

Diseño de un sistema para medir la fotoconductividad en películas delgadas  
semiconductoras

Yair Alexander Sandoval Duque

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Directora

Mónica Andrea Botero Londoño

Doctora en Ciencias Físicas

Codirector

Camilo Andrés Otalora

Doctor en Ciencias Químicas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2023

### **Agradecimientos**

Quiero agradecer a Dios por abrirme las puertas, darme la oportunidad de estudiar en una universidad prestigiosa como es la Universidad Industrial de Santander y permitirme conocer personas que aportaron a mi crecimiento personal como profesional.

Agradezco a mi madre Alba Patricia, mis hermanos y mi tía Gloria por estar ahí siempre apoyándome, a Elsa Chávez, Tiany Rodríguez por darme ejemplo de siempre hacer las cosas de forma correcta, a Mafe Quicasaque por su apoyo incondicional en este camino de subidas y bajadas, a todas aquellas personas de que una u otra manera me apoyaron en este camino como Kerly Ochoa, Diana Navas y Luisfer Leon.

Agradezco a mi directora de tesis Mónica Botero por su tiempo, por su orientación y enseñarme que cada persona va en tiempos diferentes independientemente de la edad, a mi Codirector Camilo Otalora por su tolerancia con mis errores, por su apoyo incondicional para lograr la culminación de este proyecto y por su vocación con la enseñanza.

Dedico principalmente este proyecto a mi Abuelo Guillermo de Jesús Duque Zapata por siempre creer en mí y ser motivación para lograr culminar cada meta propuesta en mi vida y aunque no esté físicamente conmigo, te llevo en lo más profundo de mi corazón y doy gracias a Dios por haberme regalado un padre como tú. **“Promesa cumplida”**.

**Tabla de Contenido**

Introducción.....	10
1. Objetivos .....	12
1.1 Objetivo general .....	12
1.2 Objetivos específicos.....	12
2. Marco conceptual .....	13
2.1 Semiconductores.....	13
2.2 Celdas solares .....	13
2.3. Energía solar .....	14
2.4. Fotoconductividad .....	15
2.4.1 Tipos de fotoconductividad .....	15
2.4.1.1 Fotoconductividad en estado estacionario.....	15
2.4.2 Fotoconductividad transiente.....	17
2.4.3 Fotoconductividad espectral o espectros de fotoconductividad .....	19
2.4.4 Fotoconductividad en función de la temperatura .....	21
2.5 Componentes para medir la fotoconductividad .....	23
2.6 Características para medir la fotoconductividad .....	24
3. Medición de la fotoconductividad en semiconductores de película delgada .....	24
3.1 Principales características.....	25
3.2 Configuraciones de los sistemas.....	26
4. Diseño del sistema de medición de fotoconductividad .....	31

4.1 Componentes del sistema de medición.....	32
4.2 Funciones del sistema.....	33
4.3 Evaluación del diseño.....	34
5. Resultados .....	36
6. Conclusiones.....	37
7. Recomendaciones .....	38
Referencias .....	39
Apéndices .....	42

**Lista de figuras**

Figura 1. Adiciones anuales de capacidad de energía renovable, por tecnología y total, 2016-2021, y para alcanzar los escenarios Net Zero para 2030 y 2050. ....	14
Figura 2. Esquema de los procesos de fotogeneración y recombinación de portadores. ....	15
Figura 3. Curvas de fotocorriente de diferentes semiconductores.....	18
Figura 4. Esquema del sistema de caracterización de la fotoconductividad utilizado. ....	19
Figura 5. Fotoconductividad espectral de un semiconductor. ....	21
Figura 6. Esquema de un sistema de medida de fotoconductividad con control de temperatura. ....	22
Figura 7. a) Circuito usado para medir fotocorriente, indicando cambios en la corriente en oscuro $I_d$ como consecuencia del exceso de portadores generados mediante absorción de la radiación. b) Variación de la generación de portadores ( $G$ ) y el exceso de portadore.....	26
Figura 8. Se muestran dos configuraciones para medir la fotoconductividad utilizando un láser de He-Ne enfocado en la muestra con ayuda de un espejo (M).....	27
Figura 9. Configuración diseñada para efectuar las mediciones de fotoconductividad modulada en el tiempo (MPC). ....	28
Figura 10. Configuración para medir la fotocorriente con un patrón de interferencia estacionario.....	29
Figura 11. Arreglo experimental para producir el (VPG), (OPG) y Patrón de interferencia modulado en el tiempo. ....	30
Figura 12. Sistema Propuesto .....	33

Figura 13. Código en Arduino para el funcionamiento del sistema propuesto. ....	35
Figura 14. Variables para tener en cuenta en la programación del sistema propuesto. ....	36
Figura 15. Diagrama de bloques que representa la unión del sistema de medida que tiene el grupo GISEL con el sistema propuesto por la presente tesis. ....	36

**Lista de apéndices**

Apéndice A. Estimación de costos ..... 42

Apéndice B. Control de intensidad lumínica..... 44

## Resumen

**Título:** Diseño de un sistema para medir la fotoconductividad en películas delgadas semiconductoras\*

**Autor:** Yair Alexander Sandoval Duque\*\*

**Palabras clave:** Películas delgadas, Materiales semiconductores, Fotoconductividad.

**Descripción:** Debido a la continua búsqueda de nuevas tecnologías en energías renovables, ha sido de gran importancia la fabricación de nuevos materiales semiconductores, con la finalidad de mejorar la eficiencia de sistemas ya utilizados para generar energías limpias, teniendo en cuenta la caracterización de las propiedades opto eléctricas de los mismos, por lo tanto, la presente tesis consta de un sistema diseñado para medir la fotoconductividad en películas delgadas semiconductoras por medio de la variación de intensidad lumínica y control de la temperatura del sustrato y complementado con sistema de medición de conductividad que tiene el grupo GISEL, se podrá medir la fotoconductividad en estado estacionario en películas delgadas semiconductoras.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Directora Mónica Andrea Botero Londoño. Doctora en ciencias físicas. Codirector. Camilo Andrés Ojalora. Doctor en ciencias Químicas

## Abstract

**Title:** Design of a system for measuring photoconductivity in semiconductor thin films. \*

**Author:** Yair Alexander Sandoval Duque \*\*

**Key Words:** Thin films, Semiconductor materials, Photoconductivity, Doping in semiconductors, absorption coefficient, absorbance and transmittance, Band Gap.

**Description:** Due to the continuous search for new technologies in renewable energies, it has been of great importance the fabrication of new semiconductor materials, with the finality of improving the efficiency of systems already used to generate clean energies, taking into account the characterization of the optoelectrical properties of the same, therefore, the present thesis consists of a system designed to measure the photoconductivity in semiconductor thin films by means of the variation of light intensity and control of the substrate temperature and complemented with the conductivity measurement system that the GISEL group has, it will be possible to measure the steady state photoconductivity in semiconductor thin films.

---

\* Degree Word

\*\* Faculty of Physical-mechanical engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director Monica Andrea Botero London. Ph.D. in physical sciences. Co-director. Camilo Andres Otalora. Doctor of Chemical Sciences

## Introducción

El uso adecuado de los recursos naturales del planeta es cada vez uno de los temas más frecuentes en las políticas energéticas, siendo necesaria la continua búsqueda de fuentes de energías renovables con el fin de evitar una catástrofe ambiental irreversible. Hasta el año 2021 la energía proveniente de fuentes renovables ha llegado al 29% y va en aumento considerablemente (REN21.net). Una de las tecnologías que ha estado en continuo desarrollo ha sido la generación de energía eléctrica a partir de la tecnología solar fotovoltaica, debido a las grandes ventajas que incluyen: Tener cero emisiones de CO<sub>2</sub>, cero emisiones de gases de efecto invernadero [durante la operación], es ilimitada [la fuente], fácil instalación, autogeneración y autoconsumo, entre otras.

La conversión de energía solar a energía eléctrica se logra mediante las celdas solares, las cuales funcionan a partir de una unión de semiconductores P-N. (McEvoy, 2012).

La estructura física y las propiedades optoelectrónicas de las películas delgadas semiconductoras que conforman una celda solar han sido áreas de continua investigación científica. El estudio de estos materiales se enfoca en mejorar la eficiencia de los dispositivos existentes o encontrar nuevos materiales semiconductores que se puedan usar para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos y sean ambientalmente sostenibles. Por lo tanto, es muy importante la caracterización de las propiedades optoelectrónicas de nuevos materiales semiconductores para el Grupo de Investigación de Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL). En la actualidad el grupo de investigación cuenta con un sistema de caracterización eléctrica enfocado en materiales fotovoltaicos mediante el método de Van Der Pauw, y el presente trabajo de grado titulado “Diseño de un sistema para medir la fotoconductividad en películas

delgadas semiconductoras” tiene la finalidad de identificar las opciones para complementar el sistema de medición nombrado de manera que se puedan realizar medidas de fotoconductividad eléctrica.

