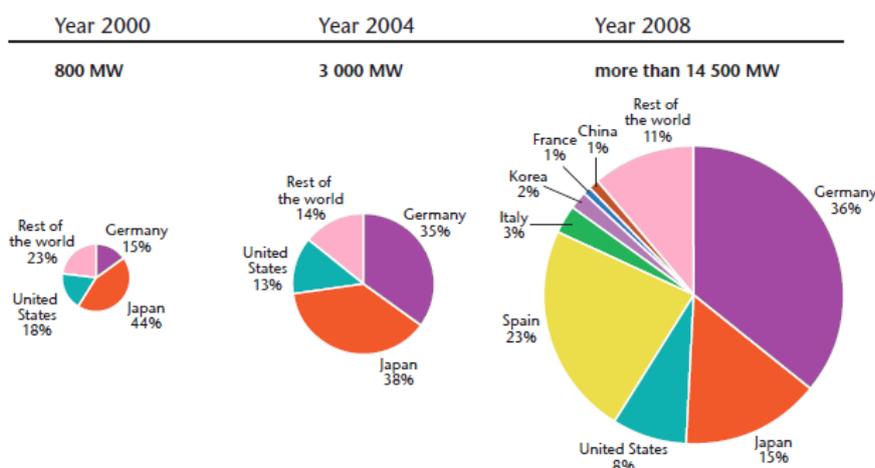


Figura 1.2. Capacidad de producción de sistemas fotovoltaicos a nivel global

La Agencia Internacional de Energía (AIE) es una agencia autónoma establecida en 1974 cuyo principal objetivo es promover la seguridad energética entre sus países miembros a través de una respuesta colectiva a alteraciones físicas en el abastecimiento del petróleo y asesoramiento en cuanto a políticas energéticas. Actualmente, la energía fotovoltaica provee el 0.1% de la generación global de electricidad, sin embargo en la hoja de ruta (*roadmap*) de la AIE de 2010 se prevé que para el año 2030 la energía fotovoltaica suministrará el 5% de la producción global de electricidad, y aumentará hasta un 11% para el año 2050, equivalente a 4500 TWh por año [3].

Además de contribuir a la reducción de la emisión del gas del efecto invernadero, esto proporcionará importantes beneficios en cuanto a la seguridad de abastecimiento y al desarrollo socio-económico. Tomando en cuenta el promedio de las diferentes emisiones de dióxido de carbono debido a la producción de electricidad en diferentes regiones del mundo, se espera que los 4500 TWh generados por la energía fotovoltaica en 2050 ahorren 2.3 Gt de tales emisiones [3].

Pero para lograr esta meta se requiere una política de esfuerzo que sea efectiva, a largo plazo y balanceado por los próximos 10 años para conseguir un progreso

tecnológico óptimo, reducción de costes y aceleración de la producción industrial. Los gobiernos deberán proporcionar metas a largo plazo y políticas de apoyo para fomentar la confianza en inversiones sobre la capacidad de producción y el desarrollo de los sistemas de energía fotovoltaicas. Las cuatro principales áreas de intervención política son:

- La creación de un marco normativo para la expansión del mercado, incluyendo los planes de incentivos a la medida para acelerar la competitividad en el mercado.
- La mejora de los productos y componentes, financiación y entrenamiento de modelos, y educación para fomentar la facilitación y la transformación del mercado.
- El apoyo al desarrollo de la tecnología continua y los esfuerzos sostenidos de I + D para avanzar en las mejoras de costes y eficiencia.
- La mejora de la colaboración internacional para permitir la aceleración del aprendizaje y la transferencia de conocimientos a los países emergentes y en desarrollo.

1.1.4. Descripción del Sistema Fotovoltaico

Los sistemas fotovoltaicos convierten la energía solar directamente en electricidad. La unidad básica de un sistema fotovoltaico es la célula solar, que es un dispositivo semiconductor que convierte la energía solar en corriente eléctrica directa. Las células solares se interconectan para formar un módulo fotovoltaico, típicamente de 50 a 200 vatios. Los módulos fotovoltaicos combinados con componentes adicionales como inversores, baterías, etc. forman un sistema fotovoltaico.

El funcionamiento es bastante sencillo. Cuando la luz solar incide sobre una célula fotoeléctrica se genera un impulso eléctrico en forma de corriente continua. Ésta llegará hasta un dispositivo que funciona como inversor, transformándola en alterna. Luego se convertirá en energía de media tensión, pasando posteriormente a la red eléctrica general. Los principios básicos de fabricación, funcionamiento y estructuras de las células solares se describen en la Sección 2.2.

1.1.5. Tecnologías y Análisis de Eficiencias

La I + D y la industrialización han dado lugar a una gama de opciones de tecnologías fotovoltaicas disponibles en diferentes niveles de madurez. Los módulos fotovoltaicos comerciales se dividen en dos categorías: Obleas de silicio cristalino, y Películas delgadas. También hay un rango de tecnologías emergentes, como los concentradores fotovoltaicos y las células solares orgánicas, cuyos conceptos novedosos tienen un potencial significativo en el aumento del rendimiento y la reducción de costes. Estos temas se desarrollarán en las Secciones

2.3 y 2.4, respectivamente. La Tabla 1.2 muestra un resumen de las tecnologías fotovoltaicas desarrolladas hasta el momento.

Tecnologías Fotovoltáicas	
Silicio cristalino (c-Si)	Representan el 85-90% del mercado global anual, se dividen en dos categorías: mono cristalino (sc-Si) y policristalino (pc-Si)
Películas delgadas	Forman el 10-15% de las ventas globales de módulos fotovoltaicos, se dividen en tres categorías: amorfos (a-Si), Telurio de Cadmio (CdTe) y Diseleniuro de Cobre-Indio-Galio (CIGS)
Tecnologías emergentes	Abarca las películas delgadas avanzadas y las células solares orgánicas.
Concentradores	Utiliza un sistema de concentrador óptico que enfoca la radiación solar en una pequeña celda de alta eficiencia, actualmente, se están haciendo pruebas en aplicaciones piloto.

Tabla 1.2. Resumen de las tecnologías fotovoltaicas

La eficiencia de conversión, que se define como la relación entre la energía eléctrica producida y la cantidad de energía solar incidente por segundo, es uno de los principales indicadores del rendimiento de las células y módulos fotovoltaicos. Se presentarán más detalles sobre la eficiencia de las células solares en la Sección 2.2.4. La Tabla 1.3 muestra las eficiencias actuales de los diferentes módulos fotovoltaicos comerciales.

Tecnologías	Tipos	Eficiencia
Obleas de Silicio Cristalino	sc-Si	14-20%
	pc-Si	13-15%
Películas Delgadas	a-Si	6-9%
	CdTe	9-11%
	CIGS	10-12%

Tabla 1.3. Eficiencias actuales de los diferentes módulos fotovoltaicos comerciales

Desde un punto de vista técnico, los avances tecnológicos de los últimos años han sido excepcionales. Las eficiencias de las células en laboratorios han crecido desde 15.5% en 1974 hasta 24.2% en 1990 para células de silicio al sol. Recientemente, un dispositivo a base de dos materiales y trabajando bajo luz concentrada, ha alcanzado el 35%. En paralelo, las eficiencias de células industriales han crecido desde el 9% hasta el 17.6% [1].

Con el objetivo de conseguir una mayor reducción de costes y mejoras en la eficiencia, la I + D está prevista para el progreso continuo en la mejora de las tecnologías existentes y el desarrollo de nuevas tecnologías. La Tabla 1.4 resume un conjunto de objetivos generales de tecnología para los sistemas fotovoltaicos, expresado en términos de (máxima) eficiencia de conversión, tiempo de

recuperación de la energía invertida, y vida útil operativa. Se espera que la eficiencia de conversión de los módulos fotovoltaicos aumente del 16% en 2010 al 25% en 2030, con la posibilidad de aumentar hasta un 40% en 2050. Al mismo tiempo, el uso de energía y materiales en el proceso de fabricación será mucho más eficiente, acortando considerablemente el tiempo de recuperación de energía invertida en la fabricación de los sistemas fotovoltaicos. Por último, se espera que la vida útil aumente de 25 a 40 años [3].

Objetivos	2008	2020	2030	2050
Eficiencia de los módulos	Más de 16%	Más de 23%	Más de 25%	Más de 40%
Tiempo de recuperación de la energía invertida	2 años	1 año	0.75 años	0.5 años
Vida útil	25 años	30 años	35 años	40 años

Tabla 1.4. Objetivos generales de tecnología

En cuanto a la tecnología basada en obleas de silicio cristalino, el principal reto es la mejora en la eficiencia y eficacia del consumo de recursos, a través de la reducción de materiales, la mejora de los conceptos celulares y la automatización de la producción. Se espera que los módulos de silicio monocristalino comerciales aumenten su eficiencia de conversión hasta el 23% para el 2020 y hasta un 25% a largo plazo. Los módulos de silicio policristalino tienen una estructura atómica desordenada, lo que se traduce en bajas eficiencias de conversión, pero se espera que aumenten hasta un 21% a largo plazo [3].

1.1.6. Estudio de Características Eléctricas

Para llevar a cabo un estudio de la eficiencia de las células solares de silicio es necesario realizar el análisis de las características eléctricas de estos dispositivos semiconductores. El primer paso es obtener la característica corriente-tensión del dispositivo, para tener una idea del funcionamiento del mismo. Muchas de las magnitudes que intervienen en los mecanismos fundamentales de limitación de la eficiencia de las células solares dependen de la temperatura [4].

En este sentido, se emplean técnicas específicas de caracterización eléctrica tomando en cuenta tres variables principales, que son: la temperatura, la tensión de polarización y la frecuencia, para determinar la presencia de defectos en los semiconductores y analizar la eficiencia de las células solares. En el laboratorio de Caracterización de Materiales y Dispositivos Electrónicos de la Universidad de Valladolid, en el cual se ha llevado a cabo este Trabajo de Fin de Máster, las técnicas que se utilizan para este fin son la espectroscopía térmica de la admitancia y el análisis de los transitorios capacidad-tensión, los cuales se describen en el Capítulo 3.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es el de utilizar técnicas específicas de caracterización eléctrica: la espectroscopía térmica de la admitancia y el análisis de los transitorios capacidad-tensión, para detectar la presencia de defectos en el sustrato de células solares e investigar la relación entre estos defectos y las pérdidas de eficiencia.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudio de los principios básicos de las células solares, sobretodo sus principios de funcionamiento y los factores que limitan el rendimiento de los mismos.
- Análisis de los fundamentos teóricos de las técnicas de espectroscopía térmica de admitancia y transitorios de capacidad-tensión para la determinación de los defectos que limitan el rendimiento de las células solares.
- Montaje de equipos necesarios en el Laboratorio de Caracterización para la aplicación de las técnicas antes mencionadas, en muestras de doble unión de sustrato de silicio policristalino tipo p.
- Generación de gráficos descriptivos de los datos obtenidos para su adecuado análisis.

1.3. Metodología

A través de la caracterización eléctrica de las células solares fotovoltaicas se puede conocer su eficiencia en la conversión de la energía solar a energía eléctrica. Sin embargo, antes de proceder con las técnicas de caracterización propiamente dichas, es necesario hacer un estudio de los principios básicos de funcionamiento de estos dispositivos. A partir de entonces, se podrá describir adecuadamente las dos técnicas de caracterización eléctrica propuestas para detectar la presencia de defectos en los dispositivos semiconductores, que son la razón de las pérdidas en la eficiencia de las mismas.

Luego, se realizará el montaje de los equipos necesarios en el Laboratorio de Caracterización, para aplicar las técnicas de espectroscopía térmica de admitancia y análisis de transitorios capacidad-tensión en muestras de doble unión de sustrato de silicio policristalino tipo p, en donde se controlarán las variables de: temperatura, tensión de polarización, tiempos de emisión y frecuencia, y por último, con los datos obtenidos se harán diversas representaciones gráficas, para su posterior análisis.

Capítulo 2

2. Células Solares

La energía solar fotovoltaica consiste en la conversión directa de la luz solar en energía eléctrica mediante un dispositivo electrónico denominado célula solar. Como se ha mencionado en el capítulo anterior, la célula solar es la unidad básica de un sistema fotovoltaico, cuyo funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico: propiedad que tienen determinados materiales de producir una corriente eléctrica cuando incide una radiación lumínica sobre ellos [5].

Es por ello que se dedica este capítulo para dar una descripción detallada de la historia, principios físicos de funcionamiento, estructuras, eficiencia, tecnologías y materiales utilizados para la fabricación de estos dispositivos (basados en semiconductores), para posteriormente, en el capítulo siguiente poder describir las técnicas utilizadas para la detección de defectos en las células solares y su relación con su eficiencia.



Figura 2.1. Célula solar fotovoltaica y panel fotovoltaico

2.1. Historia

Los principales hitos en la evolución de la generación de energía eléctrica a partir de la energía lumínica solar (generación fotovoltaica) se presentan a continuación:

- 1839: se descubre el efecto fotovoltaico por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel.

- 1883: se construye la primera célula solar por Charles Fritts, quien utilizó una cubierta extremadamente fina de oro sobre una muestra de selenio semiconductor para formar la unión, consiguiendo una eficiencia de 1%.
- 1946: Russel Ohl patenta la célula solar moderna.
- 1954: inicia la era moderna de la tecnología de las células solares. Experimentando con semiconductores, los Laboratorios Bell descubren accidentalmente que el silicio dopado con ciertas impurezas era muy sensible a la luz.

2.2. Principios Básicos

Los principios básicos de las células solares se detallan a continuación, en los cuales se describe su proceso de fabricación, sus principios de funcionamiento, sus estructuras más comunes y los fenómenos que condicionan su eficiencia.

2.2.1. Proceso de Fabricación

El proceso de fabricación de las células solares de silicio los podemos dividir en tres grandes etapas:

- a) *Obtención del silicio de alta pureza*: éste se obtiene a partir del óxido de silicio, básicamente cuarzo, cuya abundancia en la naturaleza elimina problemas de abastecimiento.
- b) *Obtención de obleas*: utilizando como materia prima polvo de silicio de alta pureza se hace crecer el monocristal hasta obtener una pieza cilíndrica de diámetro variable entre 2 y 20 cm y longitud de alrededor de 1 m. El crecimiento del monocristal sirve para purificar el material y para la creación de una estructura perfecta, gracias a la cual la futura oblea gozará de propiedades semiconductoras. La barra de silicio se corta mediante sierras especiales produciendo obleas de espesor aproximado de 300 μm .
- c) *Procesamiento de la oblea*: para obtener finalmente la célula solar, la oblea sufre un procesamiento que consiste en los siguientes pasos:
 - Lapeado y pulido,
 - Formación de la unión PN,
 - Decapado y limpieza,
 - Capa antirreflectante,
 - Fotolitografía para formación de contactos,
 - Formación de contactos o electrodos,
 - Material para soldadura de electrodos,
 - Limpieza del decapante y comprobación de las características de la celda.



