



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE FÍSICA

**“TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA CARACTERIZAR
MATERIALES FOTOCONDUCTORES”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

BIOFÍSICA

AUTOR: CRISTIAN DANIEL ARAMBULO ALMENDARIZ

DIRECTOR: Ing. LUIS SANTIAGO CARRERA ALMENDARIZ Msc.

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Cristian Daniel Arambulo Almendariz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Cristian Daniel Arambulo Almendariz, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 9 de septiembre de 2021

Cristian Daniel Arambulo Almendariz

172260464-0

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE FISICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación: Tipo: Proyecto de Investigación, “**TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA CARACTERIZAR MATERIALES FOTOCONDUCTORES**”, realizado por el señor: **CRISTIAN DANIEL ARAMBULO ALMENDARIZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Biof. Rosa Maricela Ormaza Hugo MSc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	09 de septiembre de 2021
Ing. Luis Santiago Carreras Almendáriz MSc. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	09 de septiembre de 2021
Biof. Maria Fernanda Heredia Moyano MSc. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	09 de septiembre de 2021

DEDICATORIA

A Dios, a mi madre y familia que han sido el pilar fundamental en este proceso dándome su amor y apoyo en todo momento siempre creyendo en mí, alentándome en cada paso que doy sin dudar en los logros que voy a conquistar, A todos mis amigos y personas que conocí en esta etapa de mi vida que con su pequeño grano de arena contribuyeron a formar mi carácter, adquirir conocimiento, fomentar mis habilidades a su vez ser parte de la persona que soy ahora y por todos los momentos inolvidables.

Cristian

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
INDICE DE GRÁFICOS.....	ix
INDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Fotoconductividad.....	4
1.2.1. <i>Proceso de fotoconductividad</i>	5
1.3. Etapas del proceso de fotoconducción.....	6
1.3.1. <i>Absorción de radiación</i>	6
1.3.1.1. <i>Absorción de plasma</i>.....	7
1.3.1.2. <i>Absorción de antena</i>	8
1.3.1.3. <i>Ionización</i>	8
1.3.1.4. <i>El efecto fotoeléctrico</i>	9
1.3.2. <i>Absorción por partículas cargadas que permanecen unidas</i>	9
1.3.2.1. <i>Absorción disipativa</i>	9
1.3.2.2. <i>Transición de banda de energía</i>	9
1.3.2.3. <i>Fluorescencia</i>.....	10
1.3.3. <i>Generación de portadores de carga</i>	10
1.3.4. <i>Inyección de portadores de carga</i>	11
1.3.5. <i>Transporte de portadores de carga</i>	11
1.3.6. <i>Recombinación</i>	12
1.3.7. <i>Proceso de captura</i>	12
1.4. Técnicas para caracterización de materiales fotovoltaicos	12
1.4.1. <i>Fotoconductividad en estado estacionario</i>	12
1.4.2. <i>Fotoconductividad transitoria (TPC)</i>	14

1.4.3.	<i>Fotovoltaje superficial (SPV)</i>	16
1.4.4.	<i>Recombinación dependiente del giro</i>	17
1.4.5.	<i>Conductividad de microondas de resolución temporal (TRMC)</i>	17
1.5.	Efectos fotográficos persistentes en semiconductores	18
1.5.1.	<i>Observación de fotoconductividad persistente</i>	18
1.6.	Caracterización de polímeros fotoconductores	18
1.6.1.	<i>Espectroscopía de fotocorriente modulada</i>	18
1.7.	Espectroscopía de fluorescencia	20
1.8.	Espectroscopía ultravioleta (EUV)	20
1.9.	Espectroscopía Infrarroja (EIR)	21
1.9.1.	<i>Espectroscopía de absorción infrarroja</i>	21
1.9.2.	Espectroscopía Raman	22
1.10.	Polímero Fullerenos	22
1.10.1.	<i>Aplicaciones</i>	22
1.10.1.1.	<i>Fotovoltaica</i>	22
1.10.1.2.	<i>Sensor óptico</i>	23
1.10.1.3.	<i>Sensor de temperatura</i>	23

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	25
2.1.	Metodología empleada	25

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
3.1.	Técnicas	28
3.1.1.	<i>Método de fotocorriente constante (CPM)</i>	29
3.1.2.	<i>Fotoconductividad de doble haz (DBP)</i>	32
3.1.3.	<i>Espectroscopía de fotocorriente por transformada de Fourier (FTPS)</i>	32
3.1.4.	<i>Método de rejilla fotoportadora de estado estacionario (SSPG)</i>	35
3.1.5.	<i>Técnica de la rejilla del fotoportador en movimiento (MGT)</i>	39
3.1.6.	<i>Espectroscopía de fotocorriente modulada (MPC)</i>	41
3.1.7.	<i>Transitorios de encendido y apagado</i>	45

3.1.8.	<i>Espectroscopía de fotocorriente transitoria (TPC)</i>	46
3.1.9.	<i>Tiempo de vuelo (TOF)</i>	49
3.1.10.	<i>Tiempo de vuelo de campo interrumpido (IFTOF)</i>	53
3.1.11.	<i>Espectroscopía de fotoelectrones ultravioleta (UPS)</i>	54
3.1.12.	<i>Conductividad de microondas de resolución temporal (TRMC)</i>	55
3.1.13.	<i>Espectroscopía de fluorescencia</i>	56
3.1.14.	<i>Espectroscopía bidimensional (2D)</i>	58
3.1.15.	<i>Espectroscopía de absorción infrarroja</i>	59
3.1.16.	<i>Espectroscopía Raman</i>	61
3.1.17.	<i>Espectroscopía en dominio de tiempo (TDS)</i>	65
3.1.18.	<i>Espectroscopía Infrarroja (EIR)</i>	68
3.2.	Discusión	69

CONCLUSIONES	76
---------------------------	----

RECOMENDACIONES	77
------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

GLOSARIO

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1-3:** Algunas técnicas experimentales para caracterizar materiales fotoconductores ... 26
- Tabla 2-3:** Ventajas y desventajas de técnicas para caracterizar materiales fotoconductores. 69

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3: Técnicas en la actualidad.....	28
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Diagrama de bandas que muestra diferentes procesos de transición de la fotoconductividad.....	5
Figura 2-1:	Fluorescencia	10
Figura 3-1:	Disposición para la medición de la fotoconductividad	13
Figura 4-1:	Ejemplo de configuración de electrodos interdigitados para un delgado.....	14
Figura 5-1:	Comportamiento de fotocorriente	15
Figura 6-1:	Diagrama esquemático de un sistema de medición MPC	19
Figura 1-3:	Diagrama esquemático de una configuración de CPM absoluto.....	30
Figura 2-3:	Norm, FTPS, CPM.....	34
Figura 3-3:	Medición SSPG.....	38
Figura 4-3:	Esquema del SSPG como configuración experimental.....	38
Figura 5-3:	Técnica de la rejilla del fotoportadora en movimiento	40
Figura 6-3:	Asociación de características espectrales.....	42
Figura 7-3:	Integración de la EQEPV	44
Figura 8-3:	fotocorriente transitoria.....	46
Figura 9-3:	Mediciones TPC en el proceso de encapsulación	47
Figura 10-3:	Flujo de tiempo de películas ZnO	48
Figura 11-3:	Espectros SE ideales con resolución de tiempo y frecuencia	58
Figura 12-3:	Diagrama esquemático.....	64
Figura 13-3:	Pulso THZ mediante espectroscopía de dominio de tiempo	67
Figura 14-3:	Configuración de espectroscopía de dominio de tiempo (TDS)	68

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: REVISTA CIENTÍFICA PUBLICADA

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación fue identificar técnicas para la caracterización de materiales fotoconductores. Para ello se realizó una revisión de tipo documental y bibliográfica, de textos científicos, bibliografía científico-académica llamado Google académico y sitios web de revistas científicas, haciendo hincapié en las particularidades de cada una, así como sus potencialidades y debilidades experimentales y aplicativas. Se comprendió la revisión de trabajos publicados durante los últimos cinco años incluyendo artículos y estudios de investigación relacionados con la aplicación tecnológica de estos materiales, para ello en el proceso de búsqueda se usaron términos con relación al tema central, como "fotoconductividad", "materiales fotoconductores", "método de la fotocorriente constante", los artículos retenidos, posterior a la revisión de la investigación, fueron analizadas detalladamente mediante el uso de una tabla de evidencia para dejar ver las características y resultados más relevantes del estudio. Dentro de los resultados más relevantes se encontró, que la caracterización depende de la naturaleza del material y de la fuente de radiación electromagnética que se usa para estimularlo, así como, la intensidad de la luz, la frecuencia, el número de fotones, entre otras, los materiales fotoconductores a menudo se preparan como películas delgadas son de interés para aplicaciones de gran área, por ejemplo: células solares, transistores de panel posterior de pantalla, dispositivos fotoemisivos e imágenes médicas. Se concluye, que la técnica de espectroscopía Raman es la más eficiente en comparación a otras gracias al proceso de análisis no invasiva que no afecta a las muestras. Se recomienda realizar estudios enfocados en las microestructuras de los materiales fotoconductores para conseguir un mayor conocimiento de sus posibles aplicaciones.

Palabra clave: <FOTOCONDUCTIVIDAD>, <MATERIALES FOTOCONDUCTORES>, <FOTOCORRIENTE CONSTANTE>, <PELÍCULAS DELGADAS>, <CÉLULAS SOLARES>, <DISPOSITIVOS FOTOEMISIVOS>.



1826-DBRA-UTP-2021

ABSTRACT

The aim of this research work was to identify techniques for the characterization of photoconductive materials. For this purpose, a documentary and bibliographic review of scientific texts, scientific-academic bibliography called academic Google and websites of scientific journals was carried out, emphasizing the particularities of each one, as well as their experimental and application potentialities and weaknesses. A review of works published during the last five years was carried out, including articles and research studies related to the technological application of these materials. In the search process, terms related to the central theme were used, such as "photoconductivity", "photoconductive materials", "constant photocurrent method", the articles retained, after the review of the research, were analysed in detail using a table of evidence to show the most relevant characteristics and results of the study. Among the most relevant results, it was found that the characterization depends on the nature of the material and the source of electromagnetic radiation used to stimulate it, such as light intensity, frequency, number of photons, among others. Photoconductive materials often prepared as thin films are of interest for large area applications, e.g. solar cells, back panel display transistors, photoemissive devices and medical imaging. It is concluded that the Raman spectroscopy technique is the most efficient technique compared to others due to the non-invasive analysis process that does not affect the samples. Studies focusing on the microstructures of photoconductive materials are recommended to gain a better understanding of their possible applications.

Keyword: <PHOTOCONDUCTIVITY>, <PHOTOCONDUCTIVE MATERIALS>, <CONSTANT PHOTOCURRENT>, <THIN FILMS>, <SOLAR CELLS>, <PHOTOEMISSIVE DEVICES>.

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema

El mercado tecnológico requiere de nuevos materiales fotoconductores que mejoren la conducción, a medida aumenta las necesidades humanas mayor es la necesidad de utilización de nuevos materiales, el hombre ha enfrentado la problemática de sustituir materiales agotados y utilizar aquellos con su mejor rendimiento, debido al avance del conocimiento el cual permite caracterizar materia según sus propiedad de acuerdo a los principios de física y de la matemática, los nuevos materiales inevitablemente continuarán teniendo un profundo impacto en la economía mundial, otros factores que influyen es la ausencia de técnicas para caracterizar materiales afectan la calidad de conocimiento y habilidades durante la realización experimental en laboratorio por ende la importancia de tiene la evaluación de las técnicas experimentales utilizadas para caracterizarlos.

Justificación

La presente investigación tiene como objeto sugerir las técnicas para investigar la fotoconducción en materiales que promuevan la formación del pensamiento técnico y las habilidades de diseño de los futuros expertos en el campo de la física y las tecnologías, o, estimulen la búsqueda incesante de técnicas sintéticas que provean nuevos materiales de alto interés tecnológico, la ciencia de materiales y la ingeniería, están moduladas en alcances y pretensiones por los factores del mundo moderno hay que tener en cuenta que la materia sin uso no constituye un “material” (Amao, 2003,p.1-12).

El diseño, síntesis y caracterización de nuevos materiales es uno de los grandes desafíos científicos y técnicos en esta era. Se pueden hallar muchas aplicaciones importantes de los materiales en las industrias electrónicas, de comunicaciones e información, de materiales estructurales, ambientales, de energía aeroespacial, médicas y de procesamiento de alimento, la selección de un material que tenga las propiedades necesarias y el potencial para ser fabricado y convertido, de manera económica y con seguridad en un producto útil, La identificación y recopilación de nuevas técnicas experimentales estudiadas para caracterizar materiales fotoconductores permitirá incentivar el desarrollo investigativo de potenciales materiales.

Además, otros factores que motivaron esta investigación es el estudio de los experimentos físicos los cuales actúan simultáneamente como método y como tutorial para los estudiantes mientras realizan el trabajo de laboratorio, los estudiantes adquieren nuevos conocimientos y forman habilidades prácticas para realizar un experimento de valor especial en la preparación práctica de estudiantes-físicos para planificar y llevar a cabo una investigación experimental independiente. Con esta investigación se busca lograr solucionar los problema que giran alrededor de encontrar

técnicas que ayuden a identificar de una manera más rápida y sirva como herramienta para nuevos investigadores para descubrir el potencial de nuevos materiales, además puede resultar algún aporte que sirva de base para investigaciones futuras sobre este problema u otros relacionados al mismo; en consecuencia, la investigación tiene valor teórico-científico e implicación práctica y es conveniente conocer su explicación, respuesta o solución.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Identificar técnicas experimentales para la caracterización de materiales fotoconductores.

Objetivos específicos

- Recopilar técnicas experimentales que sean de ayuda para la investigación de materiales fotoconductores.
- Estudiar el potencial de las técnicas experimentales compiladas.
- Establecer nuevas técnicas en la identificación de materiales fotoconductores óptimas.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

El fenómeno de la fotoconducción fue descubrió hace más de 100 años por W. Smith sigue atrayendo la atención de los investigadores, sobre todo de la mayor área de aplicaciones. Por otra parte, la evolución en la investigación de materiales en los últimos cuatro decenios ha mejorado nuestra comprensión de este fenómeno lo que ha dado lugar en última instancia, al desarrollo de materiales altamente fotosensibles (Eyring y Martin, 2013.p.20-50).

Desde el descubrimiento de H. Hoegl en 1957 de las propiedades fotoconductoras del PVCz, se han realizado numerosos estudios en profundidad sobre este polímero, en 2011 Natali Fernández Peña de la universidad de Alcalá realizó el tema “Caracterización De Polímeros Fotoconductores mediante Cromatografía con Detección Múltiple, Técnicas de Fluorescencia Y mecánica y Dinámica Molecular” que consistía en la aplicación de diferentes formas para caracterizar polímeros fotoconductores debido a su facilidad del material se puede ver modificada por una variación en la concentración local, movilidad y/o tiempo de vida de los cromóforos (Peña , 2011,p.10-20).

A través de los años el uso cotidiano de dispositivos ópticos se ha acrecentado enormemente, debido principalmente al descubrimiento de nuevos materiales, por ejemplo: la introducción de los semiconductores y la invención del láser al principio de la década de los sesenta de ahí se han derivado diferentes aplicaciones (Peña, 2011,10-20).

En argentina, la Universidad Nacional del Litoral, se llevó a cabo una investigación acerca de la optimización y desarrollo de técnicas basadas en la fotoconductividad para la caracterización de semiconductores, para caracterizar lo realizaban en un estado estacionario basadas en mediciones relacionadas con la fotoconductividad midiendo la conductividad mientras al material se lo ilumina con luz de energía mayor a su banda prohibida los resultados obtenidos que obtuvieron con estos métodos tradicionales coincidieron con los obtenidos mediante los nuevos métodos propuestos (Kopprío, 2019, pp.5-10).

El trabajo de Shyshkin, “Técnica de investigación experimental del mecanismo de fotoconductividad de semiconductores” describe el plan y el principio de funcionamiento del modelo desarrollado y realizado por nosotros para el estudio observacional de la fotoconducción en semiconductores. El modelo permite la medición de voltios-amperios y características de frecuencia de la fotoconductividad. Para una comprensión más profunda del estudiante de los procesos físicos que ocurren en los semiconductores (Shyshkin y Fedorenko, 2010, pp.185-195).

1.2. Fotoconductividad

La fotoconductividad, definida como el aumento de la conductividad de un material resultante de la absorción de fotones ópticos, ha jugado tradicionalmente un papel importante en la investigación de materiales, sobre todo en el estudio de semiconductores y aislantes unidos covalentemente (Rueda & Hernandez, 2020,pp.8-16). Los procesos básicos que gobiernan la magnitud de la fotocorriente son la generación de electrones libres y huecos mediante la absorción de fotones incidentes, su transporte a través del material bajo la influencia de un campo eléctrico y su recombinación.

El estudio de cualquiera de esos aspectos en función de la iluminación, la temperatura y la intensidad de campo, y su desarrollo a lo largo del tiempo, ofrecerá información sobre la estructura y las propiedades electrónicas del material investigado (Rodríguez, 2018,pp.7-30). Sin embargo, dado que varios procesos pueden estar involucrados en la producción de una fotocorriente específica, se necesita un conjunto de datos suficientemente completo para diferenciar entre interpretaciones alternativas.

Por ejemplo, una fotocorriente baja puede ser el resultado de un bajo coeficiente de absorción óptica a la energía del fotón dada, pero también puede deberse a la recombinación geminada de los pares electrón-agujero fotogenerados, o puede reflejar la formación de excitones. La carga fotogenerada debe transportarse en un material para realizar una corriente, un proceso que depende de la movilidad efectiva del portador.

Dada la complejidad de estos procesos, a menudo es aconsejable el uso de una variedad de experimentos de fotoconductividad, así como la combinación de fotoconductividad con técnicas complementarias como absorción óptica, fotoluminiscencia, activación de corriente oscura, recolección de carga, resonancia paramagnética de electrones y varios experimentos de bomba-sonda. Un modelo robusto debe buscar satisfacer todas las observaciones, de la manera más racional posible (Liu, 2019,pp. 9590-9595).

Las diversas técnicas experimentales basadas en la fotoconductividad han evolucionado. La información que se puede obtener se relaciona con los mecanismos de generación y recombinación de portadores y su transporte por deriva y difusión (Pattengale, 2019,pp.9793-9797).

Los parámetros físicos que se extraerán incluyen:

- Eficiencia cuántica
- Movilidad del transportista
- Vida útil del transportista
- Productos de movilidad de por vida
- Longitud de difusión de portadores minoritarios
- Densidad de estados electrónicos localizados y sus propiedades de captura y emisión

- Estado de carga y ubicación energética y variaciones espaciales en las propiedades de transporte.

La información obtenida no necesita ser específica del método y dependerá del contexto más amplio de las mediciones. La recombinación se puede estudiar mediante la desintegración de la fotocorriente a partir del estado estacionario, pero la dependencia de la intensidad y la temperatura de la fotoconductividad en el estado estacionario también se puede utilizar para identificar diferentes mecanismos de recombinación, mientras que los detalles de la densidad de estados en la banda prohibida de un semiconductor se pueden inferir tanto a partir de la respuesta espectral y la dependencia de la temperatura de la fotoconductividad en estado estacionario y un análisis detallado de la fotoconductividad transitoria.

1.2.1. *Proceso de fotoconductividad*

Los procesos de fotoconductividad se muestran más convenientemente en un diagrama de bandas, como se muestra en la Figura 1-1. El diagrama de bandas es la energía de los electrones representada frente a la posición. Generalmente se considera que los electrones libres en la banda de conducción y los huecos libres (electrones faltantes) en la banda de valencia contribuyen a la conductividad eléctrica. La banda de conducción y la banda de valencia están separadas por la banda prohibida, donde solo existen estados localizados, como defectos o impurezas. El proceso de fotoconductividad básico involucra varios componentes: absorción de luz, generación de pares de agujeros de electrones, captura y recombinación de portadores libres, excitación térmica de portadores atrapados y transporte de portadores (Kopprío et al., 2019, pp.5-10).

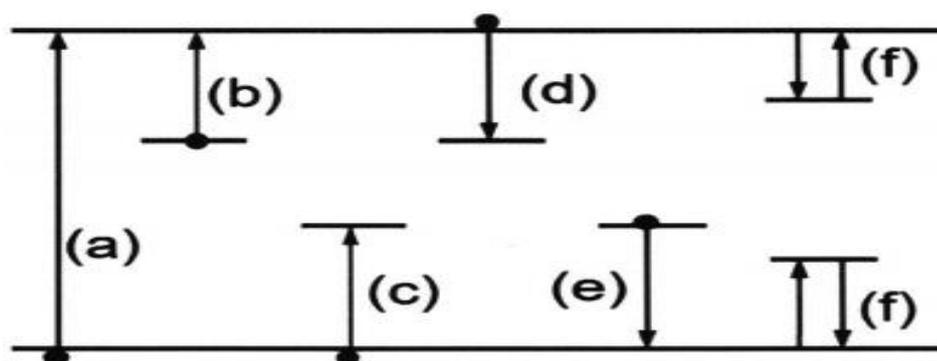


Figura 1-1. Diagrama de bandas que muestra diferentes procesos de transición de la fotoconductividad

Realizado por: Kronik, L.; Shapira, Y. 1999

La absorción óptica conduce a la generación de fotoportadores libres. Existen dos tipos de fotoexcitación: excitación intrínseca y extrínseca. La fotoexcitación intrínseca es una excitación

banda a banda en la que los electrones de la banda de valencia se excitan hacia la banda de conducción, dejando huecos en la banda de valencia (Tiede, 2018,p.4). (Figura 1-1 (a)). El número de electrones y huecos generados en este proceso es el mismo. El proceso extrínseco implica la excitación de niveles de defecto ocupados por electrones o impurezas dentro de la banda prohibida hasta la banda de conducción, donde solo se generan electrones en el proceso (Vega, 2019,p.8)., como se muestra en la Figura 1-1 (b). También podría ser la excitación de electrones desde la banda de valencia hasta los niveles de imperfección, en cuyo caso solo se generan huecos en la banda de valencia, como en la Figura 1-1 (c).

La densidad de los portadores fotogenerados está relacionada cuantitativamente con el coeficiente de absorción. Un coeficiente de absorción mayor conduce a que se absorban más fotones, de modo que se generan más portadores. Para el proceso intrínseco, a podría calcularse a partir de la teoría de la perturbación mecánica cuántica utilizando la regla de oro de Fermi (Rodríguez yMagdaleno, 2018,p.121). Para el proceso extrínseco, a podría expresarse como $\text{Sort}N$, donde Sort es la sección transversal de captura de fotones y N es la densidad de imperfecciones involucradas en el proceso de fotoexcitación.

Los electrones y huecos libres pueden ser capturados por imperfecciones desocupadas u ocupadas, respectivamente (Figura 1-1 (d) y (e)). Se relaciona cuantitativamente con el coeficiente de captura β , y es proporcional a la concentración de portador libre n y la densidad de defecto N . Para los electrones, la tasa de captura $R = \beta nN$. El coeficiente de captura depende en gran medida de las propiedades de las imperfecciones, como los estados de carga y el mecanismo de disipación de energía durante la recombinación.

Generalmente se expresa en la forma $\beta = Sv$, donde S es la sección transversal de captura y v es la velocidad térmica del portador libre. A un electrón capturado le pueden suceder dos posibilidades: se recombina con un agujero libre o se vuelve a excitar térmicamente a la banda más cercana, lo que también se conoce como destrape (Figura 1-1 (f)). Si una imperfección es un centro de recombinación o una trampa está determinado por su naturaleza, así como por las condiciones externas como la intensidad de la luz y la temperatura.

1.3. Etapas del proceso de fotoconducción

1.3.1. Absorción de radiación

El primer paso para la generación de carga es la absorción de radiación. Para intensidades de luz bajas, los materiales fotoconductores lo son verdaderamente sólo para la longitud de onda de absorción El grupo Cz absorbe en la zona UV, por tanto, el PVCz y sus derivados son fotoconductores en esa zona. Para generar carga mediante luz visible, se dopa el material con diversos colorantes o aceptores de electrones que formen complejos de transferencia de carga

coloreados y que absorban en el visible (Peña, 2011, p.1-10).

El paso de corriente eléctrica implica una transferencia de energía. Salvo en el caso de la superconductividad, una corriente siempre calienta el medio por el que pasa. Por otro lado, una corriente de electrones o iones en el vacío, que también puede considerarse una corriente eléctrica, no produce calentamiento local. Las corrientes medibles varían en magnitud desde los 105 amperios casi instantáneos en los rayos hasta valores del orden de 10^{-16} A, que ocurren en aplicaciones de investigación.

Toda la materia puede clasificarse como conductora, semiconductora o aislante, dependiendo de la facilidad con la que se transmita la corriente eléctrica a través de ella. La mayoría de los metales, las soluciones electrolíticas y los gases altamente ionizados son conductores. Los elementos de transición, como el silicio y el germanio, son semiconductores, mientras que la mayoría de las otras sustancias son aislantes.

La corriente eléctrica puede ser directa o alterna. La corriente continua (DC) es necesariamente unidireccional, pero puede ser constante o de magnitud variable. Por convención, se supone que fluye en la dirección del movimiento de las cargas positivas, opuesta al flujo real de electrones. La corriente alterna (CA) se invierte periódicamente de dirección.

Esto se define como la transferencia de carga por el movimiento real de partículas cargadas en un medio. En los metales, la corriente es transportada por electrones libres que migran a través de los espacios entre los átomos bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado. Aunque la propagación de energía es un proceso muy rápido, la tasa de deriva de los electrones individuales en los metales es solo del orden de unos pocos centímetros por segundo. En un metal o aleación superconductores, los electrones libres continúan fluyendo en ausencia de un campo eléctrico una vez que se han iniciado. En soluciones electrolíticas y gases ionizados, la corriente es transportada por iones tanto positivos como negativos. En los semiconductores, los portadores son el número limitado de electrones que pueden moverse libremente y los "huecos" que actúan como cargas positivas.

1.3.1.1. Absorción de plasma

La absorción de plasma, también conocida como bremsstrahlung inversa, implica la absorción de radiación electromagnética por los electrones e iones libres de un plasma. En este proceso, la energía que se absorbe se convierte en energía térmica y el plasma se calienta. Un ejemplo de esto ocurre en los reactores de fusión nuclear. Una reacción nuclear que combina núcleos en colisión de baja masa en elementos de masa moderada y libera una gran cantidad de energía en el proceso. La fusión nuclear es un proceso muy importante para la nucleosíntesis de los elementos y para la producción de energía en las estrellas, la bomba de hidrógeno y potencialmente en los reactores de energía termonuclear.

La fusión es la reacción nuclear primaria para núcleos con menos de aproximadamente 60 nucleones (protones y neutrones); es decir, los núcleos en los que la energía de enlace por nucleón generalmente aumenta al aumentar el número de nucleones.

Un gas de partículas cargadas y neutras que exhibe un comportamiento colectivo. Todos los gases se ionizan a temperaturas suficientemente altas, creando lo que se ha llamado un cuarto estado de la materia, junto con sólidos, líquidos y gases. Se ha estimado que más del 99% del universo se encuentra en estado de plasma. En la Tierra, los plasmas son mucho menos comunes. Los rayos son una manifestación natural familiar y las luces fluorescentes son una aplicación práctica. Las aplicaciones y estudios de plasma utilizan una enorme variedad de temperaturas, densidades y presiones neutras del plasma. Se extienden desde aplicaciones de procesamiento de plasma a temperaturas relativamente bajas (como grabado por plasma de chips semiconductores a baja presión o sopletes de corte por plasma a presión atmosférica) hasta estudios de fusión controlada a temperaturas muy altas.

1.3.1.2. Absorción de antena

Cuando la radiación electromagnética es absorbida por los electrones de conducción que se pueden mover libremente en una antena, empuja los electrones a lo largo de la antena, provocando una corriente eléctrica medible. Esto se conoce como absorción de antena o recepción de radio. La energía y la información absorbidas pueden luego ser detectadas y analizadas por un circuito eléctrico.

1.3.1.3. Ionización

La ionización implica la liberación de un electrón que estaba unido a un átomo o molécula pequeña. El átomo o molécula que queda pierde un electrón y por lo tanto se convierte en un ion positivo. A menudo, el electrón y el ion en estado libre reaccionan agresivamente con los átomos vecinos. Por esta razón, la ionización en los tejidos vivos puede provocar mutaciones, cáncer o enfermedad por radiación; la ionización de los materiales puede dañarlos. De las diversas frecuencias del espectro electromagnético, solo los rayos ultravioleta extremos, los rayos X y los rayos gamma tienen suficiente energía por fotón para ser ionizantes. Otros mecanismos además de la absorción de fotones pueden causar ionización. Por consiguiente, la ionización que resulta de la absorción de fotones a menudo se denomina fotoionización.

