

Presenta:
Francisco Javier Arizaga Ayala

SISTEMA DIGITAL DE MÚLTIPLE RAZÓN DE VENTANA PARA EL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS DE NIVELES PROFUNDOS

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ELECTRÓNICA

Dirección:

Dr. Armando Gregorio Rojas Hernández

Co-Dirección:

Dra. Alicia Vera Marquina

UNIVERSIDAD DE SONORA

29 de noviembre de 2018

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



UNIVERSIDAD DE SONORA
División de Ciencias Exactas y Naturales

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ELECTRÓNICA
Departamento de INVESTIGACIÓN EN FÍSICA

SISTEMA DIGITAL DE MÚLTIPLE RAZÓN DE
VENTANA PARA EL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS
DE NIVELES PROFUNDOS

Tesis presentada por:

Francisco Javier Arizaga Ayala

Revisores:

Dr. Armando Gregorio Rojas Hernández

Dr. José Rafael Benito Noriega Luna

Dr. Roberto Gómez Fuentes

Dr. Luis Carlos Félix Herrán

Candidato:

Ing. Francisco Javier Arizaga Ayala

29 de noviembre de 2018

Dedicatoria

Dedico este trabajo de tesis a:

Mi madre María Ayala Valenzuela, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyaste. Mamá gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto te lo debo a ti.

Mi padre Zeferino Arizaga Luviano (QEPD), por enseñarme el valor del trabajo duro, quererme mucho, creer en mí y por esforzarte al máximo para darme una buena educación. Papá este logro principalmente es por ti y para ti, todo lo bueno que tengo en la vida te lo debo a ti.

Mis hermanos, Domingo, Isabel, Ignacio, Concepción, Alberto y Zeferino por estar conmigo y apoyarme siempre emocional y económicamente jamás olvidaré lo que han hecho por mí, los quiero mucho.

Mi novia y prometida Gema Natalie Acosta Escalante, por apoyarme durante todos mis estudios universitarios, por escucharme en todo momento y darme los mejores consejos, por estar conmigo en las buenas y en las malas y por querer compartir una vida conmigo.

A mis cuñados por apoyarme económicamente durante la mayoría de mis estudios.

Todos mis amigos y compañeros de clases por compartir los buenos y malos momentos con ustedes.

Francisco Javier Arizaga Ayala

Agradecimientos

Por la culminación de esta tesis de maestría agradezco el apoyo total de mi director de tesis, el Dr. Armando Gregorio Rojas Hernández y de su familia por dedicar sus horas de trabajo para asesorarme durante el proyecto. Además de sus consejos para ser una mejor persona y enseñarme el camino de un investigador en ciencias.

Agradezco a CONACYT por el estímulo aportado durante 24 meses. Así como a el coordinador y aquellas personas que hicieron posible que los alumnos de la maestría en ciencias en electrónica pudieran obtener el estímulo.

Agradezco a mis maestros de licenciatura y posgrado por compartir sus conocimientos con nosotros.

Muchas gracias a todos.

Resumen

El presente trabajo describe un sistema digital que permite realizar un análisis de espectroscopía de transitorios de niveles profundos para obtener información de un transitorio de corriente de manera simultánea gracias al uso de razón de ventana múltiple. De esta manera se obtienen nueve espectros de información de espectroscopía de transitorios profundos o espectroscopía de foto-corriente inducida (DLTS o PICTS) durante un sólo escaneo. El sistema digital permite mejorar la resolución en la detección de trampas profundas gracias a la cantidad de espectros obtenidos. El propósito del sistema es extraer información de señales transitorias para posteriormente procesarlas y obtener la caracterización de las trampas dentro del material. Se utiliza una tarjeta de procesamiento digital de señales (DSP) económica, la cual permite generar pulsos, con lo que se define: la razón de ventana, lectura de señales y filtrado; que tiene como propósito obtener la información presente en el transitorio para el análisis de trampas profundas. Adicional a ser más sencillo y menos costoso, la resolución observada es más alta que la de un circuito completamente analógico.

Palabras clave. DLTS, PICTS, Circuito de Razón de Ventana.

Abstract

The present work describes a digital system that allows to perform a transient spectroscopy analysis of deep levels to obtain information of a current transient simultaneously through the use of a multiple window rate. In this way, nine information spectra of deep level transient spectroscopy or photoinduced current transient spectroscopy (DLTS or PICTS) are obtained during a single scan. The digital system allows to improve resolution in trap detection due to the amount of spectra obtained. The purpose of the system is to extract information from transient signals, to process it, and to obtain the traps characterization inside the material. An economic DSP is used, that allows to generate pulses to defined the window rate, signal reading and filtering that has as a purpose to obtain the information present in the transient for the analysis of deep traps. Although it is simpler and less expensive, it can be observed that the resolution is improved compared to a completely analog circuit.

Keywords. DLTS, PICTS, Multi-Rate Window Circuit.

Índice general

Dedicatoria	v
Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. General	1
1.2.2. Particulares	1
1.3. Introducción	2
2. Principio, Aplicaciones y Análisis DLTS/PICTS	5
2.1. Defectos en Semiconductores	6
2.2. Principio Básico de la Espectroscopía de Transitorios de Niveles Profundos	7
2.2.1. Transiciones de Banda Prohibida	8
2.2.2. Uniones en Semiconductores	9
2.3. DLTS/PICTS	11
2.3.1. DLTS	12

2.3.2. PICTS	14
2.3.3. PICTS VS DLTS	14
2.4. Aplicaciones de DLTS/PICTS	15
2.4.1. Materiales Absorbentes de Películas Delgadas	15
2.4.2. Aumento de Velocidad de Conmutación en Semiconductores	15
3. Sistema DLTS con Circuito de Razón de Ventana	17
3.1. Esquema Experimental	17
3.1.1. Esquema Experimental Típico	17
3.1.2. Esquema Experimental Propuesto	18
3.2. Circuito de Razón de Ventana	21
3.3. Mejoras del Circuito de Razón de Ventana	23
3.3.1. DSP como Generador de Señales	23
3.3.2. Mejoras Implementadas para Disminuir el Ruido del Circuito de Razón de Ventana	24
3.4. Circuito de Múltiple Razón de Ventana Digital	26
3.4.1. Operaciones Matemáticas para el Desfase	26
3.4.2. Generador de Señales Automáticas	27
3.4.3. Lectura de Transitorios (ADC)	29
3.4.4. Detección y Muestreo del Último Tiempo Base	30
3.4.5. Filtro Digital	30
3.4.6. Algoritmo de Discriminación	30
3.4.7. Muestreo y Retención	31
3.5. Comparación entre un Sistema Analógico Contra un Sistema Digital	31
4. Procesamiento de Datos Experimentales y Discusión	33
4.1. Medición de Transitorios	34
4.1.1. Medición de Transitorios RC	34

ÍNDICE GENERAL

4.1.2. Medición de Transitorios Experimentales	38
4.2. Discusión	42
5. Conclusiones	43
6. Apendices	45
6.1. C2000 DSP	45
6.1.1. Configuración para la comunicación entre la PC y el Micro-Controlador C2000	45
6.1.2. Programación y Comunicación de la Versión Utilizada en Matlab .	47
6.1.3. Micro-Controlador C2000	47

Índice de figuras

2.1. Defectos puntuales en materiales; a) Vacancia, b) Defecto de Frenkel, c) Impureza Sustitucional, d) Átomo Intersticial y e) Impureza Intersticial [3].	6
2.2. Defectos superficiales y profundos [3].	7
2.3. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor con niveles de trampas profundas [3].	9
2.4. Unión p^+n y región de agotamiento de un semiconductor [9].	10
2.5. Comportamiento de las bandas de energía durante y después del pulso de alimentación [2].	11
2.6. Implementación de una razón de ventana para cinco transitorios a distintas temperaturas [3].	13
3.1. Esquema experimental típico DLTS [1].	19
3.2. Esquema experimental propuesto DLTS.	19
3.3. Circuito generador de señales [1].	21
3.4. Circuito de razón de ventana [1].	22
3.5. Generador de señales mediante Piccolo C2000.	24
3.6. Mejoras de diseño del circuito de razón de ventana en PCB.	25
3.7. Diagrama de Bloques General del Funcionamiento del Circuito de Múltiple Razón de Ventana.	26
3.8. Bloque de Sincronización.	28

3.9. Generador de Señales Automáticas	29
3.10. Razón de Ventana Múltiple	32
4.1. Resultados simulados con rango con valores comerciales y no comerciales de capacitores.	35
4.2. Resultados simulados con valores comerciales de capacitores y R fija de $1M\Omega$.	35
4.3. Resultados obtenidos en placa de pruebas con capacitores comerciales y R fija de $1M\Omega$	36
4.4. Resultados obtenidos en PCB utilizando como generador la tarjeta c2000 y R fija de $1M\Omega$	37
4.5. Resultados obtenidos mediante el circuito digital de razón de ventana múltiple con una R fija de $1M\Omega$	38
4.6. Espectro experimental de 5 razones de ventana	39
4.7. Resultados obtenidos del circuito de razón de ventana múltiple t_2, t_3, t_4, t_5 .	40
4.8. Resultados obtenidos del circuito de razón de ventana múltiple t_6, t_7, t_8, t_9 .	41
6.1. Diagrama de Flujo	46

Índice de cuadros

3.1. Especificaciones de control de temperatura modelo 331 LakeShore	20
3.2. Especificaciones Chopper modelo 340CD de Scitec Instruments	20
3.3. Especificaciones Lock-In SR810 de Stanford Research	21

Introducción

1.1. Hipótesis

El diseño y operación de un buen sistema DLTS incluye la adquisición de datos mediante software y un circuito de razón de ventana múltiple para la detección de una mayor cantidad de espectros.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Implementar un sistema de control para la sincronización de señales transitorias mediante el uso de un DSP económico, capaz de lograr aumentar la resolución del sistema agregando múltiples razones de ventana a la lectura de un transitorio para posteriormente ser analizado por diferentes métodos y obtener la información de espectroscopía de transitorios de niveles profundos (DLTS) o espectroscopía de transitorios de foto-corriente inducida (PICTS) de un material semiconductor.

1.2.2. Particulares

- Mejorar la resolución del sistema automatizado que se encuentra en el laboratorio.

- Implementar constantes de tiempo cortas y largas para obtener un mayor número de información de transitorios.
- Establecer algoritmo de tiempo de discriminación o sincronía para indicarle al sistema el momento en que las señales pueden ser adquiridas.
- Implementar medidas para el incremento de la razón señal a ruido y obtener mediciones con el menor ruido posible.
- Establecer mejoras en la automatización del hardware del sistema inicial para agrupar las partes del sistema en uno general.

1.3. Introducción

La espectroscopía de transitorios de niveles profundos es una herramienta de caracterización utilizada principalmente para la evaluación de las trampas en los materiales semiconductores desarrollada por Lang en 1974 [1].

Los semiconductores son utilizados en la industria para formar dispositivos electrónicos. El desempeño de éstos dependerá de los defectos que pueden encontrarse en ellos. Generalmente, existen dos tipos de defectos; nombrados defectos químicos y físicos. Los defectos químicos se deben a la incorporación de impurezas dentro del material, mientras que los defectos físicos se deben a defectos de puntos cristalográficos (p.ej. vacancias, átomos intersticiales, etc.) o defectos en la estructura (p.ej. dislocaciones, apilado, etc.) [2].

En general, los defectos actúan como trampas, las cuales pueden atraer ya sea electrones o huecos dependiendo de la naturaleza de las trampas. Las trampas también se pueden clasificar dependiendo de la profundidad. Los niveles de energía de trampas superficiales generalmente se encuentran localizados lejos del nivel de Fermi en la banda prohibida, mientras que para las trampas profundas se les puede observar cerca del nivel de Fermi. Desde el punto de vista de la tecnología de semiconductores, los niveles profundos pueden

crear efectos deseables e indeseables en dispositivos electrónicos. Por ejemplo, niveles profundos creados por la incorporación de oro dentro de silicio, promueven la recombinación de las cargas minoritarias en uniones del tipo p-n, de esta manera reduce el tiempo de conmutación. Defectos indeseables producen procesos de recombinación no radiativa, los cuales pueden afectar la eficiencia en diodos emisores de luz [3].

Las impurezas en los niveles profundos determinan la posición, concentración y sección de cruce de una trampa. La sección de cruce es utilizada para determinar mediciones de tiempo de vida, con esto se tiene de manera indirecta información acerca de la concentración y los niveles de energía que existen en las trampas [1]. La técnica llamada espectroscopía de transitorios de niveles profundos (DLTS por sus siglas en inglés), es un método de caracterización de trampas profundas capaz de proporcionar información relativamente precisa y rápida acerca de la sección de cruce, concentración y niveles de energía de trampas. Sin embargo, existen otras técnicas para el estudio de transitorios de niveles profundos, las cuales están directamente relacionadas con la interpretación de transitorios de igual manera que la teoría DLTS aplicada en materiales.

La espectroscopía de transitorios de niveles profundos no es un método práctico para ser utilizado en semiconductores altamente resistivos [4]. En este caso, la espectroscopía de transitorios de corriente foto-inducida (PITS o PICTS) es la técnica aparentemente más adecuada para detectar y caracterizar trampas. Esta última es una técnica utilizada para caracterizar semiconductores utilizando un medio de excitación que cree centros de recombinación también conocidos como trampas o impurezas, esto para un cierto valor de temperatura.

La mayoría de los sistemas de espectroscopía de transitorios de niveles profundos empleados en laboratorios utilizan amplificadores lock-in para procesar las señales transitorias. Estos sistemas sufren una desventaja considerable de pérdida de señal debido a la complejidad asociada con las señales de los circuitos. Teniendo en cuenta estas desventajas, se ha diseñado un sistema digital de razón de ventana múltiple simple y económico utili-

zando un procesamiento digital de señales (DSP), el cual permite generar pulsos, tomar lectura de señales para posteriormente realizar un filtrado, con el propósito de obtener información presente en transitorios para el análisis de trampas profundas.