Figura 2.2. Proceso de fabricación de las células solares

2.2.2. Principios de Funcionamiento

Como se puede observar en la Figura 2.3, una célula solar es básicamente una unión PN semiconductor, en donde una de las regiones aparecerá sobre la otra siendo la que reciba la luz.

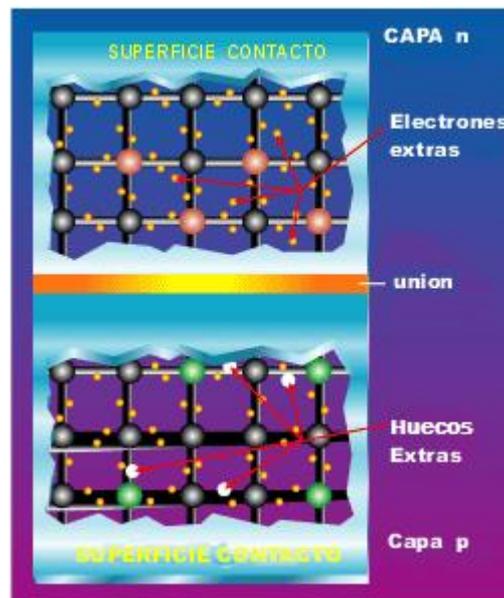


Figura 2.3. Estructura de una célula solar fotovoltaica

En torno a la unión se forma la denominada zona de carga espacial o zona de vaciamiento, en donde la ausencia de portadores libres da lugar a la aparición de una carga neta debida a los átomos dopantes ionizados. La carga neta a cada lado es opuesta, por lo que la carga de un lado se compensa con la carga del otro lado, estableciéndose una situación de equilibrio y generando un potencial de contacto (ψ_0) y, por consiguiente, un campo eléctrico, que permite el flujo de corriente en una sola dirección. Dicho de otra manera, es en la región de la zona de carga espacial donde se forman los pares electrón-hueco [6][7].

Al incidir la luz sobre la unión, una parte de la luz se refleja (energía perdida) y la otra penetra en el semiconductor. Los fotones que ingresan con energía suficiente liberan cada uno un par electrón-hueco. Los portadores de carga liberados se propagan bajo la influencia del campo eléctrico. La Figura 2.4 muestra el flujo de electrones y corriente en una célula solar. Los electrones pueden recombinarse durante su recorrido, pero si un portador minoritario (electrón en la zona P, hueco en la zona N) alcanza la capa límite de la barrera de potencial, queda atraído por el campo eléctrico de esa capa y penetra en la región en que son mayoritarios los portadores de igual signo. Por otro lado, el campo de la capa límite retiene los portadores mayoritarios en la región en que han sido liberados.

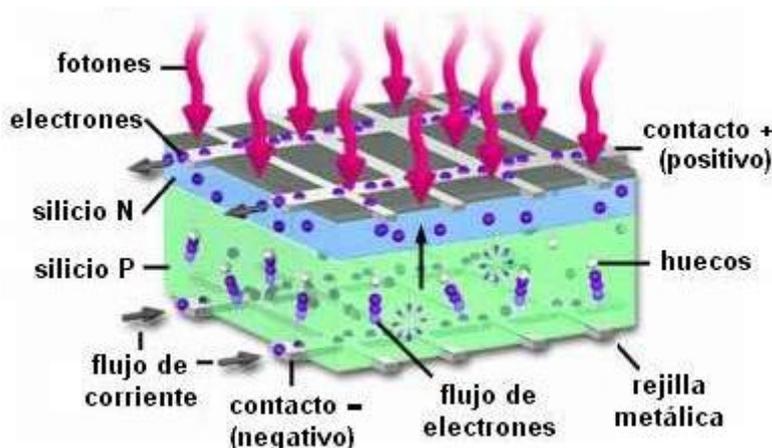


Figura 2.4. Flujo de electrones y corriente en una célula solar

De este modo, cualquiera que sea la región en que queda absorbido el fotón y liberados los portadores de carga, el efecto fotovoltaico produce un desplazamiento de portadores que da lugar a una diferencia de potencial aprovechable de alrededor de 0.5 V entre los electrodos a circuito abierto. La barrera de potencial impide que el proceso se revierta, aunque puede existir una pequeña corriente de fuga. En circuito cerrado la corriente pasa por la carga del borne P al N, por el exterior de la célula.

La Figura 2.5 muestra una unión PN en equilibrio térmico sin polarización aplicada, en donde las líneas azules y rojas representan la concentración de los electrones y huecos, respectivamente. Las regiones grises son zonas de carga neutral. La zona de carga espacial es la que está en torno a la unión, formada por la zona cargada positivamente (rosa) y la zona cargada negativamente (celeste). Debajo del gráfico se muestra la dirección del campo eléctrico, así como la fuerza electrostática sobre los electrones y los huecos, y la dirección en que la difusión tiende a mover los electrones y huecos.

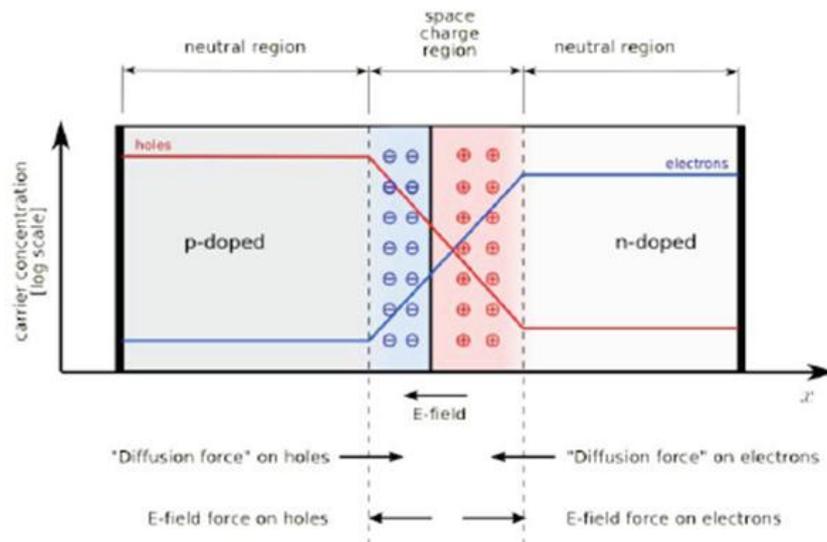


Figura 2.5 Descripción eléctrica de una unión PN

El esquema equivalente de una célula solar es un diodo que tiene en paralelo una resistencia R_p que representa la fuga de corriente en la unión y una fuente de corriente I_{ph} que modela la corriente que proporciona el dispositivo a raíz de la absorción de radiación luminosa. Además, en serie tiene una resistencia R_s que representa las pérdidas internas de la celda, como se ilustra en la Figura 2.6.

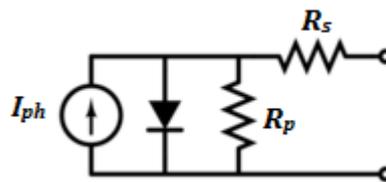


Figura 2.6. Esquema eléctrico equivalente de una célula solar

De acuerdo a este modelo, la ecuación que describe las características I-V es

$$I_c = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_c - R_s I_c)}{nkT}\right) \right] + \frac{V_c - R_s I_c}{R_p} - I_{ph}$$

donde k es la constante de Boltzman, T es la temperatura absoluta, n es la constante de no idealidad del diodo, I_0 la corriente de saturación inversa, V_c la polarización externa de la célula solar e I_c la corriente proporcionada.

Desde el punto de vista eléctrico, las celdas fotovoltaicas pueden compararse con los diodos de silicio normales [7], con ciertas características distintivas cuando éstas están bajo iluminación, como se muestra en el gráfico de la Figura 2.7.

Así la curva tensión-corriente trazada en la oscuridad O resulta igual a la de un diodo ordinario, mientras que la curva correspondiente a la incidencia sobre la celda de una determinada iluminación E , resulta de la traslación de la curva anterior, proporcional a la energía luminosa recibida.

Analizando la curva E se ve que en el primer cuadrante, correspondiente al diodo con polarización directa, la característica no parte del origen, pues a corriente nula la tensión en bornes no es cero (V_{co}).

En el tercer cuadrante, la curva O indica la corriente inversa de fuga en la oscuridad en función de la tensión inversa, mientras que la curva E da la variación de esa corriente con la iluminación. Aquí la celda funciona como fotodiodo.

Finalmente, en el cuarto cuadrante, la celda funciona como generador de energía, siendo la región de trabajo normal de las celdas fotovoltaicas. Aquí la tensión de polarización es positiva y la corriente que atraviesa el dispositivo es negativa, generando una potencia negativa, lo que indica que el dispositivo la está proporcionando y no consumiendo. En estas condiciones, la potencia que entrega pasa por un máximo (P_M) para determinados valores de tensión (V_M) y corriente (I_M), fijados en función de la resistencia óptima de carga ($R_M = V_M/I_M$).

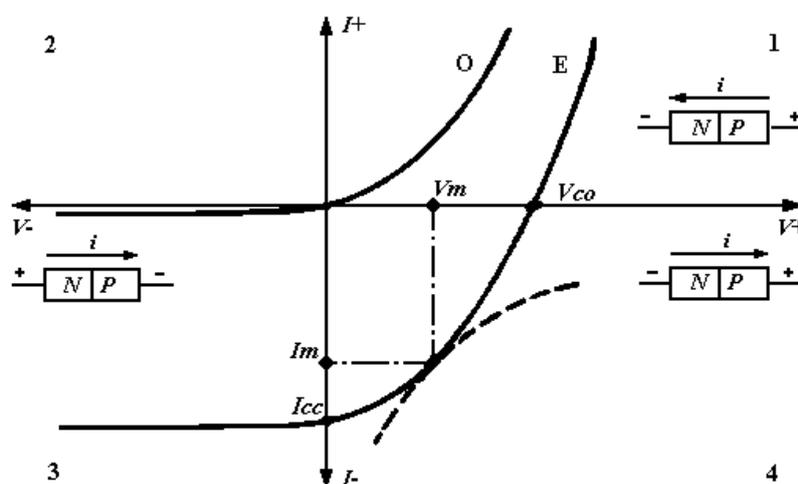


Figura 2.7. Característica I-V de una célula solar bajo iluminación (E) y en la oscuridad (O)

2.2.3. Estructuras de Células Solares

A la hora de fabricar células solares semiconductoras de unión PN, se distinguen tres estructuras diferentes:

- *Dispositivos de homounión:* son las que hemos estado presentando hasta ahora, un solo material alterado de tal manera que un lado presenta dopado tipo p y el otro un dopado tipo n.
- *Dispositivos de heterounión:* la unión se forma con dos semiconductores diferentes. La capa inferior deberá tener una banda de Gap menor, con el cual podrá absorber la radiación luminosa, y en la capa superior el semiconductor deberá tener una banda de Gap mayor para que sea transparente a la luz y pueda llegar a la zona de carga espacial.

- *Dispositivos p-i-n y n-i-p*: presenta tres capas, una capa de semiconductor intrínseco entre la capa de tipo p y la de tipo n. Esto incrementa el tamaño de la zona de carga espacial y por lo tanto la región de absorción de fotones.

2.2.4. Eficiencia

La *eficiencia* de conversión energética (η) de una célula solar es uno de los parámetros más importantes indicativos de la calidad de la misma. Se define como el porcentaje de la relación entre la potencia eléctrica que puede entregar la célula y la potencia P_L de la radiación que incide sobre ella:

$$\eta = \frac{P_M}{P_L} = \frac{I_M V_M}{P_L}$$

Las células solares de silicio actualmente comerciales tienen una eficiencia de sólo un 20%, esto es debido a una serie de pérdidas que se registran durante el proceso de absorción de fotones de la radiación lumínica. Los mecanismos de pérdidas se ilustran en la Figura 2.8, en donde se describen las pérdidas debido a la sobreexcitación de portadores (1), a las barreras de la unión (2) y de los contactos (3), y debido a la recombinación de los pares electrón-hueco (4).

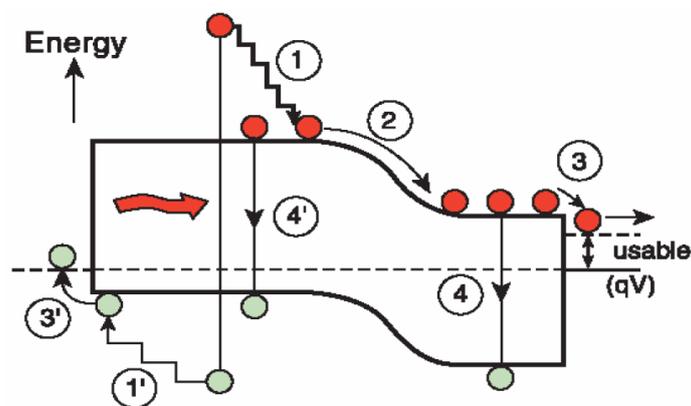


Figura 2.8. Mecanismos de pérdidas en una célula solar

El aprovechamiento del espectro solar es otra de las razones por la cual la eficiencia en las células solares es baja, como se muestra en la Figura 2.9, existe una región del espectro que no tiene suficiente energía para liberar los pares electrón-hueco en el dispositivo, y por lo tanto es energía no convertible. De igual manera, existe una región del espectro que tiene tanta energía que produce una sobreexcitación de los portadores, como se ha mencionado anteriormente, cuya energía se pierde en forma de vibraciones en la red.