Durante el desarrollo del presente trabajo se tuvo en cuenta la caracterización de los semiconductores con respecto a sus propiedades ópticas y eléctricas donde se destaca la conductividad eléctrica y sus técnicas de medición, fotoconductividad y tipos de medida, tipos de absorción óptica del semiconductor, sistemas implementados actualmente para medir la fotoconductividad en películas delgadas semiconductoras y un diseño propuesto para medir la fotoconductividad variando la temperatura y la radiación óptica.

Como resultado del proceso metodológico se logró establecer un diseño viable para el control de temperatura y radiación incidente, que acoplado con el sistema de medida de conductividad existente y puede conformar un sistema de medida de la fotoconductividad. Por último, se muestran evidencias de un prototipo de control de las variables mencionadas previamente.

## **1.Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Diseñar un sistema para medir la fotoconductividad en semiconductores de película delgada.

### **1.2 Objetivos específicos**

Seleccionar las características y componentes esenciales para realizar medidas de fotoconductividad en semiconductores de película delgada.

Identificar las principales configuraciones de medida y técnicas de fotoconductividad para caracterización eléctrica de semiconductores de película delgada.

Diseñar un sistema de medición de fotoconductividad de acuerdo con el estado del arte identificado y a la instrumentación disponible en los laboratorios del GISEL.

## **2. Marco conceptual**

### **2.1 Semiconductores**

Los semiconductores son materiales que se caracterizan por tener una conductividad eléctrica inferior a la de un conductor, pero superior a la de un buen aislante. Autores como Leñero, (2018) afirma que: “Los materiales semiconductores suelen encontrarse en los grupos IIB, IIIA, IVA, VA y VIA de la tabla periódica de los elementos” p.15, donde el semiconductor más utilizado es el silicio, que es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre. Otros semiconductores elementales comunes son el germanio y el estaño en su fase alfa. Los Semiconductores son materiales de importancia en la industria de los componentes electrónicos, fundamentales para la tecnología electrónica actual, permitiendo conmutar y regular la energía eléctrica de forma inteligente. Algunos componentes electrónicos compuestos por materiales semiconductores son los diodos, los transistores, los microprocesadores, los circuitos de memoria, fotodetectores, celdas solares, entre otros.

### **2.2 Celdas solares**

Una de las áreas estratégicas de los desarrollos tecnológicos en ciencia de los materiales es la producción de energía limpia. Las celdas solares como dispositivos semiconductores requieren de la investigación de nuevos materiales con un énfasis especial en las propiedades ópticas y eléctricas de estos (Martínez, 2005). Los nuevos desarrollos en materiales fotovoltaicos se enfocan en alcanzar mayores eficiencias de foto conversión, disminución de los costos de fabricación, disminución del impacto ambiental y aumento del tiempo de vida útil de las celdas solares.

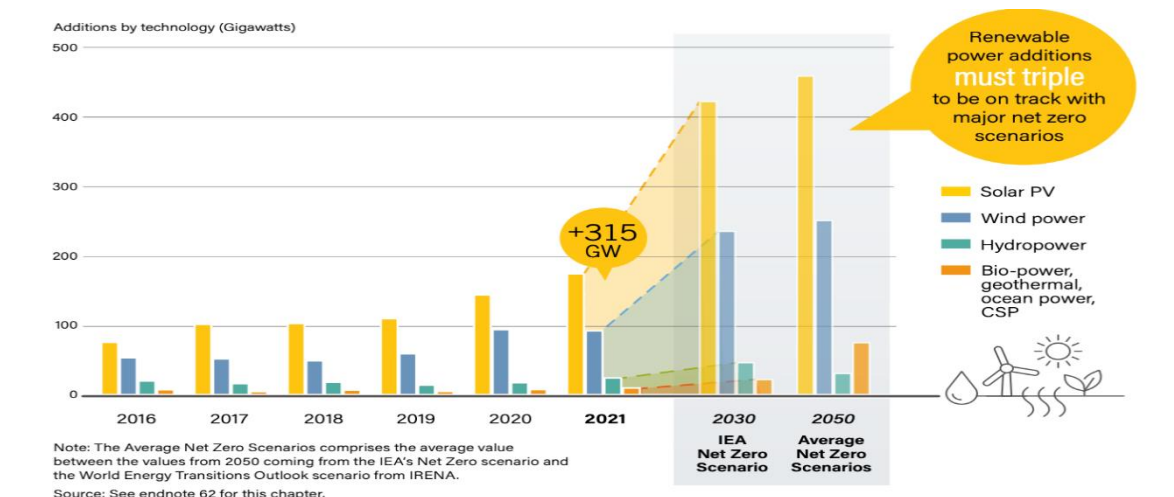
### 2.3. Energía solar

La energía solar fotovoltaica es obtenida por medio del aprovechamiento de la radiación solar electromagnética, usando celdas solares. (Luque,2011).

Según el reporte 2022 de REN21.net la demanda del uso de energía Solar ha ido en aumento y se espera que para el 2030 se puedan estar generando aproximadamente 400 GW (figura 1).

#### Figura 1.

*Adiciones anuales de capacidad de energía renovable, por tecnología y total, 2016-2021, y para alcanzar los escenarios Net Zero para 2030 y 2050.*



Tomado de Renewables (2022) Global Status Report. p. 45. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf)

## 2.4. Fotoconductividad

La fotoconductividad es definida como el cambio de la conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) de un material debido a la acción de radiación electromagnética incidente (luz). El primer reporte sobre fotoconductividad ocurrió en 1873 por W. Smith, quien observa que la resistividad del Selenio disminuía por efecto de la radiación del sol. (Solis)

### 2.4.1 Tipos de fotoconductividad

#### 2.4.1.1 Fotoconductividad en estado estacionario.

La diferencia entre el valor de conductividad en estado estacionario y la conductividad en oscuro es el valor de fotoconductividad de estado estacionario. (Temoltzi,2009).

Durante la fotoconductividad en estado estacionario, se da un equilibrio entre el proceso de generación de portadores (que se crean por la absorción de luz) y la recombinación de portadores (que es el proceso inverso en el que electrones libres y huecos desaparecen). Ver figura 2.

#### Figura 2.

*Esquema de los procesos de fotogeneración y recombinación de portadores.*

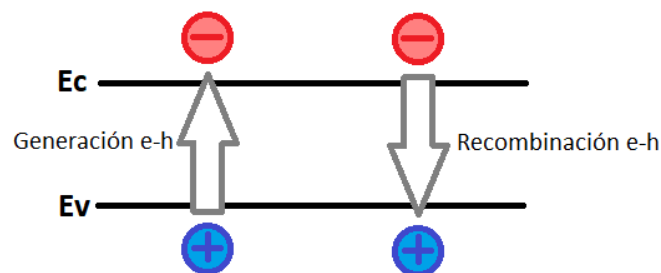


Imagen basada en el esquema presentado por *Departamento de Fisica (2017). Fisica de los semiconductores. Universidad Nacional de Mar de Plata.*

[http://www3.fi.mdp.edu.ar/fes/Semi\\_Clase-Gen%20y%20Rec.pdf](http://www3.fi.mdp.edu.ar/fes/Semi_Clase-Gen%20y%20Rec.pdf)

Si asumimos que la fotogeneración de electrones y huecos es simétrica ( $\Delta n = \Delta p$ ), y siempre que la iluminación sea uniforme (coeficiente de absorción muy bajo), de manera que la recombinación de portadores se mantenga en régimen lineal, la ecuación de continuidad nos permite calcular la concentración de equilibrio en función de la tasa de fotogeneración  $G$  de portadores y el tiempo de vida de los portadores fotoexcitados,  $\tau$ . Si llamamos  $\Phi_0$  al flujo luminoso (en fotones por unidad de tiempo y unidad de superficie) y  $\alpha$  al coeficiente de absorción, la tasa de fotogeneración será  $G = \Phi_0 \alpha$ , mientras que la tasa de recombinación es el cociente entre la densidad de portadores existentes y el tiempo de vida de dichos portadores. Dado lo anterior podemos escribir la ecuación de continuidad como:

(Kopprio, 2019)

$$\frac{\delta \Delta n}{\delta t} = \Phi_0 \alpha - \frac{\Delta n}{\tau} \quad \text{Ecuación 1}$$

cuya solución, suponiendo que el flujo luminoso empieza en el instante  $t=0$  es

$$\Delta n(t) = \Phi_0 \alpha \tau (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \text{Ecuación 2}$$

En el régimen estacionario ( $t \gg \tau$ ),  $\Delta n = \Phi_0 \alpha \tau$ , por lo que podemos expresar la fotoconductividad como:

$$\Delta\sigma = e(\mu_e + e\mu_e)\Delta n = e(\mu_e + e\mu_e)G\tau = e(\mu_e + e\mu_e)\Phi_0\alpha\tau \quad \text{Ecuación 3}$$

Lo que indica que la fotoconductividad, en un semiconductor del cual se conoce el coeficiente de absorción (para una radiación dada) y conociendo el valor de la radiación incidente, es proporcional al producto de la movilidad y el tiempo de vida de los portadores. De esta manera, la fotoconductividad de estado estacionario es una técnica que permite evaluar la calidad eléctrica de un material semiconductor.

