

DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DIGITAL DE MÚLTIPLE RAZÓN DE VENTANA PARA EL ESTUDIO DE TRAMPAS

DESIGN, SIMULATION AND IMPLEMENTATION OF A DIGITAL CIRCUIT OF MULTI-RATE-WINDOW FOR THE STUDY OF TRAPS

Francisco Javier Arizaga Ayala

Universidad de Sonora, México
Francisco.arizaga@unison.mx

Armando Gregorio Rojas Hernández

Universidad de Sonora, México
arojas@cifus.uson.mx

Recepción: 28/octubre/2020

Aceptación: 3/diciembre/2020

Resumen

El presente documento describe el uso de un microcontrolador TMS320F28027 como un sistema completamente digital usado para obtener información de transitorios de corriente gracias a la aplicación de un sistema de múltiple razón de ventana. El sistema digital de múltiple razón de ventana mejora la resolución de detección de trampas debido a la cantidad de espectros que se pueden tener en un análisis.

El propósito del sistema es extraer la información de una señal transitoria de una película de CdS a través de un transitorio de corriente para posteriormente procesarla y caracterizarla. Un sistema analógico está limitado por la cantidad de circuitos usados en la misma duración del pulso. Por lo tanto, el sistema digital es mejorado en comparación con el sistema analógico obteniendo información de diferentes partes del transitorio y no específicamente de un lugar como lo hace el sistema analógico.

Palabras Clave: Espectroscopía, niveles profundos, razón de ventana múltiple, sistema digital.

Abstract

The present document describes the use of a TMS320F28027 microcontroller as a completely digital system used to get information of current transients thanks to the application of a multi-rate window. The digital system of multi-rate window improves the resolution at traps detection due to the spectra amount that can be obtained for analysis. The system's purpose is to extract the information of a transient signal from a CdS thin film through its current transient to later process and characterize it. Therewith, information was obtained of the difference from the current transient at different parts during the pulse duration. An analog system is limited by the circuits amount used in the same pulse duration. Therefore, the digital system has an improvement compared to an analog system since we can analyze the difference of the transient at different parts and not only in a specific place just like an analog system does.

Keywords: *Deep levels, digital system, multi-rate-window, spectroscopy.*

1. Introducción

La espectroscopía de transitorio de niveles profundos (DLTS) es una herramienta de caracterización utilizada principalmente para la evaluación de las trampas en los niveles de los materiales semiconductores desarrollada por Lang en 1974 [Reddy, 1996]. Los semiconductores son utilizados para formar dispositivos electrónicos, su desempeño dependerá de los defectos. Generalmente, 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 (e.g. vacancias, átomos intersticiales, etc.) o defectos en la estructura (e.g. dislocaciones, apilado, etc.) [Acosta, 1988], [Micocci, 1990]. 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.

Las impurezas en los niveles profundos determinan la posición, concentración y sección de cruce. 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 [Avila, 2002], [Komin, 2002].

La mayoría de los sistemas de espectroscopía de transitorios de niveles profundos empleados en laboratorios utilizan boxcars o amplificadores lock-in para procesar las señales transitorias [Losson, 1993], [Reddy, 1996], [Reddy, 1998]. Estos sistemas sufren una desventaja considerable de pérdida de señal debido a la complejidad asociada con las señales de los circuitos además de caros. Se observa que el espectro reduce su ruido cuando un sistema de adquisición de datos es usado para analizar señales transitorias [Holzlein, 1986], [Weiss, 1988].