Principio, Aplicaciones y Análisis DLTS/PICTS

Los materiales semiconductores utilizados en la fabricación de dispositivos electrónicos contienen impurezas y defectos físicos debido a irregularidades en su estructura. Algunas impurezas, por ejemplo, son introducidas intencionalmente dentro de los semiconductores en forma de donadores o aceptores para producir electrones o huecos libres o crear centro de recombinación en niveles profundos los cuales reducen el tiempo de vida de cargas minoritarias. La incorporación de impurezas da como resultado la formación de estados atrapados en la banda prohibida. Estos estados se encuentran dentro de la banda de conducción o de la banda de valencia a los cuales se les conoce como impurezas de niveles superficiales, mientras que los niveles que se encuentran cerca del nivel de Fermi son conocidos como impurezas profundas [1, 5]. La caracterización de impurezas superficiales es realizada normalmente mediante métodos ópticos y eléctricos, los cuales proporcionan información acerca de la concentración y los niveles de energía de las impurezas. Estas caracterizaciones de impurezas profundas utilizan métodos basados generalmente en mediciones de capacitancia-voltaje, corriente-tiempo o carga-tiempo [6, 7].

2.1. Defectos en Semiconductores

Existen dos tipos de defectos, nombrados defectos químicos y defectos físicos. Los defectos químicos se deben a la incorporación de impurezas dentro del material, mientras que los defectos físicos se deben a defectos de puntos cristalográficos (p.ej. vacancias, átomos intersticiales, etc.) como se muestran en la Figura 2.1, o defectos en su estructura (p.ej. dislocaciones, apilado, etc.) [3].

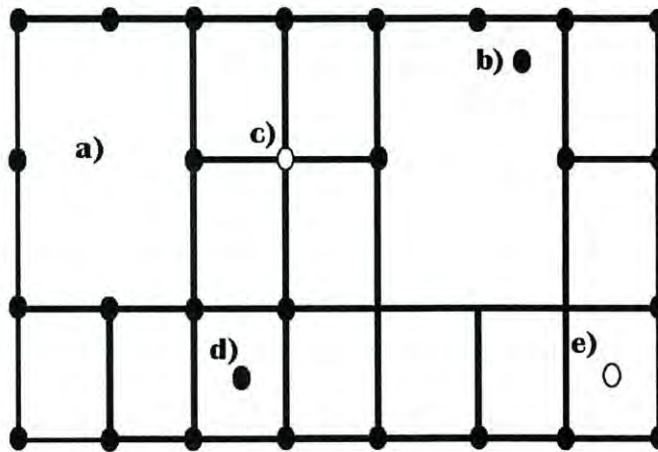


Figura 2.1: Defectos puntuales en materiales; a) Vacancia, b) Defecto de Frenkel, c) Impureza Sustitucional, d) Átomo Intersticial y e) Impureza Intersticial [3].

Los semiconductores intrínsecos se llenan intencionalmente con impurezas para modular sus propiedades eléctricas, en un proceso llamado dopaje. Las impurezas agregadas para variar la conductividad y los contaminantes pueden romper la periodicidad de la red cristalina y pueden introducir niveles de energía en la banda prohibida de los semiconductores [2, 3].

En general, los defectos actúan como trampas las cuales pueden atraer ya sea electrones o huecos dependiendo de la naturaleza de las trampas. Las trampas también se pueden clasificar dependiendo de la profundidad. En semiconductores aquellos que introducen niveles que tienen una diferencia de energía bastante pequeña desde la parte inferior de la banda de conducción o la parte superior de la banda de valencia se llaman trampas superficiales

las cuales determinan el tipo y la conductividad del semiconductor, otros que introducen niveles profundos dentro de la banda prohibida son llamadas trampas profundas como se observan en la Figura 2.2.

Los niveles profundos tienen efectos importantes en los materiales y dispositivos semiconductores. Primero, los niveles profundos que están cerca de la mitad del espacio pueden formar centros de recombinación efectivos que aumentan la velocidad a la que los electrones y los huecos se recombinan, y por lo tanto acortan la vida de los portadores. Mientras tanto, debido a que la diferencia de energía entre los niveles profundos y las bandas permitidas es menor que la banda prohibida, es más fácil excitar a los portadores desde niveles profundos a bandas de conducción o valencia y generar pares de electrón-hueco [3, 4].

Para mejorar la calidad de los materiales y dispositivos semiconductores, es necesario comprender la naturaleza y los efectos de los defectos de nivel profundo, con el fin de hacer uso de sus ventajas y reducir su nocividad.

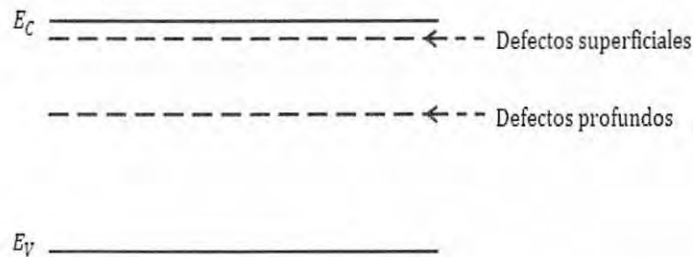


Figura 2.2: Defectos superficiales y profundos [3].

2.2. Principio Básico de la Espectroscopía de Transitorios de Niveles Profundos

Existen diferentes métodos para caracterizar niveles profundos en materiales semiconductores. Estos métodos experimentales se pueden dividir en tres importantes grupos: De

Inyección, de Estado Estacionario y de Transitorios, siendo este último uno de los más utilizados y en el cual se centra la presente investigación [6, 8].

Cuando se investigan los métodos transitorios en la caracterización de niveles profundos, la información de interés es la diferencia de capacitancia que existe en dos determinados tiempos que dependen de la temperatura, a la cual se le conoce como razón de ventana. En las mediciones de espectroscopía de transitorios de niveles profundos, es posible analizar independientemente los parámetros de interés. Esto da la libertad de asignar tiempos de llenado y vaciado de trampas de manera independiente. [3, 9, 10]

2.2.1. Transiciones de Banda Prohibida

La Figura 2.3 representa las transiciones en la banda prohibida de trampas profundas en semiconductores. Considerando que el centro captura primero un electrón de la banda de conducción, caracterizado por el coeficiente de captura c_n . Después de la captura del electrón, dos procesos pueden ocurrir. El centro puede ya sea emitir al electrón de regreso a la banda de valencia, llamada emisión de electrón representada por e_n o puede capturar un hueco de la banda de valencia, representada por c_p . Después de que ocurra cualquiera de esos eventos, el centro está ocupado por un hueco y de nuevo hay dos opciones posibles. Ya sea que emita un hueco de regreso a la banda de valencia e_p o capture un electrón c_n .

Considerando la Figura 2.3, un evento de recombinación es (a) seguido por (c) y un evento de generación es (b) seguido por (d). La impureza es un centro G-R y las bandas de conducción y valencia participan en el proceso. Un tercer evento puede tener lugar, llamado trampa (a) seguido por (b) o (c) seguido por (d), en cualquier caso, el portador es capturado y consecuentemente emitido de regreso a la banda de la que vino. Sólo una de las bandas participa junto con el centro y la impureza es representada como la trampa. Las impurezas son comúnmente llamadas trampas sin importar que actúen como centros de regeneración, recombinación o trampas [2, 4, 9, 11]. Que la impureza actúe como trampas o como centro de regeneración-recombinación depende del lugar donde se

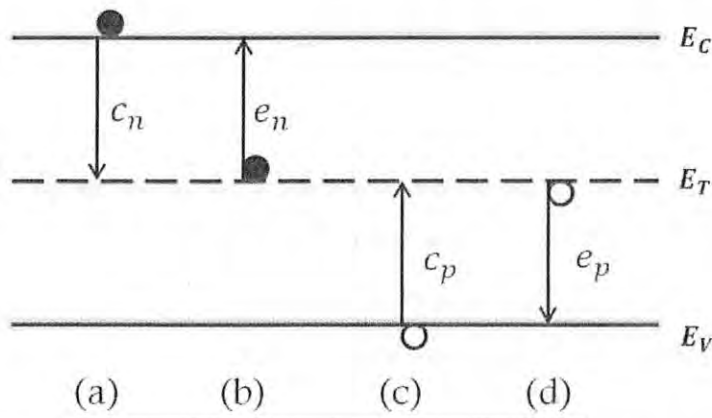


Figura 2.3: Diagrama de bandas de energía de un semiconductor con niveles de trampas profundas [3].

localice el nivel de Fermi en la banda prohibida, la temperatura y la sección de cruce de la impureza. Generalmente aquellas cuyas energías se encuentran cerca del medio de la banda prohibida se comportan como centros de generación-recombinación, mientras que aquellos cerca de los bordes de la banda actúan como trampas. La razón de emisión de electrón para centros en la mitad superior de la banda prohibida es generalmente mucho más alta que las razones de emisión del electrón para centros de la mitad inferior de la banda prohibida. Para la mayoría de los casos sólo una razón de emisión domina, mientras que la otra puede ser despreciada [2].

2.2.2. Uniones en Semiconductores

Inicialmente tenemos la estructura en polarización inversa con las trampas ionizadas sobre el nivel de Fermi. Cuando cambiamos a cero o polarización positiva se altera el nivel de Fermi por lo tanto se modifica la ocupación en las trampas, es decir, se llena de estados de tal manera que cuando regresamos al estado inicial las trampas se vacían para finalmente retornar al estado inicial de polarización inversa.

Suponiendo que la captura y emisión de electrones son dominantes, la concentración de

trampas de electrones puede ser expresada como:

$$N_T = n_t + N_0 \quad (2.1)$$

donde n_t es la concentración de estados ocupados, N_0 es la concentración de estados no ocupados. Similarmente, si la captura y emisión de huecos es dominante, la concentración de trampas de huecos se puede expresar como:

$$P_T = p_t + P_0 \quad (2.2)$$

donde p_t y P_0 son respectivamente estados ocupados y estados no ocupados.

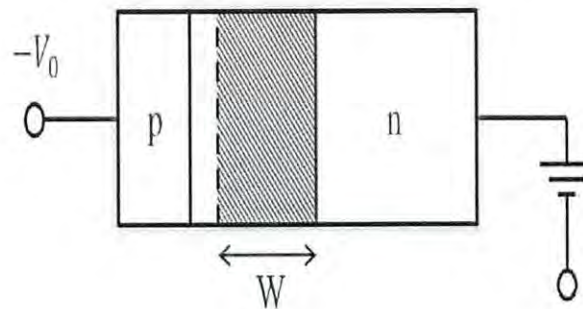


Figura 2.4: Unión p^+n y región de agotamiento de un semiconductor [9].

La Figura 2.4 muestra el comportamiento de la región de agotamiento (W) cuando es aplicado un voltaje. Esta región con donadores ionizados y aceptores es llamada de igual manera “región de carga espacial”. Los iones forman un campo eléctrico incorporado que hace que los portadores se desvíen en la dirección opuesta a la dirección de difusión hasta que se alcanza un estado estable.

Cuando se alcanza un estado estable en la región de carga espacial, la energía de Fermi es la misma en ambos lados de la unión. Esto conduce a la flexión de las bandas de conducción y valencia y crea una diferencia de potencial eléctrico. Esta diferencia de potencial

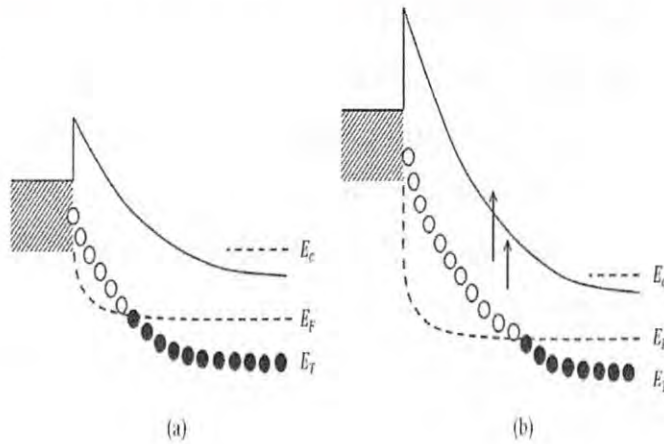


Figura 2.5: Comportamiento de las bandas de energía durante y después del pulso de alimentación [2].

mantiene un balance de cargas mayoritarias en un lado con cargas minoritarias del otro. En la Figura 2.5(a), se observa el diagrama de bandas de energía de un semiconductor tipo n con un nivel profundo E_T . Las trampas debajo del nivel de Fermi están ocupadas por electrones. A medida que este voltaje cambia a V_0 , la tendencia del ancho de la región espacial aumenta, produciendo una flexión de banda más fuerte como se muestra en la Figura 2.5(b), por lo tanto, algunas trampas que anteriormente se encontraban debajo del nivel de Fermi han incrementado la probabilidad de dejar de estar ocupadas. Esto quiere decir que el proceso de emisión, el cual se muestra con las flechas apuntando hacia arriba ha tomado lugar en el experimento. Cuando se liberan, los electrones son barridos fuera de la región agotamiento, debido a la presencia de un campo eléctrico, produciendo un transitorio de corriente [2, 3, 9, 11, 12, 13].

2.3. DLTS/PICTS

En los métodos de transitorios se obtiene información de las propiedades físicas del semiconductor, observando la respuesta de transitorio o la relajación que sigue a una perturbación abrupta del sistema.

Las técnicas desarrolladas hasta la fecha miden principalmente transitorios de capacitancia en uniones metal-semiconductor o semiconductor-semiconductor. La capacitancia de la región de carga espacial de una unión cambia si las trampas profundas en la región cambian sus estados de carga por la emisión o captura de portadores. Por medio de las técnicas de transitorios se pueden observar cambios pequeños de capacitancia (10^{-3} a 10^{-4} pF) y por lo tanto se puede obtener información del comportamiento de densidades pequeñas de trampas en presencia de concentraciones mucho mayores de impurezas poco profundas [1].