1.3.1.4. El efecto fotoeléctrico

La radiación electromagnética también puede liberar un electrón que está ligado a un sólido o una molécula grande. Dichos electrones están más débilmente unidos que los electrones que están dentro de átomos o moléculas pequeñas y, por lo tanto, pueden liberarse mediante radiación no ionizante, como la luz visible. Este proceso se conoce como efecto fotoeléctrico. Tenga en cuenta que el término efecto fotoeléctrico a veces se usa ampliamente para referirse a cualquier tipo de absorción de fotones. El efecto fotoeléctrico se utiliza en dispositivos como gafas de visión nocturna y tubos fotomultiplicadores. También es el paso clave en la fotosíntesis.

1.3.2. Absorción por partículas cargadas que permanecen unidas

Cuando la radiación no ionizante, como la luz visible, es absorbida por un electrón unido a un átomo o molécula pequeña, la radiación no puede dar al electrón la energía suficiente para liberarlo. En cambio, el electrón se excita a un estado atómico o molecular de mayor energía. La diferencia de potencial entre un estado atómico o molecular excitado y el estado fundamental. El término se usa más generalmente en relación con la excitación de electrones, pero se puede aplicar a estados vibratorios y rotacionales moleculares excitados.

1.3.2.1. Absorción disipativa

La absorción disipativa es la conversión de la energía de la radiación electromagnética absorbida en energía térmica, que calienta el objeto. Este es el tipo de absorción más común en la vida diaria. La luz que absorben los objetos cotidianos, como mesas y sillas, se convierte continuamente en energía térmica.

1.3.2.2. Transición de banda de energía

En los sólidos, un electrón que no está ligado profundamente dentro de un átomo o molécula existe en un estado deslocalizado dentro de una banda de energía. En muchas situaciones, la energía de un fotón absorbido puede dar a dicho electrón suficiente energía para pasar a otra banda de energía. En metales y semiconductores, las transiciones de bandas de energía se pueden controlar y medir fácilmente. Este es el principio operativo detrás de los paneles solares, películas fotográficas y cámaras digitales (Baird, 2019, pp.30-50).

1.3.2.3. Fluorescencia

En ciertos materiales, un electrón excitado a un estado atómico o molecular de mayor energía por absorción de fotones debe volver a su estado original a través de un estado intermedio. A medida que el electrón retrocede, emite fotones. Debido a que la ruta de retorno del electrón implica pasos de energía más pequeños, los fotones que emite tienen menor energía y, por lo tanto, menor frecuencia que los fotones originales que absorbió. Este proceso se conoce como fluorescencia. El tipo más común de fluorescencia ocurre cuando un material convierte la luz ultravioleta en luz visible, haciendo que el material parezca anormalmente brillante. Los ejemplos incluyen papel fluorescente y chalecos de seguridad (Baird, 2019, pp.30-50).

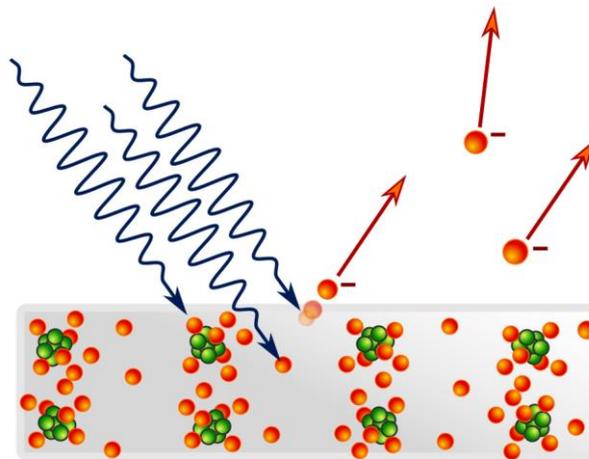


Figura 2-1. Fluorescencia

Realizado por: Baird, C. 2019

1.3.3. Generación de portadores de carga

Los grupos activos absorben la luz y son excitados formando pares electrón-hueco estrechamente unido y estable. Estos son capturados y disociados en zonas dadoras- aceptoras debido a la presencia de grupos funcionales polarizados capaces de dar lugar a separación de las cargas (Peña 2011, pp.1-10).

Los pares de huecos y electrones fotogenerados se someten a uno de los siguientes procesos; Muévase efectivamente hacia la superficie del semiconductor. Algunos se conservan en sitios defectuosos en la masa y / o en la superficie del semiconductor. Mientras que algunos se recombinan y emiten energía en forma de calor o fotones. Cuando un electrón cae de la banda de conducción en la banda de valencia, en un agujero, se produce un proceso de recombinación y desaparece un par de huecos de electrones. De la energía originada de la recombinación emerge un fotón de luz. Inversamente, cuando a un electrón de valencia se le da una energía igual o mayor que la brecha de energía se transfiere a la banda de conducción y un par electrón-hueco es

generado (KiarriI, 2017,pp.167-176).

Uno de los requisitos cruciales para un fotocatalizador potencial, polimérico o no, cumplir es la capacidad termodinámica de impulsar tanto la división del agua como el CO₂ semi-reacciones de la solución de fotorreducción. Este prerrequisito, al menos para coloidal fotocatalizadores, se traduce en la restricción de que los potenciales adiabáticos asociado con los portadores de carga, el potencial de ionización (PI) y el electrón afinidad (AE) por huecos y electrones respectivamente, y el estado excitado, IP * y EA *, en un material que se encuentra a caballo entre los de las semirreacciones de la solución, como se muestra en El conocimiento de estos potenciales es, por lo tanto, crucial cuando se trata de comprender la actividad de fotocatalizadores conocidos o desarrollo de nuevos. (Guiclion et al., 2017, pp. 1498-1506).

1.3.4. *Inyección de portadores de carga*

Es posible agregar portadores de carga mediante fotogeneradores externos que se adicionan al transportador de carga intrínseco. Estos fotogeneradores son generalmente colorantes que se dispersan en la matriz de polímero. Los portadores generados por el colorante tras la absorción de luz visible, se “inyectan” directamente en el polímero. Tanto el proceso de inyección, como el de fotogeneración y de transporte de carga dependen del campo eléctrico aplicado (Peña, 2011, pp.1-10).

1.3.5. *Transporte de portadores de carga*

La ionización bajo la influencia de la luz puede ser una fuente de energía que promueva la formación de portadores de carga libre en los semiconductores. Como los portadores libres surgen en este caso a expensas de la absorción directa de energía, la energía térmica de la red permanece prácticamente invariable. Al mismo tiempo, se rompe así el equilibrio térmico entre la celosía y los portadores de carga gratuita los electrones o huecos de conducción que no están en equilibrio termodinámico se denominan portadores de carga que no están en equilibrio (Shyshkin y Fedorenko, 2010, pp.185-195).

Los portadores de carga se mueven a través del sistema bajo la influencia de un campo eléctrico. El transporte de portadores se puede entender como un proceso de saltos (hopping mechanics) térmicamente activados, donde un hueco localizado en una zona salta a otra en presencia del campo eléctrico. El catión radical en movimiento puede aceptar un electrón de los grupos Cz neutros que se encuentran en la vecindad, y éste pasa a convertirse en un hueco (Peña, 2011, pp.1-10).

1.3.6. Recombinación

Las fuerzas coulómbicas causan, eventualmente, la recombinación de los electrones libres y los huecos en sitios en el circuito donde se den las condiciones. Este proceso compite con la generación de portadores de carga (Peña, 2011, pp.1-10).

1.3.7. Proceso de captura

Durante el tránsito, los portadores no se mueven a una velocidad uniforme, sino que residen la mayor parte del tiempo en estados localizados (trampas) y sólo ocasionalmente son liberados de estas trampas para moverse en la dirección del campo. Estas trampas pueden describirse como superficiales o profundas, aunque estos términos son relativos y están relacionados con el tiempo de liberación de los portadores. Las trampas superficiales son aquellas en las que los portadores de carga son liberados en el tiempo que dura un experimento. El proceso de captura es responsable de la movilidad extremadamente baja de los portadores de carga en la mayoría de los polímeros (Peña, 2011, pp.1-10).

1.4. Técnicas para caracterización de materiales fotovoltaicos

1.4.1. Fotoconductividad en estado estacionario

En la fotoconductividad en estado estacionario (SSPC) se utiliza una fuente de luz monocromática constante para generar un exceso de densidades iguales de electrones libres y huecos, $\Delta n = \Delta p$, que conducen a un cambio en la conductividad donde q es la carga electrónica y Δn y Δp son las movilidades de electrones y huecos respectivamente (Jiménez, 2020, pp.1-17). σ_{ph} se denomina fotoconductividad en estado estacionario. La disposición experimental básica se ilustra en la Figura 3-1 donde L y A son la longitud y el área de la sección transversal de la muestra.

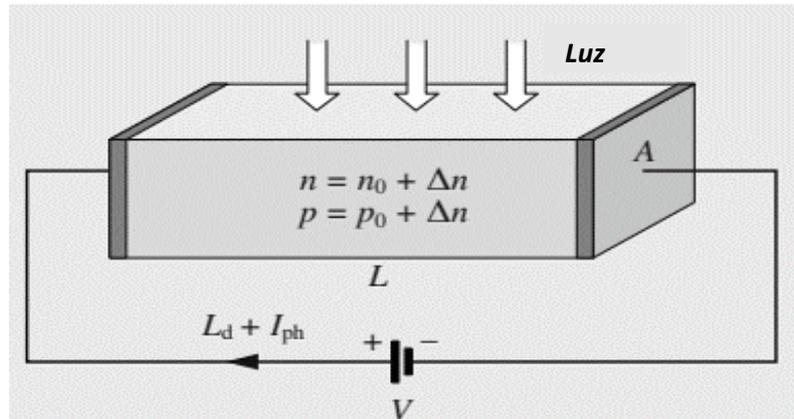


Figura 3-1: Disposición para la medición de la fotoconductividad

Realizado por: Xu, S. 2019

Cuando se aplica una diferencia de potencial V , se registra una fotocorriente I_{ph} . La fotoconductividad correspondiente $\sigma_{ph} = I_{ph} / (AF)$, donde $F = V / L$ es el campo eléctrico aplicado. Las superficies de los extremos de la muestra normalmente están en contacto con electrodos metálicos. Sin embargo, para películas delgadas en lugar de muestras a granel, los electrodos coplanares en forma de almohadillas de contacto se preparan típicamente por evaporación a través de una máscara de sombra sobre la superficie de la película, o se depositan en primer lugar sobre el sustrato, que luego se recubre con el fotoconductor (Iaseniuc y Iovu, 2020:pp. 1757-1763).

Se pueden usar electrodos interdigitados del tipo que se muestra en la Figura 4-1 para aumentar la fotocorriente si es necesario. Los contactos de este tipo de muestra se eligen para que sean óhmicos. La corriente medida de esta manera se denomina fotocorriente secundaria, ya que surge del reabastecimiento de portadores fotogenerados que salen de la muestra para mantener la neutralidad de carga.

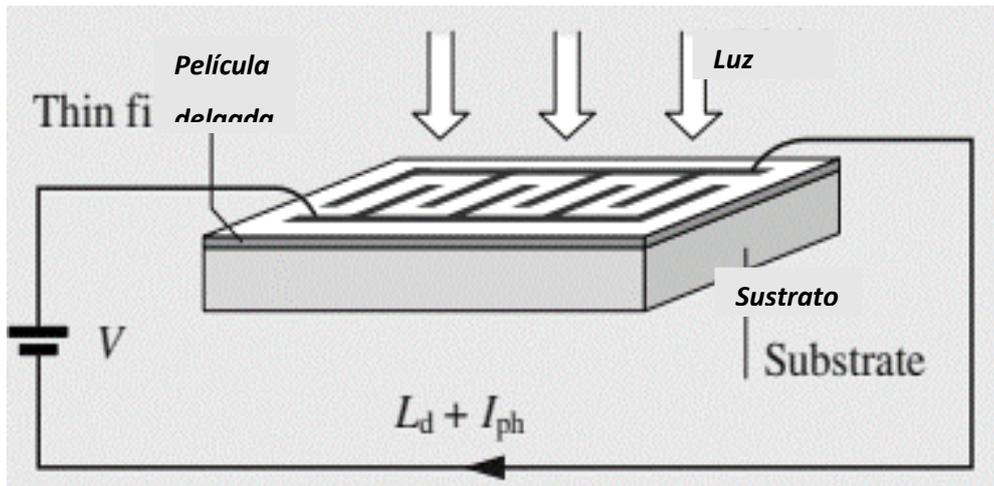


Figura 4-1. Ejemplo de configuración de electrodos interdigitados para un delgado
Realizado por: Xu, S. 2019

Se debe tener en cuenta que la tasa de flujo de los portadores alrededor del circuito puede ser muchas veces mayor que la tasa de flujo de los fotones, por un factor idealmente igual a la relación entre la vida útil del portador y su tiempo de tránsito a través de la muestra, $\tau / (L^2 / (\mu V))$ (Yang, 2021, pp.1303-1309). Esto debe distinguirse de la fotocorriente primaria que sale de una celda solar, por ejemplo, donde ambos flujos son idealmente iguales. Una fracción significativa de portadores fotogenerados puede quedar inmovilizada atrapando en estados localizados en el semiconductor (colas de banda y / o defectos) de manera que no todas las partes de Δn y Δp contribuyen por igual a la fotoconductividad.

1.4.2. Fotoconductividad transitoria (TPC)

Durante la fotoconductividad transitoria (TPC), los portadores libres se excitan en las bandas de una muestra de semiconductor en el tiempo $t = 0$ mediante un pulso corto de luz por encima del espacio absorbida uniformemente (Brown, 2020, p. 20). Dado que las distribuciones de los portadores están en equilibrio térmico al comienzo del experimento, los sitios de captura de electrones por encima de E_F y de huecos por debajo de E_F están vacíos, y los portadores fotogenerados no están excluidos de ninguno de esos sitios. La captura depende de la densidad de estados, una alta densidad resulta en una tasa de captura rápida. Cuando un portador queda atrapado, se inmoviliza hasta que se emite algún tiempo después, en un proceso activado térmicamente, siendo la profundidad de la trampa la energía de activación (Xu, 2019, p.265).

A medida que los estados menos profundos liberan antes los portadores atrapados, la retracción conducirá a una mayor ocupación de los estados más profundos a medida que avanza el tiempo, y la consiguiente reducción de la densidad de portadores libres. Esta termalización de la carga a energías progresivamente más profundas continúa hasta que se establece la recombinación,

momento en el que la carga se elimina. Esto se manifiesta como una caída más pronunciada en la corriente medida, a menudo a veces > 1 s a 300 K. Sin embargo, esto no corresponde al tiempo de recombinación del portador libre, ya que en promedio los portadores pasan mucho más tiempo en trampas que en la banda.

La TPC se lleva a cabo en modo de fotocorriente secundaria, haciendo uso de la ganancia fotoconductor. La corriente, medida en un rango de tiempo lo más amplio posible, contendrá información sobre la densidad de estados localizados y su profundidad. En breve se considerará cómo esa información podría extraerse de manera confiable para obtener la densidad de estados versus la energía.

En los materiales fotoconductores, la recombinación se encuentra mediada por estados en la banda prohibida. La presencia de los niveles de atrapamiento discretos, o un rango de energía estrecho, conduce a fotocorrientes activadas de forma térmicamente, con la energía de activación indicando las posiciones energéticas de las trampas. La energía de activación de fotocorriente positiva en el régimen de recombinación monomolecular corresponde a la energía por encima del nivel de Fermi de un centro similar al donante, mientras que un valor de energía de activación negativa en la región bimolecular corresponde a la energía por encima del borde de la banda de valencia de un aceptor -como centro (Reynolds et al., 2017:p. 265).

La figura 5-1 ilustra este comportamiento de fotocorriente para el As_2Se_3 amorfo. Esto es característico de los vidrios calcogenuros, donde los defectos con carga intrínseca actúan como centros de recombinación. Las mediciones de SSPC de este tipo pueden, por tanto, determinar el mecanismo de recombinación y la posición energética de defectos discretos.

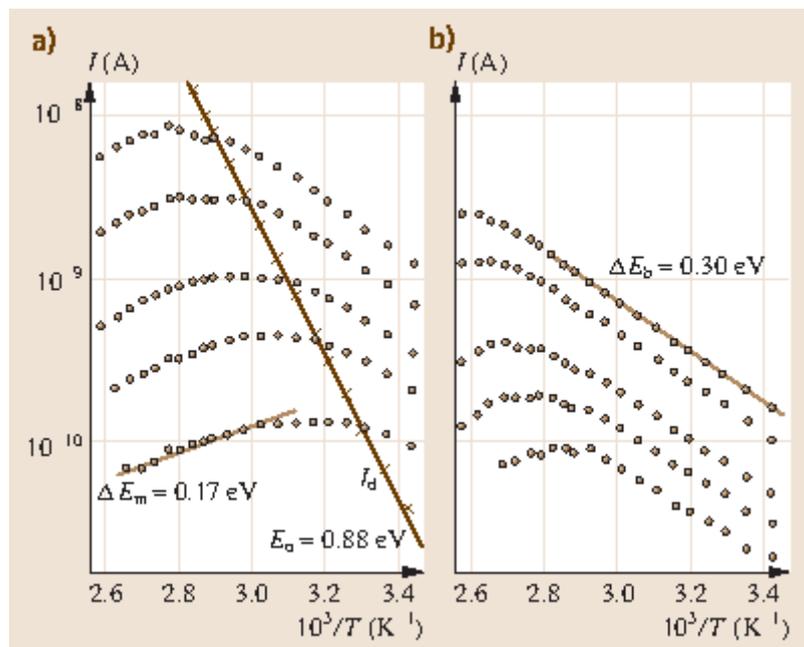


Figura 5-1. Comportamiento de fotocorriente

Realizado por: Reynolds, S. 2017

La dependencia de la temperatura de la SSPC en silicio amorfo (a-Si: H). No presenta una energía de activación definido, debido a la presencia de un conjunto más distribuido y complejo de trampas incluyendo colas de la banda y defectos cargados y neutros. En la figura 5-1 a se muestra esquemáticamente una densidad electrónica simplificada de estados (DOS)

Siempre que el DOS en la banda prohibida de un fotoconductor consista en una distribución de trampas, es útil definir niveles de cuasi-Fermi (QFL). En equilibrio térmico, los QFL y el nivel de Fermi coinciden. Bajo iluminación, los QFL se separan del nivel de equilibrio de Fermi de manera que definen la ocupación de estados por separado para electrones y para huecos.

Cambiar la posición del nivel de equilibrio de Fermi por dopaje también modifica el comportamiento de la fotoconductividad. El efecto del dopaje de tipo n sobre el SSPC de a-Si: H ha sido estudiado por varios trabajadores, incluidos Main et al. Llevaron a cabo mediciones de fotoconductividad en un amplio rango de intensidad y temperatura, y observaron que (i) en ciertos rangos de temperatura, alrededor de 200 K, se podían observar valores de γ tan bajos como 0.4, y (ii) estos valores bajos de γ persistían incluso cuando la fotocorriente estaba más de dos órdenes de magnitud por debajo de la corriente oscura(Reynolds et al., 2017:p.265).

Este apartado ha abordado en su mayor parte cómo se puede utilizar la fotoconductividad como herramienta en la detección, identificación y medición de las propiedades electrónicas y / u ópticas de los fotoconductores. Se presentan breves descripciones de tres técnicas, relacionadas directamente con la fotoconductividad, que los lectores pueden encontrar relevantes para sus campos de interés.

1.4.3. Fotovoltaje superficial (SPV)

Esta técnica implica la detección de cambios en el potencial de contacto entre un semiconductor y un electrodo (sonda Kelvin) colocado cerca de su superficie, bajo diferentes condiciones de iluminación. Se forma una región de carga espacial en la masa cerca de la superficie, equilibrada por la carga que reside en los estados de la superficie. La luz incidente en el semiconductor genera carga gratuita, que se redistribuye debajo del campo incorporado. La distribución de carga en estado estable es sensible a la longitud de difusión ambipolar del semiconductor L , que a su vez se refleja en el SPV (Kronik y Shapira, 1999:pp. 1-206).

La medición de L implica escalonar la longitud de onda de la luz incidente y ajustar su intensidad después de cada paso para mantener un SPV constante. Cada longitud de onda corresponde a una profundidad de absorción específica $1/\alpha$ en el semiconductor, y el valor de L se obtiene como la intersección de un gráfico de intensidad de luz versus profundidad de absorción. La SPV es una técnica popular para medir L , particularmente en materiales a granel, aunque se afirma que surgen inexactitudes cuando se usa en películas delgadas. El SPV es versátil y se puede configurar para medir la densidad del estado de la superficie y las longitudes de separación de carga en materiales

como grupos moleculares y puntos cuánticos (Melo, 2018, pp.805-810).

También forma la base de una microscopía de potencial de superficie (microscopía de fuerza de sonda Kelvin) cuando se combina con un sistema AFM. La fuerza electrostática entre la punta y el semiconductor se ajusta a cero mediante la aplicación de un potencial de polarización, cuyo valor se representa en función de la posición para producir un mapa de superficie.

1.4.4. *Recombinación dependiente del giro*

La recombinación está influenciada tanto por las propiedades del material como por parámetros externos. Una variable externa adicional, junto con la temperatura y la intensidad de la luz, es proporcionada por la posibilidad de alterar la cinética de recombinación mediante la inversión de giro. Para que ocurra un evento de recombinación, tanto el electrón como el hueco deben formar un estado de espín singlete (Stutzmann et al., 2000:pp. 1-22). Se excluye la recombinación a través del estado triplete más probable, pero se puede habilitar volteando uno de los espines por resonancia de espín. Así, al iluminar una muestra fotoconductor y escanear en un sistema de resonancia de espín de electrones (ESR), la condición de resonancia puede detectarse como una disminución de la fotoconductividad.

Este método de detección, denominado resonancia magnética detectada eléctricamente o EDMR, son órdenes de magnitud más sensible que un experimento de ESR estándar, que mide la potencia absorbida mediante un puente de microondas. Cuando se combina con valores de g medidos y cambios de conductividad, la fotoconductividad dependiente de espín proporciona información detallada sobre las vías de recombinación y puede aplicarse a dispositivos como células solares y LED, así como a muestras de materiales (Reynolds, 2017, p.1).

1.4.5. *Conductividad de microondas de resolución temporal (TRMC)*

El TRMC consiste en medir los cambios en la reflectividad de microondas de un fotoconductor cuando se crean portadores fotogenerados en exceso por un breve destello de luz. La reflectividad es proporcional a la densidad del portador libre, lo que produce una desintegración transitoria en muchos órdenes de magnitud de tiempo similar al método TPC (Pillai, 2019,p.20).

Una ventaja principal es que se trata de una técnica sin contacto, que no requiere deposición de electrodos sobre la muestra, por lo que se puede utilizar con polvos, agregados o materiales nanoporosos difíciles o imposibles de medir mediante TPC (Savenije, 2020,pp.10-17). Esto ha llevado a la adopción de TRMC cuando se trabaja con materiales de gran superficie, como el óxido de titanio (TiO₂) que se utiliza en fotocatalisis y células solares sensibilizadas con colorante, donde las interacciones de la superficie son de primordial importancia.

1.5. Efectos fotográficos persistentes en semiconductores

1.5.1. Observación de fotoconductividad persistente

La fotoconductividad persistente (PPC), es el fenómeno en el que la respuesta de fotoconductividad del semiconductor puede persistir durante mucho tiempo después de que se apaga la iluminación, está asociada con defectos cristalinos. Se ha observado en muchos semiconductores, incluidos el silicio (Si), azufre, óxidos y calcogenuros (Vega K. , 2019,pp.4-16).

Esta importante propiedad tiene implicaciones en una serie de aplicaciones optoelectrónicas, incluidas las células solares, los dispositivos optoelectrónicos regrabables y los fotodetectores. Entre estos materiales, el CdS ha sido ampliamente reconocido como un excelente fotoconductor con una gran fotorrespuesta. Nair sintetizó películas de CdS utilizando trietanolamina (TEA) como agente complejante y tiourea como fuente de azufre. La fotosensibilidad informada, caracterizada por una relación de corriente de luz a oscuridad, alcanza 10^6 bajo iluminación AM2 para muestras recién preparadas y 10^7 después de que estas muestras se hayan almacenado durante varias horas a 50°C (Ko, 2017, p.13).

La razón de este aumento permanece indeterminada, pero se sugiere que se debe al oxígeno quimisorbido en la superficie y los límites de los granos que sirven como centros de recombinación adicionales, lo cual es consistente con los hallazgos de (Lee, 2021: p. 104). El mismo grupo también logró películas con aproximadamente 10^9 fotosensibilidad bajo luz AM1 y un tiempo de descomposición de 13 h / década utilizando el mismo método de síntesis anterior, pero variando ligeramente la relación entre la fuente de cadmio y azufre. A pesar de la cantidad de trabajo sobre el efecto PPC en CdS, nunca se ha estudiado sistemáticamente para confirmar la fuente de PPC o el mecanismo subyacente real.

1.6. Caracterización de polímeros fotoconductores

1.6.1. Espectroscopía de fotocorriente modulada

La espectroscopía de fotocorrientes moduladas (MPS, Modulated Photocurrent Spectroscopy) es una espectroscopía de densidad de estados, introducida por (Oheda,1981, pp. 6693-6700) que se utiliza para sondear la distribución energética de los estados de trampa desocupados en la brecha de energía de un fotoconductor. MPC implica la iluminación de una muestra de fotoconductor coplanar como se muestra en la Figura 6-1 con una fuente de luz cuasimonocromática por encima del espacio, que está modulada en amplitud, típicamente dentro del rango de frecuencia 0: 1 Hz – 100 kHz.

Un LED es una fuente muy adecuada, aunque también se puede usar luz cortada de un monocromador. Se aplica una polarización de voltaje a la muestra y se mide la amplitud y la fase de la fotocorriente en relación con la excitación frente a la frecuencia de modulación utilizando un detector sensible a la fase (amplificador de bloqueo). Generalmente, la fotocorriente se retrasa con respecto a la luz, aunque hay casos en los que puede producirse un adelanto de fase genuino.

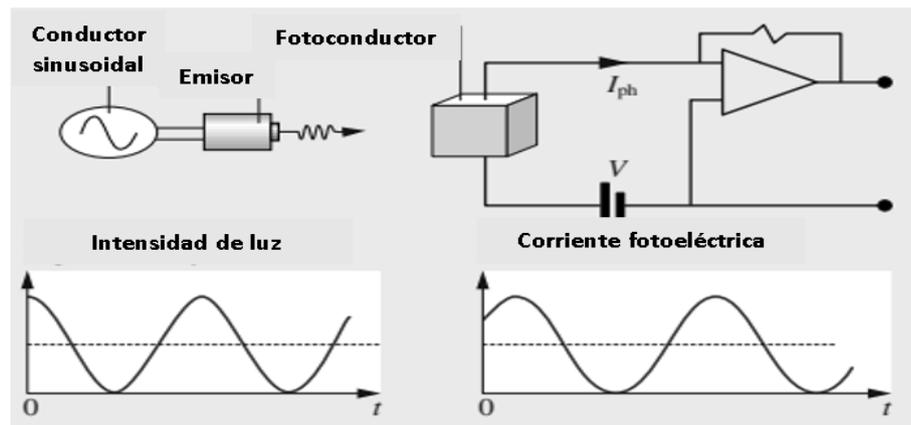


Figura 6-1. Diagrama esquemático de un sistema de medición MPC

Realizado por: Reynolds, S. 2017

Tanto la amplitud como la fase son sensibles a los procesos de transporte que tienen lugar, y ambas son útiles para calcular la densidad de estados (DE) frente a la energía de los electrones. Es importante señalar que los estados examinados directamente por este experimento son estados trampa vacía que capturan a los portadores mayoritarios. Esto es diferente al CPM, donde la mayoría de los portadores son expulsados de los estados de trampa llenos por absorción de un fotón subgap.

Es esencial algún medio de calibrar con precisión la amplitud y la fase de la luz en la muestra, ya que los cambios de fase introducidos por la electrónica de medición deben eliminarse para obtener resultados precisos y consistentes. Esto se puede lograr conectando un fotodiodo de clavija rápida a la entrada del preamplificador de corriente, además de la muestra. Se lleva a cabo un escaneo de calibración, con la fuente de luz incidente en el diodo pin y la muestra bloqueada a la luz, pero aún conectada eléctricamente al preamplificador (Gao et al., 2016:pp. 285-293).

Luego, el experimento de MPC se realiza bloqueando el diodo pin y dirigiendo la luz hacia la muestra. Pueden surgir complicaciones a alta frecuencia, ya que la alimentación del campo eléctrico de la electrónica de accionamiento de modulación puede filtrarse al preamplificador por acoplamiento capacitivo. Esto se manifiesta como una clara tendencia de señal líder en fase.

Otra fuente de señales falsas que ingresan al sistema es la presencia de bucles de tierra. Generalmente, es beneficioso aislar ópticamente la referencia de fase o desactivar el blindaje de

tierra en el cable coaxial. Un obstáculo adicional lo presenta la corriente oscura. El acoplamiento de CA de los instrumentos introducirá un cable de fase parásita, especialmente a baja frecuencia. Por lo tanto, cuando se miden pequeñas fotocorrientes por debajo de 10 Hz en modo CC, puede ser necesario introducir una corriente de compensación de CC estable en la entrada del preamplificador para cancelar la corriente oscura y evitar así la sobrecarga de la señal (Gao et al., 2016:pp. 285-293).