La principal desventaja de un circuito analógico es el número de componentes necesarios para desarrollar una razón de ventana simple. Los circuitos digitales son propuestos para sincronizar la señal, mientras que normalmente para la razón de ventana se utilizan circuitos analógicos. En estos casos, la existencia de ruido debido a la combinación de señales digitales y analógicas es inevitable, pero puede ser removido de diferentes formas [Martinez, 1987], [Rancour, 1995] [Reddy, 1996], [Schmidt, 2014]. El uso de un microcontrolador permite remover el ruido de la combinación de señales analógicas y digitales con la programación correcta. El microcontrolador puede ser programado para desarrollar tareas simples como la lectura de una muestra y sustraer información. De cualquier manera, la sincronización de señal no es tan simple como la publicada en los métodos de algunas otras publicaciones [Martínez, 1987], [Reddy, 1996] Por esta razón, se propone desarrollar un algoritmo que discrimine cuando la señal no está en sincronía utilizando la constante de tiempo.

El dispositivo TSM320F28027 es especialmente útil para procesamiento y representación de señales analógicas en tiempo real que normalmente son tomadas del circuito convertidor analógico al digital (ADC). El sistema digital de múltiple razón de ventana se enfoca en el procesamiento de una señal, un filtro digital de alto orden y operaciones matemáticas. Por esta razón, se puede tener una idea del potencial

que puede tener con este tipo de aplicación agregando un costo considerablemente bajo para las características de un DSP (procesador digital de señales) [Avila, 1994], [Holzlein, 1986], [Martinez, 1987], [Zhou, 2013]. Debido a todo esto, el TSM320F28027 ha sido elegido para realizar la programación de la múltiple razón de ventana de forma gráfica utilizando Simulink para su programación.

2. Métodos

Esquema experimental

La espectroscopía realizada mediante PICTS utiliza equipos de control, generación y medición para la caracterización de transitorios de corriente. En la figura 1 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:

- 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.

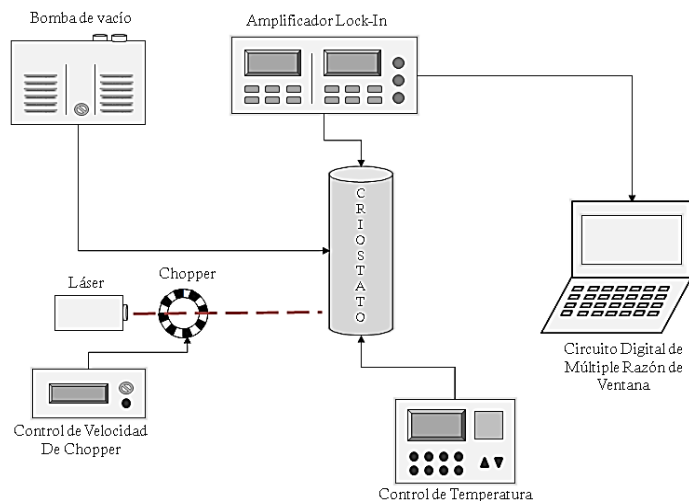


Figura 1 Esquema experimental propuesto.

- 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.

- 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.
- 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.

Diseño y simulación de un sistema digital

Funcionamiento del circuito de múltiple razón de ventana se muestra en figura 2.

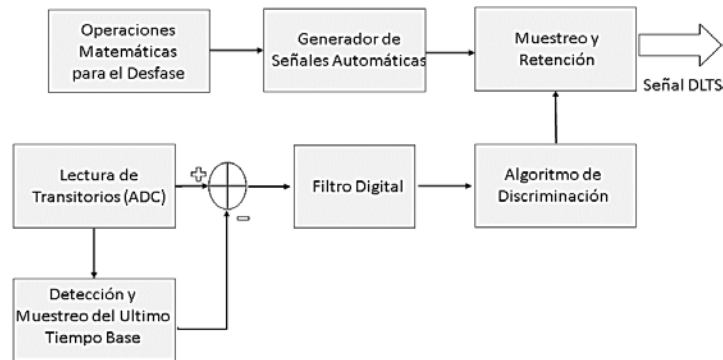


Figura 2 Diagrama de bloques general del funcionamiento del circuito de múltiple razón de ventana.