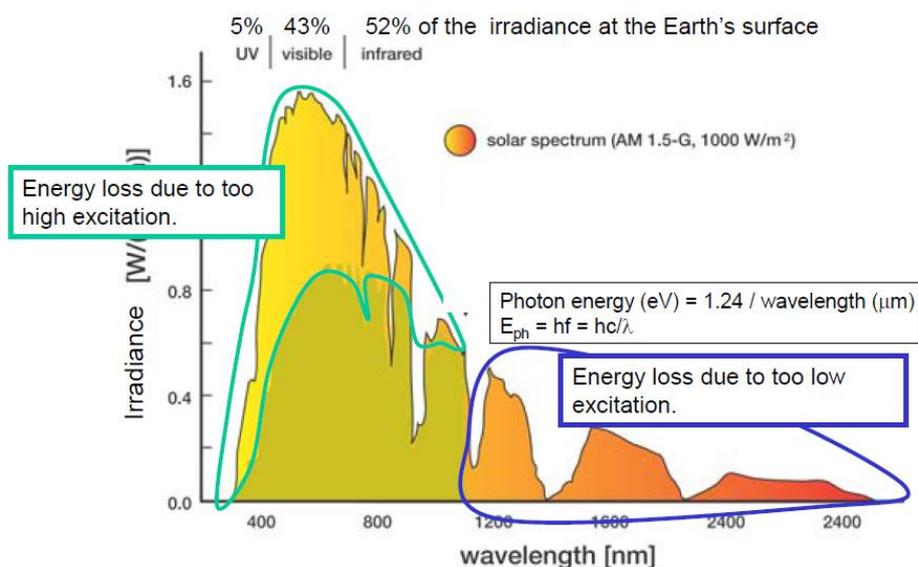


Figura 2.9. Irradiancia por unidad de longitud de onda sobre la Tierra

Las pérdidas descritas en los dos párrafos anteriores dependen del semiconductor y de la estructura utilizada en la fabricación de la célula. Así, la mejora en la eficiencia de las células solares se centra en el aumento del espectro solar aprovechable y en la reducción de la recombinación de los pares electrón-hueco durante el proceso fotovoltaico.

2.3. Generaciones de Células Solares

La evolución de las células solares fotovoltaicas se divide en cuatro generaciones, que hacen referencia tanto a su orden de aparición como a la importancia y relevancia que han tenido históricamente. A día de hoy se realizan investigaciones sobre las cuatro generaciones, aunque las tecnologías de la primera generación acaparan la mayor parte de la producción comercial, alcanzando casi un 90% de la producción.

2.3.1. Primera Generación

Estas células son las que están basadas en un diodo de unión PN de silicio cristalino, que puede ser tanto monocristalino como policristalino. Como están fabricadas de silicio, su banda prohibida o *gap* es de aproximadamente 1.11 eV por lo que su principal ventaja se presenta en su gran ancho espectral de absorción de radiación luminosa y su alta movilidad de los portadores de carga, mientras que su principal desventaja es que su producción requiere una tecnología de fabricación muy cara.

Esta generación de células es la que presenta una mayor eficiencia, cerca de unos 20 a 25%, de ahí que sea la más extendida. Sin embargo, su alto coste hace que sea necesaria la búsqueda de nuevas alternativas.

2.3.2. Segunda Generación

Las células solares de la segunda generación están basadas en la tecnología de Películas Delgadas, consistente en la deposición de una fina capa de semiconductor sobre un sustrato, generalmente de vidrio. El uso de esta tecnología reduce el material requerido para su fabricación, con lo que contribuye a una importante reducción en los costes de producción. La deposición de estas películas delgadas de silicio no-cristalino se realiza mediante la técnica de PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition – Deposición Química en fase de Vapor Estimulada por Plasma).

En función del tipo de película delgada y de sustrato utilizados, las células solares de segunda generación se clasifican en:

- *Células de silicio amorfo depositado sobre cinta de acero inoxidable:* mediante la técnica de PECVD se pueden realizar depósitos de películas finas sobre grandes áreas y puede llevarse a cabo el dopado de manera similar al de las células de silicio cristalino para la construcción de la unión PN. La anchura de su *gap* es de aproximadamente 1.7 eV.
- *Silicio policristalino:* se depositan películas delgadas de silicio policristalino en lugar de silicio amorfo, con lo cual se incrementa en varios órdenes de magnitud la movilidad de los portadores y la anchura de su *gap* se reduce a 1.1 eV.
- *Células de telururo de cadmio (CdTe) depositado sobre vidrio:* utiliza el compuesto formado por cadmio y telurio (que cristaliza en la estructura zinc blenda), usualmente emparedado entre sulfuro de cadmio (CdS) para formar la unión PN. Pese a tener una menor eficiencia, el interés por su uso reside en que es mucho más barato que el silicio. Su *gap* es de unos 1.58 eV.
- *Células de aleación de diseleniuro de cobre, indio y galio (CIGS, por sus siglas en inglés):* se deposita esta aleación sobre un sustrato de vidrio o de acero inoxidable. En esta tecnología son comunes las estructuras más complejas de heterounión. El *gap* es en torno a 1.38 eV.

Como se ha mencionado anteriormente, la reducción de los costes de fabricación de las células de esta segunda generación es su mayor ventaja, además requiere menos mantenimiento. Por otro lado, estas células son menos eficientes, más tóxicas, y para el caso partículas de las células basadas en silicio amorfo, no es estable.

2.3.3. Tercera Generación

Las células solares de la tercera generación ya no basan su tecnología en semiconductores y estructuras de unión tipo PN, sino que se emplean otro tipo de materiales fotovoltaicos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo 2. Células Solares

- *Células de nanocristales*: células solares basadas en sustratos de silicio revestidos de nanocristales. Proporcionan mayores corrientes.
- *Células fotoelectroquímicas*: consisten en un fotoánodo semiconductor y un cátodo metálico inmersos en un electrolito, como se muestra en la Figura 2.10, las funciones de generación y separación de carga están asignadas a diferentes elementos de la estructura, contrario a las células de la primera generación, en donde la zona de carga espacial de la unión PN era la encargada de ambas.

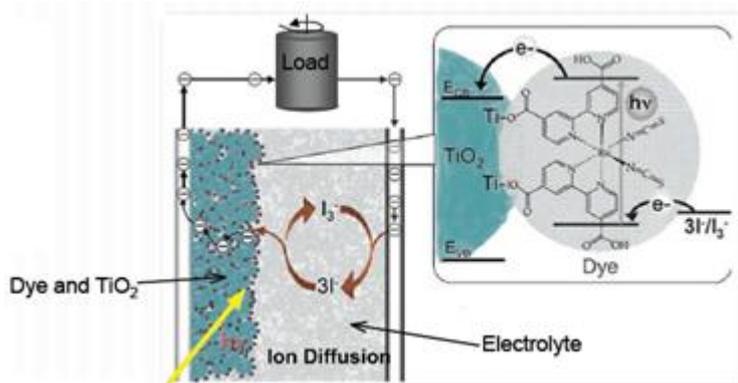


Figura 2.10. Estructura de una célula solar fotoelectroquímica

- *Células de polímeros*: basadas en heterouniones entre un polímero orgánico y una molécula orgánica como aceptor de electrones. La Figura 2.11 muestra la estructura de una célula solar basada en polímeros. Estas estructuras son ligeras, baratas, desechables y flexibles, además, tienen un bajo impacto negativo en el medio ambiente. Sin embargo su eficiencia es muy baja y la anchura del *gap* es superior a 2 eV.

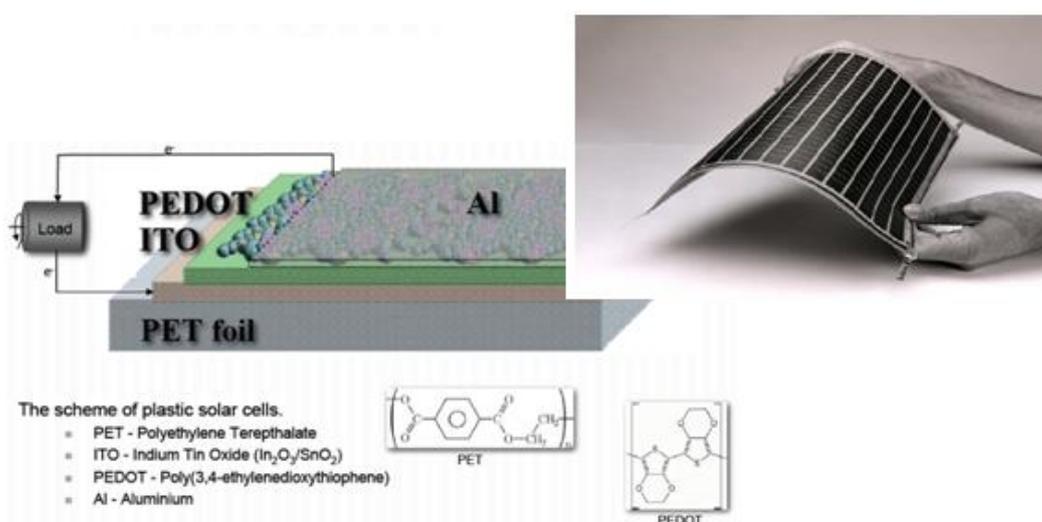


Figura 2.11. Estructura de una célula solar basada en polímeros

- *Células de tinte sensibilizado (DSSC)*: son similares a las células fotoelectroquímicas con la excepción de que se ha sustituido el electrolito por un polímero conductor, la Figura 2.12 muestra la estructura básica de estas células.

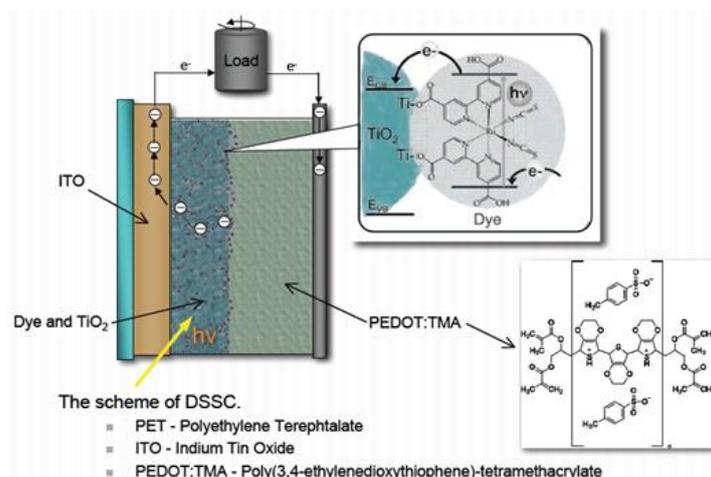


Figura 2.12. Estructura de las células solares basadas en tinte sensibilizado

La principal ventaja de este grupo de células solares es su tecnología de procesamiento de bajo consumo y alto rendimiento. Sin embargo, la eficiencia es mucho menor comparada con la tecnología basada en silicio, las células basadas en polímeros tienen una banda de Gap mayor y las células fotoelectroquímicas sufren de degradación de los electrodos del electrolito.

2.3.4. Cuarta Generación

Las células solares de la cuarta generación se centran en la tecnología híbrida de nanocristales y polímeros. Esta tecnología usa polímeros y nanopartículas mezcladas para crear una capa simple de multi-espectro, proporcionando un transporte de carga más efectivo. Al igual que las células solares de la tercera generación, presentan un bajo coste de producción, pero con eficiencias mucho menores. La Figura 2.13 muestra la estructura básica del híbrido entre nanocristales y polímeros.

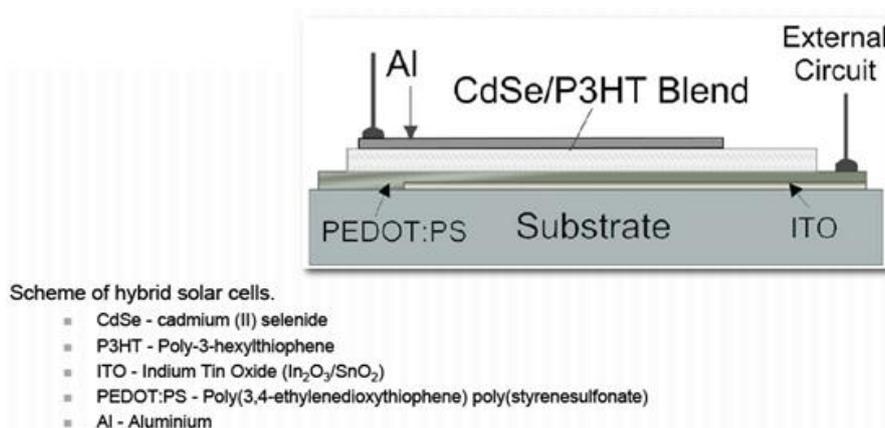


Figura 2.13. Estructura de las células solares de cuarta generación

2.4. Mejoras Tecnológicas

A continuación se presentan dos mejoras tecnológicas de las células solares de primera generación con los cuales se han obtenido incrementos en la eficiencia de hasta un 40%.

- *Dispositivos multiunión*: consisten en apilar células de unión simple con bandas de Gap diferentes (usando diferentes semiconductores), en orden descendiente para conseguir un mayor aprovechamiento del espectro solar, como se muestra en la Figura 2.14.

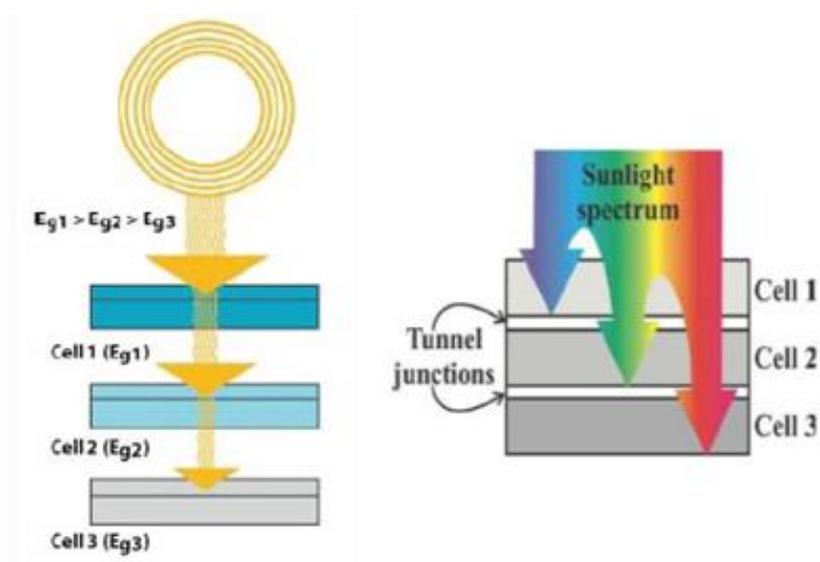


Figura 2.14. Principio de funcionamiento de las células multiunión

Existen fundamentalmente dos tipos de células multiunión:

- *Mecánicas*: las células de unión simple se fabrican individualmente y luego se apilan mecánicamente unas sobre otras.
 - *Monolíticas*: se fabrica la célula solar completa de una vez, en donde las diferentes uniones se crean mediante el depósito o crecimiento de capas sucesivas.
- *Concentradores fotovoltaicos*: consiste en la utilización de espejos y/o lentes de mayor superficie que concentran toda la luz que les llega sobre la superficie de las células solares de menor superficie. Esta técnica permite un incremento en la eficiencia de hasta 35%. La Figura 2.15 muestra un ejemplo de un concentrador fotovoltaico instalado.