1.7. Espectroscopía de fluorescencia

Los instrumentos de espectroscopía de fluorescencia iluminan las muestras con luz de longitud de onda corta en el visible o ultravioleta regiones de longitud de onda. Los electrones de un átomo de muestra pueden absorber una parte de la luz incidente y moverse hacia arriba niveles de energía. A medida que ese nivel de energía vacío se rellena con otro electrón, el átomo puede emitir una energía menor / mayor fotón de luz de longitud de onda que es característico de la muestra estructura de la molécula. La luz emitida se llama fluorescencia (American Society of Testing and Materials, 2000,p60).

Algunos de los usos de Espectrografía fluorescente (EF) se describieron en la sección previa. La instrumentación EF tiende a ser más compleja que los sistemas UV, con monocromadores tanto en iluminación como en trayectorias del haz del detector y, a veces, detectores duales. Estos a su vez comprenden características necesarias para separar la iluminación bastante intensa rayos dispersan la radiación de los a veces más débiles en fluorescencia molecular (Eyring y Martin, 2013:p 25).

1.8. Espectroscopía ultravioleta (EUV)

La espectroscopía ultravioleta requiere ser algo más costosa ya que utiliza porta muestras de vidrio de cuarzo y ópticos de cuarzo o componentes de fluoruro, así como una fuente de luz diferente a la de espectroscopía visible instrumental, pero se ha vuelto igualmente accesible y fácil de usar. La técnica se aplica a la evaluación de muestras que pueden contener compuestos aromáticos como derivados del benceno o a una amplia variedad de compuestos absorbentes de UV que son se utiliza para proteger revestimientos pintados, piel humana y tejidos.

Otros compuestos que se utilizan para blanquear fibras y tejidos produciendo fluorescencia azul-blanca bajo iluminación exterior se llaman iluminadores fluorescentes y también pueden ser analizados mediante espectroscopía de fluorescencia, Espectroscopía ultravioleta (UVS) y UV (Miranda et al, 2015:pp.20-35). UVS también se utiliza para detectar y cuantificar compuestos que se separan de mezclas complejas durante la cromatografía líquida (CL). Este método puede separar y detectar compuestos que se destruyen fácilmente con otras técnicas. La CL también se aplica a

la evaluación de muestras ambientales. para la contaminación, mezclas de medicamentos que incluyen esteroides, alimentos, mezclas de colorantes y agentes aromatizantes complejos.

1.9. Espectroscopía Infrarroja (EIR)

La EIR es el análisis de la luz infrarroja que interactúa con una molécula. Esto se puede analizar de tres formas midiendo la absorción, la emisión y la reflexión. El uso principal de esta técnica es en química orgánica e inorgánica. Los químicos lo utilizan para determinar grupos funcionales en moléculas. La EIR mide las vibraciones de los átomos, y en base a esto es posible determinar los grupos funcionales. Generalmente, los enlaces más fuertes y los átomos ligeros vibrarán a una alta frecuencia de estiramiento (número de onda) (Thompson, 2018, p.17).

1.9.1. Espectroscopía de absorción infrarroja

La espectroscopía infrarroja (EIN) es el estudio o análisis de cómo los enlaces entre los átomos de una molécula absorben energía, vibrar o doblar (deformar) de manera muy similar a los resortes. La energía necesaria para causar movimientos en estos enlaces es bastante específica y proporciona información sobre cómo los átomos y las combinaciones de átomos se asocian en una molécula (Garcia et al, 2013,p.60-80). Hay algunos requisitos básicos para el EIN de absorción. Uno es que se debe asociar una vibración o deformación con una separación de carga permanente o dipolo eléctrico si va a ser detectado. Vibraciones entre átomos en moléculas grupos como el anillo de azufre de ocho átomos en azufre puro no será detectable. En comparación, el movimiento de un. El enlace carbono-hidrógeno generalmente se detecta fácilmente. La limitación radica en el hecho de que los componentes de una mezcla deben estar presentes en más de aproximadamente 1 a 5% si van a ser detectable (Eyring y Martin, 2013:p 25).

Por último, un instrumento de infrarrojos debe poder "ver" el elemento las ondas de radiación no se ven afectadas por partículas o muestras que son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la radiación. Uno podría notar que una pelota de playa o una gaviota tiene poco efecto en una ola del océano y un turista de pie en la orilla contando olas no sabría si alguno de los esos artículos flotaba a cien metros de la costa. Cuando un científico analiza la radiación que ha pasado por una muestra, él o ella generalmente no pueden detectar la muestra si la radiación iluminadora no interactuó con él. Mucho de la información importante en un espectro IR reside en la región de 10 a 40 μm o de 10,000 a 40,000 nm del espectro de luz. Estos hechos generalmente limitan el análisis del IRS a muestras que tienen al menos 10 μm de tamaño y se mencionan aquí porque no suelen ser un factor en otros tipos de espectroscopía (American Society of Testing and Materials, 2000,p.60).

Los espectros infrarrojos se pueden producir a partir de muestras fotografiado por microscopios

a distancias de menos de un milímetro o por telescopios a distancias de un kilómetro o más. Eso se utiliza para analizar muestras que van desde cristales de fármacos y capas delgadas de pintura a los contaminantes atmosféricos.

1.9.2. Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman (RS) se puede considerar una segunda forma de análisis infrarrojo que ilumina las muestras con luz de longitud de onda corta (no infrarroja) y luego analiza la luz que se dispersa en ángulo recto con la iluminación (Ramos et al., 2013, pp. 83-95). Un láser generalmente proporciona iluminación y las moléculas del rayo láser absorben la luz a medida que vibran y cambian la longitud de onda de algunas de las luces dispersas por longitudes de onda comparables a la absorción de bandas infrarrojas. Estos se conocen como cambios Raman o espectros Raman. Estos espectros no deben confundirse con la fluorescencia, espectros que son producidos por un proceso diferente. Esta forma de EIR tiene la ventaja de ser capaz de analizar moléculas simétricas y enlaces que no exhiben separaciones de carga permanente o dipolos y es bastante complementario al EIR. También permite el análisis de cambios Raman y espectros IR que pueden estar fuera del rango de detección de un detector de infrarrojos en particular.

1.10. Polímero Fullerenos

1.10.1. Aplicaciones

1.10.1.1. Fotovoltaica

La conductividad en los semiconductores basados en carbono generalmente se observa debido a la conjugación y alternancia de enlaces simples y dobles entre los átomos de carbono (Hou, 2009). El estado fundamental del átomo de carbono es $1s^2 2s^2 2p^2$. La superposición de la función de onda del electrón conduce a la deslocalización de las cargas. Esta deslocalización de carga es responsable de la conductividad en compuestos orgánicos. El orbital molecular ocupado más alto (HOMO) y el orbital molecular desocupado más bajo (LUMO) están separados por una banda prohibida (Tang, 1986, pp. 183-185). La transición entre HOMO y LUMO es excitada por la luz en el espectro visible. Tanto las propiedades semiconductoras como las de absorción de luz hacen que los compuestos / polímeros conjugados sean una opción prometedora para la energía fotovoltaica. La energía de unión en los semiconductores orgánicos suele estar entre 0,5 y 1 eV. Las células solares orgánicas de una sola capa poseen eficiencias de conversión de energía inferiores al 1% para el espectro solar. En los dispositivos bicapa, los excitones singlete fotogenerados se difunden

dentro del donante hacia la interfaz plana del segundo material (aceptor). Un ejemplo bien conocido de material aceptor de electrones es el buckminsterfullereno (C60). El interno del material aceptor proporciona la energía necesaria para que se separe el excitón singlete.

1.10.1.2. Sensor óptico

El fullereno (C60 y C70), las metaloporfirinas (Pt^{2+} , Pd^{2+}), los pirenos y los complejos de metales de transición (Ru^{2+} , Os^{2+}) se utilizan como colorantes orgánicos para sensores ópticos de oxígeno (Amao, 2003, pp.1-12). Los sensores ópticos de oxígeno desarrollan polímeros y sondas colorantes para la detección de oxígeno. La mezcla de poli (2-metoxi-5-(20-etilhexiloxi)-1,4-fenilenvinileno) (MEH-PPV): fullereno-C60 y p-Si se utilizó para formar un sensor óptico. La altura de la barrera, el factor de idealidad del diodo, la resistencia en serie y la resistencia en derivación eran 0,75 eV, 1,36, $6,26 \times 10^5 \Omega$, $1,40 \times 10^{10} \Omega$, respectivamente, a partir de la medición característica I – V en la oscuridad. Se mide que la densidad del estado de la interfaz y la constante de tiempo del diodo eran $2,55 \times 10^{11} eV - 1 cm - 2$ y $1,81 \times 10^{-6} s$, respectivamente. La sensibilidad de la fotoconductividad y los valores de expansividad del diodo fueron $8.16 \times 10^{-6} S m / W$ y $1.63 \times 10^{-2} A / W$, respectivamente. El diodo p-Si / C60: MEH-PPV muestra un comportamiento fotovoltaico con una tensión máxima en circuito abierto V_{oc} de 130 mV y una corriente de cortocircuito I_{sc} de 24,5 nA. Los transistores de efecto de campo orgánicos fotosensibles (photofet) basados en mezclas conjugadas de polímero / fullereno en estado sólido se utilizan como capa semiconductor activa y poli-vinil-alcohol (PVA) o diviniltetrametildisiloxano-bis (benzociclobuteno) (BCB) se emplean como dieléctricos de puerta (Yakuphanoglu, 2008, pp. 383-389).

Los dispositivos fabricados con PVA como aislante de puerta revelan una saturación inducida por voltaje de puerta tras la iluminación, pero baja foto estabilidad. Por otro lado, los dispositivos fabricados con BCB como aislante de puerta muestran amplificación de transistor en una amplia gama de intensidades de iluminación.

1.10.1.3. Sensor de temperatura

Estudia las sensibilidades térmicas de los nanocompuestos en términos de la eficiencia de extinción de la fluorescencia de C60. Se prepara dos derivados: pireno-poli (N-isopropilacrilamida) -fullereno (Pyr-PNIPAM-C60) que tiene Pyr y C60 unidos a cada extremo de la cadena de PNIPAM, y el pireno-poli (N-isopropilacrilamida- metacrilato de co-fullereniletilo) (Pyr-P (NIPAM-co-C60)) que tiene Pyr unido a un extremo de la cadena de PNIPAM y dos C60 unidos a PNIPAM. Ambos compuestos exhiben el mismo cambio conformacional de espiral a glóbulo (Hong et al., 2009: pp. 2756-2761).

La eficiencia de extinción de Pyr-P (NIPAM-co-C60) es más alta que Pyr-PNIPAM-C60, porque Pyr-P (NIPAN-co-C60) tiene más C60 ubicado más cerca de Pyr que Pyr-PNIPAM-C60. Estos polímeros termosensibles basados en C60 revelan un comportamiento de encendido y apagado bien definido con un pequeño cambio de temperatura. La poli (N-isopropil-acrilamida) (PNIPAM) es un polímero sensible a la temperatura porque puede sufrir una transición de fase reversible e inducida por la temperatura única a una temperatura de solución crítica más baja en agua (Koopmans y Ritter, 2007, pp. 3502-3503). Este tipo de sensores de temperatura se ha utilizado ampliamente en dispositivos ópticos / electrónicos, así como en aplicaciones biomédicas.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Metodología empleada

Se realizó una revisión de manera sistemática en los sitios web de revistas académicas, a través del motor de búsqueda de contenido y bibliografía científico-académica llamado Google Académico. La metodología aplicada es de tipo documental y bibliográfica, dicha metodología se aplicó en todos los capítulos del presente trabajo, en donde se diferencia la aplicación de criterios de inclusión de investigaciones científicas referentes al tema de los apartados mencionados.

Así mismo, la estrategia de búsqueda se realizó de manera amplia y sostenida para garantizar que no se excluyan trabajos relevantes acerca de la caracterización de los materiales fotoconductores. Durante el proceso de búsqueda de información se usaron términos con relación al tema central, como "fotoconductividad", "materiales fotoconductores", "método de la fotocorriente constante", entre otros términos. A medida que continuaba la investigación se determinaron nuevos términos a la búsqueda, dichos términos comprendían temas más específicos y que se relacionaban de igual manera, a los temas principales de búsqueda y al tema central, es así como se incluyeron "caracterización de elementos fotoconductores" "materiales compuestos de foto sensibilizadores" e "fotoconductividad híbrida".

La fase inicial de la búsqueda de información comprendió la revisión de trabajos publicados durante los últimos 5 años, puesto que el tema relacionado al descubrimiento de nuevos materiales fotoconductores ha presentado importantes avances en la actualidad. Se tomaron en cuenta artículos completos con ensayos controlados, escritos en cualquier idioma y donde apliquen el uso técnicas para la caracterización de materiales fotoconductores y que aporten al desarrollo de nuevas tecnologías.

Los artículos retenidos, posterior a la revisión de las investigaciones, fueron analizados detalladamente mediante el uso de una tabla de evidencia para dejar ver las características y resultados más relevantes del estudio. En función de los objetivos perseguidos por la investigación la tabla incluye: título de la publicación, técnica empleada, materiales utilizados y principales resultados.

Para alcanzar este estado de la técnica, se revisaron los trabajos de investigación sobre la aplicación de técnicas experimentales para determinar materiales fotoconductores. En consecuencia, se han incluido artículos y estudios de investigación relacionados con la aplicación tecnológica de estos materiales. Se excluyen las investigaciones con una fecha de publicación previa al año 2017.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se procede a presentar los resultados que se obtuvieron a través de la revisión sistemática sobre las técnicas experimentales en la caracterización de materiales fotoconductores. Primeramente, se presenta un resumen en la tabla de algunas publicaciones que emplearon dichas técnicas en diferentes materiales, seguidamente se desarrolló de forma más extendida un estado del arte sobre el tema en cuestión.

Tabla 1-3: Algunas técnicas experimentales para caracterizar materiales fotoconductores

Autor	Publicación	Técnica	Materiales
(Arais, 2017)	Preparación y caracterización de películas delgadas de a-Si: H y a-SiC: H con clavija separada.	Método de fotocorriente constante CPM .	Películas delgadas de a-Si: H y a-SiC.
(Bidiville et al, 2017)	Investigación de interfaces y estados localizados a granel en celdas solares a-Si: H.	Espectroscopía de fotocorriente por transformada de Fourier FTPS .	Celdas solares a-Si: H.
(Veldhuizen et al, 2017)	Evaluación comparativa de materiales fotoactivos de película delgada mediante una rejilla fotoportadora de estado estable inducida por láser.	Método de rejilla fotoportadora de estado estacionario SSPG .	Materiales fotoactivos de película delgada.
Nojima et al (2019)	Espectroscopía de fotocorriente modulada para la determinación de la movilidad de electrones y huecos en celdas solares orgánicas de trabajo.	Espectroscopía de fotocorriente modulada (MPC) .	Celdas solares orgánicas.

Kalkan (2018)	El efecto de los adsorbatos sobre la estabilidad eléctrica del grafeno estudiado por espectroscopía de fotocorriente transitoria.	Espectroscopía de fotocorriente transitoria (TPC) .	Grafeno.
Kasap (2019)	Correcciones a la eficiencia de la colección de Hecht en detectores fotoconductores bajo señales grandes: campo eléctrico no uniforme debido a la deriva y portadores unipolares atrapados.	Tiempo de vuelo (TOF) .	X
ZU et al. (2019)	Desentrañar las propiedades electrónicas de los perovskitas de haluro de plomo con fotovoltaje superficial en estudios de fotoemisión.	Espectroscopía de fotoelectrones ultravioleta (UPS) .	Perovskitas de haluro de plomo.
Labram (2017)	Recombinación a alta densidad de portadores en yoduro de plomo de metilamonio estudiada usando conductividad de microondas resuelta en el tiempo.	Conductividad de microondas de resolución temporal (TRMC)	Perovskitas de haluro híbrido, yoduro de metilamonio y plomo.
Bernardini et al (2020)	Espectroscopía Raman y degradación inducida por láser de gruesatélite y ramsdellita, dos materiales catódicos de interés tecnológico.	Espectroscopía Raman.	Ramsdellita.

Realizado por: Arambulo Almendariz. Cristian, 2021.



Gráfico 1-3. Técnicas en la actualidad

Elaborado por: Arambulo, C.2021

El gráfico 1-3 ilustra algunas de las técnicas que más se han utilizado para la caracterización de materiales fotoconductores a partir del año 2017. Se destaca la espectroscopía de fotocorriente por transformada de Fourier FTPS, seguida por la espectroscopía infrarroja y la espectroscopía de Raman como técnicas más utilizadas. Estas son algunas de las técnicas utilizadas para la caracterización de materiales, sin embargo, existen muchas técnicas que se vienen desarrollando y ofrecen una alternativa a la caracterización de diversos materiales, así como a la consecución de mejores y más específicos resultados. En este sentido, se presenta una descripción de diversas técnicas con mención en algunos estudios que las han empleado en la caracterización de diversos materiales.

3.1. Técnicas

En el presente apartado, se abordó las técnicas más conocidas y nuevas técnicas para caracterizar materiales fotoconductores. Es importante conocer cada técnica, ya que da una idea focalizada en cómo puede beneficiar a futuras investigaciones, dado que en diferentes ramas del conocimiento se emplea aquello para detectar ciertas cualidades de los materiales de fotoconducción.

3.1.1. Método de fotocorriente constante (CPM)

El método de fotocorriente constante (CPM) es un desarrollo simple pero importante de la medición básica de un solo haz descrita. Se utiliza para determinar el coeficiente de absorción óptica α (E ph) de los semiconductores de película fina en un rango muy amplio (típicamente 0,1-10 5 cm $^{-1}$) en función de la energía del fotón E ph. En CPM, la fotocorriente se mantiene constante ajustando continuamente la intensidad de la luz mientras se escanea E ph en todo el espectro. Una fotocorriente constante implica que los niveles de cuasi-Fermi tienen posiciones fijas y, por lo tanto, la vida útil del portador libre τ permanece constante (Reynolds et al., 2017:p.250-265).

La fotoconductividad de una película delgada bajo luz absorbida uniformemente ($\alpha d \ll 1$) es:

$$\sigma_{ph} = q\mu\tau(I - R)\eta\alpha\phi.$$

El producto $\alpha\phi$ permanecerá constante, y los valores relativos de α pueden determinarse a partir de él, siempre que las dependencias energéticas de los parámetros μ , R y η sean despreciables. El valor al que se fija la fotocorriente puede elegirse libremente, pero en la práctica vendrá dictado por la región de baja absorción de la muestra. Sin embargo, dado que incluso las fotocorrientes de bajo nivel pueden medirse con alta precisión, el método CPM es especialmente útil en valores bajos de absorción óptica donde las mediciones de transmisión óptica estándar pierden su precisión.

De la expresión anterior se deduce que, en las condiciones anteriores, una gráfica de $1/\phi$ versus E ph revelará valores relativos de α . En una variante mejorada de la técnica CPM, denominada CPM absoluta (ACPM) la transmisión óptica a través de la película se mide al mismo tiempo que la fotocorriente, y los datos de las dos mediciones se combinan para eliminar las franjas de interferencia óptica y calibrar el sistema utilizando la fórmula de Ritter-Weiser (Holovský, 2020, p.820).

La disposición experimental utilizada en las mediciones de CPM absoluto se muestra esquemáticamente en la que se presenta continuación. Dependiendo de los requisitos, la muestra puede montarse en un criostato para permitir el funcionamiento en un amplio rango de temperatura. La elección del sistema de monocromador es importante, ya que, a longitudes de onda largas, la salida de segundo orden puede dominar fácilmente la fotocorriente de la muestra para dar lecturas erróneas. Se recomienda un monocromador doble más filtros de orden para mantener la salida de segundo y orden superior y la luz dispersa por debajo de una parte en 10 5.

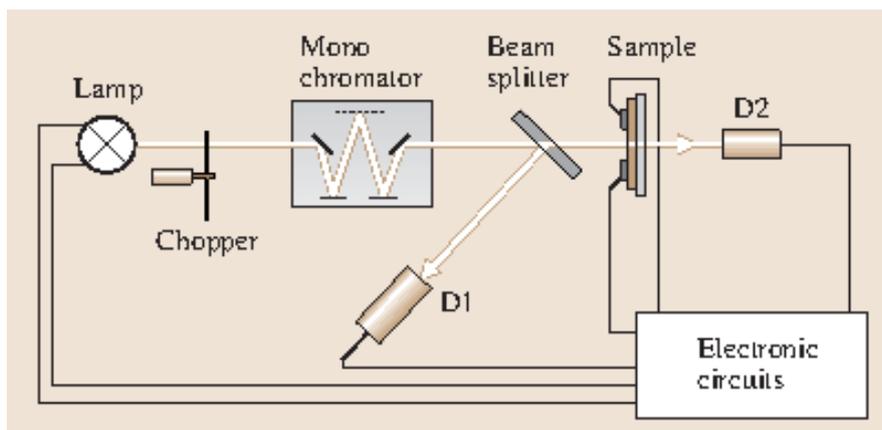


Figura 1-3. Diagrama esquemático de una configuración de CPM absoluto

Elaborado por: Reynolds , S. 2017

La figura 1-3 Diagrama esquemático de una configuración de CPM absoluto. El fotodetector D1 se utiliza para medir la intensidad de la luz incidente en la muestra, mientras que el detector D2 mide la luz transmitida. Estas señales más la fotocorriente de muestra se registra mediante electrónica, manteniéndose esta última constante mediante el control de la corriente de la lámpara. Los detalles del funcionamiento se dan en el texto.

El experimento de CPM se puede realizar con DC o iluminación de CA, pero como se discutirá más adelante, los espectros de absorción obtenidos no necesitan ser idénticos. La mayoría de los investigadores utilizan iluminación de CA de baja frecuencia (luz cortada, <10 Hz) para medir la fotocorriente de muestra y las salidas del detector, ya que los valores pueden ser pequeños (nA a pA) y, por lo tanto, propensos al ruido eléctrico y las interferencias cuyos efectos se minimizan mediante el bloqueo.

El proceso de medición de CPM procede de la siguiente manera. La corriente de la lámpara se ajusta hasta que la fotocorriente de muestra iguale el valor del punto de ajuste y permanece estable. Las lecturas se toman de los detectores calibrados D1 (proporcional a la intensidad del haz incidente) y D2 (el haz transmitido). A continuación, se reduce la longitud de onda del monocromador y se ajusta la corriente de la lámpara hasta que la fotocorriente sea una vez más igual al punto de ajuste, se leen D1 y D2, y así sucesivamente hasta que se alcance el punto final deseado del escaneo de longitud de onda. Normalmente el proceso se realiza en circuito cerrado, mediante un algoritmo de control que se ejecuta en un PC.

Dependiendo de la precisión deseada, los 30–100 puntos de medición pueden tardar varias horas en recopilarse, ya que los tiempos de asentamiento pueden ser largos. Para obtener una exposición detallada de la calibración y los cálculos necesarios para generar el espectro de CPM absoluto final.

El método de fotocorriente constante se ha empleado para estudiar los estados de defecto en la densidad de espectros de estados de películas delgadas de silicio microcristalino hidrogenado.

(Malik et al., 2019: pp. 107-113), realizaron un estudio donde emplearon el método de fotocorriente constante para el estudio sobre los defectos en las películas delgadas de silicio para ello, analizaron el coeficiente de absorción óptica de la espectroscopía UV con la ayuda del método de fotocorriente constante. Los espectros de su estudio estuvieron en una amplia región y se presentan para ambos casos, es decir, dispersiones de luz en superficie y en masa. Los espectros se interpretaron en términos de desorden, densidad de defectos resultante, fracciones de volumen cristalino / amorfo y morfología del material, los parámetros relacionados con subgap, como el coeficiente de absorción, la energía característica.

También estimaron en el estudio la energía de Urbach E_0 de los estados de cola y la densidad de los estados de defecto subgap junto con una estimación de la banda prohibida de las películas de silicio preparadas en diversas fracciones cristalinas. De esta forma, encontraron que la densidad de los estados de cola localizados cae exponencialmente hacia el espacio con un ancho de cola de banda de aproximadamente 110 meV.

De igual forma, los autores (Arais, 2017, pp. 117-121), realizaron la preparación y caracterización de películas delgadas de a-Si: H y a-SiC sin dopar, tampón, tipo p y tipo n, mediante el método de descomposición por descarga luminiscente de radiofrecuencia (RF) en sustratos de vidrio Croning 7059 a partir de gas silano (SiH_4) mezclado con metano (CH_4) para sin dopar, tampón y B_2H_6 , se agregaron PH_3 para películas delgadas de tipo p y tipo n, respectivamente.

Los defectos del estado de separación de las películas delgadas de a-Si: H y a-SiC: H para los tipos no dopados y dopados se han investigado mediante el método de fotocorriente constante (CPM). Se encontró que la densidad de defecto mínima de la película a-Si: H, i era de $2,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y para la capa tampón de a-SiC: H sin dopar se evaluó en $8,8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Hubo un aumento gradual en la densidad de defectos por aleación con carbono y también por dopaje tipo p y tipo n. Por otro lado, (Fantoni et al., 2017: pp. 167-168), presentó un artículo sobre un modelo para el índice de refracción de silicio amorfo para simulación FDTD de guías de ondas fotónicas para el análisis de la influencia de la calidad del material para guías de ondas de silicio amorfo para aplicaciones microfotónicas. La calidad del material se tuvo en cuenta mediante un modelo basado en los datos del coeficiente de absorción obtenidos que se obtuvieron por la medición de fotocorriente constante (CPM) en la región del infrarrojo cercano.

De esta forma, los valores producidos para el modelo GUTL fueron utilizado como entrada para un conjunto de simulaciones FDTD, teniendo en cuenta diferentes calidades de material y dimensiones de guías de ondas dirigidas a estudiar las características de guías de ondas de silicio amorfo incrustadas en un revestimiento de SiO_2 (Fantoni et al., 2017: pp. 167-168).

3.1.2. Fotoconductividad de doble haz (DBP)

Al igual que el método de fotocorriente constante analizado anteriormente, la técnica de fotoconductividad de doble haz (DBP) se utiliza para determinar la absorción óptica de subbandgap en un fotoconductor. Según (Zaynobidinov,2020, p.1). El DBP logra condiciones de vida constantes al dirigir un haz de polarización adicional constante, uniformemente absorbido, de aproximadamente la energía de la banda prohibida en la muestra. Este rayo debe configurarse para mantener una tasa de generación mayor que la de la sonda del monocromador de haz, a lo largo de la exploración. DBP elimina la necesidad de ajustes lentos y tediosos del haz de la sonda necesaria para mantener condiciones de fotocorriente constantes en CPM.

El rango de energía del fotón del haz de la sonda se puede escanear más rápidamente que para el CPM, utilizando un sistema de control y medición más simple. DBP requiere una configuración experimental muy similar a CPM, con la adición de una luz de polarización. Este puede ser en forma de un rayo láser, dirigido a la muestra de manera oblicua para que los detectores no se sobrecarguen. El haz de la sonda se corta ópticamente, lo que permite que la fotocorriente de muestra resultante se separe de la corriente del haz de polarización de CC mediante detección de bloqueo y amplificación. De manera similar, cualquier luz parásita del haz de polarización que llegue a los detectores ópticos será rechazada.

Una característica de la medición de DBP es que las QFL de muestra se dividen más ampliamente, ya que la corriente de polarización de CC constante debe ser mayor que un valor típico de fotocorriente constante en CPM. Las diferencias resultantes en la ocupación de los estados profundos significan que los valores de $\alpha(E_p)$ registrados por las dos técnicas pueden no coincidir. Sin embargo, la (s) diferencia (s) también se pueden utilizar con ventaja; la ocupación se puede variar de manera predecible midiendo la fotocorriente de CC, y los espectros de DBP registrados a diferentes intensidades de haz de polarización pueden interpretarse para producir información adicional sobre las densidades de defectos.

En algunos casos, también se pueden inferir las propiedades de captura de defectos y el estado de carga, y la presencia de estados de superficie.

3.1.3. Espectroscopía de fotocorriente por transformada de Fourier (FTPS)

La espectroscopía de fotocorriente por transformada de Fourier (FTPS), es capaz de medir la calidad del transporte difusivo del portador de carga de los materiales absorbentes fotoactivos, a diferencia de la técnica basada en la fotoconductividad de doble HAZ que mide la absorción óptica de los fotoconductores, esto es vital importancia saber identificar estas cualidades distintivas que pueden comprender cada técnica a diferencia de otra.

El uso de un espectrómetro FT para registrar la fotocorriente resuelta espectralmente en películas delgadas fue informado por primera vez por Inushima et al. y desarrollado como técnica cuantitativa (FTPS) por Vaněček et al. El concepto es un desarrollo basado en una técnica estándar utilizada en química analítica durante muchos años, el espectrómetro de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) (Reynolds et al., 2017:p.265).