El sistema digital de razón de ventana múltiple consiste en tres bloques principales mostrados en la figura 3, los cuales permiten la caracterización de trampas. El diseño está compuesto por un bloque de control y sincronización de señales de forma automática que permiten determinar la cantidad de pulsos y el desfase de la

razón de ventana a utilizar. El siguiente bloque es el encargado de generar los pulsos, su amplitud, su ancho de pulso y más importante su recorrido en el tiempo que tiene como objetivo tomar la información del transitorio. Por último; una razón de ventana múltiple ajustable y automática.

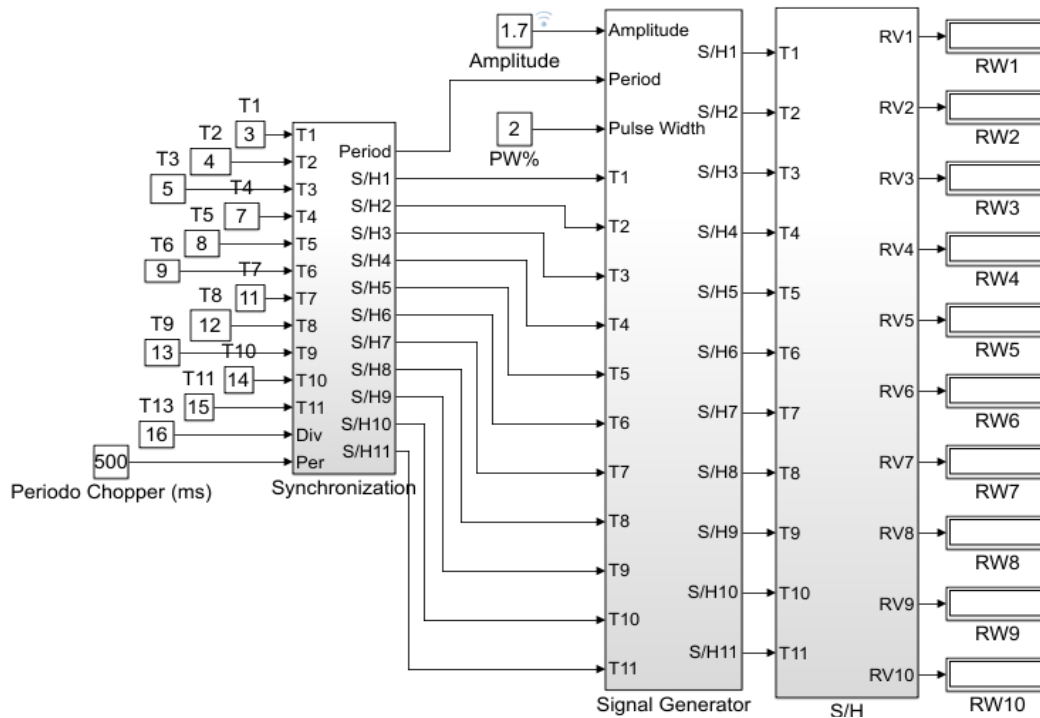


Figura 3 Sistema digital de razón de ventana múltiple.

Control de señales

El automatizar el cálculo de los tiempos que determinarán la razón de ventana tiene la ventaja de modificar en tiempo real 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 realizar el cálculo de las razones de ventana que son utilizadas, se realiza una realimentación 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 (TB) correspondiente dentro del transitorio. La figura 4 muestra la matemática realizada que permite el desfase de once señales (DivTB), tomando puntos del transitorio desde tres veces el tiempo base hasta quince veces su tiempo base.