Figura 2.15. Concentradores fotovoltaicos

A modo de resumen, se presenta en la Figura 2.16, la gráfica de las eficiencias a lo largo de los años de las diferentes generaciones de células solares, con sus principales tecnologías, junto con las obtenidas con las mejoras tecnológicas presentadas.

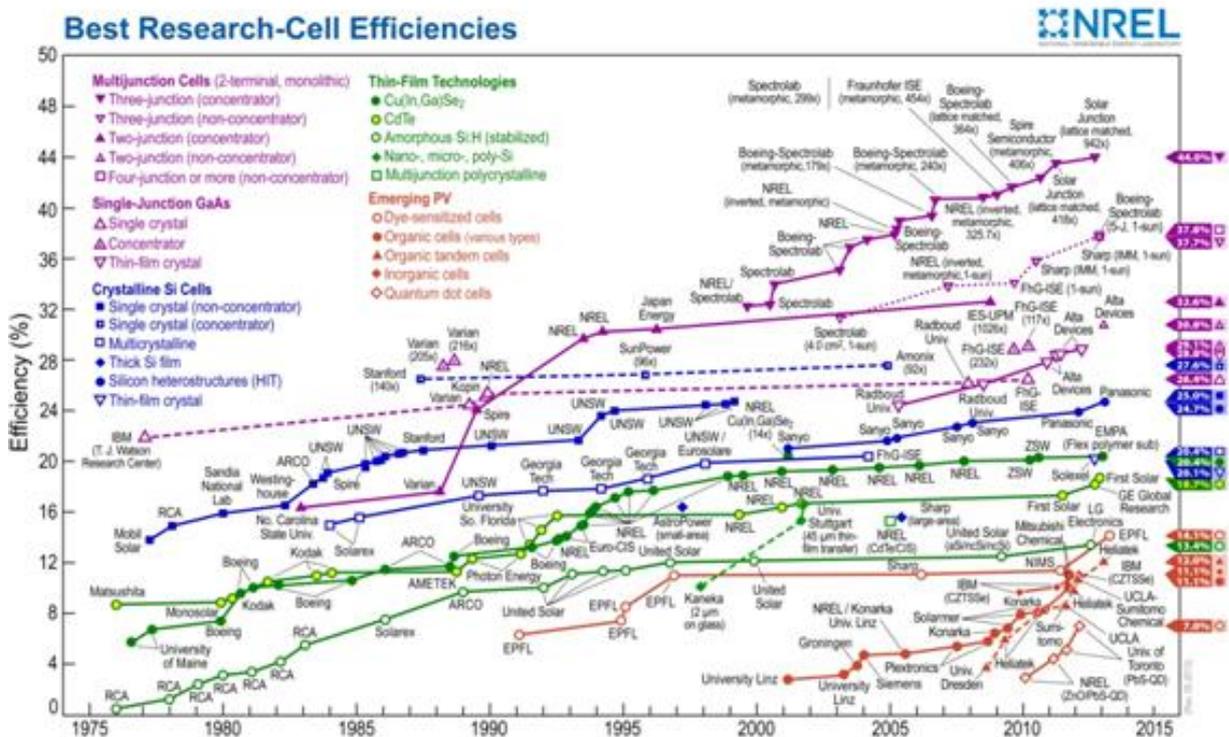


Figura 2.16. Cronología de las eficiencias de conversión logradas en células solares fotovoltaicas (fuente: National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos)

Capítulo 3

3. Técnicas de Caracterización Eléctrica de Sustratos de Células Solares

Las técnicas de caracterización eléctrica de sustratos de células solares que se describen a continuación son: la espectroscopía térmica de admitancia y el análisis de transitorios capacidad-tensión, de los cuales a partir de su fundamento teórico se detallan los valores que se pueden obtener a través de ellas y que son útiles para caracterizar los sustratos.

3.1. Espectroscopía Térmica de Admitancia

3.1.1. Fundamento Teórico

La Espectroscopía Térmica de Admitancia es una técnica que permite obtener los valores de las constantes de emisión térmica (e_n^t) y energías de activación de los defectos de los centros profundos de los semiconductores a partir de las variaciones de la capacidad y la conductancia de la unión en función de la temperatura y la frecuencia [8]. Estas variaciones son debidas al cambio en la frecuencia de la señal medida con respecto a la constante de tiempo del proceso de carga y descarga de los defectos de los centros profundos alrededor del punto de la región de carga espacial donde ambas constantes de tiempo son iguales; en donde bajo condiciones de oscuridad, este punto coincide con el punto de intersección del nivel de Fermi con el nivel del defecto [7].

Esta técnica consiste en la medida de la capacidad y la conductancia, en función de la temperatura, de una unión (PN o Schottky), en oscuridad, con una polarización inversa y al cual se le aplica una señal sinusoidal con frecuencia ω constante.

A altas temperaturas la constante de emisión térmica tiene un valor que es mucho mayor que la frecuencia ($e_n^t \gg \omega$), y los defectos de los centros profundos responden instantáneamente a las variaciones de tensión. Esto es lo que sucede a bajas frecuencias: no hay pérdidas de energía y la carga modulada es máxima, por lo tanto, a altas temperaturas la conductancia es nula y la capacidad toma el valor de la Capacidad a Bajas Frecuencias (C_{bf}).

Capítulo 3. Técnicas de Caracterización Eléctrica de Sustratos de Células Solares

A medida que la temperatura disminuye la constante de emisión térmica en el centro profundo disminuye hasta el punto de no ser capaz de seguir las variaciones de tensión y no puede responder inmediatamente. Como consecuencia, se producen pérdidas de energía y el total de carga modulada disminuye, por lo tanto, la conductancia es no nula y la capacidad es menor que la capacidad en frecuencias bajas.

Finalmente, para bajas temperaturas, la constante de emisión térmica es tan baja que no son capaces en absoluto de seguir las variaciones de tensión alcanzando la modulación de la carga su valor mínimo, debido sólo a los electrones libres en el borde de la zona de carga espacial, y por lo tanto, la capacidad su valor en altas frecuencias (C_{af}). En cuanto a la conductancia, ocurre que el descenso de temperatura supone una reducción de los portadores libres disponibles para la carga y descarga de los defectos, reduciéndose así la conductancia nuevamente a cero.

La Figura 3.1 muestra el comportamiento de ambas magnitudes. En resumen, $G(T)$ se reduce a cero para temperaturas bajas y altas y alcanza un valor máximo en la temperatura para la cual la constante de emisión térmica es igual a la frecuencia. Y $C(T)$ va de un valor máximo para altas temperaturas a un valor mínimo para bajas temperaturas y presenta un punto de inflexión en la temperatura para la cual el valor de la constante de emisión térmica es igual a la frecuencia de la señal.

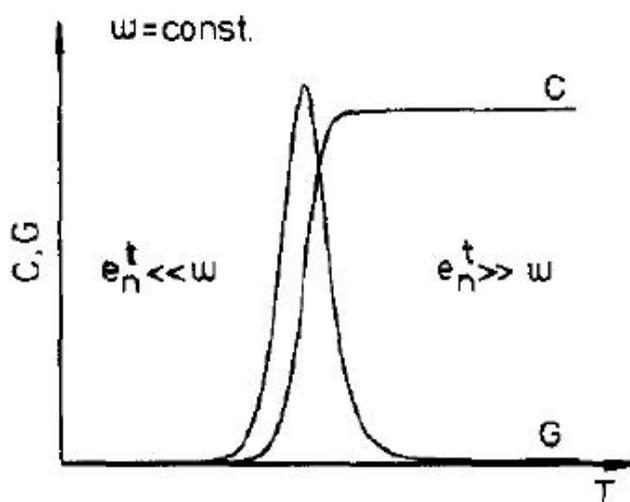


Figura 3.1. Características C-T y G-T a una frecuencia constante

Tomando en cuenta que para cualquier temperatura en la región neutral se verifica que la constante de emisión térmica es mucho menor que el proceso de captura de electrones, y que alrededor del máximo o punto de inflexión la frecuencia es aproximada a la constante de emisión, se puede expresar la capacidad y la conductancia de las uniones como:

$$C = C_{af} + (C_{bf} - C_{af}) \frac{e_n^t}{\omega} \arctan \frac{\omega}{e_n^t}$$

$$G = \frac{(C_{bf} - C_{af})}{2} e_n^t \ln \left(1 + \frac{\omega^2}{e_n^t{}^2} \right)$$

Derivando la expresión de la conductancia e igualando a cero se obtiene la posición del máximo. El máximo de $G(T)$ se da para una temperatura T en la que la constante de emisión térmica vale:

$$e_n^t = \frac{\omega}{1.980}$$

Al realizar medidas experimentales G-T para diferentes frecuencias se obtiene la posición del máximo de la conductancia para cada frecuencia, y por lo tanto pares de puntos (e_n^t, T) , con los cuales se puede conseguir la energía de activación del centro profundo. Como el coeficiente de emisión evoluciona con la temperatura según una Ley de Arrhenius:

$$e_n^t(T) = AT^2 \exp \left(\frac{-\Delta E_T}{kT} \right)$$

La representación gráfica de $\ln(e_n^t / T^2)$ en función de $1/T$ es lineal y la pendiente proporciona la energía de activación, ΔE_T del centro profundo.

En resumen, la espectroscopía térmica de admitancia es una técnica que proporciona las constantes de emisión térmica de los defectos de los centros profundos, así como la energía de activación térmica de la misma.

3.1.2. Montaje y Equipos Utilizados

El montaje experimental utilizado para realizar las mediciones de esta técnica se muestra en la Figura 3.2. El cometido de cada equipo, que se muestran en la Figura 3.3, es el siguiente:

- (1) PC: donde está el programa de control (desarrollado en LabView) que gobierna el comportamiento de cada uno de los equipos.
- (2) Controlador de Temperatura *Oxford Instruments ITC503*: monitoriza la temperatura a la que se encuentra la muestra dentro del criostato.
- (3) Criostato *Oxford Instruments DN 1710*: aísla la muestra del ambiente del laboratorio para conseguir mantenerla entre la temperatura del nitrógeno líquido y la temperatura ambiente.

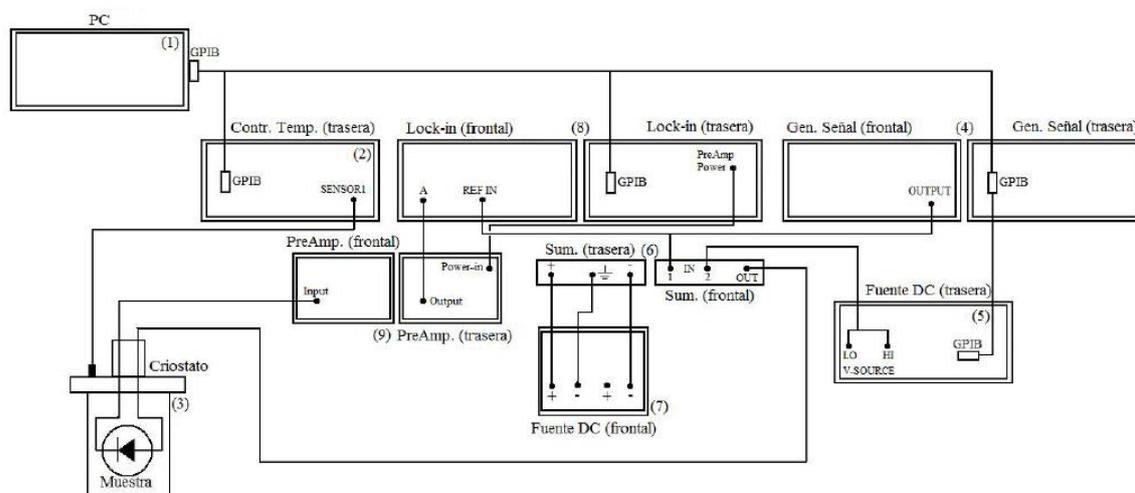


Figura 3.2. Montaje Experimental de la Espectroscopía Térmica de Admitancia



Figura 3.3. Equipos utilizados en la Espectroscopía Térmica de Admitancia:
 (a)Criostato, (b)Controlador de Temperatura, (c)Generador de Señales,
 (d)Preamplificador, (e)Lock-in, (f)Fuente DC Promax, (g)Fuente DC Keithley

Capítulo 3. Técnicas de Caracterización Eléctrica de Sustratos de Células Solares

(4) Generador de Señales *HP 33120A*: aplica la señal sinusoidal a una cierta frecuencia que nos permite medir la Capacidad y la Conductancia y que sirve de referencia al Lock-in.

(5) Fuente DC *Keithley 617*: polariza en inversa la muestra a la tensión deseada.

(6) Sumador de tensiones: suma la señal sinusoidal y la DC para aplicarlas conjuntamente a la muestra.

(7) Fuente DC *Promax FAC-662B*: alimenta el sumador de tensiones.

(8) Lock-in *EG&G PARC 5210*: mide la Capacidad y la Conductancia.

(9) Preamplificador *EG&G PARC MODEL 181*: convierte la corriente a la salida de la muestra en tensión para la entrada del Lock-in con una cierta ganancia K .

3.2. Técnica de Transitorios Capacidad – Tensión CVTT

3.2.1. Fundamento Teórico

La Técnica de Transitorios de Capacidad-Tensión nos permite obtener los parámetros característicos de los centros profundos: la concentración, el coeficiente de emisión térmica y la energía de emisión de los centros profundos presentes en una unión PN o Schottky.