Esta técnica consiste en grabar y transformar interferogramas de Fourier producidos por una configuración de Michelson iluminada por una fuente de luz de banda ancha apropiada. En el modo de absorción, la muestra de interés se coloca entre la salida de luz del interferómetro y un detector de banda ancha, y el interferograma se registra como la salida del detector frente a la diferencia de trayectoria óptica. Luego, el interferograma se transforma en Fourier y se normaliza a un espectro de fondo, produciendo un IR convencional espectro de absorbancia versus longitud de onda.

La técnica FT explora eficazmente todas las longitudes de onda en paralelo y, por lo tanto, tiene una ventaja de velocidad inherente sobre las espectroscopías dispersiva secuencial convencional. El rendimiento óptico es mucho mayor, por lo que existen ventajas considerables en términos de cancelación de ruido. En general, esto lo convierte en un enfoque más rápido, con menos ruido y potencialmente de mayor resolución.

Se reconoció que estas ventajas eran aplicables a la medición de materiales electrónicos fotoconductores a niveles bajos de absorbancia ya que el detector en el sistema FTIR también puede desempeñar un papel doble como muestra. Muchas configuraciones comerciales de FTIR poseen una entrada de detector externa. En FTPS, por lo tanto, el interferograma es registrado por un detector que consiste en el fotoconductor de interés. La fotocorriente se amplifica y se presenta a la entrada externa. El escaneo se lleva a cabo, se transforma en Fourier y se normaliza a un espectro de fondo previamente registrado usando un detector de banda ancha calibrado, para producir el espectro de absorbancia del fotoconductor.

La aplicabilidad del método FTPS a una amplia gama de materiales, incluido el silicio amorfo, el silicio microcristalino, las capas de diamante, el diamante nanocristalino y películas orgánicas muy delgadas. La técnica es muy sensible y, en algunos casos, se puede utilizar para ampliar la medición de la absorbancia del límite de partes por millón de CPM a partes por mil millones, como se muestra en la figura 2-3.

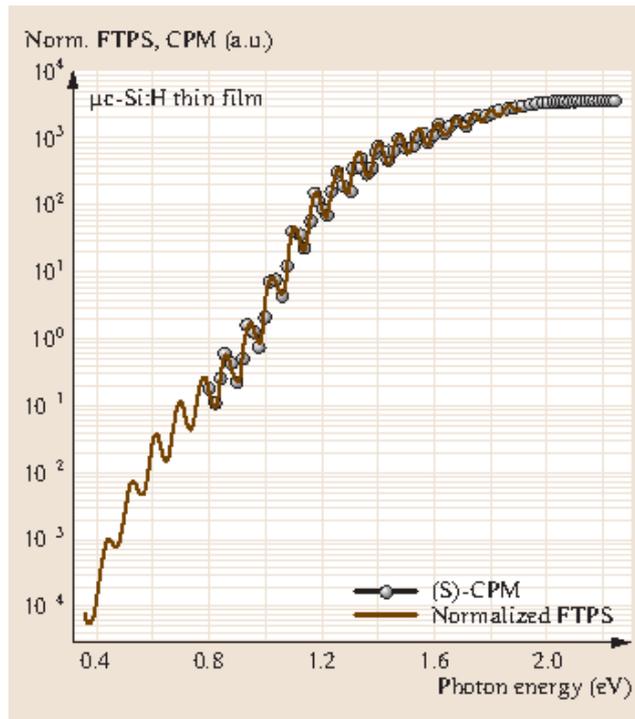


Figura 2-3. Norm, FTPS, CPM

Elaborado por: Reynolds, S. 2017

Al igual que con el CPM estándar, pueden aparecer franjas de interferencia en un espectro registrado de una película delgada. No existe un equivalente directo de la medición de transmisión utilizada en el enfoque de CPM absoluto para eliminar las franjas, pero es posible hacerlo si se dispone de un filtro auxiliar, ópticamente idéntico a la muestra. Las dos mediciones, con y sin filtro, pueden procesarse para obtener el espectro de absorbancia libre de interferencias de película delgada, mediante la fórmula de Ritter-Weiser.

El método FTPS se ha utilizado para el diagnóstico tanto en películas como en células solares. A diferencia de CPM, la fotocorriente de la muestra no se puede mantener constante en FTPS, ya que el interferograma cubre necesariamente un amplio rango de intensidad. Sin embargo, al igual que con DBP, se puede imponer una vida útil constante de la portadora aplicando un haz de polarización óptica de CC absorbido uniformemente.

Al respecto del empleo del método FTPS (Bidiville, 2017, pp. 1333-1338), realizó un estudio donde investigaron dos series de celdas solares a-Si: H con diferentes espesores de absorción ($t_i = 10-500$ nm) y temperatura de deposición ($T_{dep-i} = 200-350$ ° C) mediante Espectroscopía de fotocorriente de transformada de Fourier para determinar la sub-absorción bandgap que se origina en los estados electrónicos localizados en la capa i del absorbedor de a-Si: H. La serie de espesores mostró que el defecto a granel aumenta al espesar t_i y por un ligero remojo, mientras que no prevalece ningún defecto de interfaz p_i o n_i . Se ha demostrado que el rendimiento de la celda solar de clavija a-Si: H de última generación está dominado por el número total de defectos de espacio medio (nativos e inducidos por la luz) en la capa i a granel. Los resultados indican que la

creación de tales estados electrónicos está influenciada por la posición local del nivel de Fermi en la capa i , es decir, cuanto más cerca está el nivel de Fermi de la banda de valencia (interfaz π), más estados electrónicos se crean a una T dep alta. -i.

En otro estudio similar sobre celdas solares fue el de (Tanabe et al., 2018, p20)., demostraron el potencial de la espectroscopía de fotocorriente por transformada de Fourier (FTPS) en la investigación de la absorción óptica y la calidad de un $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S, Se)}_4$ (CZTSSe) absorbente dentro de la estructura celular. Fabricaron estructuras de células solares de película fina con un absorbente CZTSSe, que se preparó mediante una técnica de recubrimiento de nanopartículas y un proceso de poscurtido. Los espectros de absorción óptica de los absorbentes de CZTSSe preparados a diferentes temperaturas de recocido se midieron mediante FTPS, por lo que pudieron evaluar con éxito la energía de banda prohibida óptica de los espectros y encontraron una cola exponencial en los espectros.

El método de detección de defectos profundos en materiales fotovoltaicos por espectroscopía fotocorriente por transformada de Fourier ha experimentado un desarrollo continuo durante las últimas dos décadas. Aun así, dar predicciones cuantitativas del rendimiento de los dispositivos fotovoltaicos es una tarea desafiante. A medida que aparecen nuevos materiales, es muy deseable una predicción de la tensión en circuito abierto potencialmente alcanzable con respecto a la banda prohibida. A partir de la termodinámica, se puede hacer una predicción basada en el límite radiactivo, despreciando la recombinación no radiactiva y los efectos de transporte de portadores. Así lo demuestra (Holovský, 2020, p. 820), que analizo una serie de células solares de silicio amorfo hidrogenado de última generación de diferentes espesores en diferentes estados de degradación por remojo de luz. Se basaron en una combinación de resultados empíricos con simulaciones ópticas, eléctricas y termodinámicas, proporcionamos un modelo predictivo del voltaje en circuito abierto de un dispositivo con una densidad de defecto y un espesor de absorbedor determinados. De esta forma observaron que, más que la densidad o el grosor del defecto, lo que importa es su producto o el número total de defectos. Alternativamente, la inclusión de la absorción de defectos en el límite radiactivo termodinámico proporciona límites superiores cercanos al voltaje de circuito abierto con la ventaja de una evaluación mucho más fácil.

3.1.4. Método de rejilla fotoportadora de estado estacionario (SSPG)

El método FTPS demuestra una ventaja de velocidad inherente sobre la espectroscopía dispersiva secuencial convencional, sin embargo, esta técnica es propensa a presentar franjas de interferencia en un espectro registrado de una película delgada en cambio el método SSPG, descrito por primera vez por Ritter et al, permite determinar la longitud de difusión ambipolar L de una película delgada de semiconductores. Este es un parámetro particularmente importante en materiales destinados a su uso como capas absorbentes en células solares, así como en estudios

fundamentales. El método consiste en medir la fotoconductancia de una muestra coplanar iluminada por un sistema de dos haces cuando (i) los haces son coherentes y forman franjas de interferencia paralelas a los electrodos, y (ii) los haces son incoherentes y se superponen como una iluminación espacialmente uniforme.

Al respecto del uso del método (Veldhuizen et al., 2017: pp. 605-613), lo utilizaron para hacer una evaluación comparativa de materiales fotoactivos de película delgada utilizando una rejilla de fotoportadora de estado estable inducida por láser. En su estudio, evaluaron la calidad del transporte difusivo del portador de carga de los materiales absorbentes fotoactivos de película delgada tradicionales y emergentes utilizados para aplicaciones fotovoltaicas. Utilizaron la técnica de rejilla fotoportadora de estado estable, que hasta ahora se ha utilizado predominantemente para materiales a base de silicio amorfo, para obtener longitudes de difusión ambipolar, así como productos de por vida de movilidad de portadores minoritarios y mayoritarios. De esta forma determinan que, el método que presentaron se puede utilizar como una evaluación rápida de la calidad optoelectrónica de los materiales fotoactivos de película delgada.

La utilidad del método SSPG en la optimización de las propiedades de los semiconductores de película delgada depende de varios factores:

- La posición del nivel de Fermi en un semiconductor cambia en respuesta a variaciones en las condiciones de preparación, efectos de dopaje y degradación. Esto puede alterar la cinética de recombinación y, como consecuencia, la longitud de difusión. Así, por ejemplo, es posible que L aumente sin que se produzca una mejora correspondiente en la calidad del material.
- Dado que el método se basa en el establecimiento de una rejilla de fotoportadora uniforme, la rugosidad de la superficie o la estructura interior pueden dispersar la luz y reducir su uniformidad, dando como resultado inconsistencias y / o inexactitudes en los resultados.
- Las fotocorrientes en el experimento SSPG pueden ser pequeñas en comparación con la corriente oscura y esto puede restringir las mediciones, especialmente en materiales dopados y materiales intrínsecos a temperatura ambiente y superiores (Reynolds et al., 2017: p.265).

Kopprio (2019), realizaron una caracterización de silicio amorfo hidrogenado a partir de mediciones fotoconductoras en estado estacionario. En su estudio propusieron utilizar medidas de estado estable y un algoritmo de optimización basada en enseñanza-aprendizaje (TLBO) para obtener el conjunto completo de parámetros de transporte de material de semiconductores desordenados, tomando como ejemplo el silicio amorfo hidrogenado no dopado. Primero, la conductividad en estado estable bajo iluminación y la longitud de difusión ambipolar (L_{amb}) las midieron para varias temperaturas y tasas de generación.

La técnica de rejilla fotoportadora de estado estable fue utilizada para la evaluación de L_{amb} . Luego, utilizaron el algoritmo TLBO para la obtención de los parámetros del material que mejor satisfagan las ecuaciones de neutralidad de carga y continuidad. El uso de este

algoritmo permitió a los autores obtener una excelente estimación de la pendiente de la cola de la banda de valencia, en comparación con la obtenida a partir de las mediciones del coeficiente de absorción por espectroscopía de fotocorriente por transformada de Fourier y transmitancia / reflectancia.

De acuerdo a esta técnica, se evalúa la calidad del transporte difusivo del portador de carga de los fotoactivos tradicionales y emergentes de película delgada. Materiales absorbentes utilizados para aplicaciones fotovoltaicas. Usando una técnica de rejilla fotoportadora de estado estable, se utiliza predominantemente para materiales a base de silicio amorfo, para obtener también longitudes de difusión ambipolar. Como productos de movilidad de por vida de operadores minoritarios y mayoritarios. Las mediciones se realizan en volumen promediado (Veldhuizen, 2017, p. 605-613).

- Tasas de generación de $G = 1020-1021 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$
- Bajas intensidades de campo eléctrico de $E = 20-200 \text{ V cm}^{-1}$

La capacidad de absorción de los materiales se analiza calculando una profundidad de absorción óptica efectiva, y comparamos su valor con la longitud de difusión ambipolar electrónica obtenida. Las profundidades de absorción efectivas son independientes de la banda prohibida valores de modo que nuestra evaluación también sea relevante para las células solares multifuncionales. Se observa que, para películas delgadas a base de materiales de silicio, la longitud de difusión ambipolar (con un valor inferior a 150 nm) es más del doble de su longitud con efectiva profundidad de absorción, mientras que, para materiales de cobre, indio, galio seleniuro, calcopirita y perovskita de haluro, la difusión de longitud (con un valor de hasta 367 nm) es similar o mayor que la profundidad de absorción efectiva.

Longeado (2018) , demostró que las propiedades de transporte del doble y triple catión de alta calidad de perovskita son exploradas bajo diferentes tensiones ambientales por rejilla fotoportadora de estado estable (SSPG). El SSPG permite una medición directa de la difusión ambipolar que es significativamente mayor para el perovskita que contiene cesio (1,4 micrones en comparación con 0,57 micrones para un compuesto de doble catión). Esta se muestra que el efecto positivo se aniquila reversiblemente a medida que se colocan las muestras al vacío, y se acelera con el aumento de temperatura. La degradación de las propiedades del material aparece junto con la activación de un nivel de trampa de defectos y aumento del nivel de dopaje en el material. Este comportamiento se discute considerando la interacción entre el yodo contenidas en la perovskita y oxígeno que se sabe que conduce a la pasivación de trampas.

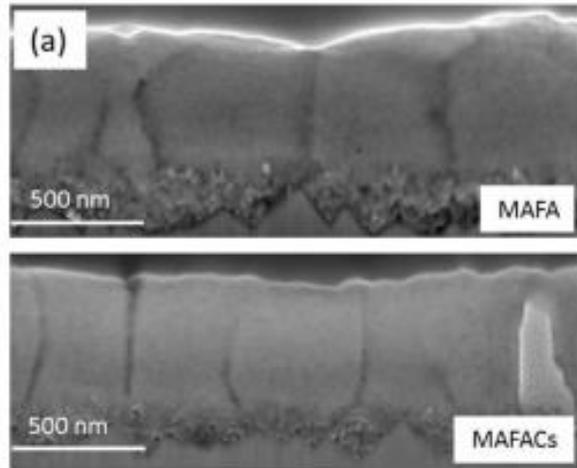


Figura 3-3. Medición SSPG

Elaborado por: Longeaud, C. 2018

Antes de realizar mediciones SSPG, superficie y cruz. Según la figura 3-3 muestra imágenes de la sección SEM para confirmar que las capas depositadas sobre vidrio son compactas y muestran morfologías similares como los incluidos en los dispositivos fotovoltaicos. El tamaño de grano y los espesores (que oscilan entre 500 y 600 nm) obtenidos son en el mismo orden de magnitud en ambos sustratos probados. La Figura 4-3 muestra un esquema del SSPG como configuración experimental.

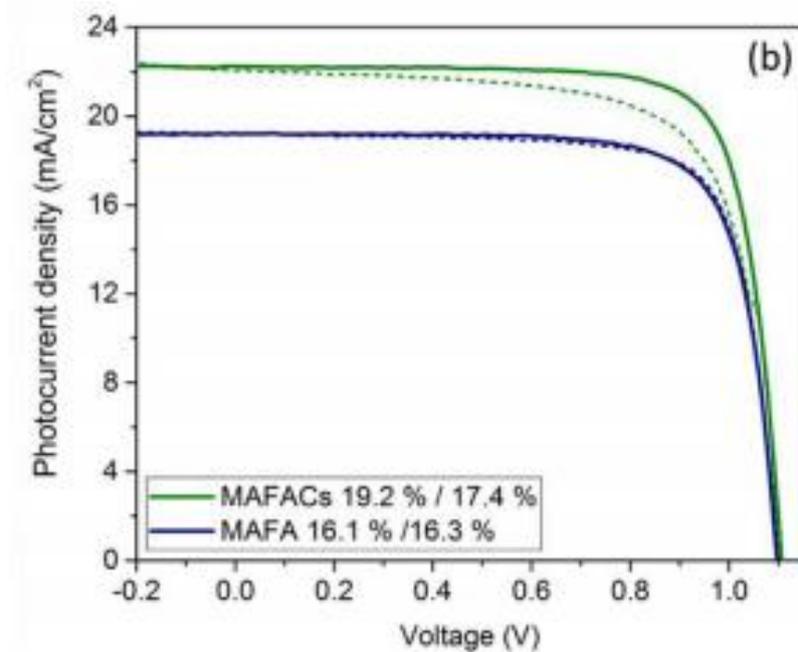


Figura 4-3. Esquema del SSPG como configuración experimental

Elaborado por: Longeaud, C. 2018

La resolución de la técnica SSPG proporcionan detalles adicionales que muestran ejemplos de curvas típicas obtenidas con esta técnica y su encaje con el modelo introducido. A su vez durante

esta medición, dos perturbaciones alcanzan el estado estacionario. El más simple consiste en rotar la polarización de la luz del haz de la sonda mediante una placa $\lambda / 2$ de modo que las polarizaciones del haz sean perpendiculares. La perturbación induce un exceso de corriente ΔI_{woi} además del estado estacionario uno generado por la viga principal. Si ambos haces presentan la misma polarización, paralela a los electrodos, su superposición genera una serie de interferencias en y en la muestra, el espaciado de la rejilla Λ viene determinado por el ángulo entre dos vigas. El más simple consiste en rotar la polarización de la luz del haz de la sonda mediante una placa $\lambda / 2$ de modo que las polarizaciones del haz sean perpendiculares. La perturbación induce un exceso de corriente ΔI_{woi} además del estado estacionario, uno generado por la viga principal. Si ambos haces presentan la misma polarización, paralela a los electrodos, su superposición genera una serie de interferencias en y en la muestra, el espaciado de la rejilla Λ viene determinado por el ángulo entre dos vigas. En este caso, la perturbación crea una serie del espacio se carga en los materiales y da lugar a un exceso de corriente ΔI_{wi} además de la corriente de estado estable. Si el período de rejilla es pequeño, la difusión difumina e incluso suprime esta matriz y el exceso de corriente es el mismo que en la simple superposición de los dos haces con polarizaciones cruzadas. Si el período de rejilla es grande, la difusión que tiene lugar es ambipolar donde los transportistas más lentos limitan el movimiento de los más rápidos. El exceso de corriente, limitado por el campo interno de la matriz, es menor que la corriente medida en el caso de superposición. La longitud de difusión ambipolar L_d puede estimarse ajustando la relación de estos dos excesos corrientes, $\beta^{1/4} \Delta I_{wi} / \Delta I_{woi}$, en función del período de rejilla Λ con la siguiente fórmula:

$$\beta \equiv 1 - \frac{2\phi}{\left[1 + \left(\frac{2\pi L_d}{\Lambda}\right)^2\right]^2}$$

El parámetro ϕ , que varía en el rango 0-1, es una cantidad vinculado a la calidad de la rejilla y a la conductividad del material. Es interesante notar que, en la técnica SSPG, la limitación se deriva por el espacio de la matriz de carga que se asemeja a la limitación de la extracción de portadores mayoritarios en un dispositivo cuando los portadores minoritarios están acumulando en un lado del dispositivo apagando el campo interno. La longitud de difusión ambipolar L_d medida por SSPG es por tanto una firma directa de la calidad del absorbedor.

3.1.5. Técnica de la rejilla del fotoportador en movimiento (MGT)

Como se analizó en el apartado anterior la técnica SSPG demuestra cualidades aceptables como la evaluación rápida de la calidad optoelectrónica de los materiales fotoactivos de película delgada, esto representa una gran ventaja para obtener resultados de análisis de muestras de fotoconductividad, a su vez la técnica de rejilla fotoportadora móvil (MGT) es una forma de

obtener información sobre las movilidades (tanto de los portadores mayoritarios como minoritarios) y el tiempo de vida de la recombinación en semiconductores amorfos, siendo a-Si:H el utilizado en las publicaciones originales. Desde entonces, se ha utilizado para estudiar semiconductores de banda ancha amplia, aleaciones de carbono de silicio, transporte de portadores en películas de C60, cristales de óxido de galio, cristales fotogalvánicos y para estudiar las ondas de carga espacial para nombrar unos pocos.

La idea central de esta técnica es lograr una iluminación que no solo tenga una distribución, otorgada por la interferencia de dos haces de luz coherentes que tienen la misma polarización (como en SSPG), sino también una rejilla ligera que se mueve a velocidad constante. La configuración experimental se muestra en la figura 5-3 que una corriente se mide únicamente como resultado del movimiento del patrón de luz, ya que no hay voltaje externo se aplica a la muestra (condiciones de cortocircuito). Para lograr este efecto, la muestra debe contener dos contactos óhmicos coplanares.

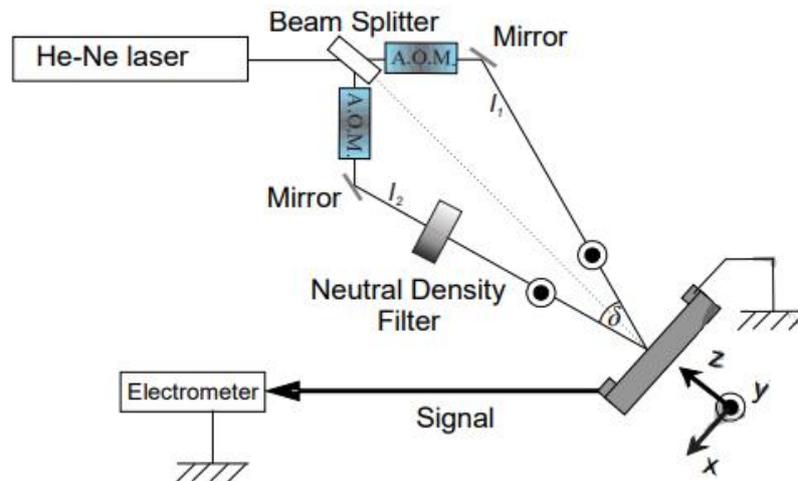


Figura 5-3. Técnica de la rejilla del fotoportadora en movimiento

Elaborado por: Veldhuizen, L. 2017

Veldhuizen (2017), en su estudio demostró que la configuración experimental utilizada para implementar la técnica de rejilla móvil. El láser He-Ne haz ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) se divide en dos mediante un divisor de haz. Un rayo es atenuado por un filtro de densidad neutra. Ambos haces se desplazan en frecuencia mediante el uso de moduladores acústico-ópticos, para introducir una diferencia de frecuencia entre los haces que interfieren en la superficie de la muestra. Dando como resultado una rejilla de intensidad que se mueve a lo largo de la superficie, lo que conduce a una corriente continua que es medido sin ningún voltaje aplicado externamente.

Ventosinos (2020), mostraron que la técnica de rejilla fotoportadora móvil (MGT) sirve para mediciones de las propiedades de fototransporte de los portadores mayoritarios y minoritarios, en

condiciones de iluminación lo más cercanas posible a un sol, para obtener información fiable sobre los mecanismos de recombinación. En su estudio mostraron que el método desarrollado originalmente para medir los parámetros de transporte de semiconductores amorfos, se puede aplicar completamente a las películas de HaPs y a través de este encontraron los exponentes que describen la dependencia de la intensidad de los parámetros de transporte de portadores mayoritarios y minoritarios en una muestra de HaP.

3.1.6. Espectroscopía de fotocorriente modulada (MPC)

Los estudios analizados en el apartado anterior pueden catalogar a la técnica MGT, como una herramienta sofisticada para mediciones de las propiedades de fototransporte en cambio el MPC es una espectroscopía de densidad de estados lo cual se analizará y enfocará en diferentes estudios realizados en el presente apartado.

La técnica de espectroscopía de fotocorriente modulada (MPC) fue introducida por Oheda en 1981, utilizado para sondear la distribución energética de estados de trampa desocupados en la brecha de energía de un fotoconductor. MPC implica la iluminación de una muestra de fotoconductor coplanar con una fuente de luz cuasimonocromática por encima del espacio, que se modula en amplitud, típicamente dentro del rango de frecuencia de 0,1 Hz a 100 kHz. Un LED es una fuente muy adecuada, aunque también se puede usar luz cortada de un monocromador. Se aplica una polarización de voltaje a la muestra y se mide la amplitud y la fase de la fotocorriente en relación con la excitación frente a la frecuencia de modulación utilizando un detector sensible a la fase (amplificador de bloqueo). Generalmente, la fotocorriente se retrasa con respecto a la luz, aunque hay casos en los que puede producirse un adelanto de fase genuino (Reynolds S. e., 2017). Tanto la amplitud como la fase son sensibles a los procesos de transporte que tienen lugar, y ambas son útiles para calcular el DOS frente a la energía del electrón. Es importante señalar que los estados examinados directamente por este experimento son estados trampa vacía que capturan a los portadores mayoritarios. Esto es diferente al CPM, donde la mayoría de los portadores son expulsados de los estados de trampa llenos por absorción de un fotón subgap. Por tanto, las dos técnicas son complementarias; en el caso del silicio amorfo, por ejemplo, MPC proporciona información sobre el DOS por encima de E_F, y CPM sobre el DOS por debajo de E_F.

Nojima et al (2019), empleo la espectroscopía de fotocorriente modulada para la determinación de la movilidad de electrones y huecos en células solares orgánicas en funcionamiento. En el estudio se analiza la validez de un nuevo método que utiliza espectroscopía de fotocorriente de modulación. Las ventajas de este método son su aplicabilidad a OSC de trabajo con estructuras de dispositivo optimizadas y la determinación simultánea de las movilidades de electrones y huecos. Estas características permiten estudiar la relación entre el equilibrio de movilidad y las características de celda solar, como la eficiencia de conversión de energía, utilizando un solo OSC

de trabajo; por lo tanto, no es necesario fabricar dispositivos de solo electrones y solo huecos para mediciones de movilidad.

Rütten (2019), llevo a cabo un estudio sobre los estados localizados y sus características de captura en materiales amorfos de cambio de fase. Empleamos espectroscopía de fotocorriente modulada (MPC) para investigar estados localizados en la fase amorfa frecuentemente estudiada de Ge 2 Sb 2 Te 5. Además, presentaron resultados sobre el DOS en la banda prohibida de Sb 2 Te amorfo dopado con AgIn, que no ha sido sujeto a espectroscopía DOS de alta resolución antes. Encontraron evidencia experimental de coeficientes de captura claramente no constantes entre un espectro continuo de estados localizados en ambos materiales estudiados. De acuerdo con esta observación, especialmente en Sb 2 Te dopado con AgIn, donde no se puede detectar ningún defecto pronunciado como canal principal para la emisión de portadora, por lo que señalan la necesidad de modificar el actual modelo de transporte basado en Poole-Frenkel.

Las técnicas de dominio de frecuencia son herramientas útiles caracterizar los procesos que ocurren en diferentes escalas de tiempo en células solares y dispositivos de combustible solar de intensidad modulada La espectroscopía de fotocorriente (IMPS) es una de esas técnicas que vincula las respuestas eléctricas y ópticas del dispositivo. La aplicación fundamental de IMPS a fotoelectrodos semiconductores y nanoestructurados se presentan las células solares, con el objetivo final de comprender la respuesta del IMPS de la célula solar de perovskita (PSC) para arrojar luz sobre sus complejos mecanismos físicos de funcionamiento. La aplicación histórica de IMPS que conecta su transferencia función de la eficiencia de transferencia de carga del semiconductor electrodo y posteriormente las consideraciones de difusión. Se resume el transporte para la célula solar sensibilizada con colorante. (Ravishankar, 2019)

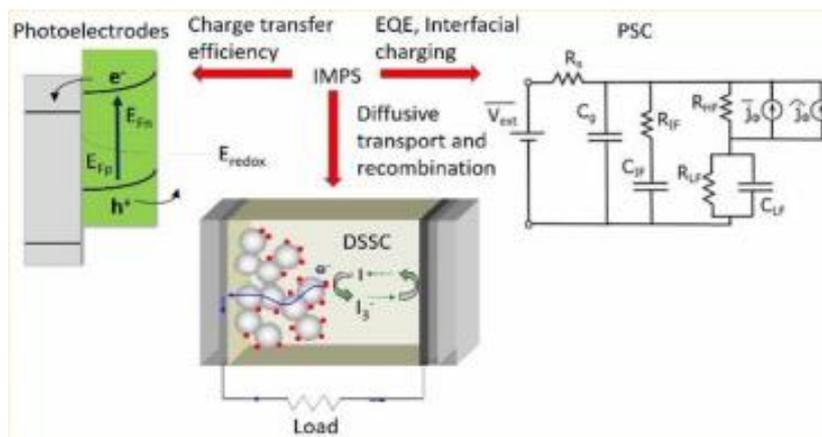


Figura 6. Asociación de características espectrales

Elaborado por: Rütten, J. 2019

Como se observa en la figura 6-3 estos modelos priorizan la asociación de características espectrales con el tiempo constante, lo que ha llevado a un descuido de otros aspectos absolutos

de los espectros por parte de la comunidad fotovoltaica. Se aclara estos aspectos mediante el desarrollo de la conexión fundamental entre el valor absoluto de la función de transferencia IMPS y la eficiencia cuántica (EQEPV) de una célula fotovoltaica. Los modelos básicos para la célula solar se desarrollan utilizando ecuaciones cinéticas y circuitos equivalentes (EC), haciendo hincapié en su equivalencia y la ventaja de la representación EC para explicar adecuadamente diferentes capacitancias en el sistema. Se realiza una crítica de las interpretaciones actuales de los espectros PSC IMPS, donde el tiempo de las constantes y su evolución están asociadas con procesos de transporte característicos de portadores electrónicos o iónicos dentro del PSC.