Los principales métodos espectroscópicos de transitorios son: 1) espectroscopía de transitorios de niveles profundos (DLTS por sus siglas en inglés), 2) espectroscopía de transitorios de corriente foto-inducida (PICTS por sus siglas en inglés)[1, 4, 14].

2.3.1. DLTS

La técnica de caracterización de espectroscopía de transitorios de niveles profundos es un método para examinar transitorios térmicos de capacitancia a altas frecuencias y permite observar una amplia variedad de trampas en semiconductores. Es un método muy sensible, rápido y fácil de analizar. Debido a que la información se muestra en forma de espectro con picos positivos o negativo sobre una línea de base en función de la temperatura, de esta manera permite determinar si la trampa contiene portadores mayoritarios o minoritarios. El método nos permite obtener parámetros como energía de activación, sección de cruce, concentraciones y el perfil de concentración para cada trampa. [1, 2]

En términos generales, el sistema de medición tradicional consiste en un medidor de capacitancia, un generador de pulsos para hacer cambios en la polarización del material a caracterizar, un criostato de temperatura controlable, un circuito de razón de ventana o integrador de señal y un sistema de procesamiento de datos. La presencia de cada trampa, está indicada por un pico positivo o negativo sobre una línea base en función de la temperatura. El signo de cada pico indica si es debido a una trampa de portadores mayoritarios

o a una de portadores minoritarios. Eligiendo adecuadamente los tiempos de razón de ventana se puede obtener los parámetros ya indicados para cada trampa. [1, 7]

El método DLTS fue introducido por D.V. Lang en 1974 [1, 15] el cual realizó la medición de un estado transitorio y tomando la diferencia entre dos valores a determinado tiempo fijo. Al hacer esto para diferentes temperaturas obtuvo defectos.

Durante la polarización inversa del material a caracterizar, todos los portadores de carga se emiten y las trampas se neutralizan, lo que aumenta la capacitancia hasta que se vuelven a estabilizar. En polarización directa la captura de portadores de carga domina conduciendo a una capacitancia negativa hasta que todos los portadores de carga sean capturados y la capacitancia será cero [9, 16].

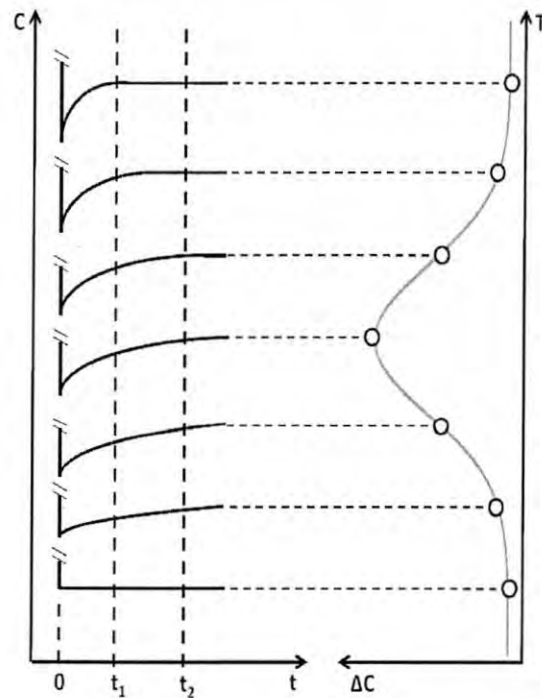


Figura 2.6: Implementación de una razón de ventana para cinco transitorios a distintas temperaturas [3].

En la Figura 2.6 existen cinco diferentes transitorios de capacitancia. La razón de ven-

tana se define como un intervalo de la diferencia de dos tiempos fijos t_1 y t_2 , donde la señal DLTS es dada por $t_2 - t_1$. Mediante el cálculo de diferentes ventanas de velocidad es posible ver picos a diferentes temperaturas, que pueden utilizarse para determinar un defecto de nivel profundo. Este es el concepto más básico de análisis DLTS, que el Dr. Lang presentó.

2.3.2. PICTS

El método DLTS puede ser utilizado para encontrar los parámetros de energía de activación, sección de cruce y densidad de defectos, más sin embargo, no puede ser aplicado en materiales semiconductores altamente resistivos debido a que la longitud de Debye es mayor que la anchura de la zona de agotamiento. Por ello, se han desarrollado técnicas ópticas tales como la espectroscopía de transitorios de corriente foto-inducida.

La espectroscopía de transitorios de corriente foto-inducida es una técnica utilizada para caracterizar materiales semiconductores, utilizando un medio de excitación que cree centros de recombinación, también conocidos como trampas o impurezas, esto para un valor de temperatura, este medio de excitación es un pulso óptico. Cuando la luz es interrumpida, los portadores foto-generados crean un transitorio de corriente que fluye a lo largo de la muestra cuando un voltaje es aplicado. La muestra es sometida a un barrido de temperatura durante el experimento. La corriente transitoria es amplificada y posteriormente almacenada[4, 17, 18, 19, 20].

2.3.3. PICTS VS DLTS

Una trampa puede ser descrita por tres parámetros; la densidad de trampas, la energía de activación y la sección de cruce. La densidad de trampas no puede ser medida utilizando PICTS. En contraste, es posible obtener todos los parámetros usando DLTS. También la naturaleza de las trampas, es decir, las trampas de electrones o huecos no pueden

ser identificadas usando PICTS debido a que ambos tipos de trampas producen señales positivas.

La espectroscopía por DLTS puede ser considerada como la herramienta más apropiada para caracterizar defectos. Sin embargo, hay una desventaja importante para DLTS, y es que este no puede ser usado para materiales altamente resistivos ya que la longitud de Debye es mayor que el ancho de la región de agotamiento [17].

2.4. Aplicaciones de DLTS/PICTS

2.4.1. Materiales Absorbentes de Películas Delgadas

Convencionalmente los materiales foto-voltaicos usan semiconductores inorgánicos. Los semiconductores de interés permiten la formación de uniones separadoras de portadores de carga. La unión puede ser homogénea o heterogénea con otros materiales para coleccionar los portadores en exceso cuando se exponen a la luz. En principio, un gran número de materiales semiconductores son elegibles, pero sólo unos pocos son de suficiente interés. Idealmente, el material absorbente de una eficiente celda solar debe ser un semiconductor con una banda prohibida de $1 - 1.5eV$ y con una absorción óptica solar alta ($10^4 - 10^5 cm^{-1}$) en la región de longitud de onda de $350nm - 1000nm$ [5, 21].

2.4.2. Aumento de Velocidad de Conmutación en Semiconductores

La fabricación de diodos de recuperación rápida es realizada usando condiciones de procesamiento exigente para minimizar la introducción de centros de recombinación. Los dispositivos así fabricados tienen velocidad de apagado lento, debido al tiempo largo requerido para la remoción de portadores minoritarios, mediante el proceso de recombinación. Para satisfacer los requerimientos de desempeño de varios sistemas electrónicos de po-

tencia, la velocidad de apagado de los dispositivos es aumentada por la introducción de centros de recombinación en la red de manera controlada. Una mayor cantidad de centros de recombinación debe introducirse al dispositivo para aplicaciones de operación a altas frecuencias para reducir pérdidas de conmutación [4, 11, 18].

Sistema DLTS con Circuito de Razón de Ventana

Un sistema de espectroscopía de transitorios profundos normalmente esta compuesto de múltiples equipos de medición, control e interpretación de los datos obtenidos. El poder eliminar la cantidad de equipos a utilizar para estos experimentos es un objetivo muy importante debido a que la señal de entrada y de salida puede ser afectada y la calidad de señal a ruido no puede ser la óptima; es por ello que dentro de esta tesis el objetivo principal es mejorar el sistema de razón de ventana.

3.1. Esquema Experimental

3.1.1. Esquema Experimental Típico

Generalmente un esquema experimental típico, para realizar espectroscopía de transitorios profundos, utiliza equipos de medición (principalmente el medidor de capacitancia, medidor de presión y sensores de temperatura), equipos de control (control de temperatura, control de presión, control y generador de pulsos) y equipos de interpretación (computadora). Existen otras configuraciones en las cuales se agregan circuitos electró-

nicos para capturar datos de una manera controlada. Estas se conocen como circuito de razón de ventana y son utilizadas para obtener un punto del transitorio de capacitancia, ya sea máximo o mínimo del espectro, que permite llevar a cabo el experimento típico DLTS [8, 15].

En la Figura 3.1 se muestra el esquema típico utilizado en un experimento DLTS, en él se puede apreciar como eje principal un criostato que contiene una muestra en forma de película para caracterizar y detectar trampas, además de otros instrumentos que a continuación se mencionan.

- Control de Temperatura
- Medidor de Capacitancia
- Generador de Pulsos
- Computadora
- Circuito de Razón de Ventana

3.1.2. Esquema Experimental Propuesto

La espectroscopía realizada mediante PICTS utiliza equipos de control, generación y medición para la caracterización de transitorios de corriente. En la Figura 3.2 se muestra el esquema experimental propuesto para realizar PICTS, utilizando instrumentos de medición, control y sistemas digitales, que reducen el número de instrumentos utilizados durante la experimentación [12, 19].

- Criostato: Se utiliza un criostato VPF-100 de Janis Research. La temperatura de la muestra se varía controlando la corriente a través de un elemento de calentamiento incrustado dentro del criostato y el flujo de nitrógeno líquido.

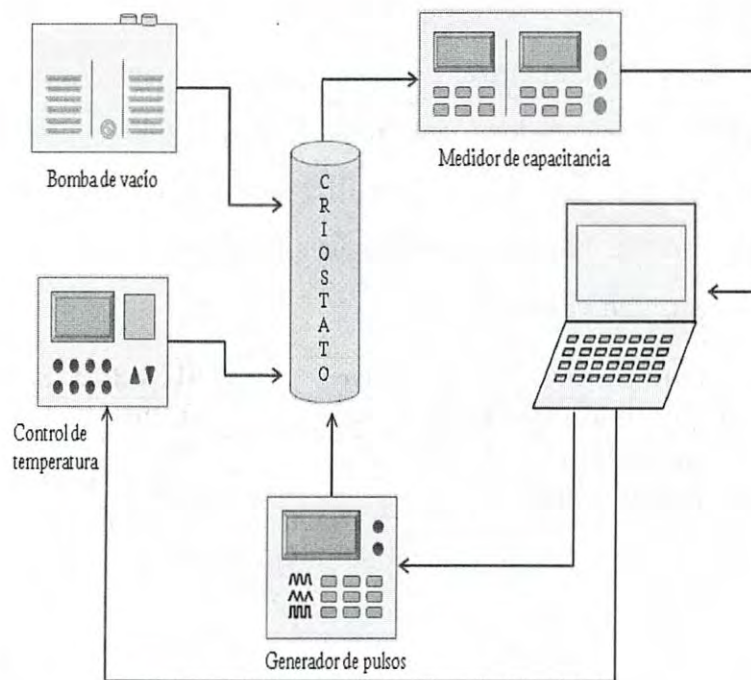


Figura 3.1: Esquema experimental típico DLTS [1].

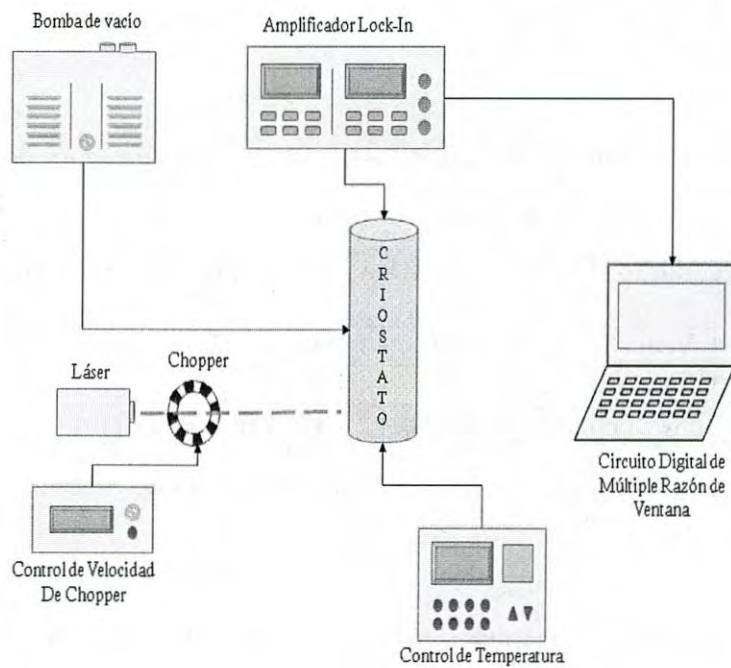


Figura 3.2: Esquema experimental propuesto DLTS

- **Control de Temperatura:** El controlador de temperatura tiene una entrada procedente de un sensor de temperatura y tiene una salida conectada a un elemento de control tal como un calentador o enfriador. El controlador de temperatura modelo 331 de LakeShore, utiliza un controlador PID para controlar con precisión la temperatura del proceso, sin la participación continua del operador. Las especificaciones del modelo se listan en el Cuadro 3.1.

Rango de Temperatura	:	70K-325K
Precisión de Temperatura	:	±0.25K
Impedancia de Entrada	:	100MΩ
Resolución A/D	:	24 Bits

Cuadro 3.1: Especificaciones de control de temperatura modelo 331 LakeShore

- **Láser:** El láser utilizado es un láser ion-argón ajustable LAP-35-431 con una longitud de onda variable de 454 a 676 nm, tiene una potencia de 195 mW y opera a un amplio rango de temperatura.
- **Chopper:** El modelo 340CD de Scitec Instruments es un chopper óptico de discos de 20 mm de diámetro con una frecuencia estándar de 5 Hz a 220 Hz la cual depende del disco seleccionado. Las características del chopper se listan en el Cuadro 3.2.