Esta técnica consiste básicamente en la obtención de los valores instantáneos de C-V para diferentes pulsos de emisión aplicados a la unión. Para ello se registran, en oscuridad, los transitorios debidos a la variación de carga ionizada en cada punto de la zona de carga espacial de una unión PN o Schottky [9][10].

La Figura 3.4 muestra el procedimiento de medida de esta técnica. A una temperatura dada se aplican sucesivos pulsos de tensión a la muestra, lo que provoca que los centros profundos capturen y emitan electrones.

Estos pulsos tienen forma de rampa porque tras la emisión la tensión vuelve al valor de llenado y debe seguir una rampa lo suficientemente rápida como para que sea instantánea para los procesos de emisión, considerando que no hay emisión de portadores en el tiempo que dura la rampa, pero lo suficientemente lenta como para que el capacitómetro pueda medir la capacidad.

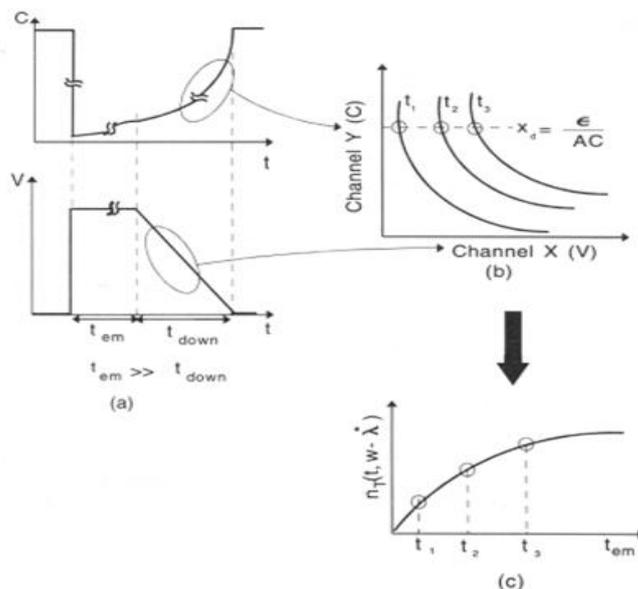


Figura 3.4. Diagramas esquemáticos de la Técnica de Transitorio CV

La constante de tiempo del capacitómetro es de 50 μ s y usamos rampas en donde la tensión varía 1 V en un rango de 200 a 500 μ s. Estos valores limitan la constante del tiempo de emisión medible en un mínimo de al menos 2-5 ms. Los valores de la tensión y la capacitancia se registran con un osciloscopio digital para la obtención de las curvas de C-V. Como la duración de los pulsos de emisión varía, el estado de carga de los centros profundos al final de cada pulso se modifica también, ya que cambia la ocupación de los centros. Estas modificaciones afectan las curvas experimentales de C-V de tal manera que se puede extraer información sobre los centros profundos.

De este modo, trabajando con diferentes anchuras de pulsos, se obtiene una familia de curvas C-V con una temperatura fija. De las pendientes de esas curvas se pueden obtener los transitorios correspondientes a la concentración de impurezas ionizadas de los centros profundos vaciados en función del tiempo para cada punto en la zona de carga espacial y a una temperatura experimental.

De igual manera, con la amplitud de los transitorios en función de la coordenada espacial se puede obtener los parámetros de centro profundo a cierta temperatura. Llevando a cabo estas medidas para diferentes temperaturas se puede obtener los coeficientes de emisión para los centros profundos en función de la temperatura en cada punto dentro de la región de carga espacial. A partir del ajuste de Arrhenius se puede obtener la variación de la energía térmica de emisión de cada centro profundo en la región de carga espacial. Este resultado es importante ya que nos permite determinar si la energía de activación del centro profundo presenta variaciones en la zona, que puede deberse al proceso de emisión de algún campo eléctrico activado.

En resumen, la técnica CVTT permite, a través de las curvas C-V para diferentes pulsos de emisión y temperaturas, la obtención para cada punto de la zona de carga espacial, la concentración, el coeficiente de emisión térmica y la energía de emisión de los centros profundos.

3.2.2. Montaje y Equipos utilizados

El montaje experimental utilizado para realizar las mediciones de esta técnica se muestra en la Figura 3.5. El cometido de cada equipo, que se muestran en la Figura 3.6, es el siguiente:

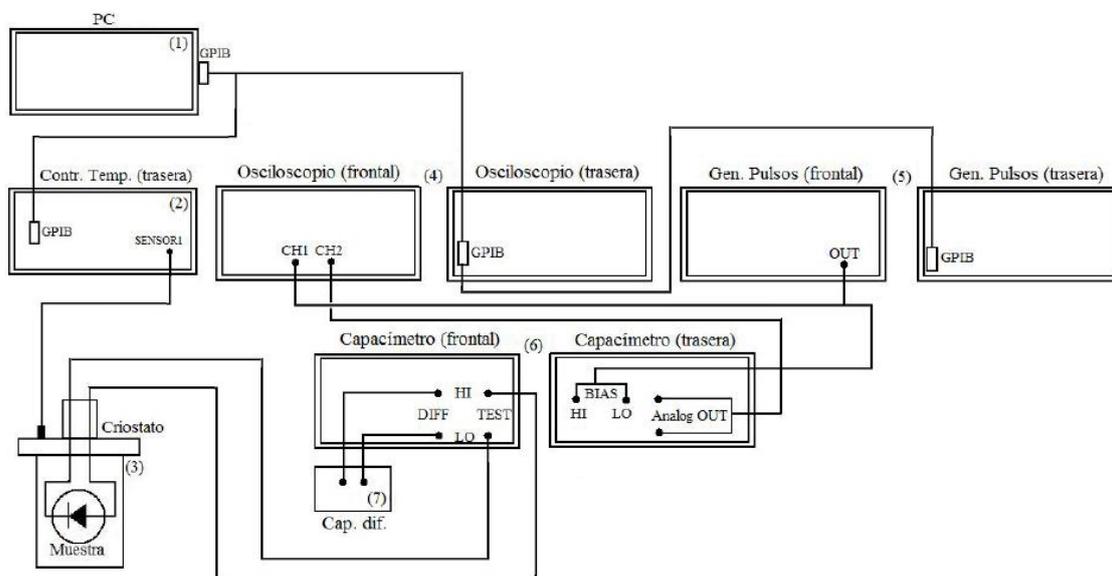


Figura 3.5. Montaje Experimental de la CVTT

- (1) PC: donde está el programa de control (desarrollado en LabView) que gobierna el comportamiento de cada uno de los equipos.
- (2) Controlador de Temperatura *Oxford Instruments ITC503*: monitoriza la temperatura a la que se encuentra la muestra dentro del criostato.
- (3) Criostato *Oxford Instruments DN 1710*: aísla la muestra del ambiente del laboratorio para conseguir mantenerla entre la temperatura del nitrógeno líquido y la temperatura ambiente.
- (4) Osciloscopio Digital *Tektronix TDS5052*: permite visualizar los registros de la capacidad y la tensión, en donde a través de su canal 1 (*CH1*) registra las formas de los pulsos de tensión proporcionados por el Generador de Pulsos, y a través de su canal 2 (*CH2*) registra la correspondiente respuesta en capacidad de la muestra, proporcionada por el Capacímetro.

Capítulo 3. Técnicas de Caracterización Eléctrica de Sustratos de Células Solares

(5) Generador de Pulsos: es el que proporciona los pulsos con distintos tiempos de emisión, cuya salida se conecta al osciloscopio (*CH1*) para su visualización, y se introduce en los terminales de polarización del Capacímetro (*BIAS HI* y *BIAS LO*). De este modo, a la vez que mide estará aplicando el pulso de tensión en la muestra.

(6) Capacímetro Analógico *Boonton 72B de 1MHz*: genera la señal alterna que va a la entrada del criostato y recoge a su vez la respuesta de la muestra, que va al osciloscopio (*CH2*) para que se pueda visualizar.

(7) Capacidad Diferencial: dispositivo útil para situaciones en las que queramos tener mayor precisión para valores de capacidad grandes. Se conecta a los terminales de entrada del Capacímetro *DIFF HI* y *DIFF LO*.

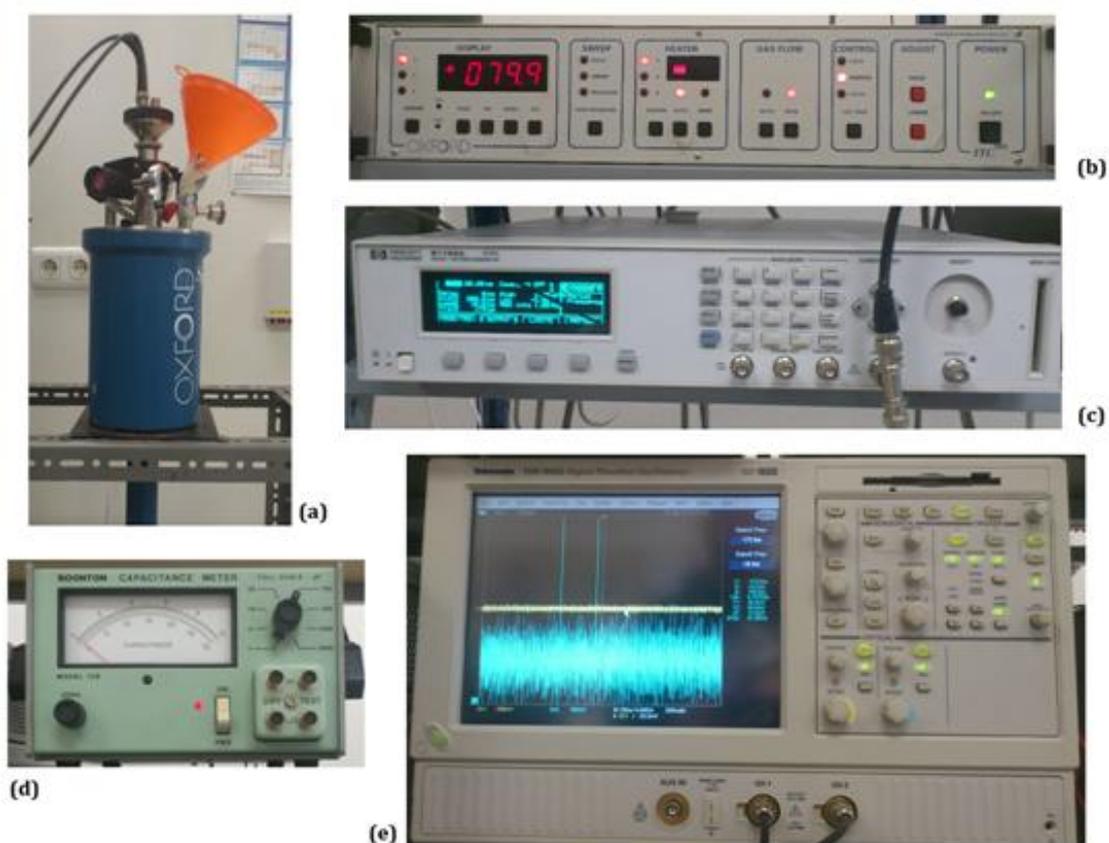


Figura 3.6. Equipos utilizados en la CVTT: (a)Criostato, (b)Controlador de Temperatura, (c)Generador de Pulsos, (d)Capacímetro, (e)Osciloscopio

Capítulo 4

4. Experimentación y Resultados

Antes de emplear las técnicas antes mencionadas para la descripción de los defectos de los centros profundos, es necesario realizar unas medidas de caracterización inicial en las muestras para conocer su funcionamiento eléctrico y definir luego los valores de los parámetros a usar: voltaje de polarización, frecuencia, temperatura, pulsos de los tiempos de emisión, etc. Para este trabajo, la muestra a utilizar es una doble unión: Schottky de Au depositado en ambas caras y sustrato de silicio policristalino.

4.1. Caracterización Inicial

La primera medida a realizar sobre la muestra es una representación de las características corriente-voltaje para diferentes temperaturas. La Figura 4.1 muestra la gráfica de Corriente vs Voltaje en escala logarítmica, en donde para los valores negativos de tensión se aplica el valor absoluto del mismo, se puede notar que para temperaturas más altas se produce una mayor corriente para un valor fijo de tensión, esto es debido a que existe un flujo mayor de electrones a medida que la temperatura aumenta.

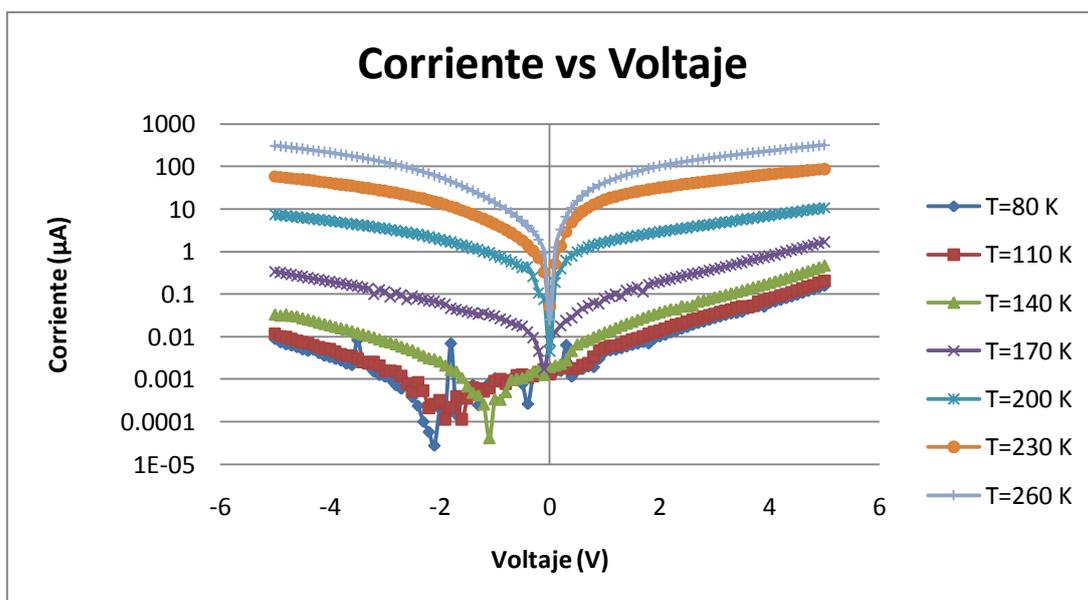


Figura 4.1. Representación de I-V de la muestra para distintas temperaturas

Capítulo 4. Experimentación y Resultados

Ya que las células solares son básicamente dos diodos Schottky inversos, para las medidas siguientes se mantendrá el barrido de tensión de polarización de -5.0 a 5.0 voltios para poder ver su comportamiento tanto en inversa como en directa. Pero esta vez se representarán gráficas de capacidad y conductancia tomando en cuenta otros dos parámetros fundamentales para la descripción eléctrica de estos dispositivos: frecuencia y temperatura.