Estos se aclaran utilizando la representación EC para identificar que los procesos característicos generados solo están relacionados al acoplamiento entre diferentes elementos de la CE y no reflejan los fenómenos de transporte en general. Además, el desarrollo de un modelo general que identifica la acumulación de carga en las interfaces significa una característica general para PSC tanto de baja como de alta eficiencia, cuyas resistencias de carga / descarga son el factor principal en el control de la respuesta eléctrica del dispositivo. Este modelo muestra una separación del fotovoltaje dentro del PSC que provoca una reducción en su EQEPV a bajas frecuencias. Un mayor desarrollo del PSC implicará ganar control sobre la cinética de carga de baja frecuencia en el dispositivo para superar estas limitaciones.

El exterior fotovoltaico muestra una eficiencia cuántica EQEPV es una relación entre la corriente eléctrica recogida j_e y ϕ , la incidencia espectral de flujo de fotones, a una longitud de onda λ . Es conveniente expresar el flujo espectral en unidades de corriente eléctrica.

$$j_{\phi} = q\phi$$

$$EQE_{PV}(\lambda) = \frac{j_e(\lambda)}{j_{\phi}(\lambda)}$$

Integración de la EQEPV compuesta con el espectral incidente del flujo sobre el rango de longitudes de onda de iluminación produce la fotocorriente j_{sc} de la célula solar. Una cantidad estrechamente relacionada con la EQEPV es la transferencia de función IMPS. Formalmente, IMPS implica la medición de una densidad de corriente extraída modulada \tilde{j}_e tras la aplicación de una pequeña perturbación del flujo de fotones modulado en un amplio rango de frecuencias, generalmente entre 10⁻² y 106 Hz.

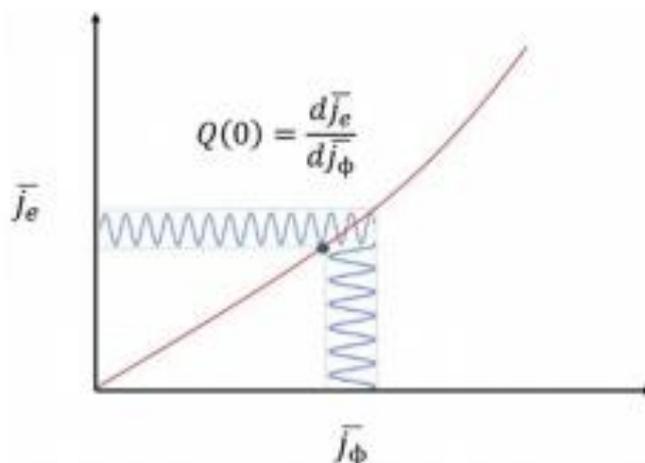


Figura 7-3. Integración de la EQEPV

Elaborado por: Rütten, J. 2019

De acuerdo a la figura 7-3 se muestran las variables involucradas en el cálculo de la transferencia IMPS en función Q . Una pequeña perturbación del flujo de fotones expresada como una corriente demuestra la densidad que se aplica a partir de un estado estable dado de densidad de corriente de fotones j_Φ y densidad de corriente extraída j_e (punto azul), lo cual corresponde al registro de la densidad de corriente modulada. El límite de baja frecuencia también se muestra la función de transferencia.

La conmutación de fotocorriente de polaridad, como lo demuestra la voltamperometría cíclica bajo iluminación cortada. Este comportamiento inusual se analizó en detalle utilizando intensidad modulada Espectroscopía de fotocorriente (IMPS). En potenciales donde la fotocorriente positiva era observada, se registró la forma esperada de IMPS, comenzando en el cuadrante (IV) en alta frecuencia (HF) y llegando al cuadrante (I) en baja frecuencia (LF) con dos semicírculos bien definidos. Sorprendentemente, en la región de fotocorriente negativa, IMPS comenzó en el cuadrante (II) en HF y terminó en el cuadrante (III) en LF. Estas características tan poco frecuentes se interpretaron aquí como la rotación de los espectros IMPS alrededor del origen del gráfico, debido al cambio de signo de la fotocorriente. Un modelo que tiene en cuenta la existencia de estados de energía dentro de la banda en la superficie de BiVO₄ se ha utilizado para dar cuenta de los resultados experimentales.

De acuerdo a un estudio realizado por Manuel Antuch (2018) se encontró que la capacidad del estado de superficie, la constante de tiempo de relajación asociada a los estados de la superficie y la densidad de los estados de superficie dentro del espacio, todos mostraban un máximo bien marcado en el valor cercano del potencial de cambio. Esto sugiere que la superficie los estados son más influyentes en las cercanías donde ocurre el cambio de fotocorriente.

Un estudio realizado por Nakatsuka (2020), determinó que la medición de transporte electrónico mediante espectroscopía de fotocorriente modulada (MPC) con heterounión masiva (BHJ) que utilizan materiales donantes y aceptores prototípicos, poli [[4,8-bis [(2-etilhexil) oxi] benzo [1-

2-b: 4,5-b0] ditiófenó-2,6-diil] [3-fluoro-2 - [(2-etilhexilo) carbonilo] = heno [3-4-b] tiofenodiil]] (PTB7) y éster metílico del ácido [6,6] -fenil-C71-butírico (PC71BM), fueron fabricados.

Las OPV tienen estructuras invertidas (las BHJ se forman en sustratos transparentes de óxidos conductores). Se caracterizó el rendimiento fotovoltaico de las OPV PTB7: PC71BM y la mejor eficiencia de conversión de energía se obtuvo con un contenido de PTB7 del 40% en peso del electrón. La movilidad se determinó con espectroscopía MPC en OPV PTB7: PC71BM y estaban bien equilibradas en contenido de PTB7 del 40% en peso. Degradación del rendimiento fotovoltaico de PTB7: OPV PC71BM, se estudió el contenido de PTB7 del 40% en peso causado por la irradiación de AM1.5G. La espectroscopía MPC mostró que la movilidad bien equilibrada no se vio afectada por la irradiación AM1.5G. La degradación de las OPV fue no debido a cambios en las propiedades de transporte electrónico, sino principalmente a la reducción de la corriente (J_{sc}) y factor de llenado (FF) (Nakatsuka, 2020, p. 2660).

3.1.7. *Transitorios de encendido y apagado*

La técnica MPC se ha representado con diferentes estudios mostrados en el apartado anterior, enfatizando unas ventajas asociadas a la aplicabilidad del OSC de trabajo con estructuras de dispositivo optimizadas, dando una significancia aprobatoria sobre el análisis de los materiales fotoconductores, en cambio los transitorios de encendido y apagado pueden brindar otro tipos de ventajas que puedan igualar o superar las técnicas antes analizadas, por lo tanto en el presente apartado se tratara de abordar conceptos y estudios realizados por diferentes autores.

Comprender las respuestas transitorias de los fotoconductores de nanocables ayuda a diseñar el ancho de banda de fotoconductores. Se deriva el teórico respuestas transitorias de fotoconductores de nanocables de silicio. Las respuestas transitorias teóricas constan de dos exponenciales y encajan bien con los resultados experimentales. La vida útil de la portadora minoritaria y el tiempo de emisión de los estados de la trampa de superficie se pueden extraer del accesorio.

De acuerdo al estudio realizado por Dan Yaping (2020), se encontró en la fotocorriente transitoria la ecuación para fotoconductores que puede encajar bien con los datos experimentales. La fotocorriente de encendido y apagado tiene dos exponencial asociado con la capacidad y la emisión de la región de agotamiento de proceso de los estados de trampa de superficie. Los datos de la recombinación de los portadores minoritarios y el tiempo de emisión de la superficie de los estados de trampa se pueden extraer del accesorio. De acuerdo a la figura 8-3 se muestra la fotocorriente transitoria cuando la iluminación de la luz es encendida / apagada periódicamente.

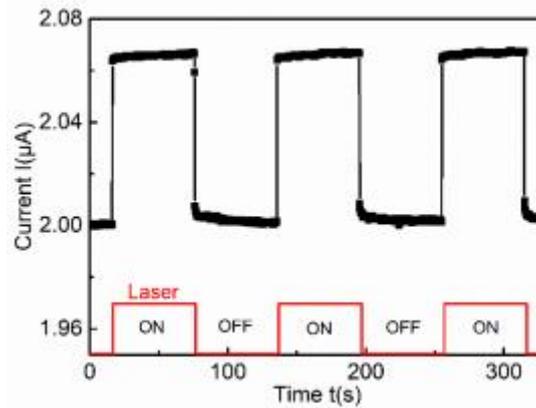


Figura 8-3. fotocorriente transitoria

Elaborado por: Yaping, W. 2020

La fotocorriente de encendido y apagado tiene dos exponenciales asociados con la capacitancia y la emisión de un proceso de agotamiento de los estados de trampa de superficie. La vida de la recombinación de los portadores minoritarios y el tiempo de emisión de la superficie demuestran que los estados de trampa se pueden extraer del accesorio.

3.1.8. Espectroscopía de fotocorriente transitoria (TPC)

La caracterización de materiales fotoconductores se ha realizado con la intervención de diferentes técnicas ya analizadas y por analizar en este estudio. Los transitorios de encendido y apagado ha demostrado ser eficaz como una espectroscopía mejorada en la detección del tiempo de emisión, en cambio la espectroscopía de fotocorriente transitoria (TPC) puede mostrar enfoques diferentes respecto al análisis en otras composiciones de fotoconducción en los materiales, lo cual se analizará en el presente apartado.

Los cambios inducidos por la adsorción en la conductividad eléctrica de las capas de grafeno con dos tipos diferentes de portadores de carga se investigan utilizando la técnica de medición de espectroscopía transitoria de fotocorriente (TPC). Las capas de grafeno-SiC se encapsulan y pasivan con una capa delgada de SiO₂, que se crea cuando se depositan electrones pulsados. Las mediciones realizadas en períodos cortos de tiempo y en varios ciclos demuestran que el proceso de encapsulación elimina por completo la inestabilidad temporal de la conductividad del grafeno independientemente del tipo de sustrato. Los resultados que se obtienen se utilizan para construir un modelo experimental para identificar los cambios en la conductividad asociados con la adsorción en grafeno, así como en otros materiales 2D con una relación superficie-volumen inherentemente alta.

Las mediciones de espectroscopía de fotocorriente transitoria (TPC) utilizando luz ultravioleta (UV) demuestran que los adsorbatos cambian la conductividad eléctrica del grafeno según el tipo de portador de carga y previenen la formación de portadores de carga fotogenerados en la celda,

que son el agotamiento subyacente de SiC. A modo de comparación, un conjunto de muestras de grafeno / SiC con dos tipos diferentes de sustratos en la capa de grafeno pueden ser selladas con una película delgada de SiO₂ utilizando una técnica avanzada de deposición de electrones (PED). En mediciones de TPS muestran que el tiempo de reacción a la luz de las muestras con una capa de grafeno desnudo mejora dramáticamente de unas pocas horas a un segundo (independientemente del tipo de vector de grafeno) (Kalkan, 2018, p. 103).

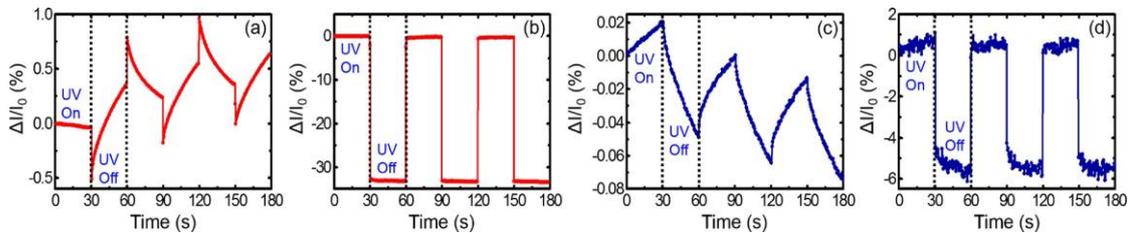


Figura 9-3. Mediciones TPC en el proceso de encapsulación

Elaborado por: Kalkan, S. 2018

Kalkan (2018), en un estudio realizado demostró que las mediciones de vacío de TPC a 5 ks muestran que la adsorción / desorción de los adsorbatos atmosféricos resulta en un aumento de más del 110% y una disminución en la conductividad epitaxial del grafeno (tipo n) y el grafeno por deposición química del 45%. la fase de vapor. (Tipo p) sobre sustratos de carburo de silicio (SiC) semiaislante. Además, aclara que las mediciones de TPC, utilizadas durante períodos cortos de tiempo y ciclos definidos, proporcionan información sobre los diversos comportamientos que subyacen a las propiedades actuales de estas muestras. Para las mediciones de TPC, se configura el tiempo de encendido / apagado del obturador para tres ciclos en 30 s. Antes de los experimentos, todas las muestras se exponen a luz ultravioleta durante 10 ks al vacío para garantizar que los adsorbatos se eliminaran en gran medida de la hoja de grafeno. Los resultados de las mediciones de TPC se obtienen antes y después del proceso de encapsulación como se muestran en la Figura 9-3.

Özdoğan (2019) determino en un estudio realizado, que las partículas adsorbentes en la superficie se descomprimen de manera más eficiente en alto vacío que en aire bajo luz ultravioleta. La tasa de aumento del cambio de corriente total a alto vacío resulta aproximadamente 11 veces mayor que la del aire al final de la irradiación UV a 5 ks y no se satura durante la irradiación. Cuando la luz está apagada, se presenta una corriente sostenida debido al mal ambiente adsorbido, es decir, alto vacío. Sin embargo, la fotocorriente se satura cuando la adsorción / desorción alcanza un estado estable y muestra la reversibilidad del cambio en el aire. Los resultados muestran que la fotoconductividad de materiales con una alta relación superficie-volumen, depende principalmente de moléculas que se adsorben en la atmósfera debido a sus interacciones.

Este estudio muestra claramente que, para obtener propiedades eléctricas y ópticas estables de este tipo de material, es necesario encapsular la superficie para eliminar los efectos atmosféricos.

Además, en su estudio enfatizo que el mecanismo de las películas delgadas fotoconductoras de ZnO, generadas por deposición de electrones de prensa, se estudia sistemáticamente mediante mediciones por espectroscopía de fotocorriente transitoria en diferentes atmósferas incluyendo ambiente aéreo y de alto vacío. La velocidad de reacción y restauración de la fotocorriente en el aire es más rápida en comparación con los caudales en condiciones de alto vacío. Los resultados de los estudios presentados muestran claramente que la fotoconductividad de películas delgadas de ZnO con una alta relación superficie / volumen está relacionada con la superficie y es principalmente en adsorción / desorción de moléculas de oxígeno y agua en la atmósfera. De ahí una fuerte interacción superficial. El desarrollo de la superficie de ZnO con la atmósfera conduce inevitablemente a una transferencia de carga desde la superficie a la superficie adsorbida y /o vice versa.

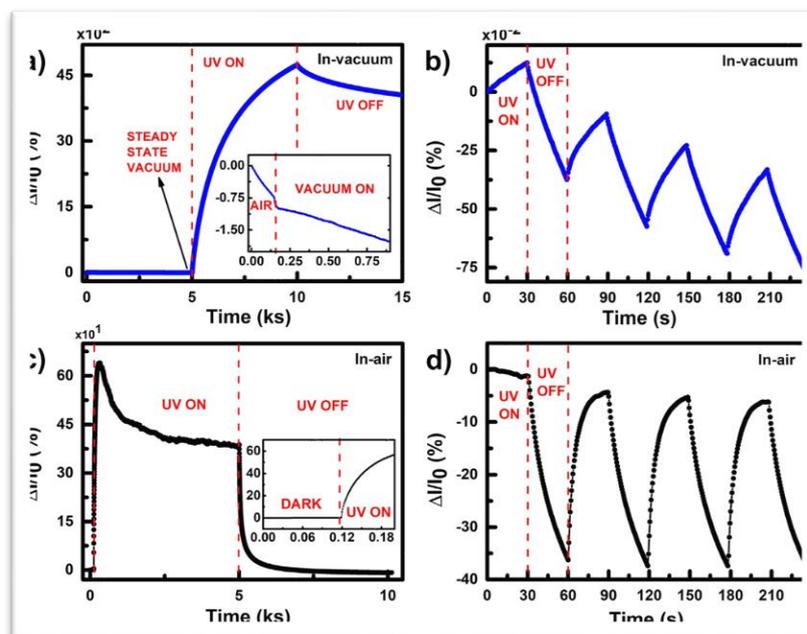


Figura 10-3. Flujo de tiempo de películas ZnO

Elaborado por: Kalkan, S. 2018

En la figura 10-3 se muestra flujo dependiente del tiempo de películas delgadas de ZnO hechas de Pn expuestas a luz ultravioleta a 254 nm durante 5 ks bajo (a) alto vacío y (c) aire (40-45% RH). Después de 5x, se apagó la luz ultravioleta y las muestras se dejaron 5x adicionales. Caja (A) muestra el efecto del alto vacío en los cambios de corriente, mientras que el recuadro (c) muestra el valor de oscuridad antes de la exposición a la luz ultravioleta en el aire. Mediciones de TPS a corto plazo de una película delgada de ZnO realizadas por Pn para (b) entornos de alto vacío y (d) aire. Durante todas las mediciones, las muestras se polarizaron con el voltaje de polarización constante $V_b = 1V$.

Las medidas de TPC se realizan por períodos cortos de 30 s con cuatro ciclos de encendido /

apagado con el fin de verificar las propiedades características de las películas delgadas de ZnO bajo alto vacío y en condiciones de aire. Antes de cada medición de TPC, las muestras se exponen a luz ultravioleta durante aproximadamente 3 horas para eliminar las muestras adsorbidas en varias de sus superficies. Justo después de aprox. 3 horas de iluminación UV continua, empieza con mediciones de TPC a corto plazo, con el tiempo de encendido / apagado del obturador establecido en 30 segundos. Cuando las luces están encendidas, se presenta un aumento muy pequeño pero notable en la producción de fotos, seguido de un aumento exponencial de la corriente debido al proceso de desorción foto asistida en ambos entornos.

Cuando se apagan las luces, la fotocorriente en el aire desciende a su nivel original, lo que indica una mayor estabilidad y reversibilidad. Sin embargo, la diferencia entre las tasas de respuesta y recuperación provoca una tendencia a la baja en el cambio en la corriente total en varios ciclos de encendido / apagado de alto vacío, Además, el cambio de la fotocorriente en el alto vacío es muy pequeño debido a la falta de oxígeno; <1%. Este ligero cambio se debe a la baja presión parcial de oxígeno y las moléculas de agua de alto vacío después de ~ 3 horas de evacuación e irradiación. Por el contrario, la variación de la fotocorriente en el aire fue > 30% porque las moléculas de oxígeno y agua permanecen cerca de la superficie y juegan un papel importante en el mecanismo fotoconductor. Por lo tanto, después de apagar la luz ultravioleta en el aire, estas moléculas se pueden volver a adsorber fácilmente. Los cambios en la fotocorriente en las películas delgadas de ZnO se deben en gran parte a la adsorción / desorción de adsorbatos superficiales y no a la fotogeneración / recombinación rápida de pares de huecos de electrones como en el primer proceso en estado sólido.

3.1.9. *Tiempo de vuelo (TOF)*

Los estudios realizados mediante técnicas ya mencionadas, han mostrado una característica en común, como lo es el análisis de fotoconducción en películas transitorias, esto ha reflejado una caracterización significativa en materiales fotoconductores, sin embargo, existen técnicas que reflejan otras ventajas significativas como los análisis en grafeno, denominado como un material fotoconductor. Una de estas técnicas es el Tiempo de vuelo (TOF) que mide el tiempo que toma las partículas fotoconductoras en vuelo desde un punto emisor hasta el receptor, lo cual se detalla en los estudios que se analizan en el presente apartado.

Kasap (2019) determinó en un estudio realizado que la eficiencia de recolección de Hechta η_0 y sus expresiones de absorción exponencial modificadas se han utilizado ampliamente en experimentos de fotoconductividad con tiempo de vuelo transitorio (TOF), así como en la evaluación de la sensibilidad del detector de radiación integrado. Sin embargo, las ecuaciones se utilizan con señales pequeñas donde el campo interno permanece uniforme (sin perturbaciones). Usando simulaciones de Monte Carlo y soluciones de continuidad numérica, tasas de captura y

ecuaciones de Poisson para calcular la eficiencia de recolección η_r (CE) para diferentes niveles de inyección de carga y adquisición de profundidad.

Los portadores de carga se inyectan inmediatamente muy cerca del electrodo receptor de radiación y luego se mueven en condiciones de perturbación de la carga espacial. La desviación EC del valor ideal de Hecht se cuantificó con respecto a la velocidad de inyección y el tiempo de adquisición normalizado τ en función del tiempo de tránsito para señales pequeñas. Los resultados se pueden presentar utilizando una escala comprimida exponencialmente con coeficientes que dependen de τ . Se presenta un diagrama para estos coeficientes. La CE cae significativamente por debajo del valor de Hecht al aumentar r , y la desviación es más pronunciada con valores más bajos de τ . Los errores en la extracción de τ de la aplicación de la ecuación de Hecht también se calcularon y mapearon a partir de varios valores de r y τ .

Li (2017) Tras un estudio realizado, determino que las imágenes tridimensionales con sensores de tiempo de vuelo (ToF) ganan impulso, ampliamente utilizado en muchas aplicaciones gracias a la rentabilidad, la simplicidad y la compacidad. Sin embargo, la generación actual de cámaras ToF adolece de una resolución espacial deficiente con restricciones de producción física. En este artículo, sugerimos CS-ToF, la arquitectura de imagen para que obtenga imágenes ToF espaciales de alta resolución con multiplexación óptica y detección de compresión. EL enfoque se basa en la observación de que la profundidad no está relacionada linealmente con el píxel ToF dado que las mediciones y la visualización de fase de las imágenes grabadas dan una imagen lineal. Están utilizando esta propiedad para desarrollar una técnica basada en CS que se utilizará para recuperar los desagües. Resolución de imagen 3D. Basándonos en la arquitectura propuesta, desarrollamos un prototipo con una resolución de 1 megapíxel con compresión ToF, que mejora la resolución espacial en 4 y 3 veces mejora del medio natural. Creemos que nuestra propuesta de arquitectura CS-ToF ofrece una extensión. Una solución sencilla y económica para mejorar la resolución espacial de ToF y sensores asociados.

Choe (2017) en su estudio determino que existe un interés significativo en el desarrollo de PET de tiempo de vuelo (TOF) para mejorar la relación señal / ruido del PET en comparación con el PET sin TOF. Las matrices de fotomultiplicadores de silicio (SIPM) han llamado la atención sobre su uso como fotosensor de PET-TOF de alta velocidad. Dado que se requieren muchas matrices SIPM para construir un PET humano moderno, se requiere un proceso multiplex para desarrollar un TOF-PET basado en SIPM con buenos parámetros de tiempo y un alto potencial de reducción de canales. El objetivo de este estudio fue desarrollar un circuito multiplex capacitivo para PET TOF basado en SIPM. El circuito de multiplexación propuesto se evaluó midiendo el tiempo de resolución de encendido (CRT) y la resolución de potencia frente a la sobretensión utilizando tres valores de condensador diferentes 15, 30 y 51 pF. Los experimentos se realizaron en una matriz SIPM de 3 x 3 mm 2 x 42. En cuanto al valor del condensador, el circuito de multiplexación que utiliza un condensador más pequeño mostró la mejor eficiencia de sincronización. Por otro lado,

la resolución de potencia y la calidad del histograma de inundación del circuito multiplex se deterioraron a medida que disminuía el valor del condensador.

El circuito propuesto fue capaz de producir un CRT de 260 ± 4 ps FWHM y una resolución de energía de 17.1% con un par de cristales LYSO de 2×20 mm³ usando un capacitor de 30 pF a una sobretensión de 3.0 V y más clara Logrando una separación de la matriz de cristal LYSO 6 es posible $\times 6$ en el histograma de flujo utilizando un circuito multiplex. Los resultados del experimento muestran que el circuito de multiplexación capacitivo propuesto es adecuado para obtener excelentes parámetros de temporización y resolución de vidrio en el histograma de fundición con un deterioro mínimo en la resolución de energía y para reducir el número de canales reproducidos. Detector PET TOF.

Arriaga (2017) en su estudio determinó que las propiedades mecánicas de la madera se pueden estimar a partir de la velocidad de propagación de las ondas midiendo el tiempo de vuelo (ToF) de las ondas. Sin embargo, el intervalo de tiempo dificulta las mediciones, lo que conduce a una dependencia obvia de la velocidad con la longitud, y esta propiedad dependiente de la especie y del instrumento también se ve influenciada por los nudos. El estudio se refiere a la determinación del retardo utilizando varias mediciones de ToF de sensores de posicionamiento in situ. Se realizaron mediciones longitudinales de ToF en 120 muestras con dimensiones de coníferas de 90×140 mm: radiata, rojiza, piña y mar. Se utilizaron los siguientes audífonos: Sylvatest Duo, USLab y Microsecond Timer.

Los sensores están diseñados para mediciones de extremo a extremo con "la misma área" y "superficies opuestas". Los datos de ToF se obtuvieron a partir de muestras de longitud completa (4 m) seguidas de las mismas muestras acortadas a 3 m, 2 m y 1 m de longitud. Los métodos de ToF in situ se utilizan para determinar de forma fiable la longitud independientemente del retardo (tL) y la velocidad. La desviación de velocidad observada en las mediciones de extremo a extremo es inferior al 4,4% (Arriaga, 2017,p.20).

Según un estudio realizado por Simonson, Johanson & Kasap (2020), demostraron que los efectos de los rayos X en las muestras se examinados bajo técnicas convencionales de tiempo de vuelo (TOF) y campo aéreo intermitente (IFTOF) y bajo un campo eléctrico fuerte (5-10 V / micrón) y expuestas a rayos X, seguidas de mediciones de TOF e IFTOF para determinar la movilidad de deflexión del orificio y la vida útil del destello X. No presentaron cambios en la movilidad de la deriva del pozo, pero hubo una fuerte disminución en la vida útil del pozo. La reducción de la vida útil del pozo dependía únicamente de la dosis total o del campo utilizado. No hubo dependencia de la tasa de dosis en el rango de 0,12 a 2,5 Gy / so de la energía de los fotones de rayos X en el rango de 50 a 90 keVp (correspondiente a un fotón con una energía media de 31,9 a 44,7 keV). Las consecuencias de estos resultados son visibles calculando la eficiencia de las tarifas de facturación. Los resultados muestran que el efecto de la exposición a los rayos X en los detectores de rayos X a-Se es significativo cuando el detector está por debajo del campo aplicado

durante la exposición, pero se minimiza cuando el campo operativo es alto.

Hasta ahora, la mayoría de los polímeros conjugados se han considerado como materiales predominantemente unipolares (portadores de cavidades o electrones), aunque no existe una razón intrínseca por la que la movilidad de las cavidades y los electrones deba ser diferente en los semiconductores orgánicos. Gambino (2021) Ha demostrado experimentalmente, utilizando el método del tiempo de vuelo, que un polímero conjugado prototipo, poli [2-metoxi-5-(2-etilhexoxi)-1,4-p-fenileno-vinilo], no muestra preferentemente transporte de electrones. o vacío., transporte de mercancías ambipolar. Además, la presencia de trampas y el dopaje (involuntario) dificultan tener en cuenta la naturaleza del mecanismo de carga. Sin embargo, al descubrir la dependencia de la movilidad de factores extrínsecos como el oxígeno molecular, pudimos descubrir la conducción no dispersiva de cavidades y electrones. También se observa una transición del control de la trampa al control térmico en el mecanismo de transporte de carga de electrones. Utilizando el modelo de perturbación gaussiana para analizar los datos experimentales, se encontró que el parámetro de perturbación posicional para las cavidades es insignificante y que solo la perturbación de energía controla el transporte de carga, mientras que la conducción de electrones está controlada por la interacción energética y posicional.

De acuerdo Simons (2020) en un estudio realizado demostró que las capas fotoconductoras estabilizadas de selenio amorfo (α -Es) se utilizan actualmente en la mayoría de los detectores de imágenes de rayos X digitales modernos para mamografías de pantalla plana. El rendimiento de estos detectores depende en parte de las propiedades de transporte de electrones de la capa fotoconductora α -Es. Las propiedades de transporte consisten en la movilidad de la deriva del portador de carga μ y el tiempo de captura de profundidad (vida útil) τ , tanto de los electrones como de los agujeros en la capa fotoconductora, que determinan la sensibilidad del detector de imágenes de rayos X mediante la recogida eficiente de mercancías. El producto de la movilidad de deriva de un vector, su duración y el campo eléctrico aplicado $\mu\tau F$ es el vector de desplazamiento de empuje, que se refiere a la distancia promedio que un portador de carga puede viajar a la capa fotoconductora antes de su captura. Los transportistas capturados no recolectan, usan ni reducen la eficiencia de recolección de carga y la sensibilidad a los rayos X en tiempo de vuelo (TOF). Se investigan los efectos de los rayos X de alta dosis de α -Es sobre las propiedades de transporte. Se produjeron películas de selenio amorfo estabilizado de composición nominal mediante técnicas de evaporación. La radiación de rayos X fue proporcionada por un tubo de rayos X con un objetivo de tungsteno filtrado.