Voltaje de Salida	:	15V DC
Estabilidad	:	0.01 %/°C
Control Frecuencia	:	Interna-Externa

Cuadro 3.2: Especificaciones Chopper modelo 340CD de Scitec Instruments

- **Amplificador Lock-In:** El amplificador Lock-In SR810 de Stanford Research se utiliza para detectar y medir muy pequeñas señales de CA. Utilizan una técnica conocida como detección sensible a la fase. Las señales de ruido a frecuencias diferentes de la

frecuencia de referencia son rechazadas y no afectan a la medición. Las especificaciones del aplicador lock-in se listan en el Cuadro 3.3.

Voltaje de Entrada	:	Sencilla (A) o Diferencial (A-B)
Rango de Frecuencia	:	1mHz a 102kHz
Constante de Tiempo	:	10 μs a 30 s
Impedancia de Salida	:	50 Ω

Cuadro 3.3: Especificaciones Lock-In SR810 de Stanford Research

3.2. Circuito de Razón de Ventana

El circuito razón de ventana proporciona la base de tiempo básica para cualquier sistema de Espectroscopía de Transitorios de Niveles Profundos. Un circuito de razón de ventana simple y económico se puede realizar utilizando contadores binarios y multiplexores; el objetivo principal es establecer tiempos de razón y controlar la secuencia de eventos que tiene lugar en un experimento típico de DLTS [15]. Sin embargo, no es la única manera con la que se puede diseñar los tiempos de razón de ventana.

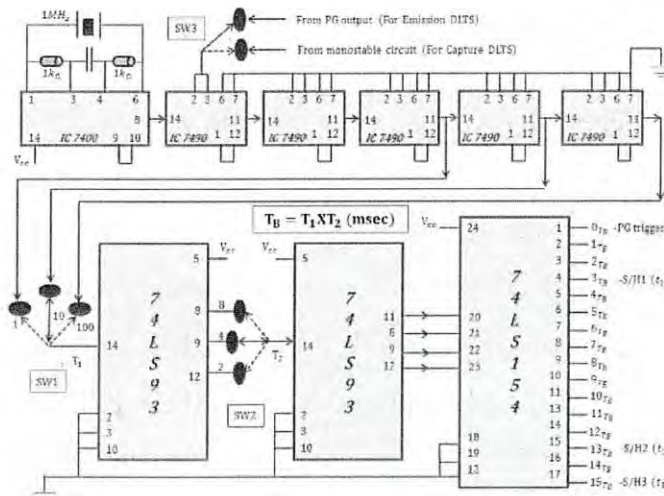


Figura 3.3: Circuito generador de señales [1].

En la Figura 3.3 se observa un circuito de razón de ventana. El tiempo base es derivado de un oscilador estable a 1 MHz cuya salida alimenta a un divisor de décadas y a un contador binario, el cual produce trenes de pulsos con diferentes periodos, en rangos de 1 ms hasta algunos segundos. Se utilizan cinco contadores de décadas 74LS90 y dos contadores binarios 74LS93, además de un multiplexor 74LS154 de cuatro entradas y dieciocho salidas, que se utilizan como una multiplicación del tiempo base, utilizado de 0 veces el tiempo base hasta 15 veces el mismo tiempo. Estas salidas son entrada de un circuito analizador de señales el cual utilizará para obtener la señal DLTS.

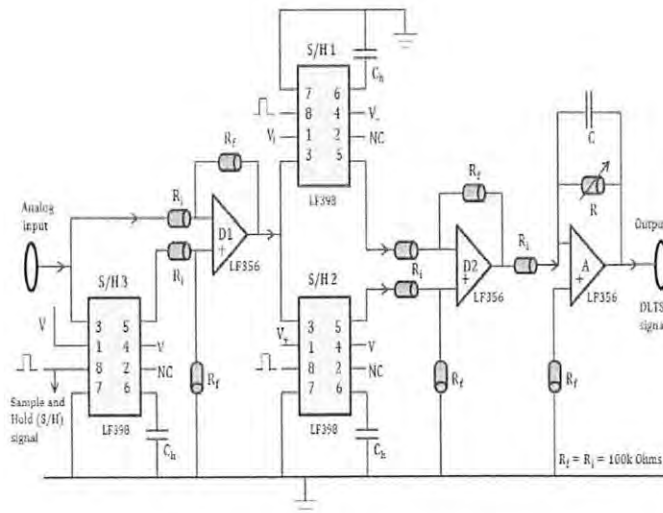


Figura 3.4: Circuito de razón de ventana [1].

En la Figura 3.4 se muestra el diagrama del circuito analizador de señales, el cual utiliza tres impulsos de muestreo, generados por el circuito de razón de ventana para alimentar los amplificadores/retenedores S/H1, S/H2 y S/H3, los cuales tiene como objetivo seleccionar el rango de la razón de ventana (para S/H1 y S/H2) y discriminar señales (S/H3) que tiene un nivel de DC. La señal DLTS se obtiene de la diferencia que existe en el amplificador LF356 (D2) el cual obtiene el transitorio en 13TB-3TB generado por la razón de ventana; esta señal se amplifica y se filtra mediante un filtro variable y se

almacena para su procesamiento. La señal de entrada es discriminada gracias a la diferencia de la señal original de entrada y una señal muestreada por el último tiempo base seleccionado, (15 TB) con ello se elimina el nivel de DC de la señal para posteriormente ser utilizada en la razón de ventana de los amplificadores retenedores LF398 S/H1 y S/H2 [1].

3.3. Mejoras del Circuito de Razón de Ventana

El reducir el número de componentes utilizados en el circuito de razón de ventana, es una de las herramientas más importantes para eliminar cualquier tipo de ruido externo al experimento y con ello mejorar los resultados experimentales.

La Figura 3.3 muestra un circuito para generar señales cuadradas a diferentes fases como se explicó anteriormente. El objetivo es tener tres trenes de pulsos a diferentes tiempos, esto puede realizarse de la misma manera utilizando algún micro-controlador y programación básica.

3.3.1. DSP como Generador de Señales

En la Figura 3.3 se observa un circuito generador de señales, el cual fué descrito en la sección anterior. Para mejorar la señal obtenida DLTS es necesario simplificar la cantidad de componentes utilizados sustituyendo el circuito por algún dispositivo capaz de realizar la misma función.

Un micro-controlador es un dispositivo adecuado para llevar acabo el trabajo de generar señales; un arduino simple como el UNO puede generar los tres pulsos necesarios para alimentar los amplificadores de muestreo y retención del circuito de la Figura 3.4. Sin embargo, un dispositivo como el de Texas Instruments Piccolo C2000, además de ser un micro-controlador funciona como procesador digital de señales y entre otras características (véase Anexo 1) lo vuelven superior a arduino para realizar el trabajo de generar los

pulsos que alimentarán a los muestreador/retenedor (S/H por sus siglas en inglés) del circuito de la Figura 3.4. El principal problema encontrado para este micro-controlador (DSP) es el lenguaje de programación y la instalación del dispositivo en un computador. Para facilitar la operación del mismo, se ha estudiado distintas maneras de utilizar el dispositivo, siendo la mas amigable la utilizada por medio de MATLAB con Simulink, el cual puede ser observado dentro del Anexo 1.

En la Figura 3.5 se aprecia el funcionamiento del dispositivo utilizando el lenguaje de

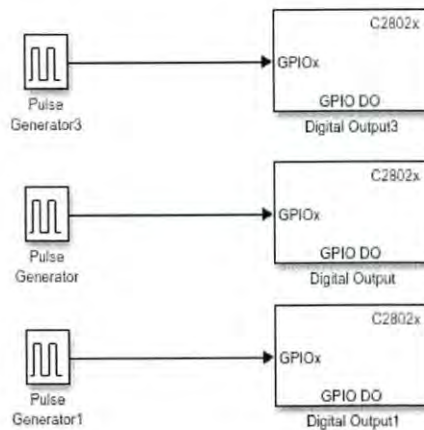


Figura 3.5: Generador de señales mediante Piccolo C2000

programación por medio de Simulink, se puede apreciar tres bloques que pertenecen a salidas digitales conectados en serie con un generador de pulsos cuadrados. Los bloques encargados de hacer la generación de señales cuadradas son modificables para distintos tiempos como sucede con el circuito de generación de señal que se mencionó anteriormente.

3.3.2. Mejoras Implementadas para Disminuir el Ruido del Circuito de Razón de Ventana

Para disminuir el ruido de la señal en el experimento se ha optado por tomar algunas medidas al momento de diseñar el circuito en PCB, esto debido a algunos ruidos presentados al momento de realizar mediciones en circuito en placa de pruebas. Las me-

mejoras implementadas para disminuir el ruido en el circuito de razón de ventana, es el uso de capacitores de desacoplo de impedancias, esto debido a que existe fuentes externas que alimentan a los amplificadores operaciones que pueden ser capaces de afectar en las mediciones. Además, se diseñó un circuito (utilizando el software Proteus 8.6) de con dimensiones de 6 cm de largo por 3 cm de alto, esto con la idea de evitar que las señales se pierdan; por último, se dio prioridad a mantener señales digitales lo más lejos de señales analógicas para evitar interferir en la toma de muestras al eliminar el nivel de DC. En la Figura 3.6 se muestra el resultado final del diseño, donde se marca en la parte inferior izquierda la entrada analogica y en la parte derecha de la PCB la entrada digital que permite eliminar el nivel de DC al momento de realizar la diferencia de señales.

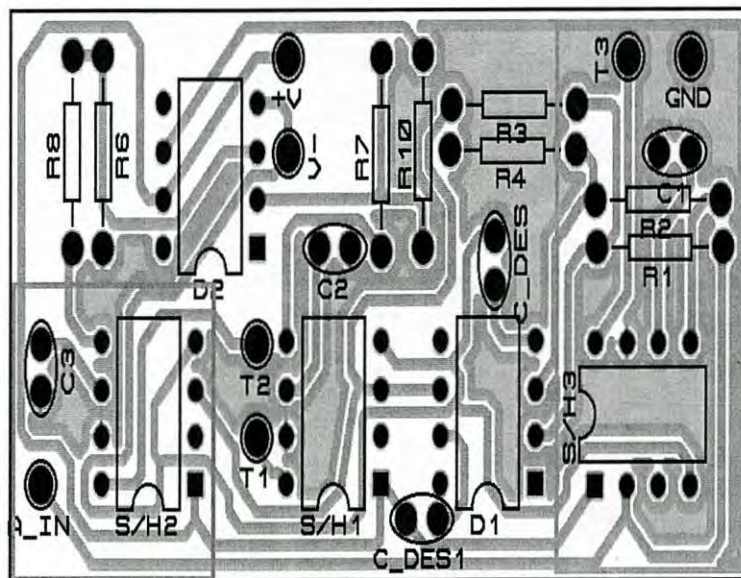


Figura 3.6: Mejoras de diseño del circuito de razón de ventana en PCB

Lista de elementos utilizados:

- Resistencias de 100k (R1, R2,..., R10)
- Muestreador-Retenedor LF398 (S/H1, S/H2 y S/H3)

- Amplificador operacional LF356 (D1 y D2)
- Capacitor de desacoplo de tantalio $1\mu\text{F}$ (CDES, CDES1)
- Capacitor retenedor (C1, C2 y C3)
- Fuente de alimentación positiva, negativa y punto de referencia (V+, V- y GND respectivamente)

3.4. Circuito de Múltiple Razón de Ventana Digital

El funcionamiento del circuito de múltiple razón de ventana, es explicado en la Figura 3.7. Los bloques del diagrama se explican detalladamente en las siguientes apartados.

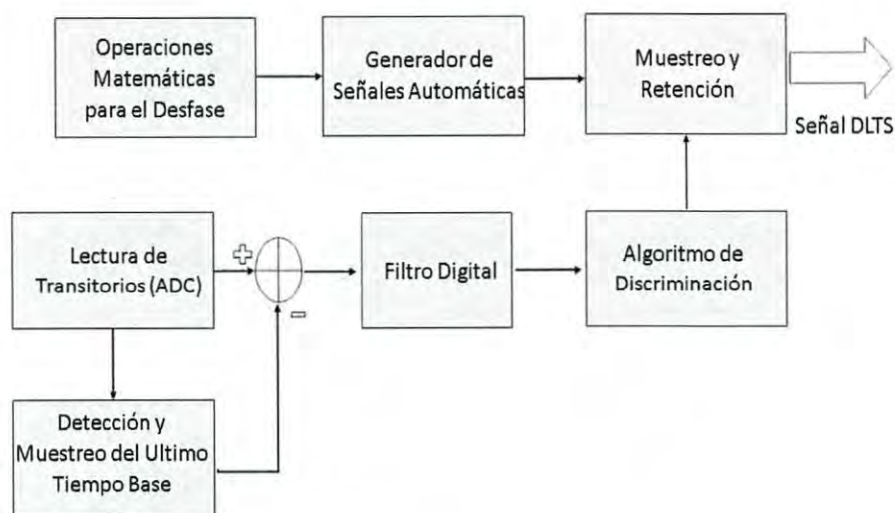


Figura 3.7: Diagrama de Bloques General del Funcionamiento del Circuito de Múltiple Razón de Ventana

3.4.1. Operaciones Matemáticas para el Desfase

Automatizar el cálculo de los tiempos que determinarán la razón de ventana tiene la ventaja de modificar en tiempo real, (es decir que al modificar un valor dentro del software

de MATLAB/Simulink, este también se modificará dentro del sistema) el experimento y con ello la obtención de un mayor número de espectros que permiten mejorar la resolución al momento de realizar el análisis. Para el cálculo de las razones de ventanas se utiliza una re-alimentación entre el periodo de la señal de entrada y la cantidad de pulsos que estarán activos; como se desfazarán cada uno de ellos en el tiempo base correspondiente dentro del transitorio.