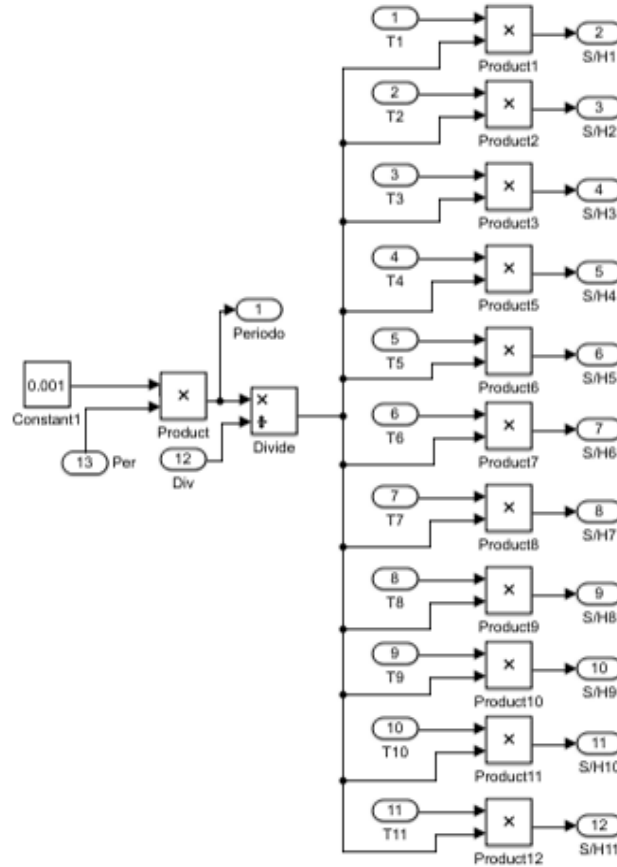


Figura 4 Cálculo matemático para once señales.

Para conocer el desfase que tendrá cada una de las señales dentro del transitorio se utiliza la ecuación 1.

$$\phi = A \frac{T}{DivT_B} \quad (1)$$

Donde,

- A = Un número real determinado de un tiempo base T_B (3, 4, 5, 7, etc).
- $DivT_B$ = Numero de tiempo base disponibles.
- T = Periodo de la señal.

Como ejemplo un transitorio que tiene un periodo de $T = 1$ segundo definirá los siguientes tiempos de razón de ventana que se verán desfasados cada 187.5, 250, 312.5, 437.5, 500, 562.5, 687.5, 750, 812.5, 875 y 937.5 ms (3 T_B , 4 T_B , 5 T_B , 7 T_B , 8 T_B , 9 T_B , 11 T_B , 12 T_B , 13 T_B , 14 T_B y 15 T_B).

Generador de señales

Las señales generadas proporcionan la amplitud, el periodo, el ancho del pulso y el desfase modificables en tiempo real. El bloque de la figura 5 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 anteriormente. Esto permite al Sistema Digital de Razón de Ventana Múltiple conocer los tiempos en que los Sample and Hold (S/H) realizarán su trabajo e identificarán la señal DLTS.

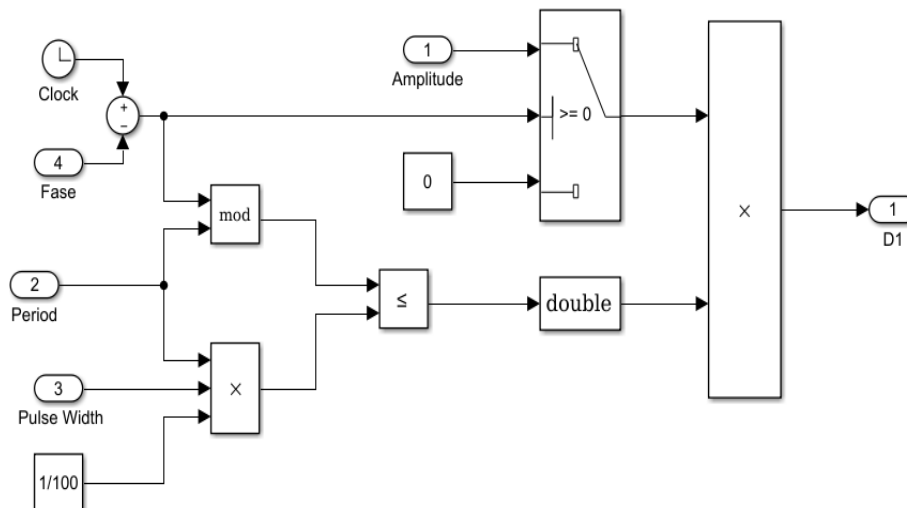


Figura 5 Generador de señales de 4 entradas.