Parte de la caracterización mediante fotoconductividad que se suele realizar con materiales semiconductores, implica la medición de la fotoconductividad de estado estacionario en función de la potencia lumínica de la fuente de luz. Para cierto rango de potencia lumínica se espera una respuesta lineal de acuerdo con la ecuación 3, pero también puede darse escenarios en que dicha relación varía y esta situación ofrece información acerca del proceso de recombinación de portadores (Guzmán, 2019).

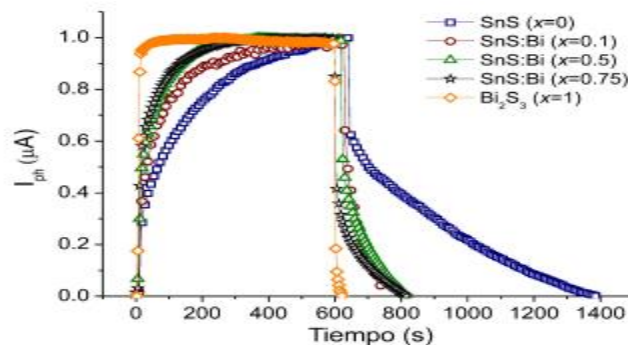
#### ***2.4.2 Fotoconductividad transiente***

Las curvas típicas de fotoconductividad de un semiconductor están caracterizadas por el ascenso de la fotocorriente ante la iluminación y un posterior descenso de la fotocorriente cuando se apaga la fuente de luz (figura 3). La forma y velocidad con que la fotocorriente aumenta o decae con el encendido y apagado de la luz respectivamente es lo que se conoce como curva de fotoconductividad transiente. (Calderón, 2016).

Dependiendo del tipo de semiconductor, el ascenso y decaimiento puede darse en tiempos cortos (inferiores a un segundo) o en tiempos más largos (de varios segundos). La fotoconductividad transiente ofrece información sobre el proceso de fotogeneración de portadores y la competencia que se da con el proceso de recombinación antes de alcanzarse el equilibrio (fotoconductividad de estado estacionario). En la figura 3 se observa que, para cada semiconductor, dependiendo de su composición química o su calidad estructural, las curvas de conductividad transiente varían.

### Figura 3.

*Curvas de fotocorriente de diferentes semiconductores.*



Tomado de Calderón, C.; Gordillo, G.; Banguero, E.; Bartolo-Pérez, P.; Botero, M (2016) Estudio de propiedades fotoeléctricas de películas delgadas de SnS y SnS:Bi *Revista Mexicana de Física*, vol. 62, núm. 5, septiembre-octubre, pp. 484-488 Sociedad Mexicana de Física A.C. Distrito Federal, México].

Las diferencias en las curvas de fotoconductividad transiente entre materiales se relacionan principalmente con la existencia de estados de trampa y centros de recombinación que son estados electrónicos que existen dentro del band-gap de energía (Guzman,2019).

### 2.4.3 Fotoconductividad espectral o espectros de fotoconductividad

El experimento de la medida espectral de la fotoconductividad consiste en iluminar una muestra con un haz monocromático de luz y medir el cambio en la resistividad (o conductividad) del material. Para obtener la respuesta espectral del material se realizarán medidas de la fotoconductividad en un rango espectral cercano al band-gap del material. Estas medidas se pueden realizar a temperatura ambiente o bien a temperaturas bajas con el fin de reducir el ruido térmico (García, 2011). En la figura 4 se observa el esquema de un sistema de caracterización de fotoconductividad espectral.

#### Figura 4.

*Esquema del sistema de caracterización de la fotoconductividad utilizado.*

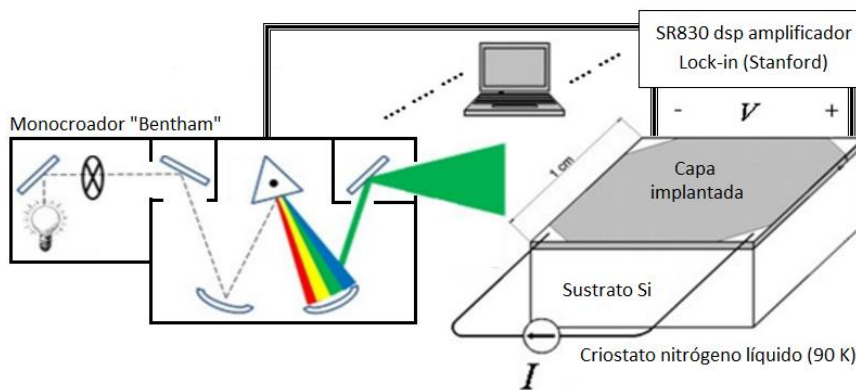


Imagen basada en el esquema presentado por García Hemme, E. (2011). Caracterización optoelectrónica de láminas de silicio implantadas con titanio (Optoelectronic characterization of titanium implanted silicon thin films).

El sistema mostrado se puede dividir en dos partes principales. Por un lado, el sistema óptico con la fuente de luz y el monocromador y por otro lado el sistema de control y medida electrónico cuyo elemento principal lo compone un amplificador Lock-in.

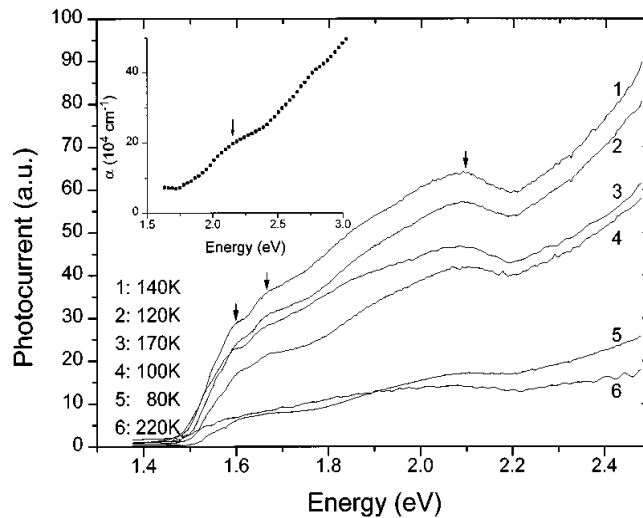
El sistema óptico puede utilizar como fuente de luz una lámpara halógena estándar para el rango visible e IR cercano (NIR) o bien una lámpara de Helio y Cuarzo para el rango UV y visible. Mediante el uso de lentes se enfoca la luz proporcionada por la lámpara hacia el monocromador. Previamente a la entrada de la luz en el monocromador, se utilizará un interruptor óptico (del inglés “optical chopper”) que bloqueará el paso del haz de luz de manera periódica. Consiste básicamente en un disco formado por aspas que girará con una determinada frecuencia. El monocromador cumple la función de descomponer la luz incidente en su espectro.

Por último, a la salida del monocromador se dispone de una rendija cuya apertura controlada con un tornillo micrométrico regula tanto la cantidad de flujo radiante que incidirá sobre la muestra como el ancho de banda espectral proveniente del monocromador  $\Delta\lambda$ . (García, 2011).

La figura 5 muestra espectros de fotoconductividad de un semiconductor tipo N (ReS) en un rango de luz de (1,4 a 2,5) eV que equivale al rango visible del espectro. En el inserto de esta figura se observa la correlación que existe entre el espectro de absorción ( $a(\lambda)$ ) y el espectro de fotoconductividad.

**Figura 5.**

*Fotoconductividad espectral de un semiconductor.*



Tomado de Friemelt, K. & Kulikova, L. & Kulyuk, Leonid & Siminel, A. & Arushanov, E. & Kloc, Ch & Bucher, Ernst. (1996). Optical and photoelectrical properties of ReS<sub>2</sub> single crystals. *Journal of Applied Physics*. 79. 9268 - 9272. 10.1063/1.362602.