El impacto de estos resultados se puede determinar calculando la eficiencia de las tarifas de facturación. Los resultados muestran que los efectos de la irradiación de rayos X en los detectores de α -Es son débiles en ausencia de un campo eléctrico, pero considerables en presencia de un campo eléctrico. Estos efectos se minimizan cuando el rango operativo es alto (correspondiente a una alta eficiencia de recolección) y el α -Es está hecho de material electrónico de alta calidad.

En un estudio realizado por Emin (2018), utilizando mediciones de fotocorriente de tiempo de vuelo para determinar el papel de los límites de los granos en el transporte de portadores de carga de película delgada de yoduro de plomo y metil amonio ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) comparando los resultados de las mediciones con simulaciones cinéticas de Monte Carlo, que se basan en un modelo de transporte que realiza el transporte en cristales y salta a través de los límites de los granos. Las movilidades electrónicas observadas son del orden de $\sim 2,5 \times 10^{-1} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, el salto a través de los granos se modela con una tasa de probabilidad similar a Arrhenius, que se caracteriza por la energía de activación. La estimación de la pendiente de una dependencia entre la movilidad y la temperatura se encontró en el rango de $\sim 56\text{-}70 \text{ meV}$. Los factores que contribuyen a E_a son las rutas de derivación y los cambios de tamaño de grano, incluidas las desalineaciones del nivel de energía en los límites de grano. Estos resultados son un paso hacia el diseño de nuevas células solares de perovskita orgánico-inorgánico sin ventanas.

3.1.10. Tiempo de vuelo de campo interrumpido (IFTOF)

Las técnicas de tiempo de vuelo de campo interrumpido (IFTOF) se utilizan para medir las propiedades de transporte de las cavidades y los electrones en las capas a-Es. La técnica de fotoconductividad transitoria TOF mide la respuesta de fotocorriente transitoria de los portadores de carga fotoinyectados a medida que se mueven a través de una muestra de alta resistencia bajo la influencia de un campo eléctrico. La amplitud temporal del pulso TOF está directamente relacionada con la movilidad de deriva del usuario. Simons (2020) determina que la técnica IFTOF detiene la deriva de los portadores de carga a través de la muestra al suprimir temporalmente el campo eléctrico, lo que permite que los portadores interactúen con las trampas en las profundidades de la masa. El número de portadores atrapados disminuye durante el tiempo de inactividad. Cuando se vuelve a aplicar el campo eléctrico, los portadores de carga restantes continúan desplazándose a través de la muestra. El porcentaje de carga recuperado antes y después del corte está vinculado al tiempo de descarga profunda de la carga (vida útil).

En un estudio realizado por Adeagbo (2018) se centró en los efectos de la inducción de rayos X en la vida atrapada del usuario en a-es y en el proceso de recuperación del daño de rayos X en la mayoría de ejemplos, investigando el efecto de la dosis de rayos X sobre la vida útil de la trampa del usuario, así como el efecto de la temperatura sobre el daño de los rayos X y el proceso de recuperación. La duración de la absorción del vector disminuye a medida que aumenta la dosis acumulada depositada en las muestras de a-Es. Una vez que cesa la exposición a los rayos X, la vida del usuario vuelve lentamente (durante varias horas) a su estado original. Varias muestras de detectores fueron expuestas a altas dosis de rayos X y el proceso de recuperación se observó a diferentes temperaturas, $23,5^\circ \text{ C}$ y $35,5^\circ \text{ C}$. La técnica del tiempo de vuelo (TOF) para medir la movilidad de los portadores Flug und Interrastiert La técnica IFTOF (Field Time-of-Flight) fue

utilizada para medir la vida útil de los portaaviones. Todas las muestras utilizadas fueron a-Es puro para medidas de transporte de vacío, a-Es: 0,3%: 2,5 ppm de Cl y a-Es: 0,5%: 10 ppm de Cl para medidas de transporte de electrones. El espesor de la muestra varía de 50 micrómetros a 200 micrómetros con una variación de ± 5 micrómetros en diferentes posiciones de la muestra. La tasa de dosis aplicada durante la exposición a los rayos X varía entre 1,9 Gy / sy 2,5 Gy / s. La diferencia en la tasa de dosis no afecta el cambio en el tiempo de retención del vacío, pero no tiene un efecto significativo sobre la duración de la absorción de electrones. La tasa de reducción de la vida útil estándar del orificio es más rápida a 35,5 ° C que a temperatura ambiente (23,5 ° C). Determinando que los procesos de recuperación fueron más rápidos a la temperatura más alta.

3.1.11. Espectroscopía de fotoelectrones ultravioleta (UPS)

A diferencia de las técnicas ya analizadas con anterioridad, la espectroscopía de fotoelectrones ultravioletas (UPS) puede medir la longitud de difusión de la portadora minoritaria de los semiconductores, estudios se han realizado aplicando esta técnica novedosa, en combinación con otras técnicas de caracterización de materiales fotoconductores, tal y como se detalla en el presente apartado.

Las mediciones de fotovoltaje de superficie (SPV) son un método que se utiliza ampliamente para la determinación de la longitud de difusión de la portadora minoritaria de los semiconductores. Estudios como el ZU et al. (2019), usaron esta técnica para desentrañar las propiedades electrónicas de los perovskitas de haluro de plomo. En su estudio demostraron que el fotovoltaje superficial (SPV) es un fenómeno clave que ocurre en las superficies de perovskita que presentan una densidad no despreciable de estados superficiales, que es más la regla que una excepción para la mayoría de los materiales en estudio. Con espectroscopía de fotoelectrones ultravioleta (UPS) y sonda Kelvin, evidenciaron que los flujos de fotones ultravioleta diminutos (500 veces más bajos que los utilizados en los experimentos típicos de UPS) son suficientes para inducir SPV y desplazar el perovskita y VBM en varios 100 meV en comparación con la oscuridad.

Por otro lado, COLE (2020), emplearon la espectroscopía de fotoelectrones de rayos X y espectroscopía de fotoelectrones ultravioleta (UPS), en polvo de Co (OH) 2 de grado analítico, los estados de valencia se analizaron mediante también con esta técnica. En el estudio destacan que la presencia de Co (OH) 2 en las aplicaciones de energía renovable es importante para mejorar la actividad. Además, proporcionó una investigación detallada de espectroscopía de fotoelectrones de modo que el Co (OH) 2 pueda identificarse correctamente de manera no destructiva. Además del escaneo de levantamiento, se reportaron escaneos detallados con corrección de carga para señales de fotoelectrones de superficie.

Aghdassi (2018), estudiaron extensamente las películas delgadas de tetraazaterrylene (TAT) cultivadas en sustratos de grafito pirolítico altamente orientado (HOPG) con respecto a sus

propiedades electrónicas intrínsecas e interfaciales mediante espectroscopía de fotoelectrones ultravioleta (UPS). El UPS dependiente de la energía de los fotones realizado perpendicularmente a los planos moleculares de las películas multicapa TAT a temperatura ambiente revelaron claramente la dispersión intermolecular en forma de banda de la energía del orbital molecular ocupado más alto (HOMO) de TAT.

La detección directa de defectos intrínsecos en perovskitas de haluro (HaPs) por métodos estándar que utilizan excitación óptica es bastante desafiante, debido a la baja densidad de defectos en la mayoría de las muestras de esta familia de materiales. Si bien varios métodos eléctricos pueden detectar densidades de defectos, como la espectroscopía transitoria de nivel profundo (DLTS) o la corriente estimulada térmicamente (TSC), requieren la preparación de contactos eléctricos óhmicos y / o rectificadores a la muestra, lo que no solo plantea un desafío por sí mismo en el caso de los HaP, sino que también puede crear defectos en la interfaz contacto-HaP e introducen defectos extrínsecos en el HaP. En este sentido, LEVINE (2021), mostraron que las mediciones de espectroscopía de fotoelectrones de baja energía se pueden usar para obtener directamente la posición de energía de los estados de brecha en HaP de banda ancha ($E_g > 2$ eV) basada en Br. Al medir las capas de HaP en las capas de contacto de huecos y electrones, así como en los monocristales sin contactos, sobre esto concluyen que los defectos profundos observados son intrínsecos al HaP basado en Br, y proponen una ruta de pasivación mediante la incorporación de un -formando ligando en la solución precursora.

3.1.12. Conductividad de microondas de resolución temporal (TRMC)

La conductividad de microondas de resolución temporal (TRMC), se enfoca en medir las propiedades electrónicas de compuestos semiconductores, tal y como se puede igualar a las técnicas antes analizadas, a la vez se diferencia con cualidades significativas representadas en la versatilidad de detectar las propiedades electrónicas de los materiales fotoconductores y evaluarlas. En el presente apartado se ha tomado en consideración conceptos y estudios realizados bajo esta técnica novedosa.

El TRMC consiste en medir los cambios en la reflectividad de microondas de un fotoconductor cuando se crean portadores fotogenerados en exceso por un breve destello de luz. La reflectividad es proporcional a la densidad del portador libre, lo que produce una desintegración transitoria en muchos órdenes de magnitud de tiempo similar al método TP. La conductividad de microondas de resolución temporal (TRMC) es un método muy versátil para evaluar rápidamente las propiedades electrónicas de compuestos semiconductores sin la necesidad de construir y optimizar dispositivos electrónicos. Al respecto LABRAM (2017), estudiaron cómo los mecanismos de recombinación bimolecular y Auger afectan las mediciones de TRMC. En particular, investigaron cómo la recombinación reduce el valor medido de la figura de mérito de

TRMC a una alta fluencia óptica incidente. Al ajustar este modelo a los datos obtenidos experimentalmente para el compuesto de perovskita de haluro híbrido, yoduro de metilamonio y plomo, pudieron extraer las constantes de velocidad bimolecular y Auger y proporcionar una determinación clara de la suma de las movilidades de huecos y electrones para estas películas. Por otro lado, DUGAY (2018), utilizaron la técnica de conductividad de microondas sin electrodos resuelta en el tiempo para caracterizar nanopartículas de cruce de espín (SCO). Mostraron que TRMC es un medio simple y preciso para evaluar simultáneamente el estado magnético de los compuestos SCO y la información de transporte de carga en la escala de longitud nanométrica.

En el estado de giro bajo desde la temperatura del nitrógeno líquido hasta 360 K, las mediciones de TRMC presentan dos regímenes bien definidos en la movilidad y en los tiempos de vida media, en los que la temperatura de transición anterior T_R ocurre cerca de 225 K. Por debajo de T_R . A partir de los resultados proponen un régimen sin activación que tiene lugar asociado con una vida útil corta de los portadores de carga apunta a la presencia de estados de trampa poco profunda. Por encima de T_R , estos estados se liberan térmicamente, produciendo un régimen de salto activado térmicamente donde los saltos más largos aumentan la movilidad y, concomitantemente, la energía de barrera. La energía de activación podría originarse no solo a partir de contribuciones intrincadas como las autolocalizaciones polarónicas, sino también del desorden dinámico debido a fonones y / o fluctuaciones térmicas de los restos de SCO (Dugay et al, 2018, pp.5672-5678).

Kay (2020), estudio la dinámica del portador de carga de las películas de hematita epitaxial mediante microondas de resolución temporal. Las mediciones de TRMC sondearon la dinámica del portador de carga en escalas de tiempo más largas, mostrando un decaimiento biexponencial con constantes de tiempo características de $\approx 20\text{--}50$ ns y $1\text{--}2$ μs . Los resultados de su estudio proporcionaron una explicación del comportamiento fotoelectroquímico dependiente de la longitud de onda de los fotoelectrodos de hematita y sugieren que un aumento en el rendimiento de la fotogeneración o la movilidad del portador de carga es responsable del rendimiento mejorado a energías de excitación más altas. Aunque la dependencia del tiempo de la disminución de la fotoconductancia, o la vida útil del portador de carga, sigue siendo la misma.

3.1.13. Espectroscopía de fluorescencia

Técnicas como TOF y su versión mejorada IFTOF muestran ventajas similares, con la diferencia que IFTOF puede suprimir el campo electromagnético y así mostrar resultados eficientes con relación al electromagnetismo derivado de muestras de materiales fotoconductores, en cambio la espectroscopía de fluorescencia que es la técnica que se analizara en el presente apartado, muestra una cualidad única que es el uso de fluorescencia para medir las propiedades electrónicas de

compuestos semiconductores. A su vez su aplicación es variada en diferentes campos, así como técnicas de MGT o SEC.

Doppagne (2020) mediante un estudio combino dos enfoques, microscopía de túnel de barrido (STM) y espectroscopía de fluorescencia, para estudiar la tautomerización dentro de moléculas individuales de ftalocianina de base libre (H2Pc) depositadas en una superficie de monocristal de Ag (111) cubierta de NaCl. Los espectros de fluorescencia inducida por STM (STM-F) exhiben características duplicadas que asignamos a la emisión de los dos tautómeros moleculares. La tautomerización, la interconversión entre dos isómeros moleculares constitucionales, es de naturaleza ubicua, juega un papel importante en la química y se percibe como una función de cambio ideal para los dispositivos emergentes de escala molecular. Los cambios electrónicos y vibrónicos que resultan de esta tautomerización del NH, así como los detalles del mecanismo de conmutación, se estudiaron extensamente con espectroscopías ópticas, incluso con sensibilidad de una sola molécula. Se apoyó esta interpretación comparando mapas de fluorescencia hiperresueltos (HRFM) de las diferentes contribuciones espectrales con simulaciones que explican la interacción entre los excitones moleculares y los plasmones de picocavidad. Identifico la orientación de los dipolos ópticos moleculares, determinando la huella vibrónica de los tautómeros y sondeamos la influencia de cambios diminutos en su entorno de escala atómica. Junto con otras observaciones, esta excitación remota indico que el estado excitado de la molécula está involucrado en la ruta de la reacción de tautomerización.

Bagheri & Fatemi (2018) demostró que los resultados de la espectroscopía de fluorescencia demostraron que la emisión de fluorescencia de HSA se apagó considerablemente tras la adición de aflatoxina B1 y G1 a través de un mecanismo de extinción estático. Los parámetros termodinámicos se calcularon utilizando la ecuación de Van't Hoff, que indicó que la reacción es espontánea y los enlaces de hidrógeno y las fuerzas de van der Waals desempeñaron un papel principal en la unión de las aflatoxinas B1 y G1 a la HSA. Las constantes de unión de las aflatoxinas B1 y G1 a HSA se determinaron mediante la ecuación de Van't Hoff modificada. También hemos realizado estudios de acoplamiento molecular para localizar los sitios de unión, el modo de unión y para determinar las constantes de unión de las aflatoxinas B1 y G1 a la HSA. Los resultados del acoplamiento molecular demostraron que tanto la aflatoxina B1 como la G1 se unen al subdominio IB de HSA principalmente por interacción hidrófoba y enlaces de hidrógeno, lo que concuerda con los obtenidos mediante el estudio de fluorescencia. Después de realizar la simulación de MD, los valores de la constante de interacción obtenidos de los resultados del acoplamiento fueron mucho más cercanos al valor experimental de la espectroscopía de fluorescencia. Todos los resultados de espectroscopía de fluorescencia, acoplamiento molecular y dinámica molecular tienen una buena correlación entre sí.

Según Chen (2019) en un estudio se ha investigado teóricamente para un modelo de dos modos de tres estados de una intersección cónica acoplada a un entorno disipativo utilizando la

monitorización de la dinámica de paquetes de ondas en intersecciones cónicas mediante espectroscopía de fluorescencia resuelta en tiempo y frecuencia. Los espectros de fluorescencia controlados por tiempo y frecuencia ideales y realmente medibles se simulan de manera precisa y eficiente combinando el método de ecuaciones de movimiento jerárquico para la dinámica cuántica disipativa con la metodología del enfoque de ajuste de fase de ecuación de movimiento para el cálculo de señales espectroscópicas. Se muestra que los espectros de fluorescencia resueltos en tiempo y frecuencia revelan aspectos esenciales de la dinámica del paquete de ondas en las intersecciones cónicas y los efectos de la disipación inducida por el medio ambiente. Los resultados del presente trabajo indican que la espectroscopía de conversión ascendente de fluorescencia con resolución de tiempo de segundos es una herramienta eficiente para la caracterización de dinámicas ultrarrápidas en intersecciones cónicas.

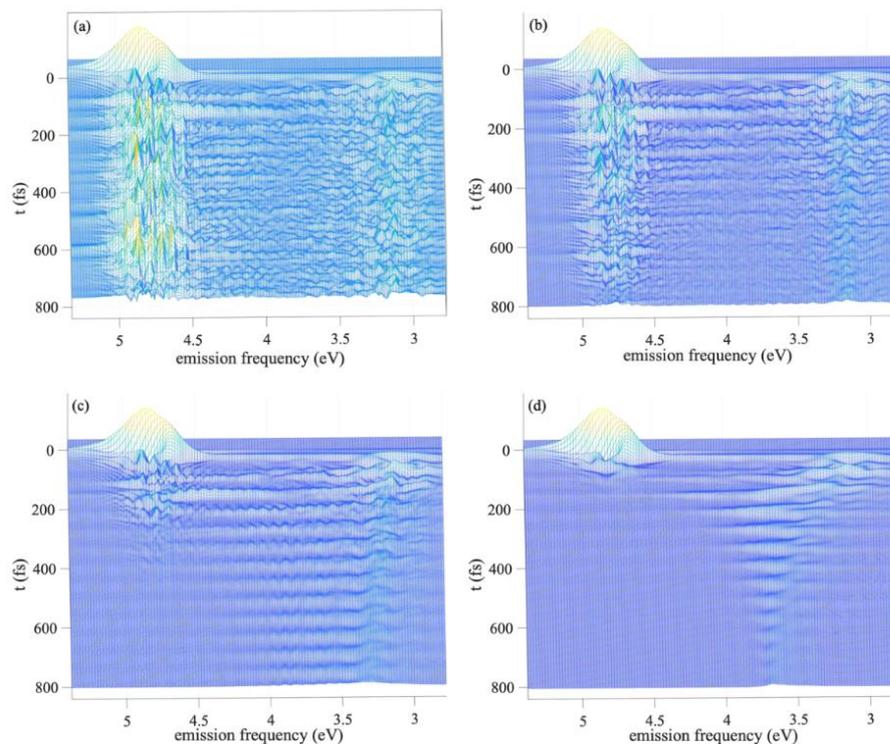


Figura 11-3. Espectros SE ideales con resolución de tiempo y frecuencia

Elaborado por: Chen, L. 2019

3.1.14. Espectroscopía bidimensional (2D)

La espectroscopia bidimensional (2D), resulta ser una técnica que a diferencia de otras como TOF, SEC o MTG, usa pixeles para mejorar su enfoque sobre las muestras de materiales fotoconductores, a su vez esta puede ser utilizada como soporte para otras técnicas, como la espectroscopia de fluorescencia. En el presente apartado se analizan diferentes estudios que han utilizado la espectroscopia bidimensional (2D) con grandes resultados.

Mediante un estudio realizado por Drager, Roeding & Brixner (2017) se determinó que se obtiene un espectro 2D completo de 15 a 15 píxeles en aproximadamente 6 segundos de tiempo de medición (más un promedio adicional si es necesario) usando espectroscopía electrónica coherente bidimensional (2D) con el apoyo de pulsos de modelado de fotoconductores mediante detección de fluorescencia. Un modelador de pulsos específico facilita la modulación de golpe a golpe de 1 kHz y se utiliza para recorrer rápidamente todos los retrasos. La información coherente se extrae de la señal de fluorescencia en fotoconductores inconsistentes utilizando un ciclo de fase de 27 pasos. Se ilustra la técnica del violeta de cresol en etanol y se restauró las fluctuaciones conocidas. El comportamiento de la señal de ruido se analiza en función del tamaño medio. El escaneo rápido proporciona un espectro 2D con un error cuadrático medio de raíz <0.05 después de 1 minuto de tiempo de medición.

Muller & Brixner (2020) en un estudio introdujeron la espectroscopía bidimensional (2D) de tres cuánticos (3Q) coherente molecular con ciclos de fase mediante la conformación de pulsos de disparo a disparo a una tasa de repetición de 1 kHz, de esta manera permitiendo adquirir simultáneamente, dentro de un solo escaneo, tres señales de cuarto orden y seis de sexto orden que correlacionan varias coherencias de un cuántico, dos cuánticos y 3Q. Demostraron el enfoque en la molécula de colorante rodamina 700 y reproducimos los nueve conjuntos de datos 2D, incluidas sus intensidades de señal absoluta, con simulaciones que utilizan un conjunto único y coherente de parámetros del modelo. Observaron una dependencia de la concentración lineal de todas las señales no lineales, lo que evidencia la ausencia de cascadas y señales de muchas partículas de moléculas que no interactúan. La implementación de un solo haz, sin fondo, permite la comparación directa entre varios tipos de señales no lineales y proporciona información sobre múltiples estados excitados. Aparte de las moléculas, se espera que el método sea aplicable a sistemas supramoleculares, polímeros y materiales de estado sólido con la perspectiva de revelar firmas de estados bi y triexcitónicos.

3.1.15. *Espectroscopía de absorción infrarroja*

La Espectroscopia de absorción infrarroja consiste en la medida de la interacción de la radiación infrarroja con la materia por absorción y es utilizada para el estudio e identificación de sustancias químicas o grupos funcionales en distintas formas a diferencia de técnicas como la SEC que separa macromoléculas usando la distorsión de luz. En el siguiente apartado se analizan resultados de diferentes autores que, utilizando la espectroscopia de absorción infrarroja, han obtenido datos relevantes en la caracterización de materiales fotoconductores.

(Olga et al., 2017, pp. 141-149), llevó a cabo un estudio donde empleó la espectroscopía de absorción de infrarroja mejorada de superficie sobre nanoestrellas de oro y nanopartículas esféricas. En su estudio, exploraron las diferentes nanoestructuras plasmónicas, incluidas nanoestrellas de oro

anisotrópicas (AuNSTs) y nanopartículas de oro esféricas, a través de la espectroscopía de absorción infrarroja mejorada en superficie en una configuración de reflexión total atenuada. En su experimento, observaron un aumento de hasta 10 veces en la absorción infrarroja (IR) del ácido tioglicólico (TGA) y un aumento de hasta 2 veces en las señales de la albúmina de suero bovino. Por otro lado, KLARENAAR et al (2017), analizó la evolución temporal de las temperaturas vibratorias en una descarga luminiscente de CO₂ medida con espectroscopía de absorción infrarroja. De igual manera, presentaron un método para analizar la transmitancia infrarroja a través de CO₂ excitado vibracionalmente y se valida en un espectro de CO₂, que muestra una buena concordancia entre el ajuste y los datos. La descarga en estudio se pulsa con un ciclo de trabajo típico de 5 a 10 ms encendido-apagado, a 50 mA y 6,7 mbar. Observaron un rápido aumento de la temperatura de la vibración de estiramiento asimétrico (T₃) al inicio del pulso, llegando a 1050 K, que es una elevación de 550 K por encima de la temperatura de rotación.

La Espectroscopía de absorción infrarroja también se presenta como una alternativa para evaluar la degradación de la encapsulación de los módulos solares, ya que en ocasiones esto es un problema crucial y, en consecuencia, las herramientas para evaluar y comprender la degradación correspondiente resultan importante. En tal sentido (Stroyuk et al., 2020, p. 110702), sugirieron la espectroscopía de absorción de infrarrojo cercano (NIRA) como una herramienta que tiene un gran potencial para determinar de forma no invasiva la composición del encapsulante y la lámina posterior en los módulos solares comerciales típicos. La identificación correcta del polímero por esta técnica fue respaldada por microscopía espectral Raman de los lados de aire y las secciones transversales de la lámina posterior, con cien módulos solares de diferentes fabricantes analizados por ambos métodos espectroscópicos.

Las antenas plasmónicas se han utilizado ampliamente para mejorar la absorción infrarroja de restos moleculares, debido a su capacidad para localizar la luz del infrarrojo medio en espacios manométricos a las longitudes de onda deseadas. Sin embargo, en longitudes de onda del infrarrojo medio, estas antenas plasmónicas metálicas no se benefician de la escala de longitud de onda que permite que los tamaños más pequeños de antenas operen a longitudes de onda más cortas (Wang et al., 2019, pp. 1272-1278), realizaron un estudio sobre la espectroscopía de absorción de infrarrojos mejorada en la superficie mediante plasma de transferencia de carga en el cual mostraron que los plasmones de transferencia de carga (CTP) permiten una huella de antena más pequeña con resonancias en el infrarrojo medio que se pueden sintonizar con una variación de escala manométrica en el ancho de un puente conductor. Sus resultados muestran que los CTP proporcionan un nuevo enfoque para el diseño de la antena de infrarrojo medio para SEIRA con capacidad de sintonización de resonancia a escala nanométrica.

Yoo (2018) en un estudio presento una matriz a escala de obleas de nanoaberturas coaxiales resonantes como una plataforma práctica para la espectroscopía de absorción infrarroja (SEIRA). Las nanoaberturas coaxiales con espacios tan pequeños como 7 nm se fabrican mediante

fotolitografía, deposición de capa atómica de una capa de Al₂O₃ de sacrificio para definir los nanogaps y planarización mediante molienda de iones con ángulo de mirada. En la condición de resonancia de Fabry-Pérot de orden cero, nuestras aberturas coaxiales actúan como un "resonador de modo cero (ZMR)", canalizando de manera eficiente hasta un 34% de la luz infrarroja incidente (IR) a lo largo de espacios anulares de 10 nm. Después de eliminar el Al₂O₃ de los huecos e insertar la proteína de seda, podemos acoplar los intensos campos ópticos del nanogap anular en los modos vibracionales de las moléculas de proteína. A partir de dispositivos ZMR de 7-nm-gap recubiertos con una película de proteína de seda de 5 nm de espesor, observamos señales de absorbancia IR de alto contraste que suprimen drásticamente el 58% de la luz transmitida e inferimos un factor de mejora de la absorción IR fuerte de 104 ~ 105. Estos dispositivos ZMR de un solo nanómetro pueden producirse en masa mediante el procesamiento por lotes y ofrecen rutas prometedoras para amplias aplicaciones de SEIRA.

3.1.16. Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es una herramienta versátil para identificar y caracterizar las propiedades químicas y físicas de los materiales, tanto a escala de laboratorio como de producción en masa. Esta técnica es tan importante que la mayoría de los artículos publicados sobre materiales como el grafeno contienen al menos un espectro Raman, técnicas como la espectroscopia de fluorescencia ha tomado como base espectroscopia Raman para caracterizar materiales fotoconductores en base a detección de fluorescencia, a su vez en el presente apartado se menciona diferentes estudios que dan soporte a la significancia de la espectroscopia Raman.

Los avances en el campo de la espectroscopía Raman se pueden atribuir en gran medida a los avances recientes realizados en las áreas de instrumentación. Históricamente, se pensaba que las aplicaciones analíticas que involucraban la espectroscopía Raman eran difíciles, sin embargo, los desarrollos en las fuentes, como los láseres de diodo, los dispositivos de carga acoplada (CCD), los pequeños espectrómetros, la óptica junto con la interconexión de fibras ópticas con Raman, lo han convertido en un método novedoso para aplicaciones analíticas.

La confluencia de la nanotecnología y la espectroscopía Raman que condujo al descubrimiento de la Espectroscopía Raman mejorada de superficie (SERS) ha abierto nuevas perspectivas para la detección de analitos en concentraciones muy bajas. Es posible obtener señales Raman de biomoléculas, productos químicos, explosivos, drogas, etc. en partes por mil millones (incluso a nivel de una sola molécula) con gran sensibilidad y especificidad (Kuhar, et al, 2018,pp.45).

Las otras ventajas que ofrece la espectroscopía Raman sobre otras herramientas analíticas son su naturaleza no invasiva y no destructiva. Esto ha dado lugar a su uso prolífico en el campo de materiales como estudios sobre alótropos de carbono, explosivos, semiconductores, productos farmacéuticos, arte, pintura y arqueología (Kuhar, et al, 2018,pp.45). La espectroscopía Raman ha sido

una herramienta indispensable para la caracterización de diferentes alótropos de carbono. Desde el diamante 3D o el grafito hasta materiales 2D como el grafeno o materiales 1D como los nanotubos de carbono (CNT), la espectroscopía Raman proporciona información relativa a las vibraciones de la red, defectos, orientaciones, etc. (Wu, et al, 2018,pp.1822-1873). Por ejemplo, los CNT de pared simple y de pared múltiple se pueden distinguir utilizando esta técnica. (Kuhar et al., 2018,pp.45).