La Figura 3.8 muestra las operaciones matemáticas realizadas que permite el desfase de once señales, tomando puntos del transitorio desde tres veces el tiempo base hasta quince veces su tiempo base (TB). Para conocer el desfase que tendrá cada una de las señales dentro del transitorio se utiliza la ecuación 3.1. Por ejemplo, un transitorio que tiene un periodo de $T = 1$ s definirá los siguientes tiempos de razón de ventana que se verán desfasados cada: 187.5 ms, 250 ms, 312.5 ms, 437.5 ms, 500 ms, 562.5 ms, 687.5 ms, 750 ms, 812.5 ms, 875 ms, 937.5 ms (3TB, 4TB, 5TB, 7TB, 8TB, 9TB, 11TB, 12TB, 13TB, 14TB y 15TB).

$$\phi = A * \frac{T}{DivTB} \quad (3.1)$$

Donde,

A=Número real que determina el recorrido del TB.

DivTB=El número de tiempo TB disponibles.

T=El Periodo de la señal.

ϕ =El desfase de cada una se las señales.

3.4.2. Generador de Señales Automáticas

Las señales generadas proporcionan la amplitud, el periodo, el ancho del pulso y el desfase modificables en tiempo real. El bloque de la Figura 3.9 muestra cuatro entradas que pueden variar dependiendo del experimento, siendo la más importante la entrada de desfase. El desfase de la señal permite mover un pulso pequeño cierto intervalo de tiempo dependiente del tiempo base determinado, como se mencionó en el apartado 3.3.1. Esto

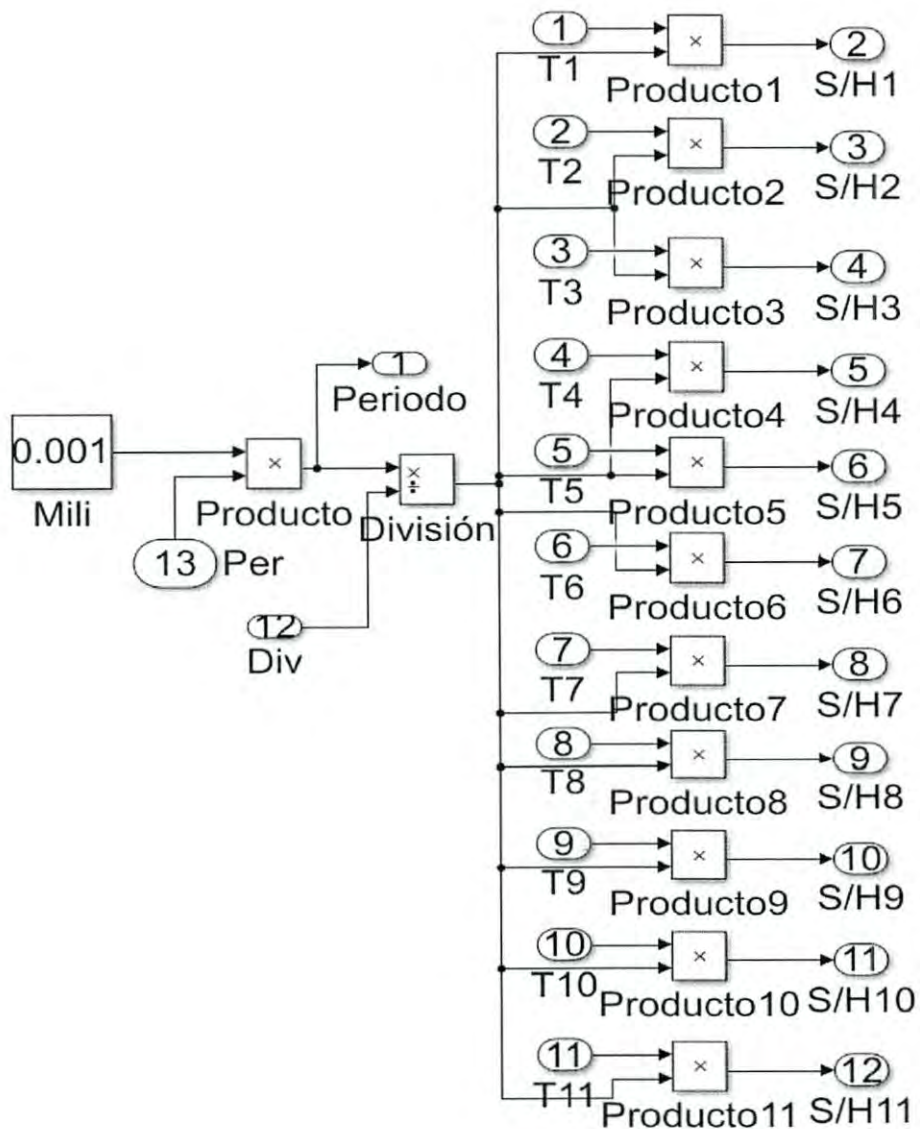


Figura 3.8: Bloque de Sincronización

permite al Sistema Digital de Razón de Ventana Múltiple conocer los tiempos en que los muestreadores-retenedores realizarán su trabajo e identificarán la señal DLTS.

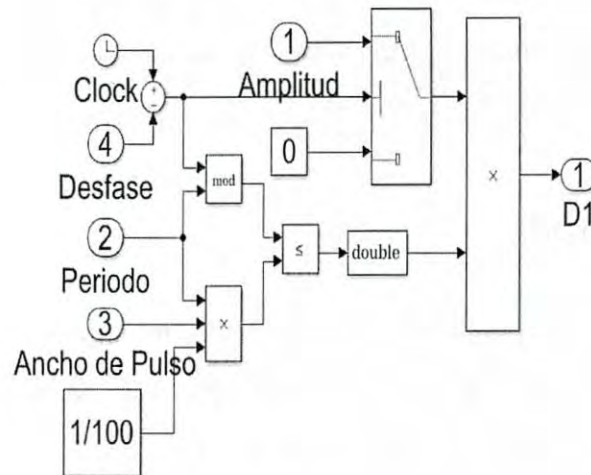


Figura 3.9: Generador de Señales Automáticas

3.4.3. Lectura de Transitorios (ADC)

Los transitorios, como se observa en la Figura 3.2, son tomados a la salida del amplificador lock-in. El dsp, se encarga de tomar lectura del transitorios, utilizando un convertidor analógico-digital (A-D) de 12 bits. Para convertir la lectura a voltaje, se utiliza la siguiente formula:

$$V_{out} = \frac{Bits * V_{ref}}{2^{n-1}} \quad (3.2)$$

donde,

$Bits$, es la lectura,

$V_{ref} = 3.3V$,

y $n = 12$.

3.4.4. Detección y Muestreo del Último Tiempo Base

En este bloque, se utiliza el valor máximo de la lectura del transitorio obtenido del convertidor A-D. Posteriormente, el valor máximo es restado con la lectura del transitorio anterior con el objetivo de eliminar el nivel del DC de la señal original.

3.4.5. Filtro Digital

Para obtener una señal transitoria libre de ruido, es importante utilizar un filtrado digital. El filtro indicado para este trabajo, es un filtro FIR pasa bajas con frecuencia de corte de 500 Hz, octavo orden y de mínimos cuadrados.

La ventaja de utilizar un filtro FIR sobre un filtro IIR, es la linealidad que es requerida para mantener en fase las señales. El utilizar mínimos cuadrados, de igual manera reduce el error entre las señales manteniendo la linealidad.

3.4.6. Algoritmo de Discriminación

El algoritmo de discriminación, es el encargado de indicar a los indicadores cuando se puede tomar la lectura de la razón de ventana. El algoritmo utiliza la lógica de la siguiente ecuación.

$$i(t) = 1 - e^{-\frac{tB}{\tau}} \quad (3.3)$$

Cuando la señal se encuentra en su 63.2%, significa que los valores del tiempo base y la constante de tiempo son iguales. Con esta información, se utiliza la diferencia del valor máximo del tiempo base utilizado y el valor mínimo del mismo. Si esta diferencia es mayor que 0.632 la señal se encuentra en sincronía, de lo contrario los indicadores muestran como valor obtenido 0.

3.4.7. Muestreo y Retención

Para obtener una señal típica DLTS, se utilizan muestreadores-retenedores, los cuales toman un valor del algoritmo en el momento que el generador de señales desfasadas se lo indica. Cuando los S/H se encuentran con información, la razón de ventana (Rate Window o RW) es calculada con las siguientes ecuaciones.

$$RW_1 = S/H_2 - S/H_1 \quad (3.4)$$

$$RW_2 = S/H_3 - S/H_1 \quad (3.5)$$

$$RW_n = S/H_{n+1} - S/H_1 \quad (3.6)$$

En la Figura 3.10 se muestra el código realizado en Simulink de los apartados 3.4.4 a 3.4.7.

3.5. Comparación entre un Sistema Analógico Contra un Sistema Digital

Un sistema analógico de razón de ventana múltiple, tiene como desventaja, utilizar una cantidad mayor de dispositivos electrónicos, utilizada para un sistema de una sola razón ventana. Los resultados que se obtienen pueden incluir ruido ambiental, ocasionado por las corrientes de fuga de los mismos dispositivos y con ello afectando al experimento. El experimento no puede ser modificado en tiempo real y con ello aumenta el tiempo tomado para un solo escaneo.

El sistema digital permite obtener un valor indefinido de amplificadores de muestreo sin afectar la medición final. El poder modificar los valores en tiempo real, ahorra al experimento tiempo y con ello aumenta la resolución del sistema gracias obtener un mayor número de espectros como resultado de un solo escaneo.

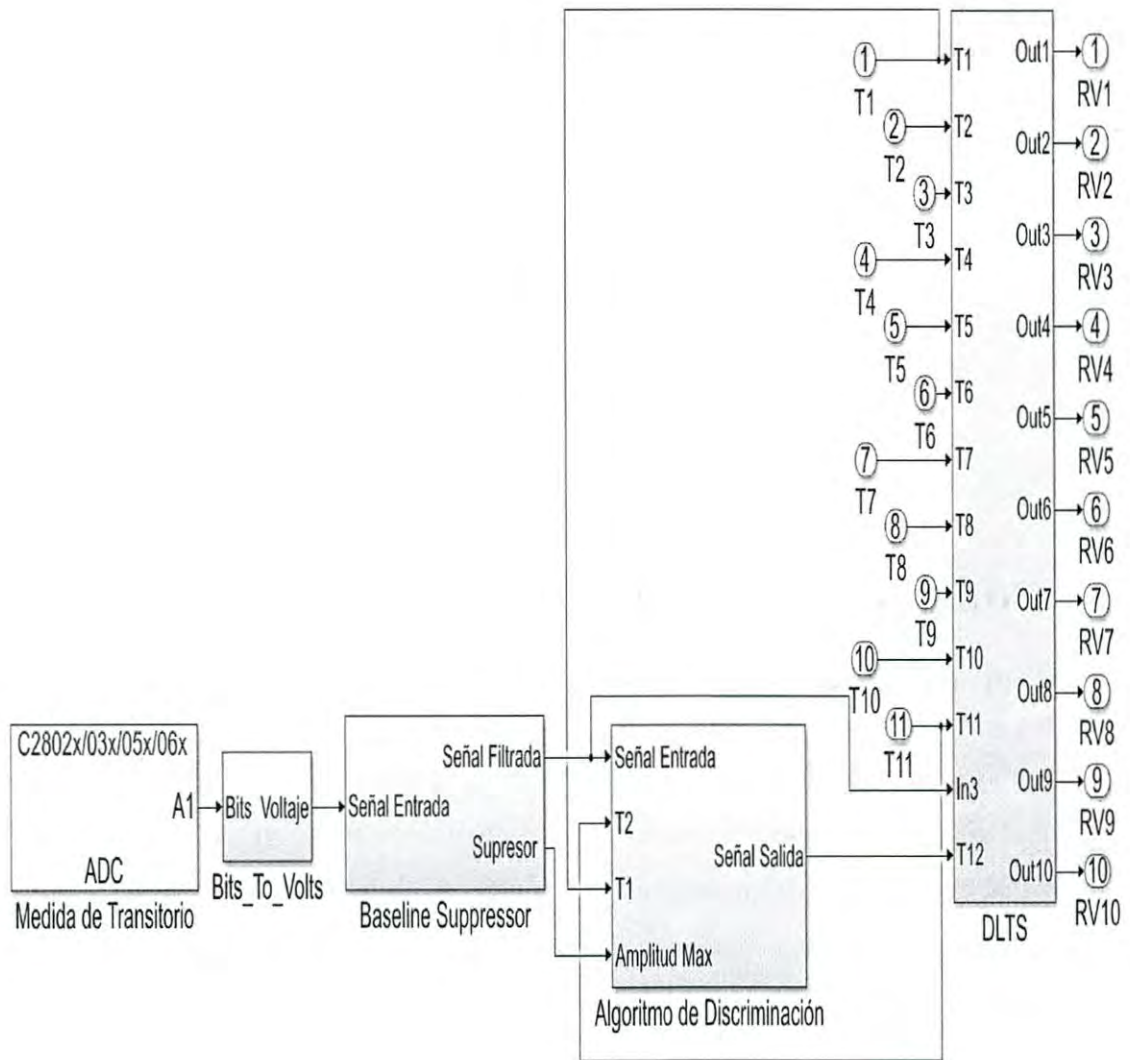


Figura 3.10: Razón de Ventana Múltiple

Procesamiento de Datos Experimentales y Discusión

El objetivo principal de la tesis ha sido implementar un sistema experimental para la caracterización de niveles profundos en semiconductores por la técnica de Espectroscopía de Transitorios de Niveles Profundos o PICTS. A diferencia de los sistemas tradicionales de DLTS, los cuales se basan en el uso de "lock-in o boxcar" para la medición DLTS, nuestro sistema ha ido evolucionando cada vez, pasando de un simple circuito de razón de ventana a uno de múltiple razón de ventana. Primero utilizando circuitos electrónicos en placas de pruebas y la tarjeta DSP para generar pulsos cuadrados. Para realizar la caracterización de espectros se utilizaron circuitos tipo RC, que simularon un experimento típico de DLTS. Después, se diseñó e implemento un PCB con el objetivo de mejorar la señal de salida; por último, se encontró la manera de tener el experimento completamente digital (mediante el uso de programación en computadora) utilizando únicamente la tarjeta DSP Piccolo C2000 que es capaz de realizar las funciones de los circuitos electrónicos, con ello eliminar ruidos provenientes del uso de éstos.