#### **2.4.4 Fotoconductividad en función de la temperatura**

Como se observa en la figura 5, los experimentos de fotoconductividad espectral se pueden hacer a diferentes temperaturas para evidenciar cambios en el estado estacionario de la fotoconductividad de un semiconductor. Estos experimentos de fotoconductividad a diferentes temperaturas son relevantes también en materiales que por su uso pueden estar sometidos a cambios de temperatura o para evaluar la estabilidad térmica y desempeño de fotodetectores. Para este tipo de sistemas se puede emplear un equipo de fotoconductividad para medidas en estado estacionario junto con un módulo de control de la temperatura que normalmente puede implicar el enfriamiento controlado con nitrógeno líquido para bajas

temperaturas o con calentamiento eléctrico para temperaturas superiores a la temperatura ambiente (Gordillo, G. & Otalora, 2018).

A nivel de equipo, además del componente óptico y el componente de medición de la fotoconductividad, se requiere de un módulo de control de temperatura que puede incluir control de flujo de nitrógeno líquido y calentamiento con resistencia eléctrica para temperaturas por debajo de la temperatura ambiente o bien sistemas de control con flujo de agua o aire y calentamiento con resistencia eléctrica si la temperatura de trabajo está sobre la temperatura ambiente.

**Figura 6.**

*Esquema de un sistema de medida de fotoconductividad con control de temperatura.*

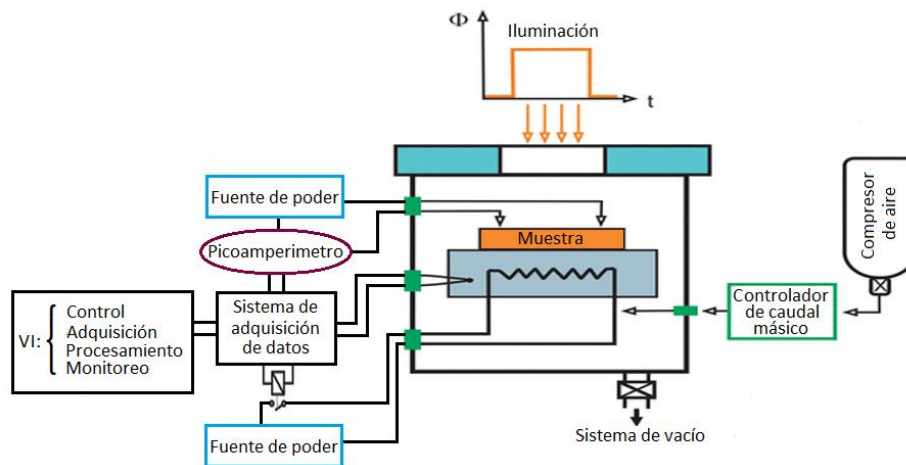


Imagen basada en el esquema presentado por Gordillo, G. & Otalora, C. & Reinoso, M. (2018). Study of trapping and recombination processes in thin films of MAPbI<sub>3</sub>, MAPbI<sub>2</sub>Br and MAPbI<sub>2</sub>Cl through photoconductivity measurements. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 29. 10.1007/s10854-017-8374-4.

La importancia de evaluar el cambio en la conductividad en función de la temperatura radica en que tanto la conductividad (en oscuro) como la fotoconductividad dependen de la cantidad de portadores disponibles, así como de su movilidad y estos dos parámetros pueden variar de acuerdo con la temperatura. (Gordillo, G. & Otalora, 2018).

## 2.5 Componentes para medir la fotoconductividad

Los Componentes para tener en cuenta para medir la fotoconductividad en película delgada semiconductor son los elementos de electrónica y de control (El-Saba, 2015). En el presente trabajo de grado se tuvieron en cuenta 3 componentes importantes:

- **Control de temperatura:** Se emplea para evaluar el comportamiento del semiconductor con respecto a la variación de la temperatura. En el diseño se empleó un control on/off, es decir, control de lazo cerrado (Ogata, 2003), por medio de el sensor de temperatura LM35Dt y un comparador en el código de Arduino para mantener una temperatura constante por medio de una resistencia eléctrica simulada como fuente térmica.
- **Control de iluminación:** Hay dos formas de hacer el control de iluminación, ya sea de forma manual por medio de un dimmer o de forma digital utilizando una interfaz. En esta tesis se realizó el control de iluminación por medio de un control de fase AC. Véase Apéndice B.
- **Módulo de medida de la conductividad eléctrica:** Existen diferentes métodos para medir la conductividad o resistividad eléctrica de una película delgada semiconductor. Estas diferentes técnicas se basan en la medición del campo eléctrico y la densidad de corriente que a su vez dependen de la tensión eléctrica, la corriente

eléctrica que fluye por el material y las dimensiones de este. Las técnicas de medición de la conductividad son:

- \*Método de dos puntas (Michael B. Heaney, 2004).
- \* Método de las cuatro puntas (Michael B. Heaney, 2004).
- \*Medición de la resistencia de la hoja (Michael B. Heaney, 2004)
- \* Método de Van Der Pauw (Van Der Pauw, 1958).

La fotoconductividad requiere dos módulos uno para medir la conductividad y un sistema para medir las variables de interés, como la potencia de iluminación. La temperatura es una variable que se puede controlar, así como los ciclos de iluminación.

## **2.6 Características para medir la fotoconductividad**

Las características que se deben tener en cuenta para medir la fotoconductividad en película delgada semiconductoras son: el espesor y del *band gap* de la película, los datos que se extraen de las medidas, es decir, la fotoconductividad de estado estacionario en este caso, (Temoltzi,2009); pero también el delta de la fotoconductividad en estado estacionario, como varia con la intensidad lumínica, y como varia el delta de conductividad en función de la temperatura. Para medir la fotoconductividad transiente se necesitaría de un generador de pulsos y un osciloscopio, lo cual daría una señal muy pequeña en microsegundos para poder identificar el comportamiento. (Kopprio, 2019).

## **3. Medición de la fotoconductividad en semiconductores de película delgada**

La técnica de fotoconductividad, en definitiva, es un método que permite conocer la respuesta óptica y eléctrica de un material semiconductor, es decir, se llama efecto de

fotoconductividad al cambio de conductividad que se produce en un semiconductor como consecuencia de la presencia de portadores fuera de equilibrio, excitados por la absorción de luz (El-Saba, 2015). La conductividad eléctrica de un material a nivel microscópico está dada por el producto entre la densidad de portadores libres ( $n$  y  $p$ ), la carga eléctrica de estos portadores y su movilidad. (Temoltzi,2009).

### 3.1 Principales características

La conductividad de un semiconductor puede ser modificada por la incidencia de radiación con energía superior al *band-gap*, ya que esto puede generar la absorción de luz que conlleva a la excitación fundamental de electrones que a su vez genera portadores de carga y por ende se da un aumento en los valores de  $n$  y  $p$ . Estos cambios en la densidad de portadores se denotan como  $\Delta n$  y  $\Delta p$ , mientras que el cambio en la conductividad por efecto de la absorción de luz se denota como  $\Delta\sigma$  que es justamente la fotoconductividad.

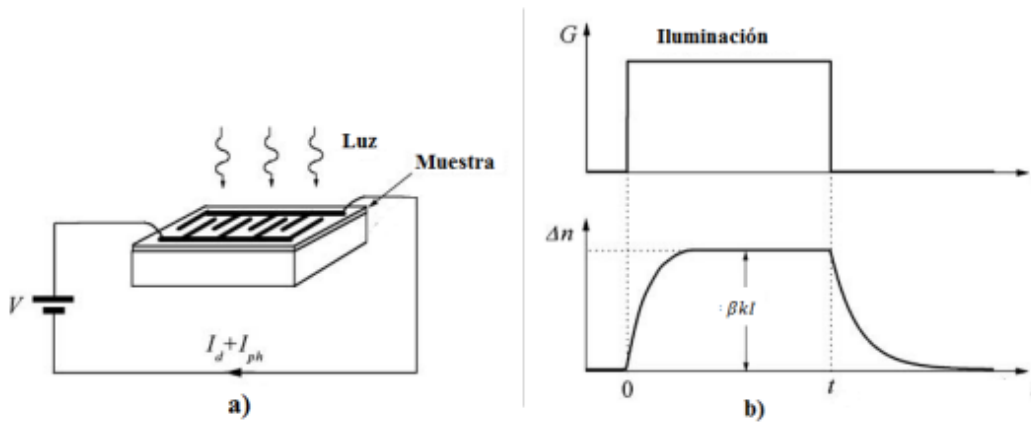
$$\sigma = e\mu_e(n_0 + \Delta n) + e\mu_p\Delta p = \sigma_0 + \Delta\sigma \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\Delta\sigma = e\mu_e\Delta n + e\mu_p\Delta p = e(\mu_e + \mu_p)\Delta n \quad \text{Ecuación 5}$$

La medida de la fotoconductividad se puede realizar mediante un montaje modificado del experimento de medida de la conductividad eléctrica en el que se adapta un sistema de iluminación en el que se conoce la potencia lumínica ( $\Phi$ ) y la composición espectral de la luz incidente (Guzmán, 2019). En la siguiente figura 7, se muestra un esquema del experimento básico de medida de la fotoconductividad.