Los modos de respiración radial que son exclusivos de la CNT de pared simple están ausentes en la CNT de paredes múltiples. Además, también se pueden diferenciar varios carbonos sp². Uno de los intereses más recientes sobre los alótropos de carbono ha sido la investigación del grafeno. Aquí, la espectroscopía Raman ha demostrado ser una herramienta integral para determinar el número de capas de grafeno junto con información de orientación, bordes, deformaciones, defectos, etc. También se ha explorado la mejora de las señales Raman de analitos utilizando materiales de carbono. En el campo de la detección de explosivos, se ha empleado la espectroscopía Raman mejorada de superficie para la detección de niveles de trazas.

Además, también se han explorado estudios sobre la viabilidad de la espectroscopía Raman para la detección de distancia. Las secciones siguientes proporcionan un aspecto diferente de esta técnica para demostrar la utilidad de la espectroscopía Raman en estudios sobre explosivos. El primer ejemplo muestra cómo se puede utilizar la espectroscopía Raman para monitorear las formulaciones de explosivos fundidos. En el segundo caso, se ha demostrado la detección de materiales ocultos en contenedores no metálicos utilizando espectroscopía Raman sensible a la profundidad, como la espectroscopía Raman con compensación espacial (SORS), la transmisión Raman y la espectroscopía universal Raman de múltiples ángulos (UMAR).

(Wu et al., 2018, pp. 1822-1873), realizó una investigación sobre la espectroscopía Raman de materiales basados en grafeno y sus aplicaciones en dispositivos relacionados. En su estudio establecen que los materiales basados en grafeno exhiben propiedades electrónicas, ópticas y mecánicas notables, lo que ha dado lugar a un gran interés científico y un enorme potencial para una variedad de aplicaciones. Además, la familia de materiales basados en grafeno está creciendo debido a los avances en los métodos de preparación. En este sentido, la espectroscopía Raman es una herramienta versátil para identificar y caracterizar las propiedades químicas y físicas de estos materiales, tanto a escala de laboratorio como de producción en masa.

Por otro lado, (Fang et al., 2018, pp. 3253-3263), realizó la captura de estructuras instantáneas durante reacciones fotoquímicas con espectroscopía Raman ultrarrápida. En su estudio el desarrollo actual de Raman ultrarrápido como una poderosa técnica vibratoria resuelta en el tiempo, particularmente la espectroscopía Raman estimulada por femtosegundos (FSRS), ha arrojado luz sobre las relaciones estructura-energía-función de varios sistemas fotosensibles. Estos conocimientos únicos a nivel de enlaces químicos han comenzado a permitir el diseño racional y el control preciso de máquinas moleculares funcionales en óptica, materiales, energía y ciencias

de la vida.

Autores como (Bernardini et al., 2020, pp. 923-929), utilizaron la Espectroscopía Raman y degradación inducida por láser de gruesatélite y ramsdellita, dos materiales catódicos de interés tecnológico. En su trabajo, caracterizan las mezclas naturales de ramsdellita y grotestelite combinando espectroscopía SEM-EDS, XRPD, FT-IR y Raman, para proporcionar espectros Raman de referencia. Los datos muestran que tienen un espectro típico e inconfundible, lo que permite un reconocimiento claro. Además, investigaron la degradación inducida por láser y muestran sobre el grupo satélite se transforma en ramsdellita. Además, el mapeo Raman les permitió estudiar la distribución en todas las muestras investigadas e, indirectamente, lo que juega un papel clave en la actividad electroquímica de estos compuestos.

Huang (2018) mediante un estudio determinó que la espectroscopía avanzada de puntos Raman puede proporcionar información de huellas dactilares moleculares con una resolución espacial extremadamente alta, pero la punta se contamina fácilmente, lo que produce desperfectos. También enfatizo que es siempre difícil obtener una mejor fluorescencia en la punta porque hay enfriamiento por la proximidad con el metal. En este estudio, se obtuvo una fluorescencia mejorada y espectroscopía Raman aislada usando una punta en placa aislada usando puntas ultrafinas aisladas generadas por deposición de capa atómica. Estas puntas de carcasa aisladas no solo muestran una excelente amplificación del campo electromagnético en el TERS, sino que también excluyen la interferencia de impurezas, lo que favorece enormemente las aplicaciones en solución. También se obtuvo una fluorescencia de pico mejorada utilizando estas puntas de concha aisladas con factores de ganancia de hasta $1,7 \times 10^3$ según las simulaciones teóricas. Además, las señales de fluorescencia amplificada y pico Raman se registran simultáneamente y sus intensidades relativas se pueden manipular alterando el grosor de la capa. Este trabajo abre una nueva vía para el análisis de superficies de muy alta resolución con una espectroscopía optimizada para plasmón.

Xiong (2019) mediante un estudio utilizó la espectroscopía de fluorescencia y la espectroscopía Raman como dos clases principales de métodos de espectroscopía en química física. Muy recientemente, la fluorescencia excitada Raman estimulada (SREF) se ha demostrado como una nueva espectroscopía híbrida que combina la especificidad vibratoria de la espectroscopía Raman con la magnífica sensibilidad de la espectroscopía de fluorescencia (hasta el nivel de una sola molécula). Sin embargo, este estudio de prueba de concepto estuvo limitado tanto por la capacidad de sintonización de la fuente láser comercial como por la disponibilidad de moléculas excitables en el infrarrojo cercano. Como resultado, la generalidad de la espectroscopía SREF permanece sin abordar y falta la comprensión de la condición crítica de preresonancia electrónica. En este trabajo, construimos una fuente de excitación modificada para explorar la espectroscopía SREF en la región visible. Aprovechando una gran paleta de tintes rojos, hemos estudiado sistemáticamente la espectroscopía SREF en una docena de casos diferentes con un intervalo

espectral fino de varios nanómetros. Los resultados no solo establecen la generalidad de la espectroscopía SREF para una amplia gama de moléculas, sino que también revelan una estrecha ventana de preresonancia electrónica adecuada para el proceso de bombeo Raman estimulado. Nuestro modelado teórico y otros experimentos con tintes recién sintetizados también respaldan los conocimientos obtenidos, que serían valiosos para diseñar y optimizar futuros experimentos SREF para espectroscopía vibracional de una sola molécula e imágenes vibratorias supermultiplex.

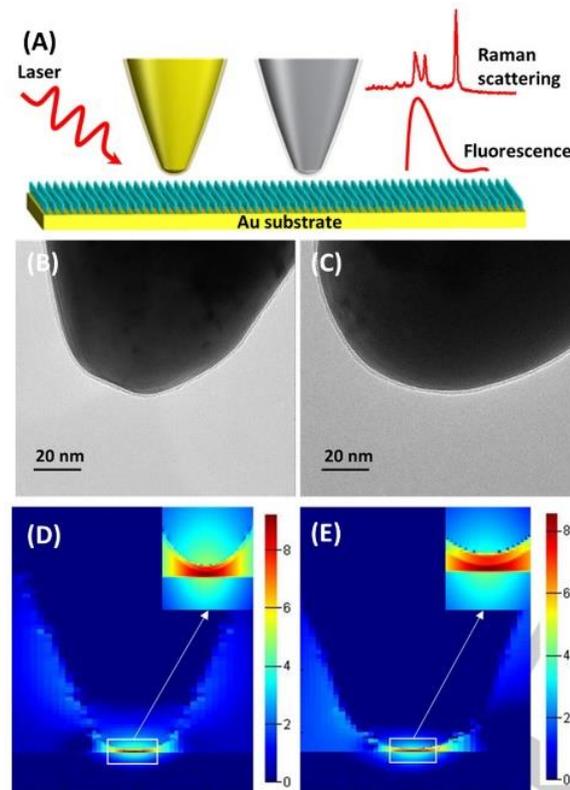


Figura 12-3. Diagrama esquemático

Elaborado por: Huang, Y. 2018

Según la figura 12-3 se puede observar: (A) Diagrama esquemático de espectroscopías mejoradas con punta plasmónica aislada de caparazón. (B), (C) Imágenes TEM del ápice de una punta de Au o Ag recubierta con 2 nm de SiO₂, respectivamente. (D), (E) La simulación de dominio de tiempo de diferencia finita tridimensional (3D-FDTD) del factor de mejora Raman en el nano-gap entre la punta de Au o Ag recubierta con 2 nm de sílice y un sustrato de Au, respectivamente. La longitud de onda del láser incidente es de 633 nm. El radio de la punta de Au y Ag es de 30 nm y 60 nm, respectivamente. La distancia entre la punta y el sustrato es de 1 nm. Cong (2020) determino que los materiales bidimensionales (2DM), con propiedades notablemente electrónicas, ópticas y mecánicas, exhiben un alto interés científico y un enorme potencial de aplicación. A su vez ha demostrado que la espectroscopía Raman es una técnica

rápida, conveniente y no destructiva para caracterizar las propiedades fundamentales de los 2DM a escalas de laboratorio y de producción en masa. En esta revisión, se discutió los avances recientes en la aplicación de la espectroscopía Raman a 2DM para probar sus propiedades fundamentales. Primero, se presentó la caracterización Raman en diferentes tipos de 2DM, transición de fase desencadenada por defecto, dopaje electrostático y temperatura, modos intracapa e intercapa dependientes del espesor, y aleaciones bidimensionales con composiciones ajustables. Se discuten las amplias capacidades de la espectroscopía Raman para sondear la transición de fase cuántica, como la onda de densidad de carga y la transición magnética. Luego, se discutió la aplicación de la espectroscopía Raman para sondear los fonones muaré, el acoplamiento interfacial y el acoplamiento interdimensional electrón-fonón en heteroestructuras de van der Waals (vdWHs).

Según Ribeiro y De Matos (2018) en su estudio sobre el estado actual de la espectroscopía Raman en fósforo negro ortorrómbico (BP) (para simplificar, en adelante, denominado BP). Demostraron que BP es un cristal semiconductor en capas que recientemente recuperó el interés porque puede exfoliarse hasta la capa única, exhibiendo así propiedades 2-D. Primero, revisamos brevemente la estructura cristalina y las relaciones de dispersión de fonones en BP, discutiendo las simetrías de los modos activos de Raman a la luz de la teoría de grupos, y se presentan las configuraciones de dispersión para observar los diferentes modos de fonón. Los resultados de la espectroscopía Raman polarizada revelan características de dependencia angular inusuales, que pueden atribuirse al dicroísmo lineal ya la naturaleza compleja de los elementos de la matriz de electrones y fonones. También los efectos del fonón de borde originados por reordenamientos de las terminaciones atómicas. Posteriormente, se presentaron los modos Raman que surgen de la interacción entre capas y que solo son visibles en el régimen de pocas capas. Finalmente, se describió nuevas perspectivas para la espectroscopía BP Raman en direcciones que permanecen parcial o totalmente inexploradas y que pueden proporcionar resultados potencialmente importantes para problemas como defectos, oxidación, dopaje, deformación, orden de apilamiento y otros materiales 2-D similares a BP.

3.1.17. Espectroscopía en dominio de tiempo (TDS)

Técnicas como Conductividad de microondas de resolución temporal o Espectroscopía de fotocorriente transitoria (TPC), poseen una característica común que es el uso de electromagnetismo para determinar las propiedades eléctricas semiconductoras de los materiales fotoconductoras, en cambio la espectroscopia en dominio de tiempo (TDS), permite medir los pulsos electromagnéticos emanados por materiales fotoconductoras, esto puede complementar demás técnicas antes mencionadas como MTG o Ups. En el presente apartado se analizan diferentes resultados de estudios que han utilizado la técnica en mención.

De acuerdo a Lai (2017), se investigó la caracterización óptica de vectores de silicio fotoexcitados recubiertos con MnFe₂O₄ NP utilizando espectroscopía en el dominio del tiempo THz (THz-TD). Se observó que el silicio recubierto con MnFe₂O₄ NP dio como resultado una atenuación significativamente mejorada de la radiación de THz en comparación con los sustratos de silicio puro bajo el láser de irradiación. Los resultados experimentales se evaluaron en el contexto de un modelo de estructura de bandas de superficie de semiconductores. Además, las antenas fotoconductoras recubiertas de MnFe₂O₄ NP han mejorado significativamente la eficiencia de la generación de radiación THz y la relación señal / ruido de la señal THz. Estos trabajos muestran que el revestimiento de MnFe₂O₄-NP puede mejorar el rendimiento general de los sistemas THz y que MnFe₂O₄-NP todavía se puede utilizar para la implantación de nuevos dispositivos ópticos. Este trabajo tiene un efecto significativo de las nanopartículas de ferrita de manganeso (Nn de MnFe₂O₄) sobre el aumento de la fotoconductividad superficial de los semiconductores.

Maussang (2017), determinó que los interruptores fotoconductores interdigitados (iPC) son dispositivos potentes y convenientes para la espectroscopía de resolución temporal, con la capacidad de funcionar como fuentes y detectores de pulsos de frecuencia de terahercios (THz). Sin embargo, la radiación emitida o detectada dentro del propio sustrato del dispositivo puede producir ecos que limitan inherentemente la resolución espectroscópica alcanzable para su uso en sistemas de espectroscopía en el dominio del tiempo (TDS). En este trabajo, se demostró un diseño de interruptores iPC de GaAs crecido a baja temperatura (LT-GaAs) para la detección de pulsos THz mediante espectroscopía en el dominio del tiempo que suprime estos ecos no deseados. Esto se logra mediante el crecimiento de una estructura de LT-GaAs multicapa enterrada que conserva sus propiedades ultrarrápidas, que, después de la unión de la oblea a un sustrato anfitrión recubierto de metal, da como resultado un interruptor iPC con un plano metálico enterrado a una profundidad de sublongitud de onda por debajo del LT- Superficie de GaAs. El uso de este dispositivo como detector, y acoplándolo a una fuente iPC sin eco, permite un THz-TDS sin eco y una espectroscopía de alta resolución, con una resolución limitada solo por la longitud temporal de la medición gobernada por la línea de retardo mecánico utilizada.

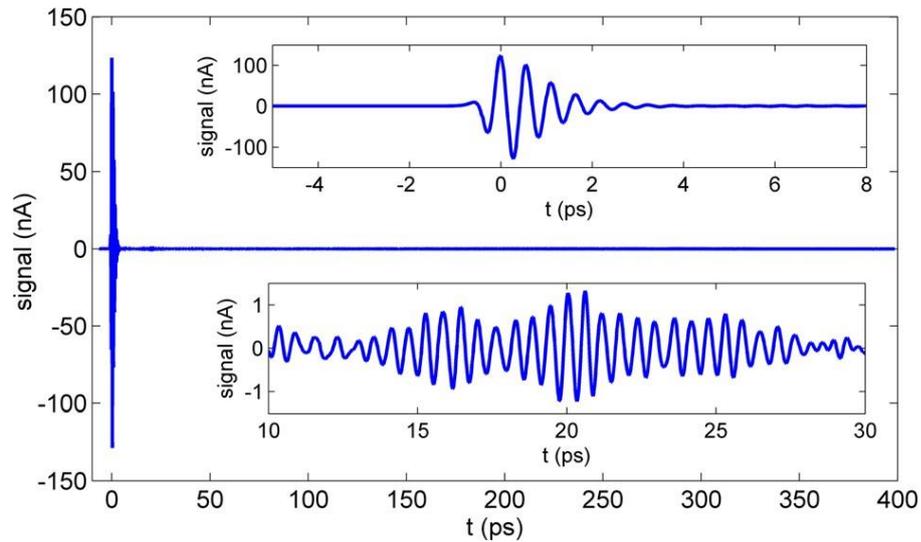


Figura 13-3. Pulso THZ mediante espectroscopía de dominio de tiempo

Elaborado por: Huang, Y. 2018

En la figura 13-3 se puede observar la traza detectada en el dominio del tiempo del campo eléctrico THz con un interruptor de metal enterrado basado en LT-GaAs para un tiempo de exploración de 400 ps. El pulso de THz se generó con un interruptor metálico enterrado a base de GaAs de 10 nm de espesor.

Nandi (2018) en su estudio reveló que los fotoconductores de superrejilla de In (Al) GaAs se cultivan usando epitaxia de haz molecular (MBE) con excelentes características de material para sistemas de espectroscopía en el dominio del tiempo (TDS) de terahercios que operan a 1550 nm. El material del transmisor (Tx) presenta una resistividad récord de 3,85 k Ω cm y una intensidad de campo de ruptura récord de 170 40 kV / cm (oscuro) y 130 20 kV / cm (iluminado con una potencia de láser de 45 mW). Se fabricaron receptores (Rx) con diferentes estructuras de superrejilla que mostraban una movilidad muy alta (775 cm² / Vs). El sistema TDS que utiliza estos fotoconductores presenta un ancho de banda superior a 6,5 THz con una potencia de láser de 45 mW en Tx y 16 mW en Rx.

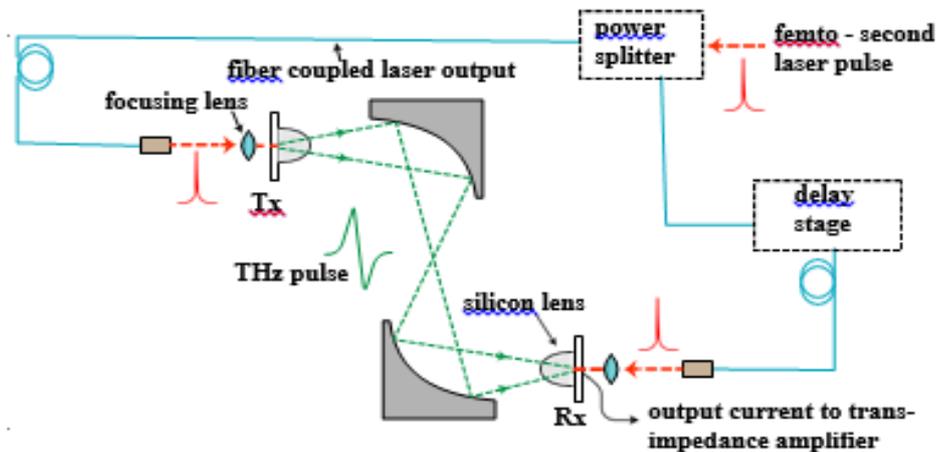


Figura 74-3. Configuración de espectroscopía de dominio de tiempo(TDS)

Elaborado por: Nandi, U. 2018

Según la figura 14-3 muestra la configuración experimental de espectroscopía en el dominio del tiempo (TDS) de terahercios utilizando un láser de fibra de modo bloqueado de Menlo Systems con una duración de pulso de 90 fs y una tasa de repetición de 100 MHz.

3.1.18. Espectroscopía Infrarroja (EIR)

De acuerdo a todas las técnicas antes mencionadas, se ha demostrado que los materiales fotoconductores con propiedades fluorescentes, electromagnéticas semiconductoras, pueden ser medidos de forma similar en mayoría de las veces, ya sea comprimiendo la capacidad electromagnética o describiendo la composición química con rayos de luz. La espectroscopia infrarroja (EIR), bajo rayos de luz infrarroja puede valorar las bandas electroestáticas de los materiales fotoconductores como también la medición de transporte de fotodetección y de fotoemisión.

Según Goubet (2018) en un estudio realizado determino que el uso de la transición infrarroja es una ruta alternativa interesante para el diseño de materiales coloidales complejos ópticamente activos en el rango del infrarrojo medio. Sin embargo, el rendimiento obtenido para la fotodetección basada en la transición dentro de la banda sigue siendo mucho menor que el que se basa en la transición entre bandas en materiales de banda estrecha que operan a la misma longitud de onda. Además, aconseja que se deben desarrollar nuevas estrategias para que los materiales intrabanda sean más eficaces. Se propuso el crecimiento de una heteroestructura de HgSe / HgTe como un medio para lograr una fotoconducción mejorada basada en infrarrojo. En primer lugar, se abordó el desafío sintético de desarrollar una heteroestructura en material blando (basado en Hg). Se investigó el espectro electrónico de la heteroestructura desarrollada mediante una combinación de simulación numérica, espectroscopía infrarroja, medición de transporte y

fotoemisión. Todo esto resultando una alineación de banda de tipo II con reducción de dopaje en comparación con un HgSe de un solo núcleo, las heteroestructuras tienen una corriente oscura más baja, una dependencia de la temperatura más fuerte, una fotorrespuesta más rápida (con una respuesta de tiempo por debajo de 50 μ s) y una detección aumentada en un factor de 30.

3.2. Discusión

De acuerdo con lo analizado en la etapa de resultados se puede observar la variedad de técnicas que se pueden implementar para caracterizar materiales fotoconductores, el presente enunciado nos permitirá dar una comparación de las técnicas analizadas, demostrando en tabla 2-3 parte de sus ventajas y desventajas que caracteriza a cada uno de estos.

Tabla 2-3: Ventajas y desventajas de técnicas para caracterizar materiales fotoconductores

Autor	Técnica usada	Ventaja	Desventaja
MALIK ET AL (2019) ARAIS (2017) FANTONI (2017)	Método de fotocorriente constante (CPM) para escaneo de E_{ph} en materiales fotoconductores.	Es especialmente útil en valores bajos de absorción óptica donde las mediciones de transmisión óptica estándar pierden su precisión.	Tarda varias horas en recopilar datos sobre el escaneo de E_{ph} en materiales fotoconductores, ya que los tiempos de asentamiento de las muestras pueden ser largos.
ZAYNOBIDINOV (2020)	Fotoconductividad de doble haz (DBP) mide la absorción óptica de un fotoconductor.	Logra condiciones de vida constantes a la muestra al dirigir un haz de polarización adicional constante, uniformemente absorbido. El rango de energía del fotón del haz de la sonda se puede escanear más rápidamente que	El rayo de luz debe configurarse para mantener una tasa de generación mayor.

			para el CPM, utilizando un sistema de control y medición más simple.
BIDIVILLE (2017) TANABE ET AL (2018) HOLOVSKÝ (2020)	Espectroscopía de fotocorriente por transformada de fourier (FTPS), mide la calidad del transporte difusivo del portador de carga de los materiales absorbentes fotoactivos.	Explora eficazmente todas las longitudes de onda en paralelo y, por lo tanto, tiene una ventaja de velocidad inherente sobre la espectroscopía dispersiva secuencial convencional.	Pueden aparecer franjas de interferencia en un espectro registrado de una película delgada.
VELDHUIZEN ET AL (2017) KOPPRIO (2019) LONGEADU (2018)	Método de rejilla fotoportadora de estado estacionario, mide la fotoconductancia de una muestra coplanar iluminada por un sistema de dos haces.	Se puede utilizar como una evaluación rápida de la calidad optoelectrónica de los materiales fotoactivos de película delgada. Permite una medición directa de la difusión ambipolar.	Puede alterar la cinética de recombinación y, como consecuencia, la longitud de difusión. La rugosidad de la superficie o la estructura interior pueden dispersar la luz y reducir su uniformidad, dando como resultado inconsistencias y / o inexactitudes en los resultados.

VELDHUIZEN (2017) VENTOSINOS ET AL (2020)	Técnicas de rejilla del fotoportador en movimiento (MGT), sirve para mediciones de las propiedades de fototransporte de los portadores mayoritarios y minoritarios.	Es utilizado para estudiar semiconductores de banda ancha amplia. La rejilla es ligera y se mueve a velocidad constante.	Para lograr el efecto de luz necesaria, la muestra debe contener dos contactos óhmicos coplanares.
NOJIMA ET AL (2019) RÜTTEN (2019) MANUEL ANTUCH (2018) NAKATSUKA (2020)	Espectroscopía de fotocorriente modulada, mide la distribución energética de estados de trampa desocupados en la brecha de energía de un fotoconductor.	Proporciona información sobre el DOS por encima de E F Genera aplicabilidad a OSC de trabajo con estructuras de dispositivo optimizadas y la determinación simultánea de las movilidades de electrones y huecos.	Antes de los experimentos, todas las muestras se deben exponer a luz ultravioleta.
DAN YAPING (2020)	Transitorios de encendido y apagado, mide la recombinación de los portadores minoritarios y el tiempo de emisión.	Las respuestas transitorias teóricas constan de dos exponenciales y encajan bien con los resultados experimentales.	Necesita de otras técnicas para dar arrojar datos más precisos.
KALKAN (2018) ÖZDOĞAN (2019)	Espectroscopía de fotocorriente transitoria (TPC), mide adsorción en la conductividad eléctrica en materiales fotoconductores.	Permite demostrar el cambio de conductividad de los componentes a analizar Las evaluaciones durante períodos cortos de tiempo y ciclos definidos,	Los análisis deben ser en periodos cortos de tiempo, mas no es factible para análisis que se requiera tiempos largos de recolección de datos en muestras

		proporcionan información sobre los diversos comportamientos que subyacen a las propiedades actuales de estas muestras.	de materiales fotoconductores.
KASAP (2019) LI (2017) CHOE (2017) ARRIAGA (2017) GAMBINO (2021) EMIN (2018)	Tiempo de vuelo (TOF), mide el tiempo que toma las partículas fotoconductoras en vuelo desde un punto emisor hasta el receptor.	Permite una recolección amplia y eficiente de datos sobre muestras fotoconductoras.	Adolece de una resolución espacial deficiente con restricciones de producción física.
SIMONSONS (2020) ADEAGBO (2018)	Tiempo de vuelo de campo ininterrumpido (IFTOF), se utilizan para medir las propiedades de transporte de las cavidades y los electrones.	Detiene la deriva de los portadores de carga a través de la muestra al suprimir temporalmente el campo eléctrico, lo que permite que los portadores interactúen con las trampas en las profundidades de la masa.	los portadores de las cargas fotoconductoras continúan desplazándose a través de la muestra, ocasionando en muchas veces variación en los datos.
ZU ET AL. (2019) COLE (2020) AGHDASSI (2018) LEVINE (2021)	Espectroscopía de fotoelectrones ultravioleta (UPS), mide la longitud de difusión de la portadora minoritaria de los semiconductores.	Permite a otras técnicas de mediciones de materiales fotoconductores, a llegar a datos que por sí solas no pueden.	Muchas de sus funciones de análisis de materiales fotoconductores, otras técnicas lo pueden realizar.
LABRAM (2017) DUGAY (2018) KAY (2020)	Conductividad de microondas de resolución temporal, mide las propiedades electrónicas de compuestos semiconductores.	Es un método muy versátil para evaluar rápidamente las propiedades electrónicas de compuestos semiconductores	Mecanismos de recombinación bimolecular y Auger afectan las mediciones de TRMC.

			sin la necesidad de construir y optimizar dispositivos electrónicos.	
DOPPAGNE (2020) BAGHERI Y FATEMI (2018) CHEN (2019)	Espectroscopía de fluorescencia, mide caracterización de dinámicas ultrarrápidas en intersecciones cónicas.		Es una herramienta eficiente para la caracterización de dinámicas ultrarrápidas en intersecciones cónicas. Analiza de manera precisa y eficiente.	Es más costoso de aplicar y en muchas ocasiones no arroja resultados fiables Los espectros independientes no son fáciles de alcanzar.
DRAGER, ROEDING Y BRIXNER (2017) MULLER Y BRIXNER (2020)	Espectroscopía Bidimensional 2D, mide bajo utilización de pixeles las señales de fluorescencia de los materiales fotoconductores.		El escaneo rápido proporciona un espectro 2D con un error cuadrático medio de raíz <0.05. Proporciona información sobre múltiples estados excitados.	La interpretación de los datos es más compleja.
OLGA ET AL (2017) KLARENAAR ET AL (2017) WANG ET AL (2019) YOO (2018)	Espectroscopía de absorción infrarroja, mide la composición química de los materiales fotoconductores.		Tiene un gran potencial para determinar de forma no invasiva de los materiales fotoconductores.	Si la muestra comprende agua, con la luz infrarroja, esta se puede evaporar y afectar a la muestra.
WU ET AL (2018) FANG ET AL (2018) BERNARDINI ET AL (2020) HUANG (2018) XIONG (2019) CONG (2020)	Espectroscopía Raman, mide la composición química de los materiales fotoconductores de manera sofisticada.		Versátil para identificar y caracterizar las propiedades químicas y físicas de los materiales. Es una herramienta	Es insensible a capas superficiales y a la talla de partículas.

RIBEIRO, PIMENTA Y DE MATOS (2018)		indispensable para la caracterización de diferentes materiales fotoconductores.	
		Su utilización es muy común y de gran necesidad en diferentes campos.	
LAI (2017) MAUSSANG (2017) NANDI (2018)	Espectroscopía en dominio de tiempo (TDS), permite medir los pulsos electromagnéticos emanados por los materiales fotoconductores.	Puede suprimir ecos no deseados en las evaluaciones de materiales fotoconductores.	La resolución espectroscópica puede ser afectada por altos niveles de radiación. emanados por algunos tipos de materiales fotoconductores.
GOUBET (2018)	Espectroscopia Infrarroja (EIR), mide la radiación infrarroja de los materiales fotoconductores.	Es ideal para el diseño de materiales coloidales complejos ópticamente activos en el rango del infrarrojo medio.	No se puede aplicar el análisis en ciertos tipos de materiales fotoconductores. La calibración es lenta y compleja.

Realizado por: Arambulo Almendariz, Cristian,2021.