Sistema digital de múltiple razón de ventana

Con el fin de determinar los espectros, es necesario hacer la diferencia entre un punto del transitorio en un tiempo dado y un tiempo distante previo, normalmente un experimento de este tipo usa la diferencia de un punto máximo del transitorio y el inicio de este. La principal ventaja de un sistema digital es modificar y ajustar la razón de ventana eligiendo los puntos del transitorio en cualquiera de los valores que sean necesarios. El sistema digital de múltiple razón de ventana usa una tarjeta C2000 para realizar el procesamiento. La figura 6 muestra el código de programación en simulink donde, se realiza la lectura de la señal transitoria del convertidor analógico-digital, se compensa el error del convertidor bit a voltaje.

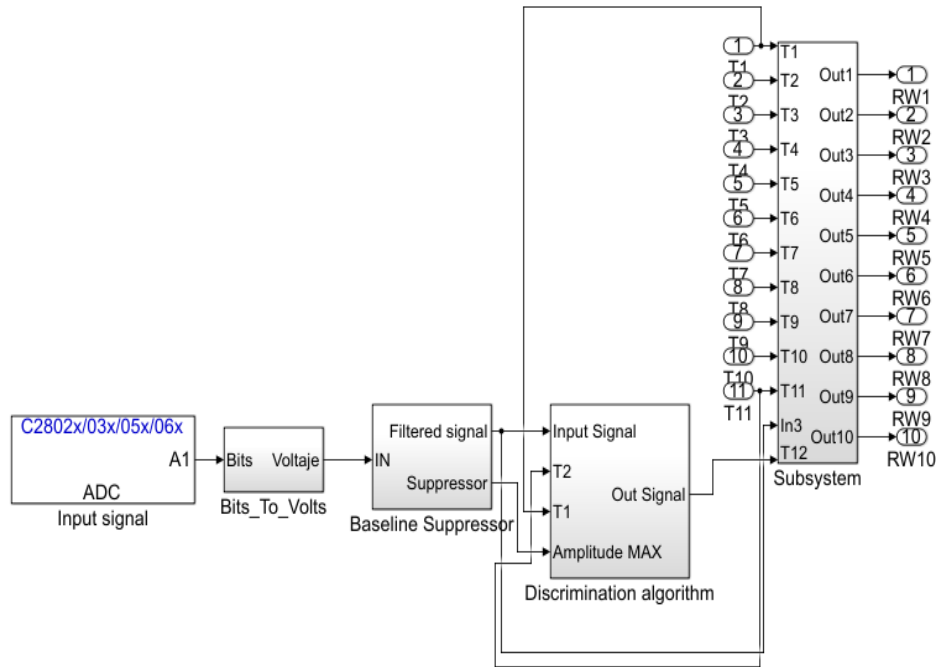


Figura 6 Sistema digital de múltiple razón de ventana.

Después, la señal entra al bloque “Baseline Supressor” para eliminar el nivel de DC generado por la primera vez que se realiza la muestra de la señal. Una vez eliminado el nivel de DC se aplica una ligera ganancia debido a que la señal se encuentra en los rangos de mV. Finalmente, la señal pasa a un bloque de filtrado digital para eliminar el ruido de altas frecuencias. Este filtro ha sido diseñado para atenuar señales de alta frecuencia (200 Hz). Se utiliza un filtro digital FIR para eliminar la distorsión de fase, esto debido a la importancia del experimento con la sincronía de señales. El sistema digital de múltiple razón de ventana ha sido desarrollado para once muestreadores retenedores digitales de los cuales se toma la lectura de cada uno para obtener por lo menos nueve razones de ventana.