**Figura 7.**

a) Circuito usado para medir fotocorriente, indicando cambios en la corriente en oscuro  $I_d$  como consecuencia del exceso de portadores generados mediante absorción de la radiación. b) Variación de la generación de portadores ( $G$ ) y el exceso de portadores



Tomado de Guzmán Castiblanco, F.E. (2019). *Estudio de trampas y centros de recombinación en películas delgadas de compuestos híbridos orgánico/inorgánicos con estructura perovskita*, Universidad Nacional de Colombia,

### 3.2 Configuraciones de medida de fotoconductividad

El sistema básico de medida de la fotoconductividad consiste en un módulo de medida de la conductividad eléctrica y un módulo de iluminación con suficiente versatilidad para poder variar parámetros como la potencia lumínica y la energía del haz de luz incidente. Dado que la medida de fotoconductividad puede dar información sobre parámetros de transporte de carga como la movilidad o el tiempo de vida, los sistemas de medida de fotoconductividad pueden ir acompañados de módulos de control de la temperatura de la muestra. En el caso de sistemas de medición de la fotoconductividad transiente, se pueden requerir mecanismos de

generación de pulsos de iluminación y de adquisición de datos de alta resolución para poder hacer medidas en periodos de tiempo tan pequeños como los nanosegundos.

Veamos a continuación algunas de las configuraciones de medida de fotoconductividad más comunes:

En la Tesis “Desarrollo y optimización de técnicas basadas en la fotoconductividad para la caracterización de semiconductores con aplicaciones fotovoltaicas”( *Kopprio L., 2019*), se muestran las técnicas fotoconductoras a detalle, desde las más sencillas como la fotoconductividad en estado estacionario, donde se ilumina la región entre los contactos de una manera uniforme a lo largo de la distancia.

En la Figura 8 se muestran dos configuraciones para medir la fotoconductividad utilizando un láser de He-Ne enfocado en la muestra con ayuda de un espejo (M). En la primera se mide la corriente continua con un electrómetro y en la segunda se modula el haz con un chopper (Ch) a baja frecuencia para obtener una señal alterna donde se mide el primer armónico con un amplificador lock-in para determinar la fotoconductividad.

### Figura 8.

*Se muestran dos configuraciones para medir la fotoconductividad utilizando un láser de He-Ne enfocado en la muestra con ayuda de un espejo (M).*

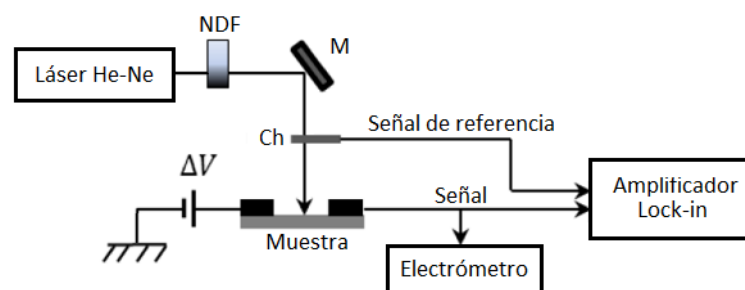


Imagen basada en el esquema presentado por Kopprio L. (2019). *Desarrollo y optimización de técnicas basadas en la fotoconductividad para la caracterización de semiconductores con aplicaciones fotovoltaicas, Universidad Nacional del Litoral.*

La figura 9 presenta una configuración diseñada para efectuar mediciones de fotoconductividad modulada en el tiempo (MPC), también llamada fotoconductividad transiente.

### Figura 9.

*Configuración diseñada para efectuar las mediciones de fotoconductividad modulada en el tiempo (MPC).*

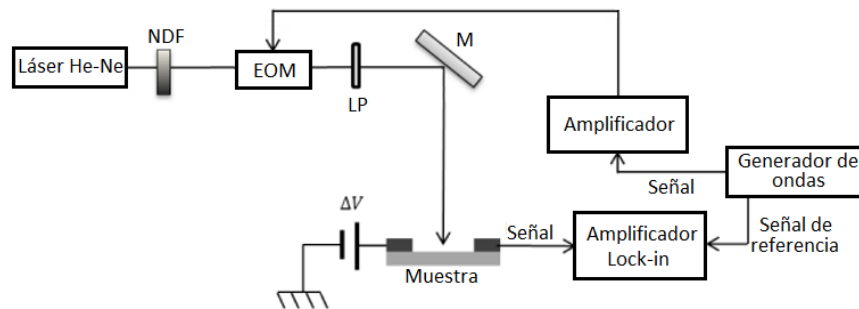


Imagen basada en el esquema presentado por Kopprio L. (2019). *Desarrollo y optimización de técnicas basadas en la fotoconductividad para la caracterización de semiconductores con aplicaciones fotovoltaicas, Universidad Nacional del Litoral.*

En la figura 9 se muestra una configuración típica para medir la fotoconductividad transiente, haciendo uso de un modulador electro-óptico (EOM) y un polarizador lineal que actúa como modulador de intensidad de haz. Al ingresar una señal oscilante al EOM, se obtiene la oscilación de la luz que origina una oscilación de la corriente en la muestra producida al aplicar una diferencia de tensión constante entre los contactos.

A continuación, en la figura 10 se presenta la imagen basada en el arreglo experimental que se realizó por (Kroppio L, 2019) para medir la fotocorriente con un patrón de interferencia estacionario, donde el haz de luz láser es dividido por un espejo semiplateado llamado BS y la intensidad de un haz es atenuada con un filtro de densidad neutra (NDF) logrando que sea mucho menor al otro haz.

### Figura 10.

*Configuración para medir la fotocorriente con un patrón de interferencia estacionario*

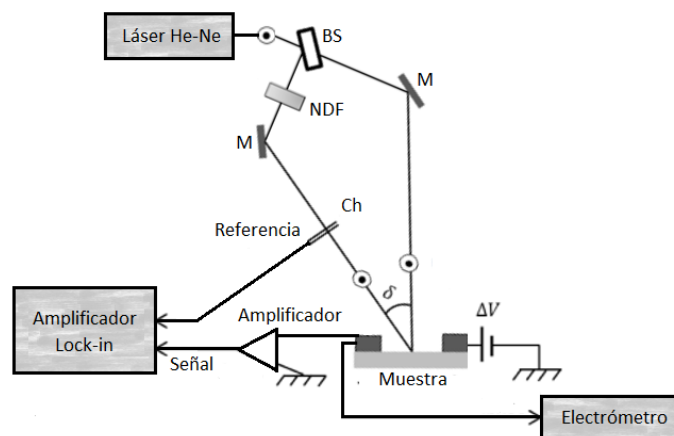


Imagen basada en el esquema presentado por *Kopprio L. (2019). Desarrollo y optimización de técnicas basadas en la fotoconductividad para la caracterización de semiconductores con aplicaciones fotovoltaicas, Universidad Nacional del Litoral.*

Con ayuda de los espejos (M) se llevan los haces a la muestra y con una lámina de media onda (HWP) se rota la polarización del haz intenso, finalmente el haz débil puede chopearse (CH) a una baja frecuencia para obtener de manera precisa las mediciones y recuperarlas con un amplificador lock-in.

Para llevar a cabo las mediciones en el caso de un patrón de interferencia móvil, se usa el mismo equipo y la misma distribución de componentes quitando la diferencia de tensión y llevando el contacto de la muestra directamente a tierra, además de incluir un modulador electro-óptico (AOM) en la trayectoria de cada haz que permite modificar levemente su frecuencia.

Para finalizar, en la figura 11 se explica la configuración experimental para implementar las técnicas de patrón de interferencia modulado en el tiempo, patrón de interferencia vibratorio (VPG) y el patrón de interferencia oscilante (OPG).