4.1. Medición de Transitorios

El experimento DLTS consiste en realizar mediciones de capacitancia o corriente como se ha explicado en capítulos anteriores. El experimento consiste en medir transitorios de alguna película o muestra a cierta temperatura. Sin embargo, por motivos de ahorrar recursos, los sistemas de procesamientos de datos primero fueron simulados por circuitos RC, dejando como fijo un valor de R con un valor igual a la resistencia de los materiales a caracterizar y variando C con el objetivo de obtener valores de transitorios que simularán el experimento típico DLTS como se muestra en la Figura 2.6

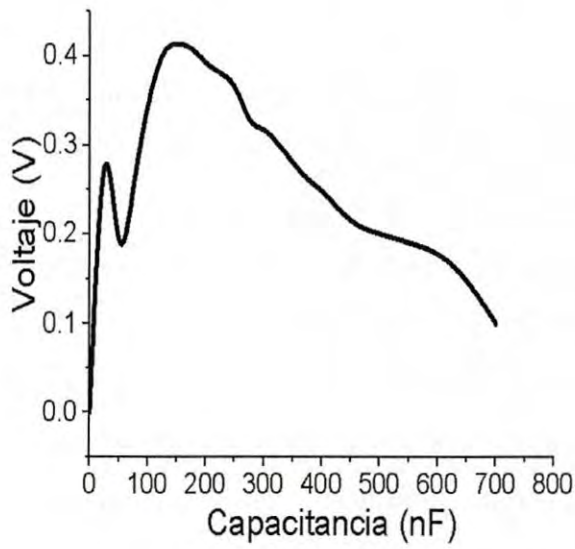
4.1.1. Medición de Transitorios RC

Simulación

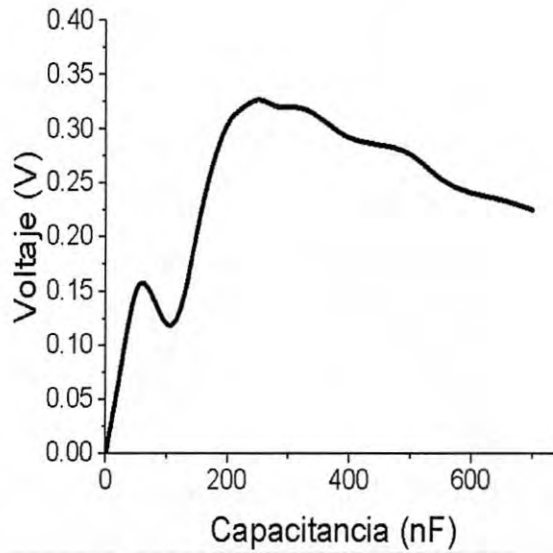
En la Figura 4.1 se muestran los espectros obtenidos al medir un circuito RC mediante la simulación en el software del circuito propuesto en la Figura 3.4, donde se utilizó un circuito RC con $R=1\text{ M}\Omega$ y C con valores de 0 a 600 nF.

Las figuras obtenidas muestran dos espectros típicos obtenidos en un experimento DLTS o PICTS tomados de la razón de ventana del circuito. Ambos espectros indican la presencia de trampas dentro del transitorio, simulado por el circuito RC. Por lo tanto, se puede establecer que el circuito simula correctamente el comportamiento de las trampas en un dispositivo semiconductor. Sin embargo, debido a que el circuito será implementado físicamente se deben tener valores de capacitores comerciales y no un rango amplio de puntos como los obtenidos en la simulación. Por lo tanto, la siguiente Figura muestra el resultado de la simulación para valores de capacitores comerciales.

En la Figura 4.2 se muestran dos espectros que aparentemente son distintos a los obtenidos en la Figura 4.1; esto se debe al uso de valores comerciales de capacitores para la simulación y un incremento en la ganancia del circuito de la Figura 3.4 para poder obtener mayor resolución en los datos obtenidos.

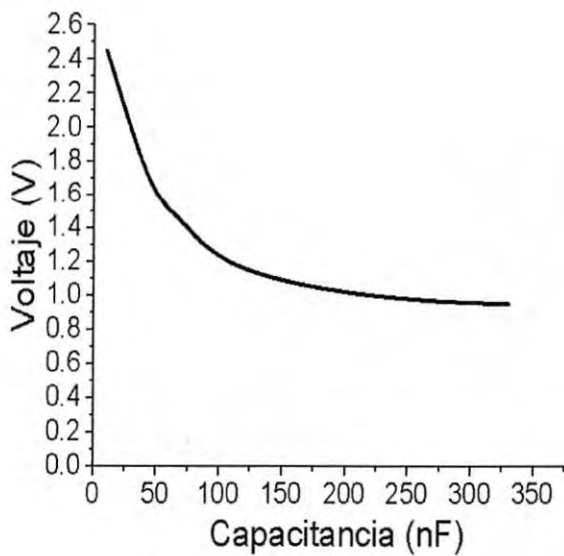


(a) Simulación en Proteus a 1 Hz

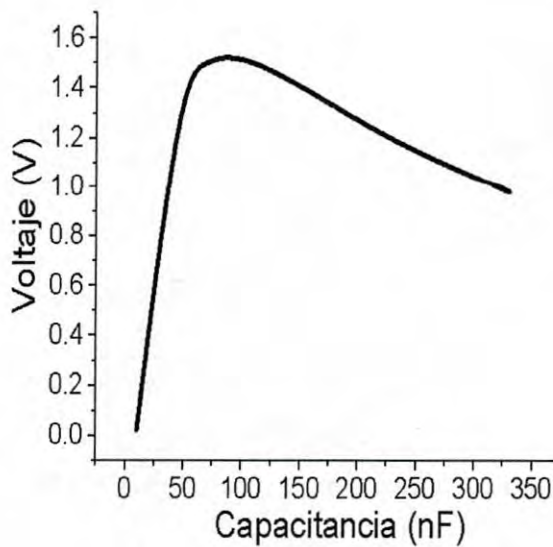


(b) Simulación en Proteus a 2 Hz

Figura 4.1: Resultados simulados con rango con valores comerciales y no comerciales de capacitores.



(a) Simulación en Proteus a 1 Hz



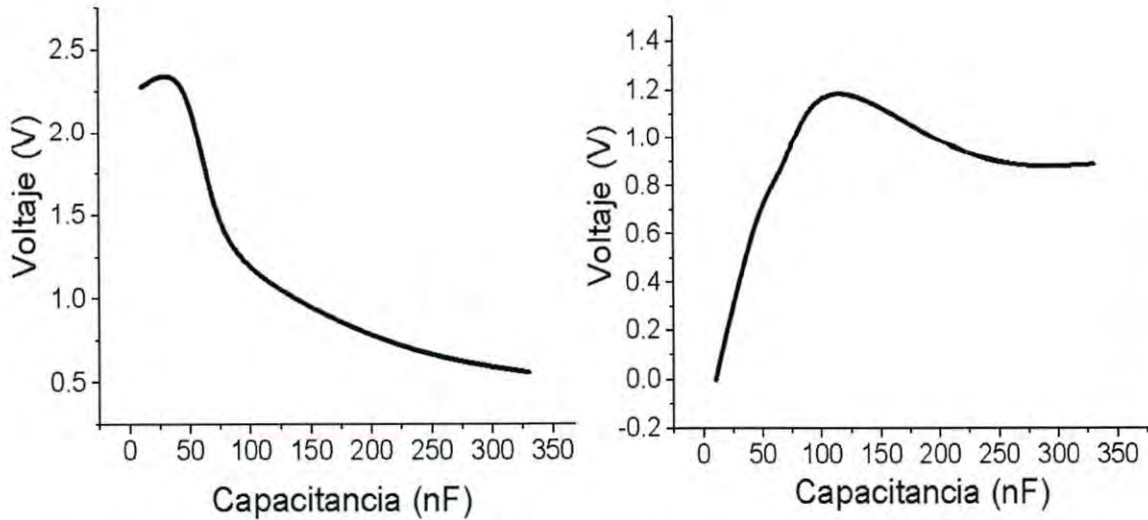
(b) Simulación en Proteus a 2 Hz

Figura 4.2: Resultados simulados con valores comerciales de capacitores y R fija de $1M\Omega$.

Experimental

La Figura 4.3 muestra los espectros obtenidos de realizar un experimento en placa de pruebas (protoboard) y la primera mejora realizada al circuito propuesto de la Figura 3.3. En la cual se realiza la sustitución del generador de señales para utilizar la tarjeta de Texas Instruments C2000 Piccolo, como generador de 3 pulsos cuadrados, que alimentan, mediante una salida digital, al circuito de muestreo y retención de la Figura 3.4.

La Figura 4.3 tiene un ligero parecido a la Figura 4.2, se puede decir que no es totalmente equivalente debido a un extraño comportamiento de picos o cambios bruscos del espectro de comparación obtenido en la simulación, los picos no deseados pueden ser eliminados con un buen diseño de circuito impreso (PCB) como se mencionó en el apartado 3.3 Mejoras del Circuito de Razón de Ventana.



(a) Experimental en placa de pruebas a 1 Hz (b) Experimental en placa de pruebas a 2 Hz

Figura 4.3: Resultados obtenidos en placa de pruebas con capacitores comerciales y R fija de $1M\Omega$

Experimental Primer Mejora

En la Figura 4.4 se muestra una mejora del espectro con respecto al obtenido utilizando placa de pruebas. Los picos y los cambios bruscos se eliminaron gracias a un buen diseño de circuito impreso. Los espectros se muestran más limpios y por lo tanto la información dentro del mismo será más precisa.

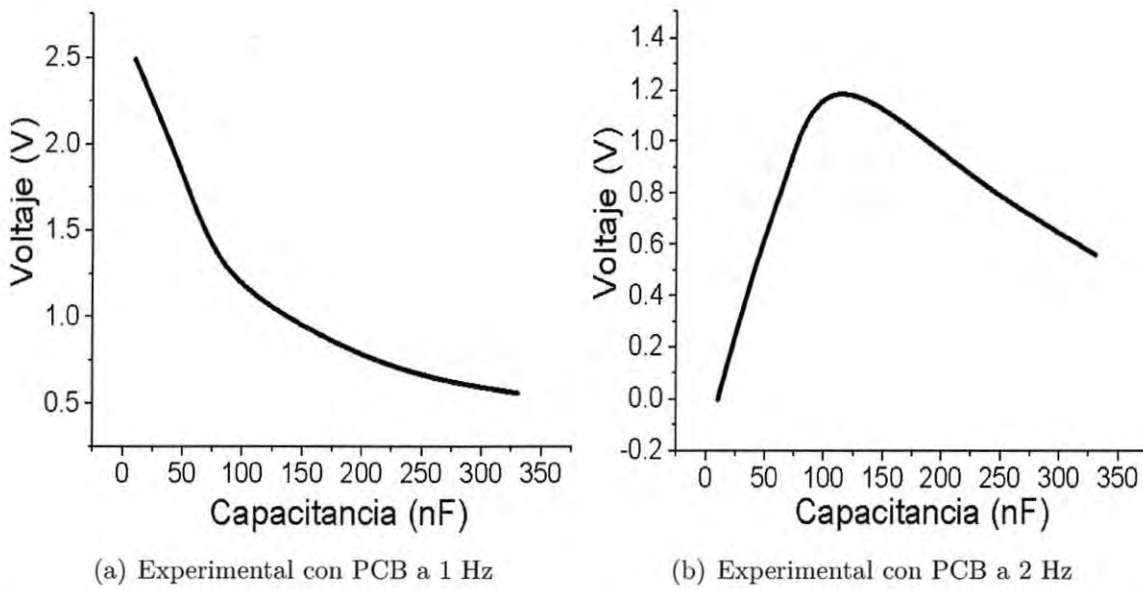
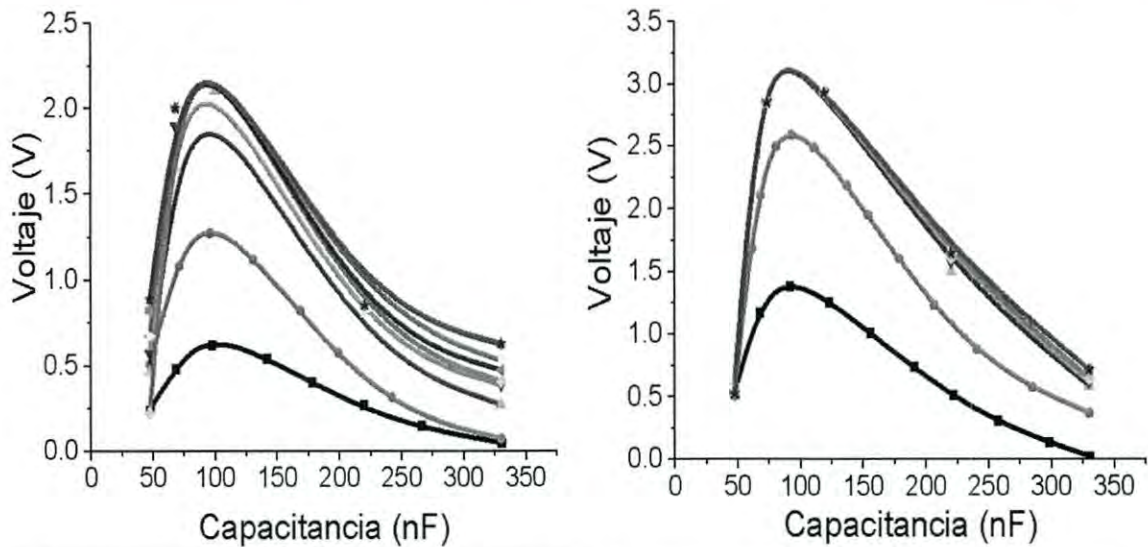


Figura 4.4: Resultados obtenidos en PCB utilizando como generador la tarjeta c2000 y R fija de $1M\Omega$

Experimental Circuito Digital

La Figura 4.5 muestra múltiples espectros para cada una de las mediciones a diferentes frecuencias. Si se compara los espectros obtenidos con los simulados se observa que por lo menos un espectro es igual al obtenido. El tener mayor número de espectros indica un aumento en la resolución al momento de caracterizar trampas, esto se debe a que existe mayor información al obtener más espectros en un solo experimento. Además, se aprecia que los resultados mediante este método concuerdan con los simulados y realizados mediante experimento.