Primeramente se hará un estudio sobre la muestra manteniendo una temperatura fija (temperatura ambiente). Se hace un barrido en tensión de -5.0 a 5.0 voltios y se registran los valores de la capacidad y la conductancia para diferentes frecuencias, como se muestran en las Figuras 4.2 y 4.3, respectivamente.

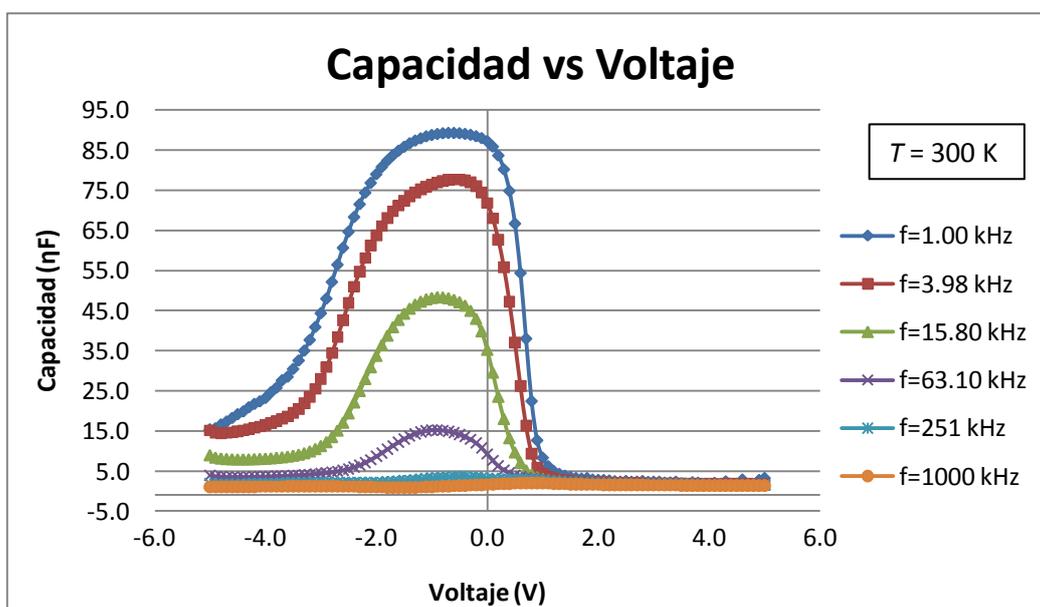


Figura 4.2. Gráfica de C-V para temperatura ambiente ($T=300\text{ K}$)

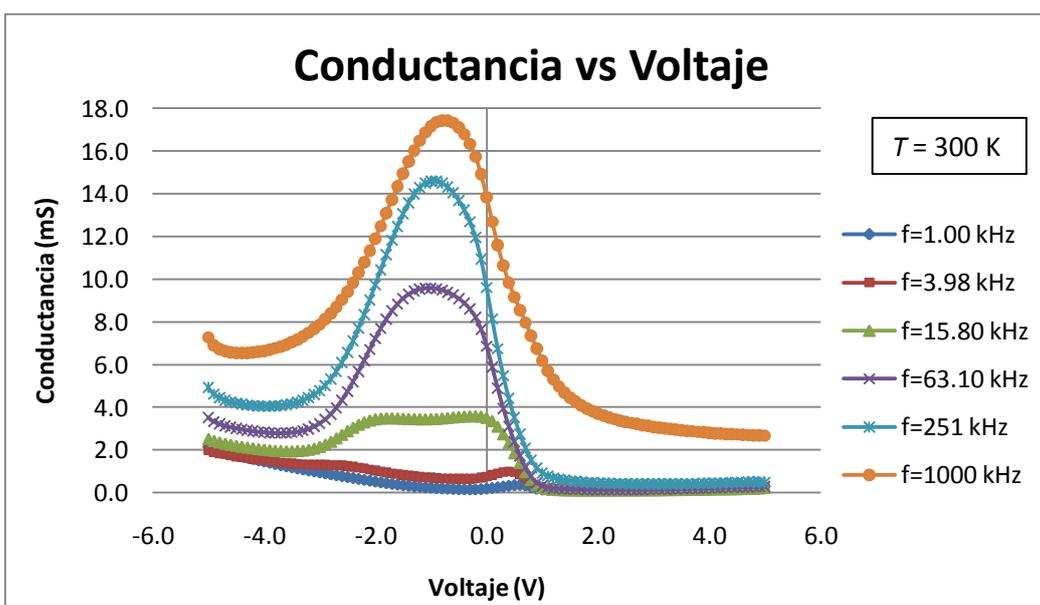


Figura 4.3. Gráfica de G-V para temperatura ambiente ($T=300\text{ K}$)

Otra manera de representar estos datos es observar cómo varían la capacidad y la conductancia en función de la frecuencia para un valor fijo de tensión de polarización, como se muestran en las Figuras 4.4 y 4.5, respectivamente.

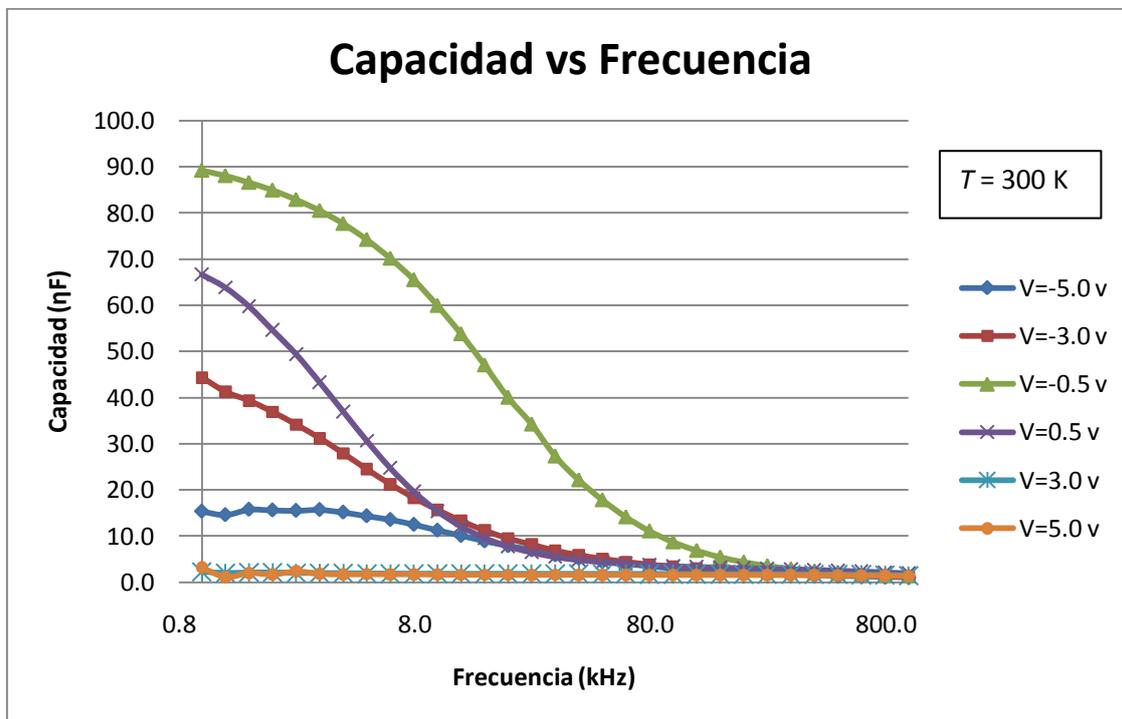


Figura 4.4. Gráfica de C-F para temperatura ambiente ($T=300\text{K}$)

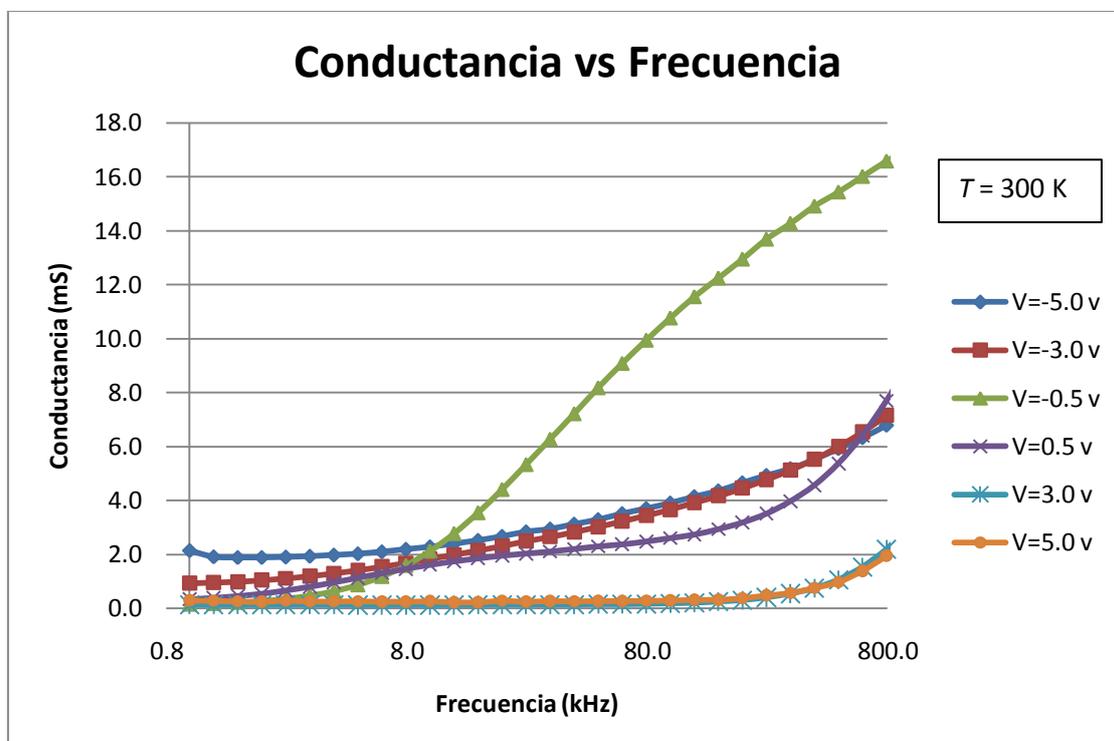


Figura 4.5. Gráfica de G-F para temperatura ambiente ($T=300\text{K}$)

Capítulo 4. Experimentación y Resultados

El siguiente paso es hacer un estudio sobre la muestra manteniendo una frecuencia constante, en este caso $f = 30 \text{ kHz}$, de igual manera, se realiza el barrido en tensión de polarización de -5.0 a 5.0 voltios y se representan las gráficas de la capacidad y la conductancia en función del voltaje de polarización, pero esta vez para diferentes temperaturas, como se muestran en las Figuras 4.6 y 4.7.