Muchos autores de investigaciones relacionadas a materiales fotoconductores han utilizado variadas técnicas de medición y análisis. Como toda técnica utilizada, comprende ventajas que pueden aumentar su credibilidad en dar un resultado preciso en los análisis planteados, pero también a su vez pueden comprender desventajas que dificultan de alguna u otra manera la perspectiva de los investigadores y tomar en consideración la aplicación de las mismas. Así como se muestra en la tabla 2, se analizó cada técnica utilizada por los autores citados, considerando resultados y procesos en la aplicación en materiales fotoconductores.

Ciertas técnicas aplicadas a materiales fotoconductores son esenciales como el uso de la técnica Espectroscopía Raman, gracias a los autores ya mencionados en la adopción de la misma en sus estudios, ha mostrado gran relevancia en comparación a otras técnicas a diferencia de la espectroscopía transitorios de encendido / apagado o Espectroscopía de fotoelectrones ultravioleta

(UPS) que presentan desventajas parecidas como la necesidad de incluir otras técnicas que permitan complementar a la primera.

Las limitaciones de ciertas técnicas como la espectroscopía infrarroja, en la demostración de un bajo rango de eficiencia tomando como ejemplo el estudio de Goubet (2018) que sugirió investigar otras estrategias para que las intrabandas en la espectroscopía infrarroja sean más eficaces.

Cabe destacar que el uso de la espectroscopía Raman en un estudio realizado por (Wu et al., 2018, pp1822-1873) da credibilidad a esta técnica ya que gracias a esta se pudo establecer que los materiales basados en grafeno exhiben propiedades electrónicas, ópticas y mecánicas notables, lo que ha dado lugar a un gran interés científico y un enorme potencial para una variedad de aplicaciones y justifica que la herramienta es muy versátil en comparación a otras ya mencionadas.

A su vez se destaca que las técnicas como la espectroscopía de fotocorriente por transformada de Fourier FTPS, seguida por la espectroscopía de absorción infrarroja forman parte de técnicas más utilizadas por sus capacidades de detección de emisores de fotoconductividad, pero presentando desventajas relevantes que impiden darles credibilidad acertada.

CONCLUSIONES

La fotoconductividad es el cambio incremental en la conductividad eléctrica de un semiconductor o de un aislante posterior a la iluminación. Ha quedado en evidencia que el comportamiento de la fotoconductividad junto a la energía de los fotones, intensidad de la luz y temperatura, y su evolución en el tiempo y la dependencia de la frecuencia, pueden revelar mucha información acerca de los procesos de generación, recombinación y transporte de los materiales. Con las técnicas de caracterización de materiales fotoconductores gran parte de los procesos presentan ahora una sólida base teórica, de manera que se hace posible, con cautela necesaria, el empleo la fotoconductividad como una herramienta en el diagnóstico y estudio de diversos materiales y dispositivos electrónicos.

En el trabajo se describe las principales técnicas de fotoconductividad transitoria y en estado estable que son aplicados en la investigación de semiconductores en el cual el rendimiento se encuentra limitado debido a la presencia de estados electrónicos localizados. Muchos de estos materiales tienden a estar desordenados, y presentan una baja movilidad de los portadores y tiempos de vida de portadores libres cortos en comparación con otros materiales.

Los materiales fotoconductores a menudo se preparan como películas delgadas y son de interés para las aplicaciones en muchas áreas, por ejemplo, en celdas solares, transistores de panel posterior de pantalla, dispositivos fotoemisivos como diodos emisores de luz orgánicos y en imágenes médicas. Sin embargo, también se mostraron ejemplos que estas las técnicas han sido útiles en el estudio de semiconductores cristalinos defectuosos.

En el estudio se encontró que, algunas de las técnicas que más se han utilizado para la caracterización de materiales fotoconductores fueron la espectroscopía de fotocorriente por transformada de Fourier FTPS, seguida por la espectroscopía de absorción infrarroja y la espectroscopía de Raman, además se presentaron diversas técnicas que se han desarrollado en los últimos años y ofrecen una alternativa a la caracterización de diversos materiales así como a la consecución de mejores y más específicos resultados.

De las técnicas mencionadas y analizadas se concluyó que la espectroscopía Raman es la más eficiente en comparación a otras gracias al proceso de análisis no invasiva que no afecta a las muestras, además su gran necesidad de uso en diferentes ramas de la física han permitido señalarla como la más reconocida. De la técnica por espectroscopía Raman en materiales fotoconductores, se han derivado técnicas como la espectroscopía bidimensional o la espectroscopía Raman de superficie (SERS), que es una versión mejorada de la técnica pionera Raman.

RECOMENDACIONES

Llevar a cabo estudios sobre la caracterización de los materiales fotoconductores con relación a las aplicaciones que estos ofrecen para determinar la contribución y efectividad de las técnicas que se usan para caracterizarlos.

Es recomendable realizar estudios que evalúen la eficacia de las técnicas empleadas para la caracterización de los materiales fotoconductores a fin de obtener conocimientos sobre las ventajas y desventajas que ofrece cada técnica.

Realizar estudios enfocados en la microestructura de los materiales fotoconductores para tener mayor conocimiento sobre sus posibles aplicaciones.

GLOSARIO

Atenuación: Reducción de la intensidad de la radiación como resultado de la absorción y la dispersión (Brown, 2020,pp.78-79).

Campo eléctrico: Líneas de fuerza que ejercen los electrodos sobre los iones con carga en los tejidos que ocasionan que las partículas cargadas se desplacen de un polo a otro (Goubet, 2018,pp. 4590-4597).

Conducción: Transferencia de calor por la agitación molecular (Brown, 2020,pp.78-79).

Dopado: Proceso de introducir impurezas a un material semiconductor intrínseco para modificar sus características de conducción (Goubet, 2018,pp. 4590-4597).

Luz visible: Energía radiante en el espectro electromagnético que es visible para el ojo humano (Brown, 2020,pp.78-79).

Radiación: Energía emitida y transferida a través de la materia (Brown, 2020,pp.78-79).

Radiación electromagnética: Campos magnéticos y eléctricos oscilantes que se desplazan en el vacío a la velocidad de la luz. Incluyen los rayos X, los rayos gamma y alguna radiación no ionizante (ultravioleta, visible, infrarroja y las ondas de radio) (Brown, 2020,pp.78-79).

Radiación infrarroja: Radiación electromagnética ligeramente inferior en energía a la de la luz visible, con una longitud de onda en el intervalo de 0,7 a 1.000 mm (Brown, 2020,pp.78-79).

Radiación ionizante: Radiación capaz de producir ionización (Liu, 2019,pp. 9590-9595).

Radiación no ionizante: Radiación cuyo mecanismo de acción en el tejido no es ioniza (Liu, 2019)

Semiconductor: Material que puede servir tanto como conductor como de aislante de la electricidad. (Liu, 2019,pp. 9590-9595)

Superconductividad: Propiedad de algunos materiales de no mostrar resistencia por debajo de una temperatura crítica (Brown, 2020,pp.78-79).

BIBLIOGRAFÍA

- AGHDASSI, N., WANG, Q., JI, R., WANG, B., FAN, J., & DUHM, S.** (2018). Ultraviolet photoelectron spectroscopy reveals energy-band dispersion for π -stacked 7, 8, 15, 16-tetraazaterrylene thin films in a donor–acceptor bulk heterojunction. *Nanotechnology*, 194002.
- AMAO, Y.** (2003). Probes and polymers for optical sensing of oxygen. *Microchimica Acta*, 2003, vol. 143, no 1, 1-12.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS.** (2000). *General Methods and Instrumentation*. Annual Book of ASTM Standards.
- ANTUCH, M. E.** (2018). The role of surface states during photocurrent switching: Intensity modulated photocurrent spectroscopy analysis of BiVO₄ photoelectrodes. *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 237, p. 401-408.
- ARAI, A.** (2017). Preparation and Characterization of a-Si: H and a-SiC: H Separate pin Thin Films. *Int. J. Thin. Fil. Sci. Tec*, 117-121.
- ARRIEGA, F. E.** (2017). Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber. *Holzforschung*, vol. 71, no 9, pág. 713-723.
- BAGHERI, M., & FATEMI, M. H.** (2018). Fluorescence spectroscopy, molecular docking and molecular dynamic simulation studies of HSA-Aflatoxin B1 and G1 interactions. *Journal of Luminescence*, vol. 202, pág. 345-353.
- BAIRD, C. S.** (2019). *Absorption of electromagnetic radiation*. Canyon, Texa: Universidad West Texas A&M.
- BERNARDINI, S., BELLATRECCIA, F., DELLA, V. G., BALLIRANO, P., & SODO, A.** (2020). Raman spectroscopy and laser-induced degradation of groutellite and ramsdellite, two cathode materials of technological interest. *RSC advances*, 923-929.

- BIBIKOVA, O., HAAS, J., LÓPEZ-LORENTE, Á. I., POPOV, A., KINNUNEN, M. R., & MIZAIKOFF, B.** (2017). Surface enhanced infrared absorption spectroscopy based on gold nanostars and spherical nanoparticles. *Analytica Chimica Acta*, 141-149.
- BIDIVILLE, A., & AL, E.** (2017). Investigation of Interface and Bulk Localized States in a-Si: H Solar Cells. *EEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 1333-1338.
- BROWN, F.** (2020). *Física de los Sólidos*. Barcelona: Reverté.
- CHEN, L. E.** (2019). Mapping of wave packet dynamics at conical intersections by time-and frequency-resolved fluorescence spectroscopy: A computational study. *The journal of physical chemistry letters*, vol. 10, no 19, p. 5873-5880.
- CHOE, H.-J. E.** (2017). Development of capacitive multiplexing circuit for SiPM-based time-of-flight (TOF) PET detector. *Physics in Medicine & Biology*, vol. 62, no 7, pág. N120.
- COLE, K., KIRK, D., & THORPE, S.** (2020). Co (OH) 2 powder characterized by x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and ultraviolet photoelectron spectroscopy (UPS). *Surface Science Spectra*, 024013.
- CONG, X. E.** (2020). Application of Raman spectroscopy to probe fundamental properties of two-dimensional materials. *npj 2D Materials and Applications.*, vol. 4, no 1, p. 1-12.
- CRAVER, C., & CARRAHER, C.** (2000). *Applied polymer science: 21st century*. Elsevier.
- CYTIVA.** (2021). *Cytiva*. Retrieved from www.cytivalifesciences.com: <https://www.cytivalifesciences.com/en/us/solutions/protein-research/knowledge-center/protein-purification-methods/size-exclusion-chromatography>
- DAN, Y., HE, J., & HUANG, C.** (2020). Understanding Transient Responses of Silicon Nanowire Photoconductors. *IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW).*, 119-120.
- DOPPAGNE, B. E.** (2020). Single-molecule tautomerization tracking through space-and time-resolved fluorescence spectroscopy. *Nature nanotechnology.*, vol. 15, no 3, pág. 207-211.

- DRAEGER, S., ROEDING, S., & BRIXNER, T.** (2017). Rapid-scan coherent 2D fluorescence spectroscopy. *Optics express*, vol. 25, no 4, pág. 3259-3267.
- DUGAY, J., EVERS, W., TORRES, C. R., GIMÉNEZ, M. M., CORONADO, E., & VAN DER ZANT, H.** (2018). Charge Mobility and Dynamics in Spin-Crossover Nanoparticles Studied by Time-Resolved Microwave Conductivity. *The journal of physical chemistry letters*, 5672-5678.
- EMIN, S. E.** (2018). Charge carrier transport in polycrystalline CH₃NH₃PbI₃ perovskite thin films in a lateral direction characterized by time-of-flight photoconductivity. *Materials Chemistry and Physics*, vol. 220, p. 182-189.
- EYRING, M. B., & MARTIN, P.** (2013). *Spectroscopy in Forensic Science*.
- FANG, C., TANG, L., OSCAR, B., & CHEN, C.** (2018). Capturing structural snapshots during photochemical reactions with ultrafast Raman spectroscopy: From materials transformation to biosensor responses. *The journal of physical chemistry letters*, 3253-3263.
- FANTONI, A., LOURENCO, P. ..., & VIERA, M.** (2017). A model for the refractive index of amorphous silicon for FDTD simulation of photonics waveguides. *International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD)*, 167-168.
- GAMBINO, S.** (2021). The impact of charge carrier relaxation, electron trapping and oxygen p-doping on the photocurrent transients of a conjugated polymer probed by the Time of Flight method. *Thin Solid Films*, vol. 718, p. 138485.
- GAO ET AL.** (2016). Spectroscopic and intensity modulated photocurrent imaging of polymer/fullerene solar cells. *ACS applied materials & interfaces*, 2016, vol. 8, no 1, 285-293.
- GARCIA, M., ALFONSO, J., & VALVERDE, A.** (2013). *Fotoconductividad en películas sol-gel de ZnO-TiO₂*. Editorial Académica Española, 2013.
- GOUBET, N. E.** (2018). Wave-function engineering in HgSe/HgTe colloidal heterostructures to enhance mid-infrared photoconductive properties. *Nano letters*, vol. 18, no 7, p. 4590-4597.

- GUICLION, P., MONTI, A., & ZWIJNENBURG, M. A.** (2017). Validating a density functional theory approach for predicting the redox potentials associated with charge carriers and excitons in polymeric photocatalysts. *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 121, no 3, p. 1498-1506.
- HOLOVSKÝ, J. E.** (2020). Towards Quantitative Interpretation of Fourier-Transform Photocurrent Spectroscopy on Thin-Film Solar Cells. *Coatings*, 820.
- HOLOVSKÝ, J., STUCKELBERGER, M., FINSTERLE, T., CONRAD, B., PETER, A. A., MÜLLER, M., & HAUG, F. J.** (2020). Towards Quantitative Interpretation of Fourier-Transform Photocurrent Spectroscopy on Thin-Film Solar Cells. *Coatings*, 820.
- HONG ET AL.** (2009). Synthesis of polymeric temperature sensor based on photophysical property of fullerene and thermal sensitivity of poly (N-isopropylacrylamide). *Macromolecules*, 2009, vol. 42, no 7, 2756-2761.
- HOU, W. W.** (2009). Low-temperature processing of a solution-deposited CuInSSe thin-film solar cell. *Thin Solid Films*, 2009, vol. 517, no 24, 6853-6856.
- HUANG, Y.-P. E.** (2018). Shell-Isolated Tip-Enhanced Raman and Fluorescence Spectroscopy. *Angewandte Chemie*, vol. 130, no 25, p. 7645-7649.
- IASENIUC, O., & IOVU, M.** (2020). Absorption and photoconductivity spectra of amorphous multilayer structures. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2020, vol. 11, no 1, 1757-1763.
- JIMÉNEZ MACÍAS, J. P.** (2020). *Síntesis y propiedades de compuestos con potencial importancia tecnológica*. Universidad Nacional de La Plata.
- KALKAN, S. B.** (2018). The effect of adsorbates on the electrical stability of graphene studied by transient photocurrent spectroscopy. *Applied Physics Letters*, vol. 112, no 1, p. 013103.

- KASAP, S. E.** (2019). Corrections to the Hecht collection efficiency in photoconductive detectors under large signals: non-uniform electric field due to drifting and trapped unipolar carriers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 52, no 13, p.
- KAUSAR, A.** (2017). Advances in polymer/fullerene nanocomposite: a review on essential features and applications. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2017, vol. 56, no 6, 594-605.
- KAY, A., FIEGENBAUM - RAZ, M., MÜLLER, S., EICHBERGER, R., DOTAN, H., VAN DE KROL, R., & GRAVE, D.** (2020). Effect of Doping and Excitation Wavelength on Charge Carrier Dynamics in Hematite by Time-Resolved Microwave and Terahertz Photoconductivity. *Advanced Functional Materials*, 1901590.
- KIARIII, E. M.** (2017). The generation of charge carriers in semi conductors—A theoretical study. *Chemical Physics Letters*, vol. 678, p. 167-176.
- KLARENAAR, B., ENGELN, R., VAN DEN BEKEROM, D., VAN DE SANDEN, M., MORILLO-CANDAS, A., & GUAITELLA, O.** (2017). Time evolution of vibrational temperatures in a CO₂ glow discharge measured with infrared absorption spectroscopy. *Plasma Sources Science and Technology*, 115008.
- KO, T.-S. E.** (2017). Observation of persistent photoconductivity in Ni-doped MoS₂. *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(4S), 13.
- KOOPMANS, C., & RITTER, H.** (2007). Color change of N-isopropylacrylamide copolymer bearing reichardt's dye as optical sensor for lower critical solution temperature and for host– guest interaction with β -cyclodextrin. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, vol. 129, no 12, 3502-3503.
- KOPPRIO, L., LONGEAUD, C., & SCHMIDT, J.** (2019). Hydrogenated amorphous silicon characterization from steady state photoconductive measurements. *Semiconductor Science and Technology*.
- KRONIK, L., & SHAPIRA, Y.** (1999). Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications. *Surface science reports*, 1999, vol. 37, no 1-5, 1-206.

- LABRAM, J., & CHABINYC, M.** (2017). Recombination at high carrier density in methylammonium lead iodide studied using time-resolved microwave conductivity. *Journal of Applied Physics*, 065501.
- LAI, W. E.** (2017). Enhanced terahertz radiation generation of photoconductive antennas based on manganese ferrite nanoparticles. *Scientific reports*, vol. 7, no 1, p. 1-7.
- LEE, G. Y., MUN, B. S., & JU, H.** (2021). Observation of giant persistent photoconductivity on vanadium dioxide thin film device. *Applied Materials Today*, 2021, vol. 22, 104.
- LEVINE, I., SHIMIZU, K., LOMUSCIO, A., KULBAK, M., REHERMANN, C., ZOHAR, A., & CAHEN, D.** (2021). Direct Probing of Gap States and Their Passivation in Halide Perovskites by High-Sensitivity, Variable Energy Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry C*, 5217–5225.
- LI, F. E.** (2017). CS-ToF: High-resolution compressive time-of-flight imaging. *Optics express*, vol. 25, no 25, p. 31096-31110.
- LIU, X. E.** (2019). Photoconductivity in metal–organic framework (MOF) thin films. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, vol. 58, no 28, 9590-9595.
- LONGEAUD, C. E.** (2018). Impact of Environmental Stresses Onto Transport Properties of Hybrid Perovskite Investigated by Steady State Photocurrent Grating and Steady State Photocurrent Techniques. *Solar RRL*, vol. 2, no 11, p. 1800192.
- MALIK, H. K., JUNEJA, S., & KUMAR, S.** (2019). Employing constant photocurrent method for the study of defects in silicon thin films. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 107-113.
- MAUSSANG, K. E.** (2017). Monolithic echo-less photoconductive switches as a high-resolution detector for terahertz time-domain spectroscopy. *Applied Physics Letters*, vol. 110, no 14, p. 141102.
- MELO, M. A.** (2018). Surface photovoltage measurements on a particle tandem photocatalyst for overall water splitting. *Nano letters*, 18(2), 805-810.

- MIRANDA, J. A., AMAYAB, O. C., LARA, F. F., & CABALLERO, F.** (2015). *Fotoconductividad persistente en películas de CdS: Mg medida por CAFM.*
- MONGUIÓ, T. M., GÁLVEZ, M. C., BAYES, G. A., ROURA, S., & BORRÀS, F.** (2019). Extracellular vesicle isolation methods: rising impact of size-exclusion chromatography. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2369-2382.
- MUELLER, S., & BRIXNER, T.** (2020). Molecular coherent three-quantum two-dimensional fluorescence spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 11, no 13, p. 5139-5147.
- NAKATSUKA, E. E.** (2020). Modulated Photocurrent Spectroscopy Study of the Electronic Transport Properties of Working Organic Photovoltaics: Degradation Analysis. *Materials*, vol. 13, no 11, p. 2660.
- NANDI, U. E.** (2018). 1550-nm driven ErAs: In (Al) GaAs photoconductor-based terahertz time domain system with 6.5 THz bandwidth. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.*, vol. 39, no 4, p. 340-348.
- NOJIMA, H., KOBAYASHI, T., NAGASE, T., & NAITO, H.** (2019). Modulated photocurrent Spectroscopy for Determination of electron and Hole Mobilities in Working organic Solar cells. *Scientific report*, 1-8.
- OHEDA, H.** (1981). *Journal Of Applied Physics*, 52(11). *Phase-shift analysis of modulated photocurrent: Its application to the determination of the energetic distribution of gap states*, 6693-6700.
- ÖZDOGAN, M. E.** (2019). The comparison of transient photocurrent spectroscopy measurements of Pulsed Electron Deposited ZnO thin film for air and vacuum ambient conditions. *Thin Solid Films*, vol. 680, pág. 48-54.
- PACHÓN RODRIGUEZ, L. E.** (2018). *Estudio de la respuesta óptica de películas delgadas de nanotubos de carbono decorados con nanopartículas de oro.* Uniandes.

- PATTENGALE, B. E.** (2019). Metal–organic framework photoconductivity via time-resolved terahertz spectroscopy. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, vol. 141, no 25, 9793-9797.
- PEÑA, N.** (2011). *Caracterización de polímeros fotoconductores mediante cromatografía con detección múltiple, técnicas de fluorescencia y mecánica y dinámica molecular*. Alcalá: Universidad de Alcalá.
- PILLAI, S. E.** (2019). *Validation of Time-Resolved Microwave Conductivity (TRMC) as a screening tool for all-polymer solar cells*.
- RAMOS, J., LUNA, A., & LIMA, M.** (2013). Espectroscopia Raman y sus aplicaciones. *Opt. Pura. Apl*, 83-95.
- RAVISHANKAR, S. E.** (2019). Intensity-modulated photocurrent spectroscopy and its application to perovskite solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 123, no 41, p. 24995-25014.
- REYNOLDS, S. E.** (2017). Photoconductivity in materials research. *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*. Cham, 2017, 1.
- REYNOLDS, S., BRINZA, M., BENKHEDIR, M. L., & ADRIAENSSENS, G. J.** (2017). Photoconductivity in materials research. *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, 50-72.
- RIBEIRO, H. B., PIMIENTA, M. A., & DE MATOS, C. J.** (2018). Raman spectroscopy in black phosphorus. *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 49, no 1, p. 76-90.
- RODRÍGUEZ-MAGDALENO, K. A.** (2018). Generación de minibandas en el coeficiente de absorción intrabanda en puntos cuánticos esféricos multicapas GaAs/Al_xGa_{1-x}As. *SOME CURRENT TOPICS IN CONDENSED MATTER PHYSICS 2018*, 121.
- RUEDA, J., & HERNANDEZ, A.** (2020). Técnica rápida de producción de monocristales de titanato de estroncio con fotoconductividad persistente. *3*(2), 8-16.

- RÜTTEN, M., GEILEN, A., SEBASTIAN, A., KREBS, D., & SALINGA, M.** (2019). Localised states and their capture characteristics in amorphous phase-change materials. *Scientific reports*, 1-10.
- SAVENIJE, T. E.** (2020). Using Time-Resolved Photoconductivity Measurements to Reveal the Urbach Tail and Two Photon Absorption in MHPs. *Virtual MRS Fall Meeting & Exhibit, Symposium: F. EL08: Frontiers of Halide Perovskites—Linking Fundamental Properties to Devices. 2020.*
- SIMONSON, B., JOHANSON, R. E., & KASAP, S. O.** (2020). Effects of High-Dose X-Ray Irradiation on the Hole Lifetime in Vacuum-Deposited Stabilized a-Se Photoconductive Films: Implications to the Quality Control of a-Se Used in X-Ray Detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 67, no 11, p. 2445-2453.
- SIMONSONI, B. M.** (2020). *X-ray Induced Effects and Charge Collection Efficiency in Stabilized Amorphous Selenium Based X-ray Photoconductors.* University of Saskatchewan.
- STROYUK, O., BUERHOP-LUTZ, C., VETTER, A., HAUCH, J., & BRABEC, C.** (2020). Nondestructive characterization of polymeric components of silicon solar modules by near-infrared absorption spectroscopy (NIRA). *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 110702.
- STUTZMANN, M., BRANDT, M. S., & BAYERL, M. W.** (2000). Spin-dependent processes in amorphous and microcrystalline silicon: a survey. *Journal of non-crystalline solids*, 2000, vol. 266, 1-22.
- TANABE, K., YAMADA, S., ITOH, T., NONOMURA, S., SUGIMOTO, K., & YAMADA, A.** (2018). Optical absorption spectra of Cu₂ZnSn (S, Se) 4 thin-film solar cells by Fourier transform photocurrent spectroscopy. *Japanese Journal of Applied Physics*.
- Tang, C. W.** (1986). Two-layer organic photovoltaic cell. *Applied physics letters*, 1986, vol. 48, no 2, 183-185.
- THOMPSON, J.** (2018). *Infrared spectroscopy.* CRC Press.

- TIEDE, D.** (2018). *Mejora en la fotoluminiscencia de monocristales de perovskitas híbridas mediante exposición a vapores de halógeno.*
- VEGA, K.** (2019). *Fuerza foto-electromotriz en películas de perovskita.*
- VELDHUIZEN, L. W.** (2017). Benchmarking photoactive thin-film materials using a laser-induced steady-state photocarrier grating. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 25, no 7, p. 605-613.
- VELDHUIZEN, L. W.** (2017). Evaluación comparativa de materiales fotoactivos de película delgada mediante una rejilla fotoportadora de estado estable inducida por láser. *Progreso en energía fotovoltaica: investigación y aplicaciones*, vol. 25, no 7.
- VELDHUIZEN, L., ADHYAKSA, G., THEELEN, M., GARNETT, E., & SCHROPP, R.** (2017). Benchmarking photoactive thin-film materials using a laser-induced steady-state photocarrier grating. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 605-613.
- VENTOSINOS, F., KOFFMAN-FRISCHKNECHT, A., HERRERA, W., SENNO, M., CARAM, J., PEREZ, M., & SCHMIDT, J.** (2020). Estimation of carrier mobilities and recombination lifetime in halide perovskites films using the moving grating technique. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 415107.
- WANG, T., DONG, Z., KOAY, E., & YANG, J.** (2019). Surface-enhanced infrared absorption spectroscopy using charge transfer plasmons. *ACS Photonics*, 1272-1278.
- WU, J. B., LIN, M. L., CONG, X., LIU, H. N., & TAN, P. H.** (2018). Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices. *Chemical Society Reviews*, 1822-1873.
- XIONGI, H. E.** (2019). Stimulated Raman excited fluorescence spectroscopy of visible dyes. *The journal of physical chemistry letters*, vol. 10, no 13, p. 3563-3570.
- XU, S. E.** (2019). Transient photoconductivity and free carrier dynamics in a monolayer WS₂ probed by time resolved Terahertz spectroscopy. *Nanotechnology*, 2019, vol. 30, no 26, 265.

- YAKUPHANOGLU, F.** (2008). Photovoltaic properties of the organic–inorganic photodiode based on polymer and fullerene blend for optical sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, vol. 141, no 2, 383-389.
- YANG, W. E.** (2021). Diamine tailored smooth and continuous perovskite single crystal with enhanced photoconductivity. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, vol. 9, no 4, 1303-1309.
- YOO, D. E.** (2018). High-contrast infrared absorption spectroscopy via mass-produced coaxial zero-mode resonators with sub-10 nm gaps. *Nano letters*, vol. 18, no 3, pág. 1930-1936.
- ZAYNOBIDINOV, S. E.** (2020). INVESTIGATION OF RECOMBINATIONAL PROCESSES THROUGH PHOTOELECTRIC CONDUCTIVITY OF THE FILM OF HYDROGENATED AMORPHOUS SILICON AND ITS MODIFICATION. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 1.
- ZU, F., WOLFF, C., RALAIARISOA, M., AMSALEM, P., NEHER, D., & KOCH, N.** (2019). Unraveling the Electronic Properties of Lead Halide Perovskites with Surface Photovoltage in Photoemission Studies. *ACS applied materials & interfaces*, 21578-21583.

ANEXOS

ANEXO A: REVISTA CIENTÍFICA PUBLICADA

Conciencia Digital ACTUAL ARCHIVOS ESTADÍSTICA INFORMACIÓN LEGAL FORMATOS AVISOS

Técnicas experimentales para caracterizar materiales fotoconductores



Publicación 13. Vol 4. Num 3.

HTML

EPUB

Cristian Daniel Arambulo Almendariz
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Luis Santiago Carrera Almendáriz
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Resumen

Introducción. Los materiales fotoconductores, son aquellos que, al estar expuestos a la radiación electromagnética, varían su conductividad eléctrica. Sus aplicaciones son diversas y muy valiosas en las ciencias y la industria. Entre las técnicas experimentales que se usan para la caracterización de estos materiales, se encuentran la microscopía electrónica de barrido, la microscopía óptica, la difracción de rayos, el efecto tunelamiento, entre otras. **Objetivo.** Presentar una revisión de tipo documental, de las técnicas experimentales para la caracterización de materiales fotoconductores. **Metodología.** La metodología fue cualitativa, relacionada con la revisión de trabajos, artículos y textos científicos, que permitieron establecer un estado del arte aproximado, de este campo de estudio. **Resultados.** Dentro de los resultados más relevantes se encontró, que la caracterización



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 11 / 09 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Cristian Daniel Arambulo Almendariz</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Física</i>
Título a optar: <i>Físico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

**LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE**

Firmado digitalmente
por LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Fecha: 2021.10.11
10:40:58 -05'00'



1826-DBRA-UTP-2021