(a) Espectros múltiples obtenidos con circuito digital a 1 Hz (b) Espectros múltiples obtenidos con circuito digital a 2 Hz

Figura 4.5: Resultados obtenidos mediante el circuito digital de razón de ventana múltiple con una R fija de $1M\Omega$

4.1.2. Medición de Transitorios Experimentales

El experimento DLTS se realiza haciendo mediciones de capacitancia o corriente, las cuales dependerán de las características de la muestra a estudiar. El experimento mide los transitorios obtenidos al excitar una película; esto ocasiona que la respuesta a esa excitación proporcione una respuesta transitoria que dependerá de la temperatura a la que se encuentre la película.

El experimento realizado tiene las siguientes características, un barrido de temperatura de 100K a 300K, la cual fue controlada por el controlador de temperatura LakeShore por medio de una resistencia y nitrógeno líquido, además el experimento fue realizado a un vacío de 1×10^{-4} mbar. Estas condiciones dieron como resultado las siguientes figuras. En la Figura 4.6 se muestra el resultado del circuito de razón de ventana múltiple para 5 razones de ventana ($t_2 - t_1, t_3 - t_1, t_4 - t_1, t_7 - t_1, t_9 - t_1$) las cuales se observan que tienen comportamiento parecido en ciertas temperaturas.

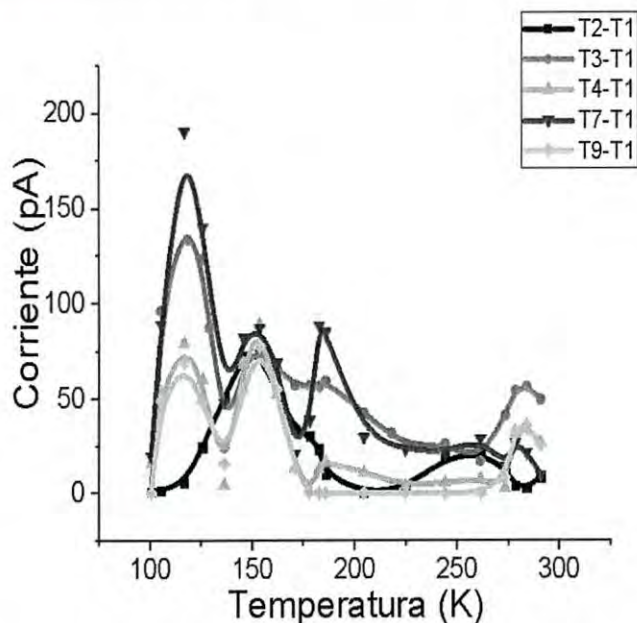
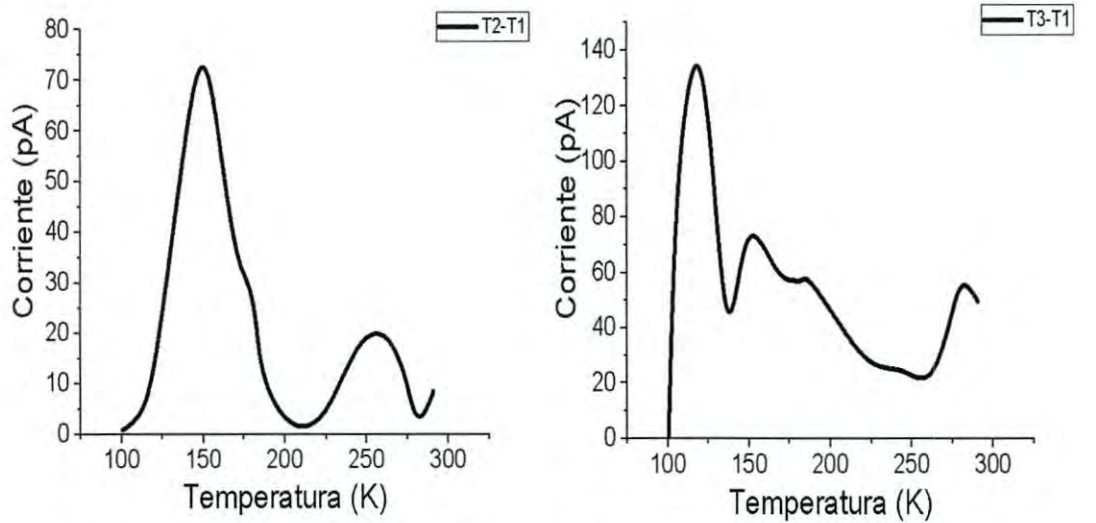


Figura 4.6: Espectro experimental de 5 razones de ventana

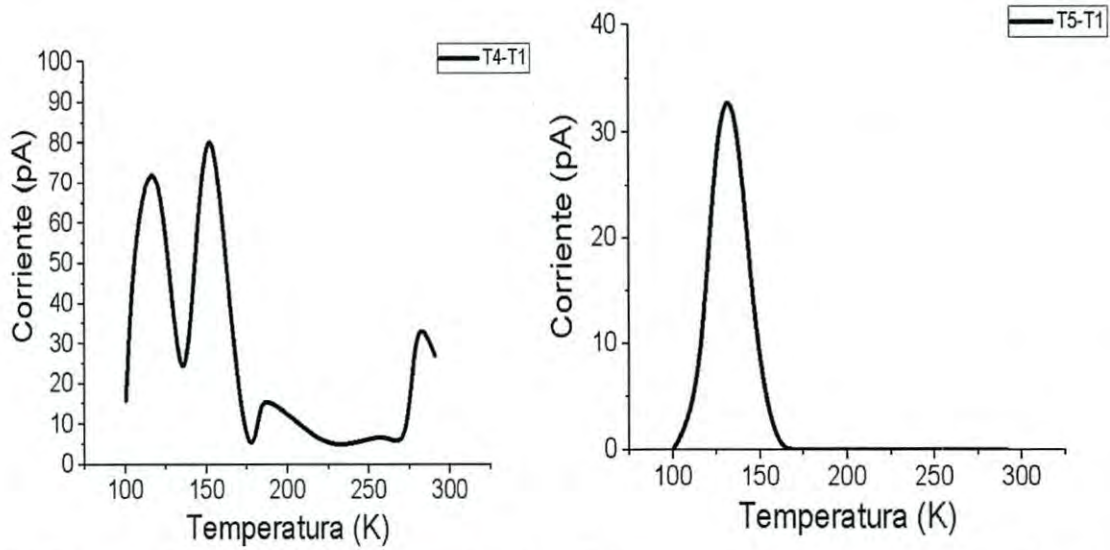
Los espectros que se encuentran en un experimento típico de DLTS o PICTS antes de realizar el análisis proporcionan información de las posibles trampas que pueden ser caracterizadas. En aproximadamente 125K existe un espectro que coincide con las razones de ventana t_3, t_4, t_7 y t_9 las cuales nos indican información sobre la posible existencia de una trampa. En la temperatura de 150K también existe un espectro que coincide en ciertas razones de ventana del experimento obtenido; por lo que también indica la existencia de una posible trampa a esta temperatura.

Para observar de manera más clara los resultados obtenidos en el experimento, se presentan las siguientes Figuras individualmente. En la Figura 4.7 se muestran los resultados obtenidos para las siguientes razones de ventana, t_2, t_3, t_4 y t_5 . En las Figuras (b), (c) y (d) existen espectros de los cuales posiblemente contiene información de trampas para el experimento. En las Figuras (a), (b) y (c) de igual manera existen espectros que indican la posibilidad de que existan trampas.

En la Figura 4.8 se muestran las siguientes razones de ventana obtenidas del circuito

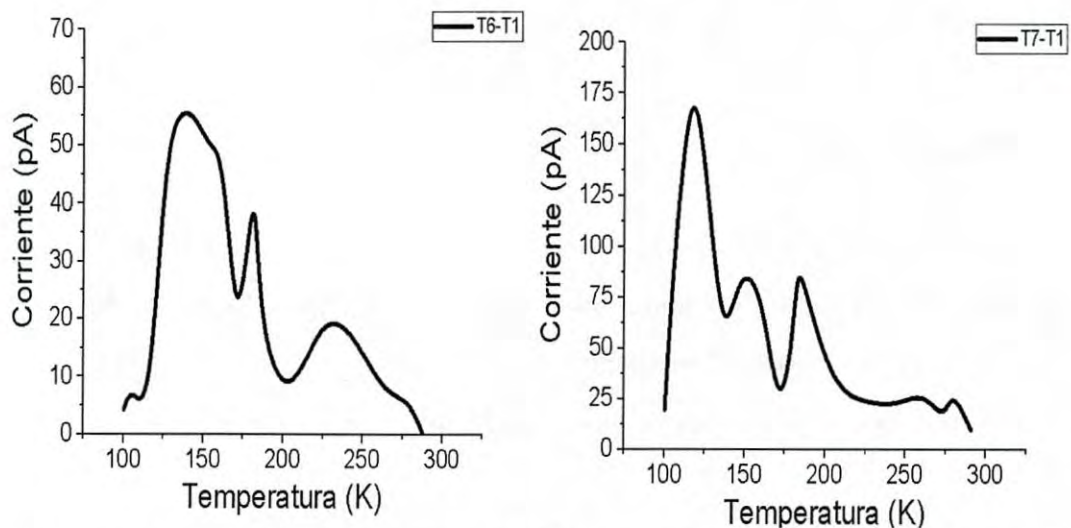


(a) Espectro de razón de ventana para $t_2 - t_1$ (b) Espectro de razón de ventana para $t_3 - t_1$

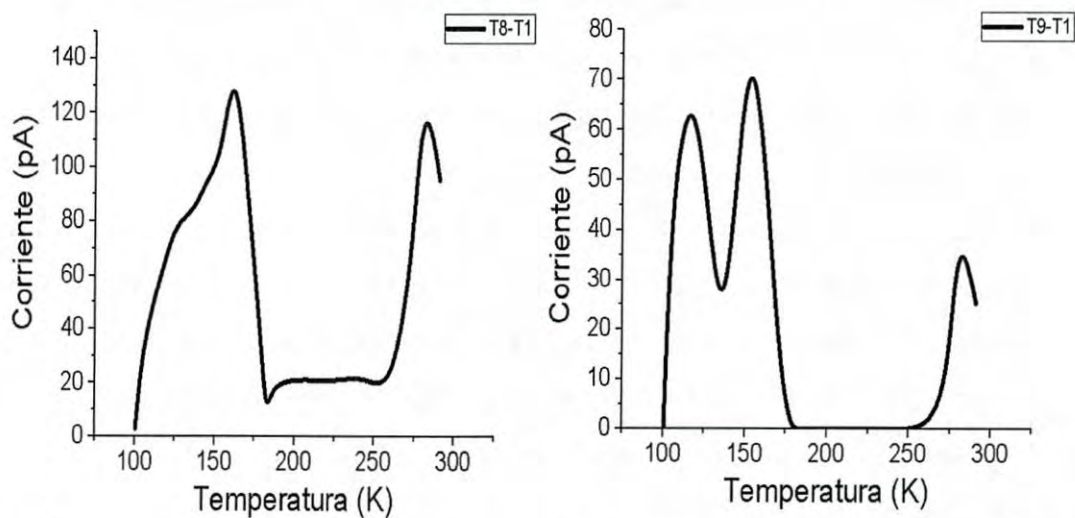


(c) Espectro de razón de ventana para $t_4 - t_1$ (d) Espectro de razón de ventana para $t_5 - t_1$

Figura 4.7: Resultados obtenidos del circuito de razón de ventana múltiple t_2, t_3, t_4, t_5



(a) Espectro de razón de ventana para $t_6 - t_1$ (b) Espectro de razón de ventana para $t_7 - t_1$



(c) Espectro de razón de ventana para $t_8 - t_1$ (d) Espectro de razón de ventana para $t_9 - t_1$

Figura 4.8: Resultados obtenidos del circuito de razón de ventana múltiple t_6, t_7, t_8, t_9

de múltiple razón de ventana restantes t_6, t_7, t_8 y t_9 . En las Figuras (a), (b), (c) y (d) se observa el mismo comportamiento de los resultados de la Figura 4.7, indicando la posible existencia de una trampa a la temperatura de 125K. Las Figuras (c) y (d) de igual manera confirman la existencia de una trampa a 150K.

4.2. Discusión

El experimento ha sido realizado a temperaturas de 100K a 300K, la duración del experimento es de alrededor de 6 horas como mínimo. Los resultados obtenidos indican la existencia de trampas dentro del semiconductor caracterizado (CdS), la película responde a la luz con una longitud de 430nm (color azul), todo esto realizado a una presión de 1×10^{-4} mbar.