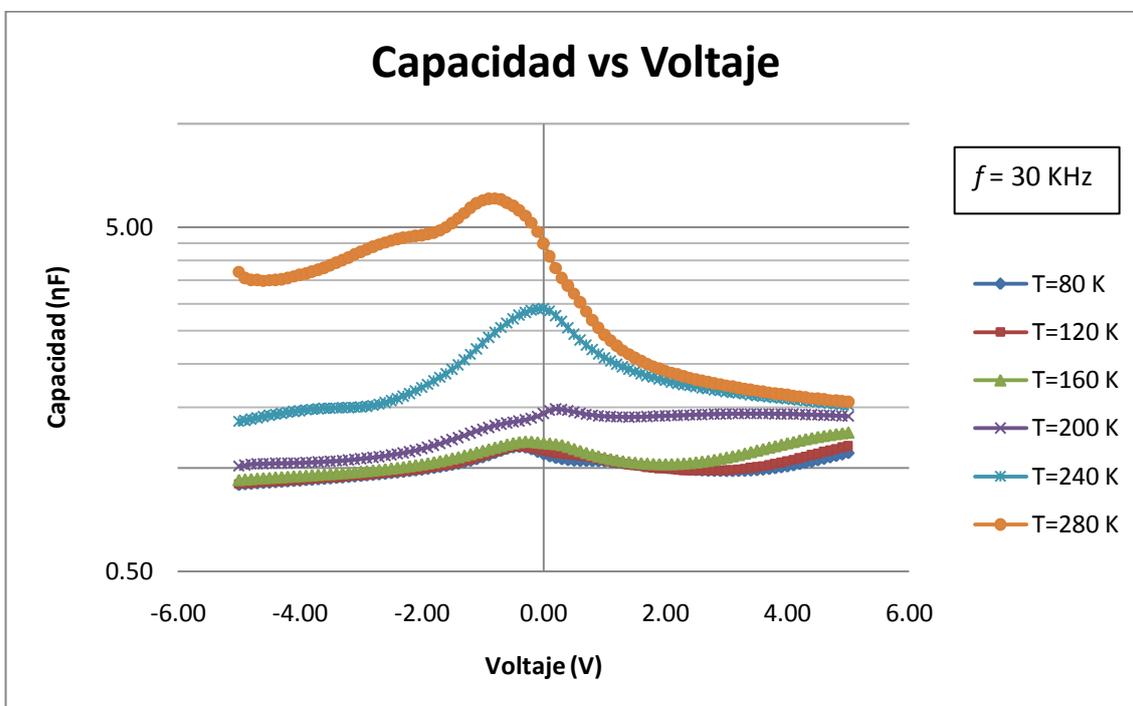


Figura 4.6. Gráfica de C-V para frecuencia = 30 kHz

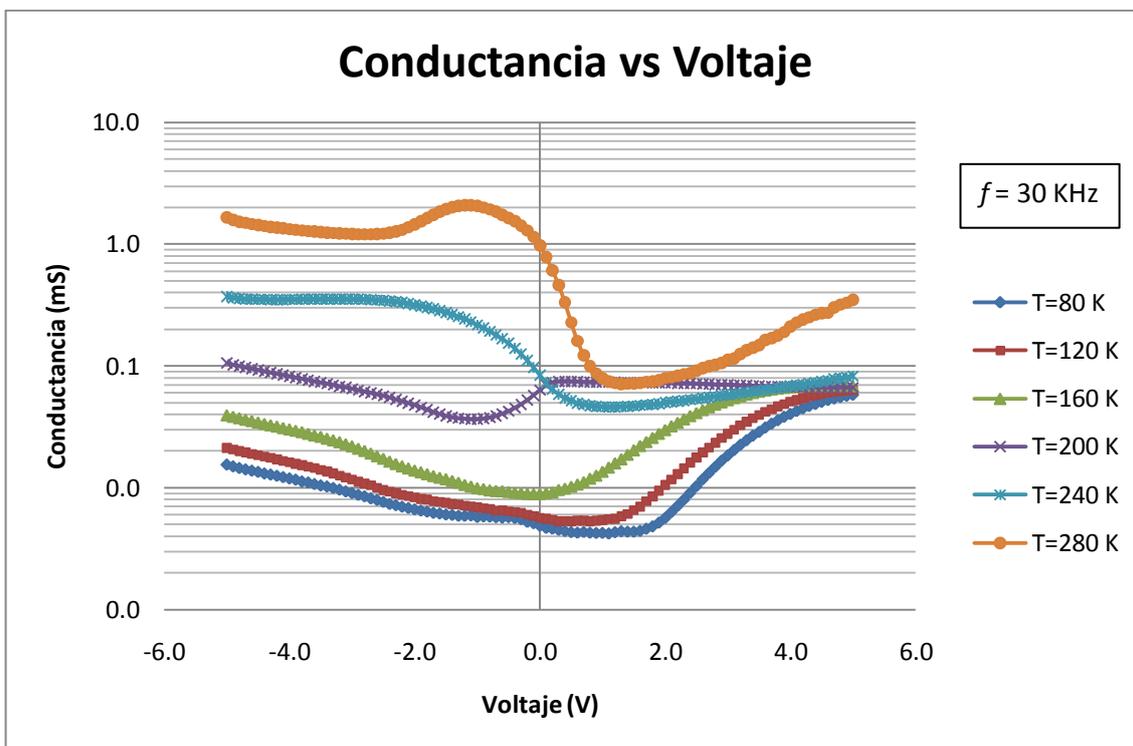


Figura 4.7. Gráfica de G-V para frecuencia = 30 kHz

También se muestran las gráficas de la capacidad y la conductancia en función de la temperatura, para valores fijos de tensión de polarización, representadas en las Figuras 4.8 y 4.9, respectivamente, en donde, al igual que las gráficas de las Figuras 4.4 y 4.5 se puede observar que los valores de tensión más negativos y los más positivos presentan un comportamiento similar, mientras que para las tensiones en torno al cero se muestran más irregulares. De ahí que para la aplicación de la técnica de espectroscopía térmica de admitancia para la caracterización eléctrica de los defectos de los sustratos de células solares, se ha escogido realizar las medidas con una tensión de polarización de 0.5 voltios.

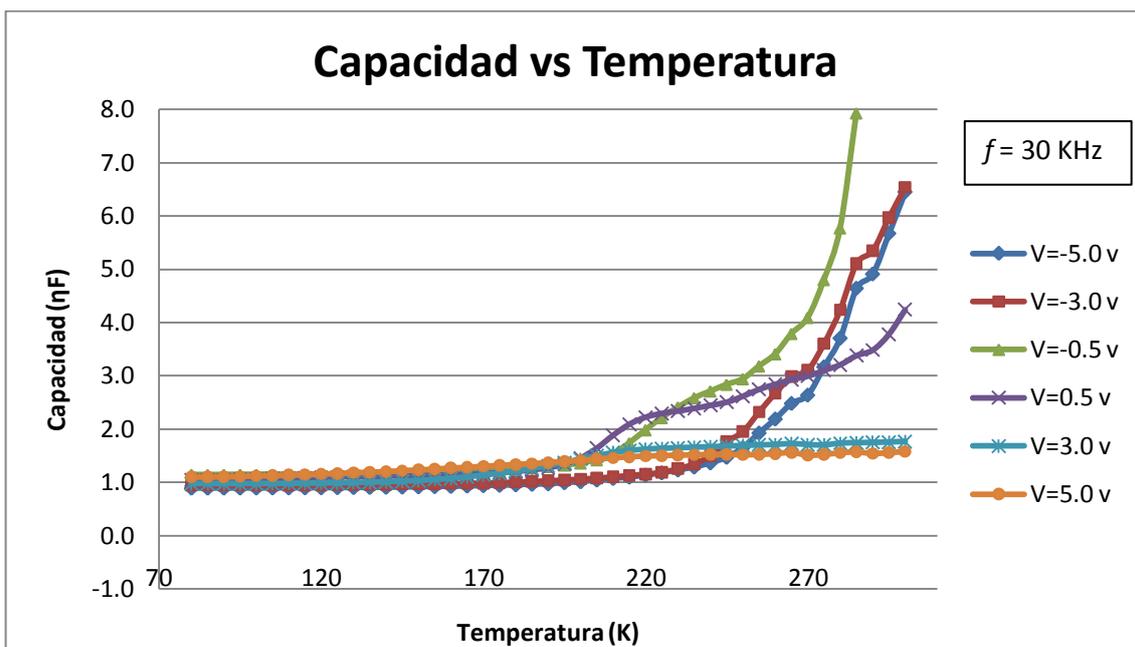


Figura 4.8. Gráfica de C-T para frecuencia = 30 kHz

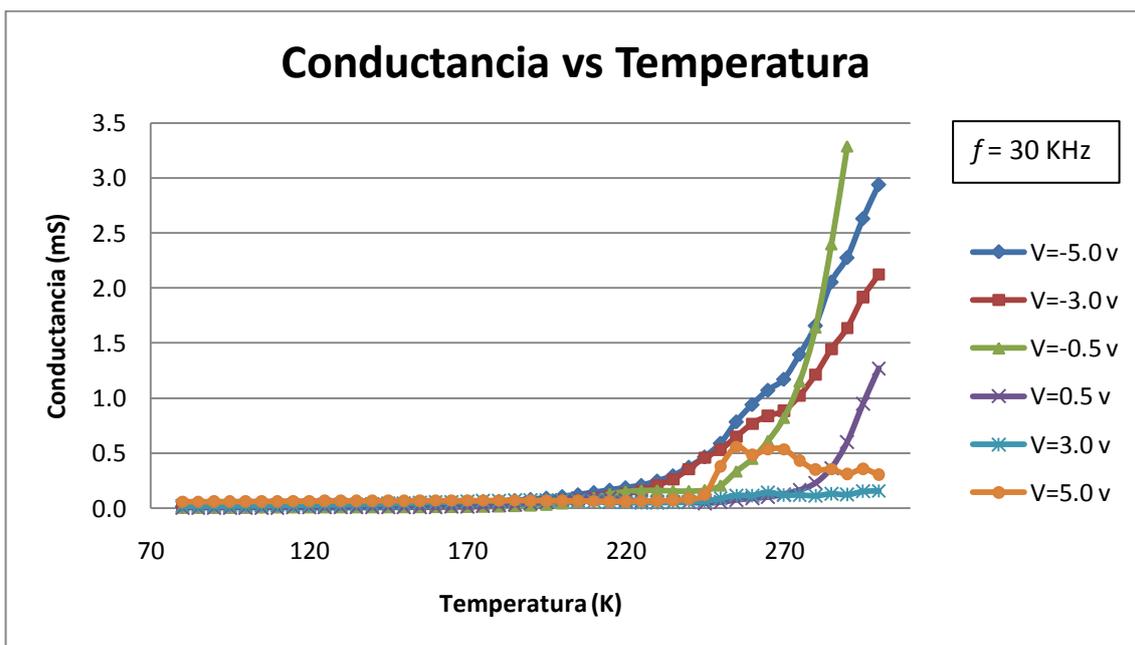


Figura 4.9. Gráfica de G-T para frecuencia = 30 kHz

4.2. Espectroscopía Térmica de Admitancia

Para las medidas experimentales de la técnica de espectroscopía térmica de admitancia se utilizaron muestras de doble unión (Schottky de Au y Si policristalino), polarizadas a 0.5 V, se realizaron medidas con diferentes frecuencias desde los 77 Hz hasta los 77 kHz, obteniendo 7 curvas de C-T y G-T con los cuales a través de la Ley de Arrhenius se obtuvo la energía de activación térmica del defecto del centro profundo de la muestra. Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran las gráficas C-T y G-T, respectivamente, obtenidas a distintas frecuencias.

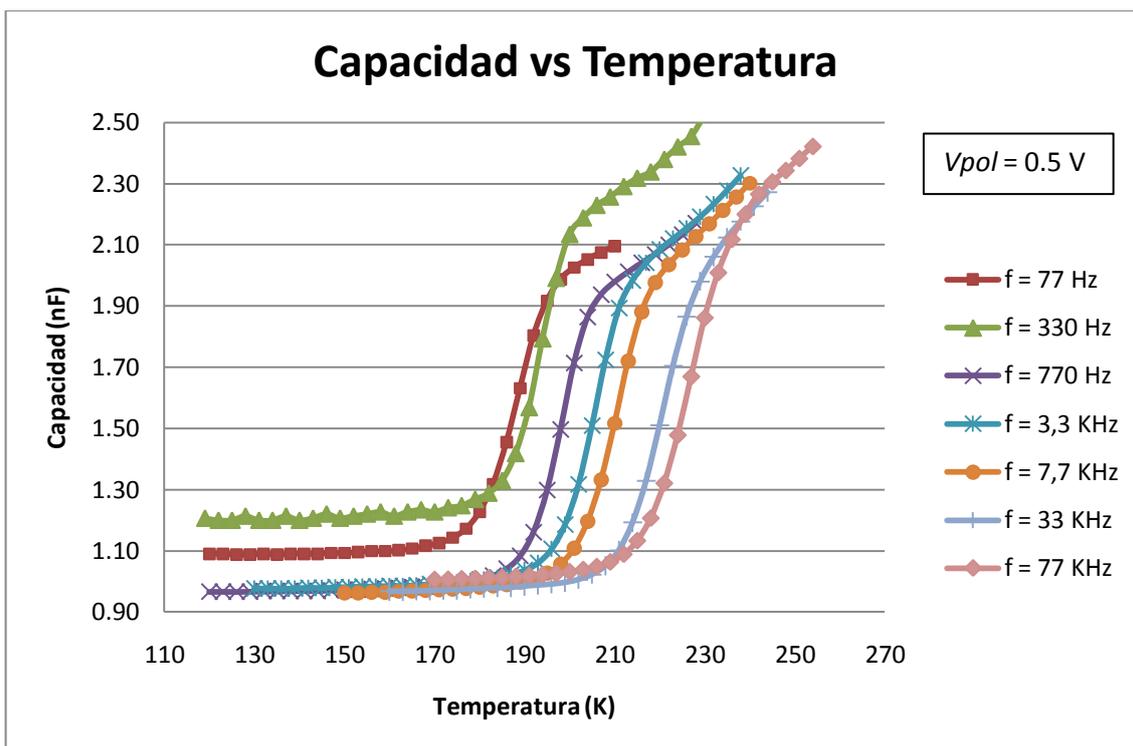


Figura 4.10. Gráfica de Capacidad-Temperatura para distintas frecuencias

A partir de la gráfica de la Figura 4.11 se obtiene la Tabla 4.1 en donde se muestra los valores de temperatura para la cual se alcanza el máximo en la conductancia según la frecuencia medida. Y con estos valores se puede calcular la energía de activación térmica de los defectos de centro profundo a partir de la aproximación de la Ley de Arrhenius, que se muestra en la Figura 4.12, que representa la gráfica de $\ln(e_n^t / T^2)$ en función de $1/T$ cuya pendiente es la energía de activación, ΔE_T del centro profundo.