Supresor de línea base

El supresor de línea base es utilizado para leer el valor máximo de la señal obtenida gracias al convertidor analógico-digital. El supresor de línea base tiene como objetivo remover el nivel de DC que se encuentre en la señal de lectura, para ello se toma el valor máximo de la señal obtenida por el convertidor analógico-digital de 12 bits y se realiza la diferencia con una señal retrasada del mismo periodo, al

restar ambas señales (señal en tiempo real y señal desfasada) se elimina cualquier nivel de DC existente y las lecturas que se tomen después del supresor de línea base no se verán afectadas por este fenómeno.

Filtro digital FIR de octavo orden

El sistema digital de múltiple razón de ventana tiene la ventaja de poder diseñar un filtro digital ya sea IIR o FIR. Sin embargo, debido a la necesidad de sincronizar las señales la mejor opción es un filtro FIR gracias a las propiedades de simetría (fase lineal). La desventaja de estos tipos de filtros se basa en el cálculo computacional que pueda exigir el diseño, por ello es importante diseñar un buen filtro que no afecte a la sincronía de la señal transitoria.

Para obtener una señal transitoria libre de ruido, es necesario el uso de un filtro digital FIR pasa bajas. Las señales típicas de este tipo de experimentos son de algunos segundos (1 o 2 segundos) como máximo, por ello es importante tener en cuenta las características del filtro.

El filtro FIR mínimos cuadrados pasa bajas tiene una frecuencia de corte de 500 Hz y un grado no mayor a ocho. Estas características se basan en las especificaciones mencionadas. Un filtro lineal, de baja frecuencia y que no afecte al cálculo computacional es aplicado para eliminar el ruido de la señal transitoria.

Algoritmo de discriminación y sincronía

El algoritmo de discriminación es el responsable de mostrar en los indicadores únicamente cuando la señal de lectura está en sincronía. El algoritmo se basa en la ecuación 2 de la constante del tiempo de un sistema de primer orden.

$$i(t) = 1 - e^{-t/T_B} \quad (2)$$

Cuando la señal se encuentra al 63.2% quiere decir que el tiempo base y la constante de tiempo se encuentra en sincronía. Con esta información, la diferencia del valor máximo de la señal y el valor mínimo del tiempo base aplicado deberá ser igual a 0.632 para estar en sincronía y posteriormente dar un valor a los muestreadores retenedores de lo contrario la información que se muestra en los indicadores será cero.

Muestreo y retención

Para obtener una señal típica DLTS, se utilizan muestreadores retenedores (S/H), 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 como en la ecuación 3. Donde se realiza la diferencia entre un valor cualquiera del transitorio y el primer tiempo base.

$$RW = S/H_n - S/H_1 \quad (3)$$

Donde:

- RW = Razón de ventana.
- S/H_n = Muestrador de valor n.
- S/H_1 = Primer valor tomado del transitorio.

3. Resultados

El experimento mide transitorios obtenidos al excitar una película; esto ocasiona que la respuesta a esa excitación proporcione una respuesta que dependerá de la temperatura a la que se encuentre la película, pero como se ha mencionado anteriormente, el sistema digital de razón de ventana permite medir varias razones de ventana en un solo experimento en lugar de una como se muestra en la figura 7.

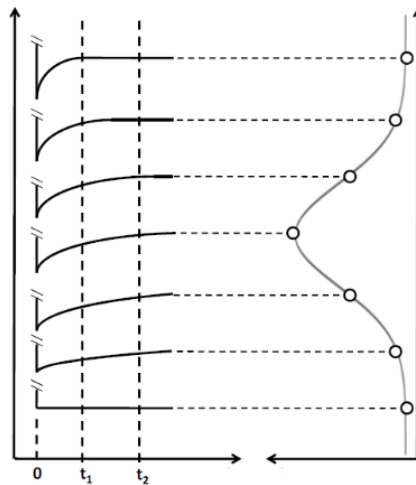


Figura 7 Razón de ventana para cinco transitorios a distintas temperaturas.