### Figura 11.

*Arreglo experimental para producir el (VPG), (OPG) y Patrón de interferencia modulado en el tiempo.*

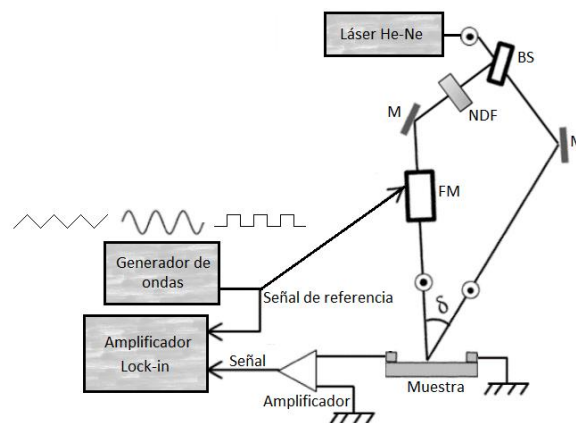


Imagen basada en el esquema presentado por *Kopprio L. (2019). Desarrollo y optimización de técnicas basadas en la fotoconductividad para la caracterización de semiconductores con aplicaciones fotovoltaicas, Universidad Nacional del Litoral.*

En la figura 11 se observa el arreglo experimental para producir el VPG, donde el haz de luz es dividido por el espejo semiplataado (BS), uno de ellos atenuado por un filtro de

densidad neutra (NDF) logrando que su intensidad sea mucho menor comparada con el otro haz, los haces se hacen coincidir en la muestra, el haz débil atraviesa un modulador de fase (FM) que induce una pequeña oscilación en la fase del haz, posteriormente se mide la corriente alterna inducida en la muestra a la frecuencia fundamental con el amplificador lock-in.

La configuración del diseño para el OPG es idéntica efectuando el único cambio en la señal que produce el generador de ondas, pasando a una modulación triangular de su fase. Para la técnica de del patrón de interferencia modulado en el tiempo se usa la misma configuración, pero reemplazando el modulador de fase (FM) por un modulador electro-óptico (EOM) que produce una alternancia (señal cuadrada) óptica de  $90^\circ$  en la polarización del haz.

Con base en los sistemas vistos en las figuras 8, 9, 10 y 11 se hace una estimación de costos de cada sistema (véase Apéndice A), Además, se adicionó un sistema básico con Arduino UNO como el descrito en la figura 12.

#### **4. Diseño del sistema propuesto de medición de fotoconductividad**

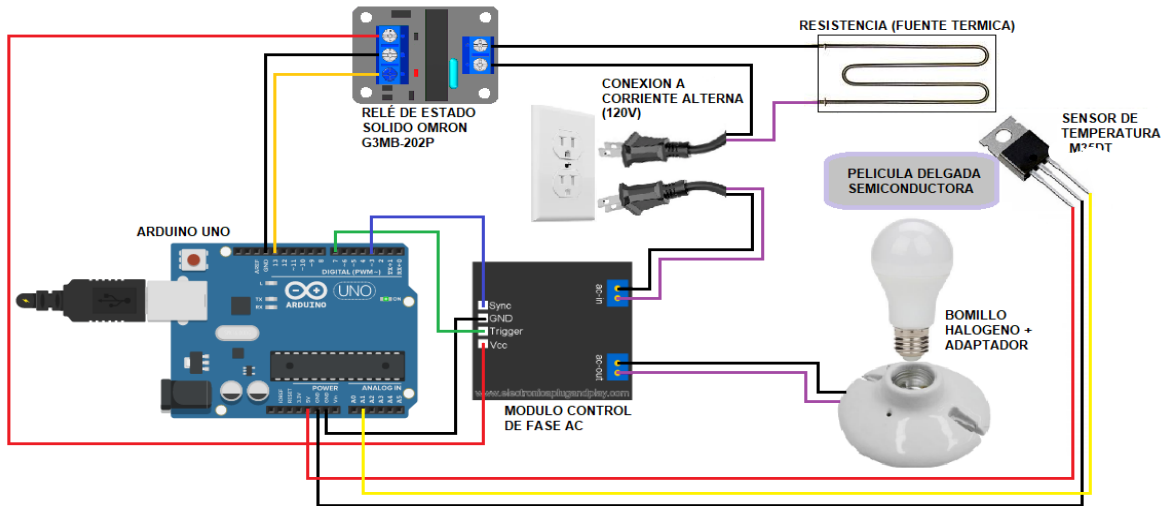
El grupo de investigación de la Universidad Industrial de Santander hasta ahora no cuenta con un sistema para medir la fotoconductividad en película delgada semiconductor y la principal motivación de este trabajo de grado es la identificación de la importancia de este tipo de equipos, así como las características que se deben tener en cuenta para poder diseñar un sistema que aporte al desarrollo investigativo del Grupo.

En el anterior capítulo se pudo observar que se puede medir fotoconductividad espectral y fotoconductividad con respecto a la temperatura, sin embargo, en el presente trabajo de grado se propone el diseño de un sistema que permite iluminar y calentar controladamente una película delgada, para la caracterización de las propiedades optoelectrónicas de materiales semiconductores.

Este diseño parte del sistema de medición de conductividad con el método de Van Der Pauw (Burgos,2020) con el que cuenta el grupo GISEL actualmente, y se complementa con un sistema que permite controlar la intensidad lumínica que incide en la película delgada semiconductor por medio de un “módulo de control de fase AC” y mediante la adquisición de datos de la temperatura ambiente de la película delgada semiconductor, lo cual fue simulada con una resistencia como fuente térmica.

#### **4.1 Componentes del sistema de medición**

El sistema propuesto está compuesto de un microcontrolador programable incorporado en una tarjeta impresa Arduino UNO, un módulo de control AC de fase, un sensor de temperatura, una lámpara halógena de 15W con su respectivo adaptador y cables de conexión, un relé de estado sólido Omron G3MB-202P y una resistencia eléctrica como *fuentes térmica*.

**Figura 12.***Sistema Propuesto*

La selección de materiales se realizó basado en la disponibilidad y costo de los componentes, en el caso del Arduino UNO por su facilidad comercial, el módulo de control de fase AC ya que permite el control de fase en cargas tipo monofásicas de 120V, traducido en este caso como control de intensidad lumínica y además puede funcionar como conmutador, el sensor de temperatura puede ser escogido dentro de una gran variedad de sensores disponibles y de bajo costo que se pueden intercambiar dependiendo del rango de temperatura y sensibilidad requerida para cada tipo de muestras estudiadas. El relé de estado sólido Omron G3MB-202P por su fácil adquisición y la resistencia por su bajo costo y facilidad para cambiar su tipo según sea necesario.

#### 4.2 Funciones del sistema

El funcionamiento del sistema está orientado a una etapa de iluminación de una película delgada de un material semiconductor, en la que el material es sometido a una

determinada intensidad lumínica y térmica, la iluminación es programada en el microcontrolador y ejecutada por el módulo de control de fase AC y el control térmico es ejecutado por el relé de estado sólido.

La fase de iluminación está diseñada para tener un número de ciclos de encendido y apagado donde se ilumina la película delgada, cada ciclo cuenta con una cantidad de mediciones de temperatura en el ciclo útil de la señal que son definidas por el usuario y otro parámetro de mediciones cuando la iluminación está apagada, donde gracias a las mediciones se puede observar el aumento en la temperatura de la película delgada del material semiconductor.

Las mediciones son comparadas constantemente con parámetros establecidos por operador que sirven para controlar la temperatura que es inducida en la película delgada de material semiconductor, la temperatura de la resistencia es controlada mediante un control ON/OFF, para realizar el control se establece la temperatura en la que se quiere que se mantenga y un margen de error para generar los rangos donde será válido que oscile la temperatura.

La segunda etapa está enfocada a la ausencia de iluminación de la película delgada donde se programa con qué frecuencia se mide la temperatura después de la última iluminación, permitiendo observar y controlar la temperatura de la película delgada de material semiconductor.