Los resultados obtenidos indican que, si hubiera utilizado una razón de ventana única como inicialmente se propuso, posiblemente se encontraría una trampa al realizar la caracterización y el análisis de trampas. Por lo tanto, al obtener un mayor número de espectros en un solo barrido de temperaturas proporciona mayor información y por ende, mayor número de trampas que pueden ser encontradas.

En las Figuras 4.7 y 4.8 se muestran algunos espectros a distintas temperaturas que difieren a las mencionadas anteriormente; estos espectros pueden o no pueden ser trampas. Para confirmar la existencia de espectros que posiblemente pudiera ser algún defecto se toman en cuenta los resultados obtenidos en todas las razones de ventanas disponibles, de donde se puede apreciar la superposición de espectros y con ello confirmando que efectivamente existen defectos.

Debido a la complejidad del experimento, el tiempo que se toma y los gastos económicos que implica, se propone mejorar el sistema integrando todos los programas (controladores, adquisición, procesamiento de datos y gráficas) en uno solo para obtener un mayor control sobre los equipos de operación y mejorar de esta manera las Figuras obtenidas.

Conclusiones

Se diseñó un sistema digital capaz de realizar mediciones de múltiples razones de ventana en un solo experimento. Se utilizó una tarjeta DSP económica capaz de lograr adaptar un circuito de razón de ventana básico utilizando únicamente dos muestreadores-retenedores a utilizar por lo menos diez, con ello mejorando la obtención de lecturas de transitorios.

Se demostró que las simulaciones y los experimentos realizados utilizando un circuito físico pueden ser mejorados al implementar el circuito digital de múltiple razón de ventana, pasando de obtener un solo espectro que puede dar la interpretación de la existencia de una trampa en cierto punto a confirmar que efectivamente entre mayores espectros existan en una misma temperatura más posibilidades hay de tener un defecto.

Los resultados obtenidos demuestran que con un solo experimento es posible obtener una mayor cantidad de información, esto debido a que el experimento tiene una duración de por lo menos 6 horas y un costo muy alto, aprovechando que con un solo barrido de temperatura se obtiene no una razón sino más bien ocho o nueve.

Se logró mejorar la resolución del sistema al encontrar espectros que por lo menos indican que pueden contener dos trampas con cualquier método de análisis

Apendices

6.1. C2000 DSP

La configuración inicial para la utilización de la herramienta DSP consiste realizar una comunicación entre el micro-controlador de Texas Instrument C2000 Piccolo MCU F28027 LaunchPad Development Kit y una computadora portatil. La comunicación se realiza mediante un enlace con el dispositivo de Texas Instrument y el programa Code Composer Studio. Además se utiliza de interfaz el programa Matlab mediante un puerto COM del computador y la herramienta Simulink para su programación. Estas configuraciones se detallan en las siguientes sub-secciones y el en la Figura 6.1.

6.1.1. Configuración para la comunicación entre la PC y el Micro-Controlador C2000

La configuración inicial entre la PC y el micro-controlador es realizada mediante la herramienta Code Composer Studio. Esta permite que el dispositivo C2000 Piccolo MCU F28027 LaunchPad Development Kit se comuniquen con una computadora portatil agregando una configuración por default en la que se establece el tipo de conexión a utilizar y el nombre de dispositivo de trabajo. Además, se puede realizar la programación del dispositivo en esta herramienta con su respectivo lenguaje C o simplemente cargar ejemplos

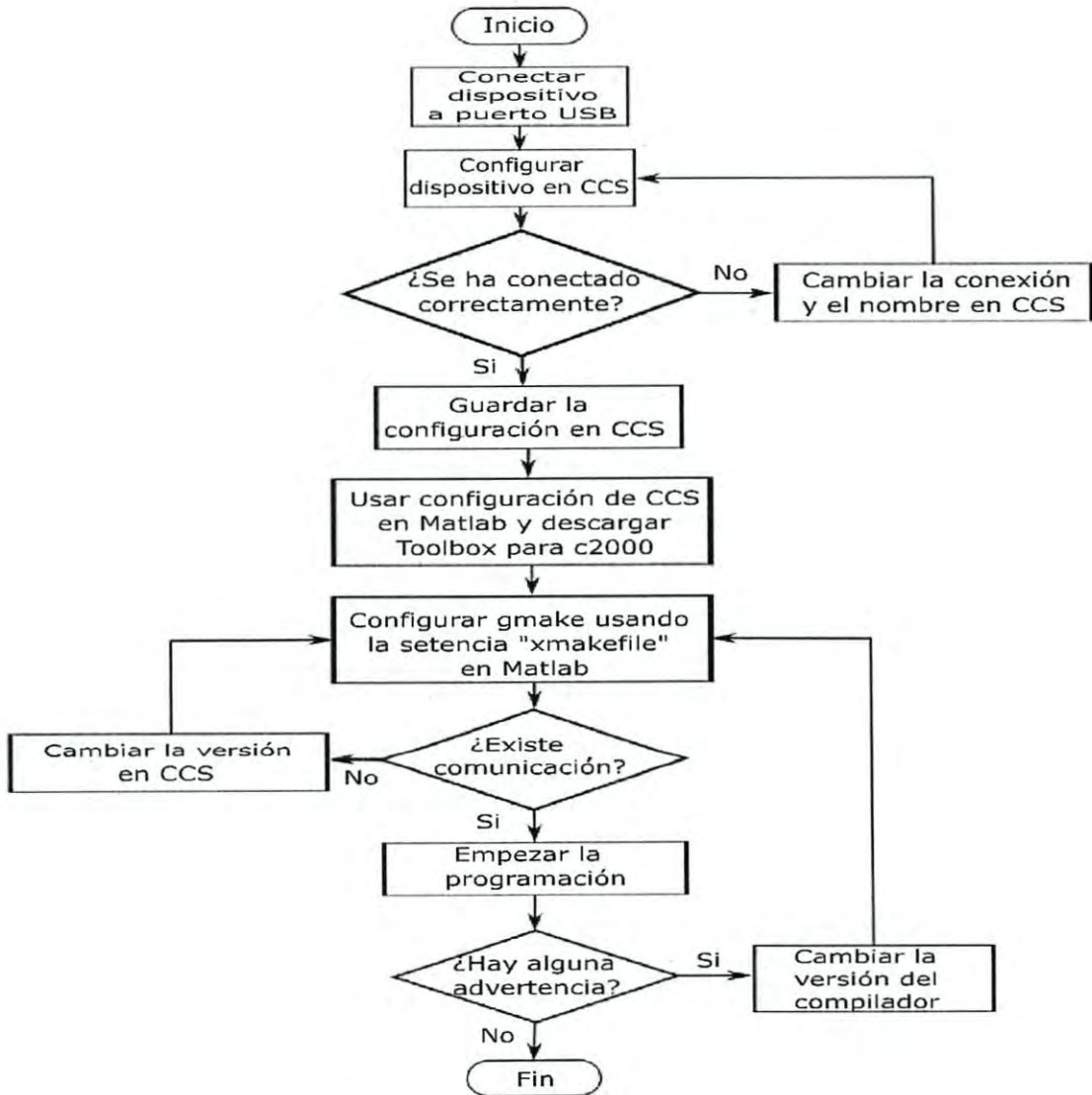


Figura 6.1: Diagrama de Flujo

predefinidos.

6.1.2. Programación y Comunicación de la Versión Utilizada en Matlab

Matlab es utilizado para realizar la programación, comunicación y procesamiento de información utilizada en el estudio de trampas en la espectroscopía DLTS. La programación del DSP se lleva a cabo utilizando la herramienta Simulink de Matlab, con la cual se puede descargar un toolbox de Texas Instruments para poder utilizar bloques que nos permitan el direccionamiento de las acciones que se realizan a el dispositivo físico. El proceso de comunicación entre Matlab y el micro-controlador c2000 consiste en agregar los compiladores del programa Code Composer Studio a la versión 2015a o 2017a de Matlab. Esto es realizado desde la ventana de comandos de matlab utilizando la sentencia `xmakefilesetup` y agregando a la plantilla `gmake` una configuración de la versión compatible del Code Composer Studio que será utilizada, esta puede variar entre sus versiones 4, 5 y 6.

6.1.3. Micro-Controlador C2000

El dispositivo C2000 Piccolo MCU F28027 LaunchPad Development Kit, es una placa experimentadora de bajo costo para los dispositivos Texas Instruments Piccolo F2802x. El dispositivo se programa mediante lenguaje C/C++ y ensamblador, con una frecuencia de 60MHz, una resolución ADC de 12 Bits, entradas y salidas digitales, entradas analógicas y salidas PWM, muestreo y retención, además de 12 convertidores analógico digital y dos comparadores. Estas herramientas hacen del dispositivo una herramienta útil debido a su velocidad, resolución y sus S/H.

Una vez realizada la configuración para utilizar el dispositivo, se realiza la programación en simulink la cual es dada en tiempo real lo cual permite al dispositivo interactuar con el experimento de manera rápida y automatizada con el objetivo de incrementar la resolución del experimento DLTS de una manera menos costosa y aceptable en cuanto a ruido de la

señal, el cual puede ser eliminado al utilizar un circuito completamente digital en lugar de un analógico.

Bibliografía

- [1] C. V. Reddy, S. Fung, and C. D. Beling. A simple and inexpensive circuit for emission and capture deep level transient spectroscopy. *Review of Scientific Instruments*, 67(1):257–261, 1996.
- [2] Reyes Barranca Alfredo Avila García Alejandro. Computerized dlts system to characterize deep levels in semiconductors. *Revista Mexicana de Física*, 48(6):257–261, 2002.
- [3] Acosta Ortiz S.E. Niveles profundos en semiconductores. *Revista Mexicana de Física*, 34(1):54–68, 1988.
- [4] G. Micocci, P. Siciliano, and A. Tepore. Photoinduced current transient spectroscopy in inse single crystals. *Solar Energy Materials*, 20(3):181 – 187, 1990.
- [5] V. Komin, V. Viswanathan, B. Tetali, D. L. Morel, and C. S. Ferekides. Identification of defect levels in cdte/cds solar cells using deep level transient spectroscopy. In *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002.*, pages 736–739, May 2002.
- [6] E. Losson and B. Lepley. New method of deep level transient spectroscopy analysis: a five emission rate method. *Materials Science and Engineering: B*, 20(1):214 – 220, 1993.

- [7] PN Reddy, BPN Reddy, SV Pandurangaiah, and KS Chari. Development of computer controlled deep level transient spectroscopy system. *IETE Technical Review*, 15(1-2):105–110, 1998.
- [8] K Holzlein, G Pensl, M Schulz, and P Stolz. Fast computer-controlled deep level transient spectroscopy system for versatile applications in semiconductors. 57:1373 – 1377, 08 1986.
- [9] Silvaco. Simulations of deep-level transient spectroscopy for 4h-sic. *Silvaco Simulation Standard*, 2014.
- [10] S. Weiss and R. Kassing. Deep level transient fourier spectroscopy (dltfs)—a technique for the analysis of deep level properties. *Solid-State Electronics*, 31(12):1733 – 1742, 1988.
- [11] Florian Schmidt, Holger von Wenckstern, Otwin Breitenstein, Rainer Pickenhain, and Marius Grundmann. Low rate deep level transient spectroscopy - a powerful tool for defect characterization in wide bandgap semiconductors. *Solid-State Electronics*, 92:40 – 46, 2014.
- [12] J. Martinez, F. Sandoval, F. G. Perez, and A. I. Gomez. A new sequential four-rate-window dlts system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-36(1):115–119, March 1987.
- [13] David P. Rancour. A sensitive technique for detecting low concentrations of deep level traps: Current source deep level transient spectroscopy. *Journal of Applied Physics*, 78, 1995.
- [14] A. F. Basile, J. Rozen, J. R. Williams, L. C. Feldman, and P. M. Mooney. Capacitance-voltage and deep-level-transient spectroscopy characterization of defects near SiO_2/SiC interfaces. *Journal of Applied Physics*, 109(6), 3 2011.

-
- [15] L Jansson, V Kumar, L A Ledebø, and K Nideborn. A sensitive and inexpensive signal analyser for deep level studies. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 14(4):464, 1981.
- [16] A. Avila-Garcia and A. R. Barranca. Computerized digitizing technique for dlts measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 43(6):936–939, Dec 1994.
- [17] C Eiche, D Maier, M Schneider, D Sinerius, J Weese, KW Benz, and J Honerkamp. Analysis of photoinduced current transient spectroscopy (picts) data by a regularization method. *Journal of Physics: Condensed Matter*, page 6131, 1992.
- [18] M. Tapiero, N. Benjelloun, J. P. Zielinger, S. El Hamd, and C. Noguét. Photoinduced current transient spectroscopy in high-resistivity bulk materials: Instrumentation and methodology. *Journal of Applied Physics*, 64(8):4006–4012, 1988.
- [19] Jie Zhou, Lin Jun Wang, Xiao Xiang Sun, Jia Qi Teng, Bei Ling Yao, Run Xu, Jia Hua Ming, Jian Huang, and Ke Tang. Deep level transient spectroscopy system designed by labview. In *Advanced Information and Computer Technology in Engineering and Manufacturing, Environmental Engineering*, volume 765 of *Advanced Materials Research*, pages 2324–2328. Trans Tech Publications, 10 2013.
- [20] Dimitri Alexiev, Dale Prokopovich, Mark I. Reinhard, Stuart Thomson, and Li Mo. Deep-level transient conductance spectroscopy of high resistivity semiconductors. *physica status solidi (c)*, 2(4):1347–1354, 2005.
- [21] J. Lauwaert, L. Callens, S. Khelifi, K. Decock, M. Burgelman, A. Chirila, F. Pianezzi, S. Buecheler, A. N. Tiwari, and H. Vrielinck. About re-like contacts in deep level transient spectroscopy and cu(in,ga)se₂ solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20(5):588–594, 2012.
-