f (Hz)	77	330	770	3300	7700	33000	77000
T (K)	189	194	198	205	210	220	227

Tabla 4.1. Máximos de Conductancia para una frecuencia medida

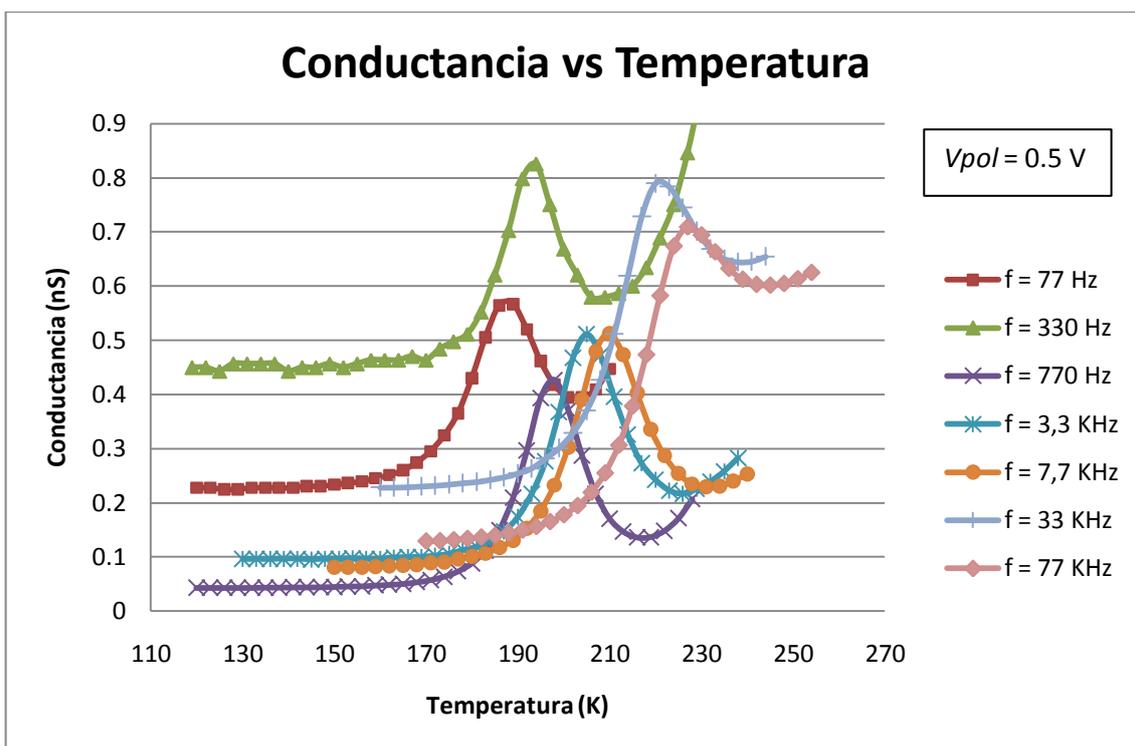


Figura 4.11. Gráfica de Conductancia-Temperatura para distintas frecuencias

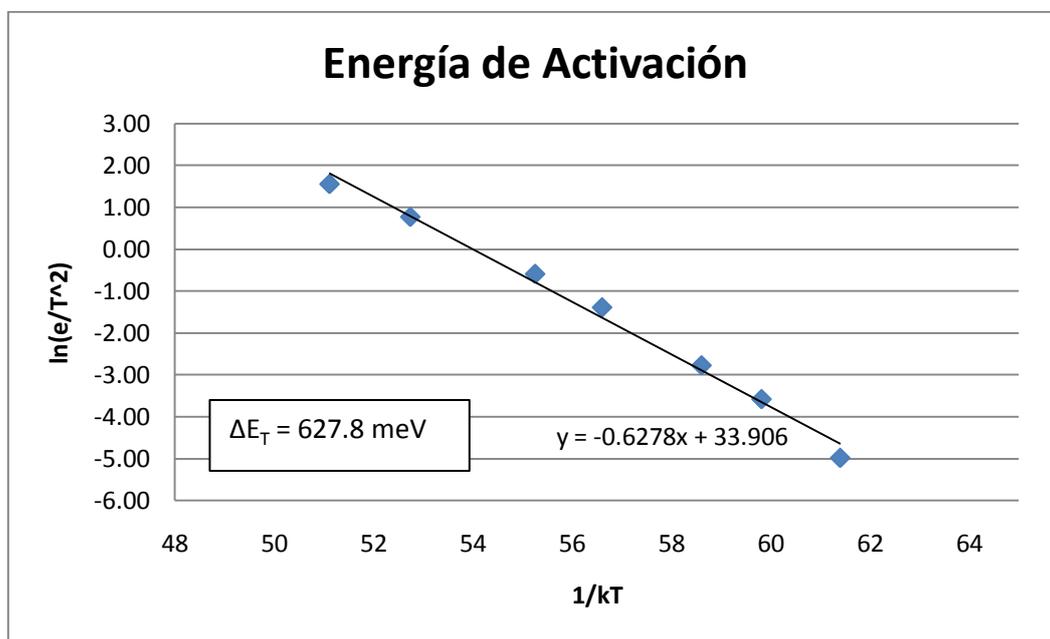


Figura 4.12. Gráfica para la obtención de la energía de activación, ΔE_T del centro profundo

4.3. Técnica de Transitorios Capacidad – Tensión CVTT

Al igual que la técnica anterior, las medidas experimentales de la técnica de análisis de transitorios se obtuvieron con muestras de doble unión (Schottky de Au y Si policristalino), pero en este caso, se harán las medidas con las siguientes características:

- Polarización directa: 0.01 V
- Polarización inversa: -5.0 V
- Tiempos de emisión: 0.2 ms, 0.5 ms, 0.7 ms, 2 ms, 5 ms, 7 ms y 20 ms.

Los resultados obtenidos de la familia de curvas C-V para los diferentes tiempos de emisión se presentan en las Figuras 4.13 y 4.14, con temperaturas fijas de 80 K y 140 K, respectivamente.

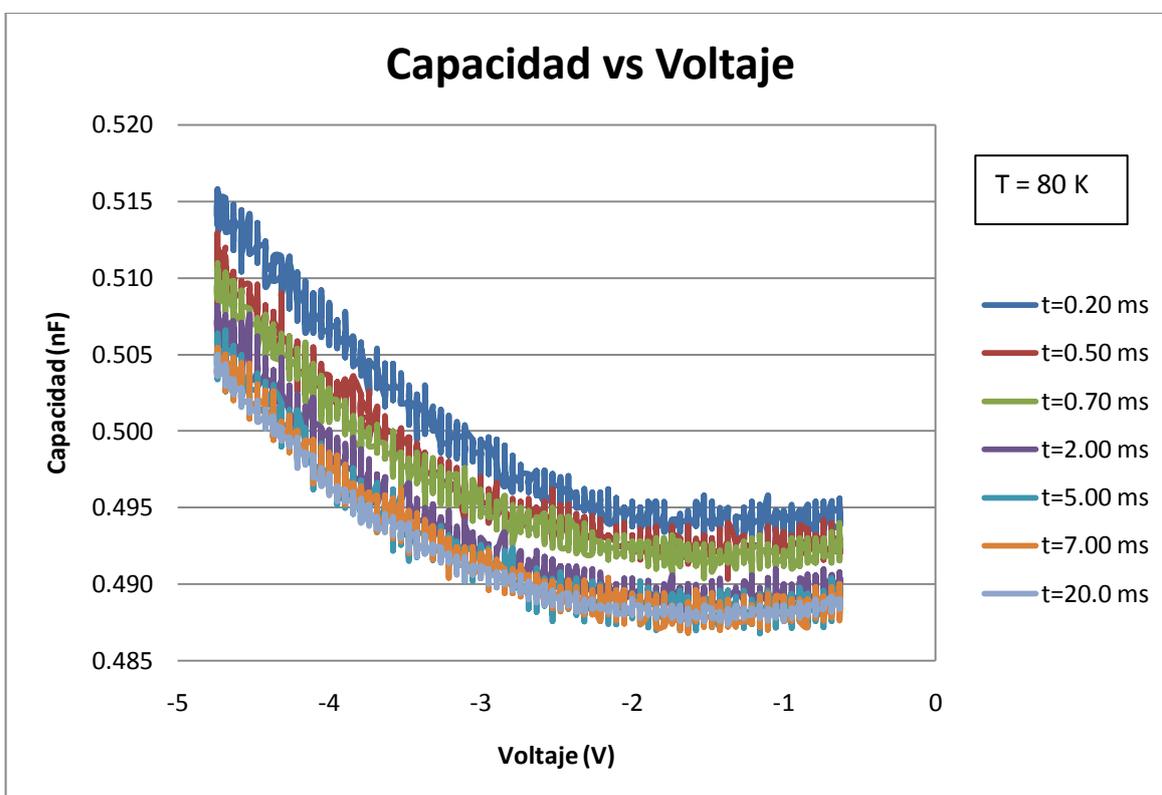


Figura 4.13. Curvas C-V para T = 80K con diferentes tiempos de emisión

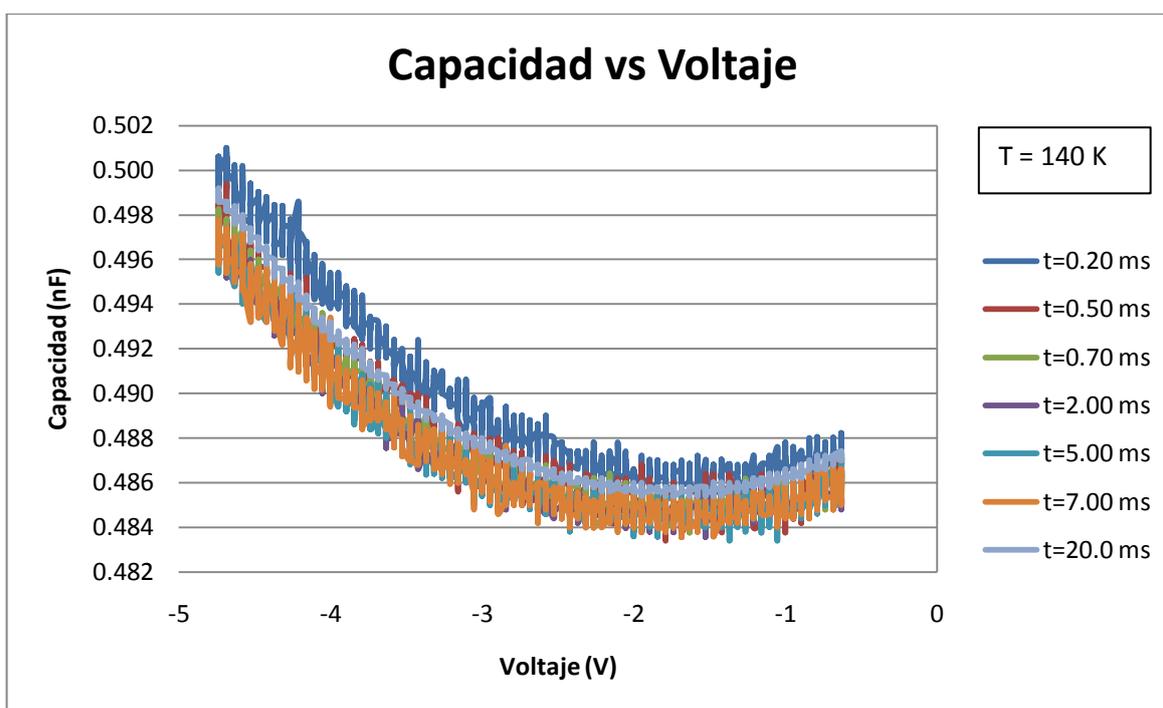


Figura 4.14 Curvas C-V para T = 140K con diferentes tiempos de emisión

De la familia de curvas se procede a utilizar la expresión:

$$N(x_d) = \frac{-C^3}{q\varepsilon_0\varepsilon_S A^2} \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1}$$

donde x_d viene dado por:

$$x_d = \varepsilon_0\varepsilon_S A/C$$

siendo $N(x_d)$ la concentración de las impurezas dopantes y niveles profundos presentes en el punto x_d de la zona de carga espacial de la muestra para un determinado tiempo de emisión. Luego, tomando en cada valor de capacidad C el valor de la derivada en el punto de la correspondiente curva C-V, podemos representar el valor de la concentración neta de impurezas en función de la distancia de la unión (x_d) y para un tiempo de emisión dado.

Realizando estas medidas para diferentes temperaturas se puede obtener los coeficientes de emisión para los centros profundos en función de la temperatura en cada punto dentro de la región de carga espacial, y a partir del arreglo de Arrhenius se puede obtener la variación de la energía térmica de emisión de cada centro profundo en la región de carga espacial.

De esta manera, queda manifiesto que esta técnica nos proporciona valores que permiten caracterizar un defecto en el semiconductor.

Capítulo 5

5. Conclusiones y Futuros Trabajos

En el ámbito de las células solares fotovoltaicas una de las características fundamentales es la concentración de defectos, o Niveles Profundos, presentes en la estructura. Dado que los defectos reducen el tiempo de vida de los portadores de carga, y por tanto la cantidad de éstos que contribuyen a la corriente proporcionada por el dispositivo a través de la luz recibida, suponen un factor de gran relevancia en la reducción del rendimiento de las células.

Es por ello que se han desarrollado diversas técnicas para la caracterización de estos defectos, que nos proporcionan información del grado de eficiencia de las células en la conversión de la energía solar a energía eléctrica, y acerca de si las modificaciones incorporadas en los procesos de fabricación son las más adecuadas, desde el punto de vista de la presencia de los defectos mencionados.

Se han descrito dos técnicas de caracterización de defectos en este trabajo: la espectroscopía térmica de admitancia, que proporciona las constantes de emisión térmica de los defectos de los centros profundos, así como la energía de activación térmica de la misma; y la técnica de análisis de transitorios capacidad-tensión, que permite, a través de las curvas C-V para diferentes pulsos de emisión y temperaturas, la obtención para cada punto de la zona de carga espacial, la concentración, el coeficiente de emisión térmica y la energía de emisión de los centros profundos.

En cuanto a la técnica de la espectroscopía térmica de admitancia se han logrado conseguir gráficas muy descriptivas del comportamiento de los defectos de los sustratos de las células solares a través de las curvas de capacidad y conductancia en función de la temperatura para un valor fijo de tensión de polarización, con los cuales por medio del arreglo de Arrhenius se ha obtenido el valor de la energía de activación térmica de los defectos.

Sin embargo, en cuanto a la técnica de análisis de transitorios capacidad-tensión, debido a la falta de tiempo para lograr un desarrollo más profundo de la técnica ya que superaba el requerido para la elaboración de este trabajo, sólo se ha logrado conseguir gráficas de familias de curvas capacidad-tensión con diferentes temperaturas, con los cuales, al igual que en la técnica anterior también se pueden

Capítulo 5. Conclusiones y Futuros Trabajos

obtener más información sobre la caracterización de los defectos de los sustratos, por lo que queda abierta una importante línea de investigación para el desarrollo de esta técnica.

De ahí que este campo de investigación es muy extenso, y es necesario indagar más en el estudio de la interpretación de los resultados obtenidos, con el fin de lograr disponer dispositivos que aprovechen al máximo el espectro solar.

Bibliografía

- [1] E. Lorenzo, "Energía Solar. Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos", *Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid*, 1994.
- [2] M. C. Tobajas Vázquez, "Energía Solar Fotovoltaica", *Ediciones Ceysa*, 2005.
- [3] International Energy Agency 2010, *Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy*.
- [4] L. Castañer Muñoz, "Energía Solar Fotovoltaica", *Politext Universitat Politècnica de Catalunya*, 1994.
- [5] P. Würfel, "Physics of Solar Cells from Basic Principles to Advanced Concepts", *Wiley-VCH*, 2009.
- [6] H. Castán, S. Dueñas, L. Bailón, "Células Solares", Apuntes, Caracterización de Dispositivos y Circuitos Electrónicos, MUI-TIC, ETSI de Telecomunicación, UVA, 2009.
- [7] D. K. Schroeder, "Semiconductor Material and Device Characterization", *John Wiley & Sons*, 1990.
- [8] J. Barbolla, S. Dueñas, L. Bailón, "Admittance Spectroscopy in Junctions", *Solid-State Electronics*, Vol. 35, No 3, pp. 285-297, 1992.
- [9] S. Dueñas, H. Castán, L. Enríquez, J. Barbolla, J. Montserrat, E. Lora-Tamayo, "Characterization of the damage induced in boron-implanted and RTA annealed silicon by the capacitance-voltage transient technique", *Semiconductor Science Technology*, Vol. 9, pp. 1637-1648, 1994.
- [10] E. Pérez, H. Castán, "Cualificación de Sustratos de Silicio Multicristalino para Células Solares", Trabajo Fin de Máster MUI-TIC, ETSI de Telecomunicación, UVA, 2010.