### **4.3 Evaluación del diseño**

Como ejercicio de prueba se realizó la adquisición de datos con los que se calentaría una película delgada mediante una resistencia, para este caso se usó una secuencia de

encendido de 5 segundos y apagado de 5 segundos que se repite tres veces en el ciclo de calentamiento y en el ciclo de enfriamiento se realizan mediciones de la temperatura cada 500 milisegundos; el código usado para esta prueba fue el siguiente:

### Figura 13.

*Código en Arduino para el funcionamiento del sistema propuesto.*

```

Codigo_Tesis $
#include <AcPhaseControl.h>
// 2134646 - Yair Sandoval - Ingenieria Electrica

int syncsignal = 3; //Asignacion del pin de sincronismo de la señal
int gate = 7; //Asignacion del pin deL TRIGGER
int My_angle = 90 ; //intencidad luminica
int timeOn = 5000; //Tiempo de encendido en ms
int timeOff = 5000; //Tiempo de apagado en ms
int Npulsos = 3; //Numero de intentos
int NmedicCUC = 50; //Numero de mediciones ciclo encendido de calentamiento
int NmedicCIC = 50; //Numero de mediciones ciclo apagado de calentamiento
int FCE = 200; //frecuencia de las mediciones del ciclo oscuro en ms
int T = 40; //Temperatura a la que se debira mantener la muestra en °C
int ET = 2; // Margen de error de la temperatura de la muestra +-ET°C
AcPhaseControl Control_Ac;

//zona de configuraciones
void setup() {
  Serial.begin(9600); //comunicación serial de 9600 bits por segundo (baudios)
  Control_Ac.begin(gate, syncsignal); //Importar modulo de control AC
  pinMode(gate, OUTPUT);
  pinMode(syncsignal, OUTPUT);
  pinMode(A1, INPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);

  delay(10000); //Tiempo de 10s para la coneccion con el software de toma de datos
  Serial.println(String("prueba de temperatura: "));
  Serial.println(((analogRead(A1)*500.0)/1023)); //Toma de temperatura de prueba
  delay(timeOff); //Tiempo de la señal en apagado

  Serial.println(String("Inicio de las mediciones de temperaturaciclo encendido: "));
  for (int i = 0; i < Npulsos; i++){ //Señal cuadrada de encendido
    Control_Ac.ControlAngle(My_angle);

    digitalWrite(gate, HIGH), digitalWrite(syncsignal, HIGH); //Orden de encendido y de fase
    for (int j = 0; j < NmedicCUC; j++){
      Serial.println(((analogRead(A1)*500.0)/1023));
      if (((analogRead(A1)*500.0)/1023) > T+ET) digitalWrite(13, LOW); //Control de disminuir la temperatura de la muestra
      if (((analogRead(A1)*500.0)/1023) < T-ET) digitalWrite(13, HIGH); //Control de aumentar la temperatura de la muestra
      delay(timeOn/NmedicCUC); //Tiempo de encendido en ms
    }

    digitalWrite(gate, LOW), digitalWrite(syncsignal, LOW); //Orden de apagado y de fase
    for (int k = 0; k < NmedicCIC; k++){
      Serial.println(((analogRead(A1)*500.0)/1023));
      if (((analogRead(A1)*500.0)/1023) > T+ET) digitalWrite(13, LOW); //Control de disminuir la temperatura de la muestra
      if (((analogRead(A1)*500.0)/1023) < T-ET) digitalWrite(13, HIGH); //Control de aumentar la temperatura de la muestra
      delay(timeOff/NmedicCIC); //Tiempo de apagado en ms
    }
  }
  Serial.println(String("Inicio ciclo apagado: "));
}

// ciclo infinito
void loop() {
  Serial.println(((analogRead(A1)*500.0)/1023)); //Toma de temperatura
  if (((analogRead(A1)*500.0)/1023) > T+ET) digitalWrite(13, LOW); //Control de disminuir la temperatura de la muestra
  if (((analogRead(A1)*500.0)/1023) < T-ET) digitalWrite(13, HIGH); //Control de aumentar la temperatura de la muestra
  delay(FCE); //Tiempo entre tomas de temperatura en ms
}

```

Las variables que se deben configurar son las mostradas en la Figura 14, y algunas observaciones para el correcto uso del sistema son:

Configurar las mediciones de cada ciclo (NmediCUC y NmediCIC) teniendo en cuenta los tiempos de encendido y apagado de la fase de iluminación (timeOn y timeOff) para que la frecuencia de muestreo y control en los intervalos sea alta.

Definir una frecuencia de muestreo y control del ciclo apagado (FCE) con respecto al material de la resistencia y la velocidad de su cambio de temperatura.

Tener parámetros fijos para los experimentos, en la fase o intensidad lumínica (My\_angle), el número de pulsos (Npulsos), temperatura a la que se mantendrá la muestra (T) y su margen de error o rango variable (ET).

#### **Figura 14.**

*Variables a tener en cuenta en la programación del sistema propuesto.*

```
int My_angle = 90 ; //intensidad luminica
int timeOn = 5000; //Tiempo de encendido en ms
int timeOff = 5000; //Tiempo de apagado en ms
int Npulsos = 3; //Numero de intentos
int NmediCUC = 50; //Numero de mediciones ciclo encendido de calentamiento
int NmediCIC = 50; //Numero de mediciones ciclo apagado de calentamiento
int FCE = 200; //frecuencia de las mediciones del ciclo oscuro en ms
int T = 40; //Temperatura a la que se debira mantener la muestra en °C
int ET = 2; // Margen de error de la temperatura de la muestra +-ET°C
```

## **5. Resultados**

Los resultados obtenidos del diseño son:

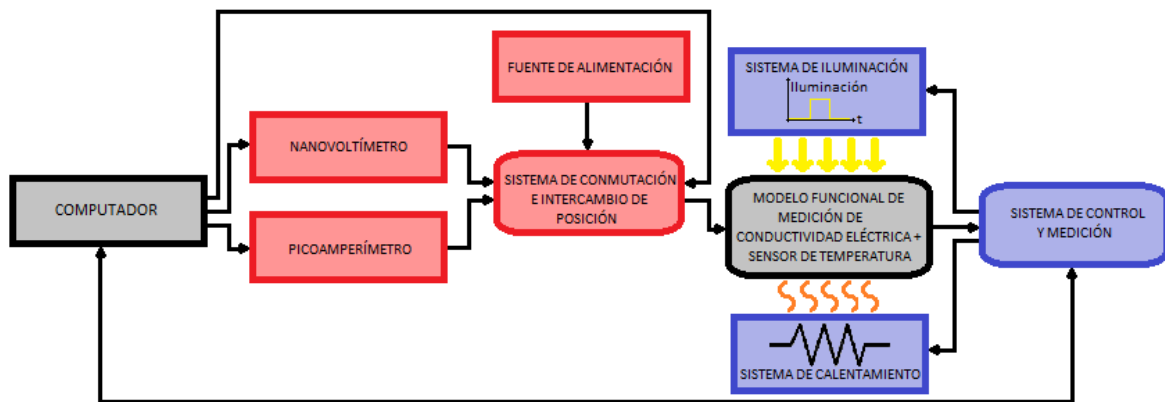
- \* Control de la intensidad Lumínica por medio del control de fase AC usando la interfaz de Arduino.

- \* En la herramienta serial plotter de Arduino, se podrá evidenciar la temperatura a la que estaría expuesta en tiempo real la película delgada de material semiconductor.

\*Teniendo en cuenta el circuito de la figura 12, en la figura 15, se representa como quedaría la adición al circuito que se tiene implementado en el grupo GISEL para medir conductividad.

### Figura 15.

Diagrama de bloques que representa la unión del sistema de medida que tiene el grupo GISEL con el sistema propuesto por la presente tesis.



## 6. Conclusiones

- Los componentes esenciales para medir la fotoconductividad en película delgada semiconductor son el control de temperatura, el control de la iluminación y el módulo medida de la conductividad, mientras que se deben hacer medidas complementarias para conocer las características del band gap y el espesor de la película.

- Los sistemas de medida de fotoconductividad esenciales para caracterizar semiconductores fotovoltaicos son los sistemas de fotoconductividad transiente y en estado estacionario.
- Se diseñó un sistema para controlar la intensidad lumínica de una bombilla Halógena y la adquisición de datos de la temperatura a la que va a estar expuesta la película delgada semiconductor por medio de la simulación de una fuente térmica. Esto se logra mediante la interfaz de Arduino usando el código propuesto en la figura 13.
- El sistema de control diseñado junto con el sistema con el que cuenta el Grupo de investigación para la medida de la conductividad eléctrica podría dar lugar a un primer sistema de medida de la fotoconductividad.

### **7.Recomendaciones**

- Idealmente, el sistema propuesto en la figura 12 se puede complementar con un piranómetro como sensor de radiación que permita medir el valor real de potencia lumínica que incide en la muestra como resultado del control de la intensidad de la lámpara halógena.
- En una próxima fase del trabajo de grado, sería interesante implementar un sistema de control de temperatura PID, donde se pueda garantizar una mayor eficiencia energética con respecto a la fuente térmica utilizada y garantizar mayor estabilidad en los valores de temperatura deseados.

### Referencias

- Burgos Baez, E.L. y Noy Salamanca, J.N. (2020) Implementación de un sistema de caracterización eléctrica enfocado en materiales fotovoltaicos mediante el método de Van der Pauw. [proyecto de grado. Universidad Industrial de Santander]
- Calderón, C.; Gordillo, G.; Banguero, E.; Bartolo-Pérez, P.; Botero, M (2016) Estudio de propiedades fotoeléctricas de películas delgadas de SnS y SnS:Bi *Revista Mexicana de Física*, vol. 62, núm. 5, septiembre-octubre, pp. 484-488 Sociedad Mexicana de Física A.C. Distrito Federal, México].
- Departamento de Física (2017). Física de los semiconductores. Universidad Nacional de Mar de Plata. [http://www3.fi.mdp.edu.ar/fes/Semi\\_Clase-Gen%20y%20Rec.pdf](http://www3.fi.mdp.edu.ar/fes/Semi_Clase-Gen%20y%20Rec.pdf)
- El-Saba, Muhammad. (2015). Measurement of the Semiconductor Parameters. • Electronic Engineering Materials & Nanotechnology (pp.931-1050). Chapter: 10 Publisher: Hakim Presd
- Friemelt, K. & Kulikova, L. & Kulyuk, Leonid & Siminel, A. & Arushanov, E. & Kloc, Ch & Bucher, Ernst. (1996). Optical and photoelectrical properties of ReS<sub>2</sub> single crystals. *Journal of Applied Physics*. 79. 9268 - 9272. 10.1063/1.362602.
- Guzmán Castiblanco, F.E. (2019). Estudio de trampas y centros de recombinación en películas delgadas de compuestos híbridos orgánico/inorgánicos con estructura perovskita, Universidad Nacional de Colombia
- García Hemme, E. (2011). Caracterización optoelectrónica de láminas de silicio implantadas con titanio (Optoelectronic characterization of titanium implanted silicon thin films)

Gordillo, G., Otálora, C. A., & Ramirez, A. A. (2016). A study of trap and recombination centers in MAPbI<sub>3</sub> perovskites. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(48), 32862–32867. doi:10.1039/c6cp06261j

Gordillo, G. & Otalora, C. & Reinoso, M. (2018). Study of trapping and recombination processes in thin films of MAPbI<sub>3</sub>, MAPbI<sub>2</sub>Br and MAPbI<sub>2</sub>Cl through photoconductivity measurements. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 29. 10.1007/s10854-017-8374-4.

Heaney, Michael B.(1999) Electrical conductivity and resistivity. CRC Press.

Kopprio, L. (2019) Desarrollo y optimización de técnicas basadas en la fotoconductividad para la caracterización de semiconductores con aplicaciones fotovoltaicas [tesis doctoral Universidad Nacional del Litoral]

Leñero Bardallo, J. A.(2018) <b>Fundamentos de la electrónica y los semiconductores</b>. ed. Cádiz (España): Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, 195 p.  
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4259/es/ereader/uis/106562?page=30>.

Consultado en: 04 Feb 2022

Luque, Antonio Hegedus, Steven. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (2nd Edition) - 1.1 The Big Picture*. John Wiley & Sons. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008UI1B1/handbook-photovoltaic/the-big-picture>

Martinez Perez, L.( 2005) Ipn.Mx. Retrieved October 19, 2022, from

[https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/10766/1/PTA\\_D\\_20050700\\_001.PDF](https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/10766/1/PTA_D_20050700_001.PDF). (fabricación y caracterización óptica, estructural y eléctrica de películas

delgadas transparentes de óxidos de estaño, circonio y zinc- M. en C. Lilia Martínez Pérez-2005)

McEvoy, A (s.f.). Practical Handbook of Photovoltaics : Fundamentals and Applications. In Practical Handbook of Photovoltaics : Fundamentals and Applications.

Medel Mejía, A. (2018). Investigación de efectos de temperatura en parámetros fotoeléctricos de fotoconductores determinados por medio de la técnica de rejilla dinámica [Master's thesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla].

Michael B. Heaney. "Electrical Conductivity and Resistivity." Copyright 2000 CRC Press LLC. <<http://www.engnetbase.com>>.

Ogata. (2003). Ingeniería de Control Moderna. Pearson Educación.

Rodríguez Martínez, J. (2017). Fundamentos de física para semiconductores. Ediciones USTA. <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4259/es/lc/uis/titulos/70694>.

Solis. J.L.(s.f.) Física de Celdas Fotovoltaicas I. Cap. II Semiconductores. Universidad Nacional de Ingeniería. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Consultado 20 de junio de 2022

Temoltzi Avila, F. (2009) Estudio de las características electrónicas en base a la fotoconductividad en películas de silicio-germanio [tesis de maestria. Instituto Nacional de Astrofisica, Optica y Electronica. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/463/1/TemoltziAF.pdf>

Van der Pauw, L.J. (1958) A Method of Measuring the Resistivity and Hall Coefficient on Lamellae of Arbitrary Shape. Philips Technical Review, 20, 220-224.

## Apéndices

### Apéndice A. Estimación de costos

<b>Componen te</b>	<b>Precio Unitario “P.U.”</b>	<b>Sistema Básico Arduino</b>	<b>Sistema para la medición de la fotoconducti vidad con láser y modulación de choper</b>	<b>Sistema para la medición de fotocond uctividad trascient e</b>	<b>Sistema para medir la fotocorriente con un patrón de interferencia estacionario</b>	<b>Sistema para medir (vpg), (opg) y patrón de interferencia modulado en el tiempo</b>
Lámpara Halógena	9 USD	1 Unidad				
Laser He- Ne	1.523 USD		1 Unidad	1 Unidad	1 Unidad	1 Unidad
Filtro Neutro De Densidad Óptica Variable (NDF)	18 USD		1 Unidad	1 Unidad	1 Unidad	1 Unidad
Espejo Óptico (M)	250 USD		1 Unidad	1 Unidad	2 Unidades	2 Unidades

Optical Choper (Ch)	1.395 USD				1 Unidad	
Electróme tro	11.400 USD				1 Unidad	
Modulado r Electroópt ico (EOM)	500 USD			1 Unidad		1 Unidad
Filtro Polarizad or Lineal (LP)	674 USD		1 Unidad	1 Unidad		
Generador De Ondas	263 USD	1 Unidad	1 Unidad	1 Unidad		1 Unidad
Lamina De Media Onda (HWP)	39 USD				1 Unidad	
Picoampe rímetro	2810 USD	1 Unidad				
Nano Amperím etro	5.580 USD	1 Unidad				

Amplificador Lock-In	4.250 USD		1 Unidad	1 Unidad	1 Unidad	1 Unidad
Espejo semiplatado (BS)					1 Unidad	1 Unidad
Tarjeta Arduino Uno	29 USD	1 Unidad				
Total Estimado		8.691 USD	6.978 USD	7.478 USD	19.125 USD	7.054 USD

TRM Del Día Viernes 7 De Oct. De 22: (4612,54 Pesos Por Dólar).

#### Apéndice B. Control de intensidad lumínica

```

int sync = 4; // este es el pin de sincronismo o SYNC
int led = 13; // un led para ayudar a visualizar ciclos
int trigger = 8; // este es el pin de disparo o TRIGGER

int mivariabletime = 0; //variable para medir los tiempos de disparo

//zona de configuraciones
void setup() {
  pinMode(led, OUTPUT); //led es una salida
  pinMode(sync, INPUT); //pin de sincronismo es una entrada
  pinMode(trigger, OUTPUT); //pin de disparo es una salida
  digitalWrite(trigger, LOW); //inicializamos la señal de disparo en cero
}
// ciclo infinito
void loop() {
  digitalWrite(trigger, LOW);
  digitalWrite(led, LOW);

```

```
if(pulseIn(sync , LOW) > 10); //Esperamos un flanco de bajada y que la duración en bajo sea mayor a 10us
{
  delayMicroseconds(mivariabletime);
  digitalWrite(trigger, HIGH); // enviamos el pulso alto de disparo
  delayMicroseconds(50); // por al menos 50 microsegundos
  digitalWrite(trigger, LOW); // luego ponemos a bajo la linea de disparo
}
//incrementamos la variable de tiempo de disparo para ir disminuyendo el ángulo de conducción
//o lo que es lo mismo ir aumentando el ángulo de fase.
mivariabletime = mivariabletime + 2;
if (mivariabletime >= 7000) // si ya pasaron 7000 microsegundos
{
  digitalWrite(trigger, LOW);
  mivariabletime = 0; // reinicie la variable de tiempo
  digitalWrite(led, HIGH); // activa el led del pin 13 por dos segundos para
  delay(2000); // indicarle al usuario que se ha completado el ciclo de decremento
  digitalWrite(led, HIGH); // de intensidad lumínica
}
}
```