El experimento realizado tiene las siguientes características, un barrido de temperatura de 100 a 300 K, la cual fue controlada por el controlador de temperatura LakeShore por medio de una resistencia y nitrógeno líquido, además el experimento fue realizado al vacío de 1×10^{-4} mbar. La figura 8a muestra el resultado del circuito de razón de ventana múltiple para cinco 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. Los espectros que se encuentran en un experimento típico de DLTS antes de realizar el análisis proporcionan información de las posibles trampas que pueden ser caracterizadas. En la figura 8b se muestra de forma más clara los resultados obtenidos para la razón de ventana, $t_2 - t_1$. Se observa que existen por lo menos dos espectros en 150 y 250 K. Sin embargo, se puede descartar el pico en 250 K debido a su amplitud y su poca repetición con las demás razones.

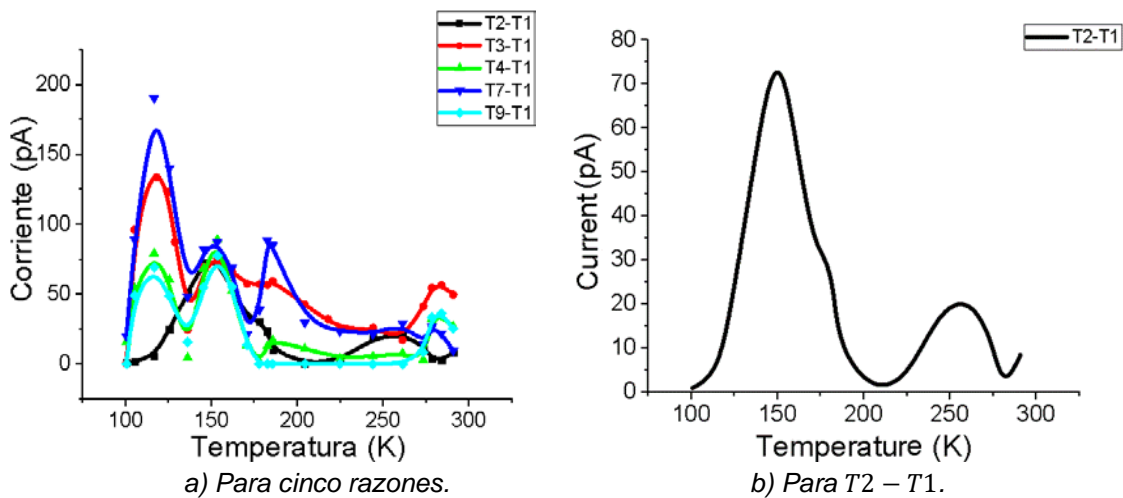


Figura 8 Espectros obtenidos.

En la figura 9a se muestran la razón de ventana obtenida para la diferencia de $t_5 - t_1$ del transitorio. Se puede observar que existe únicamente un espectro en aproximadamente 125 K que confirma la posibilidad de que exista una trampa debido a la repetición del experimento con éxito en 125 K. De igual manera todas las razones de ventanas obtenidas en el experimento aportan y confirman la existencia de trampas o defectos en el material caracterizado. En la figura 9b se muestra la razón de ventana $T_5 - T_1$, se puede observar claramente la existencia

de varios picos o espectros en esta figura. Sin embargo, si compara con la figura 6 no existen una superposición de espectros en todas las temperaturas, pero si existe en 125 y 150 K como en figura 9 por lo que podríamos descartar los picos existentes en 200 K de ser necesario o podríamos de igual manera suponer la existencia una trampa a esta temperatura.

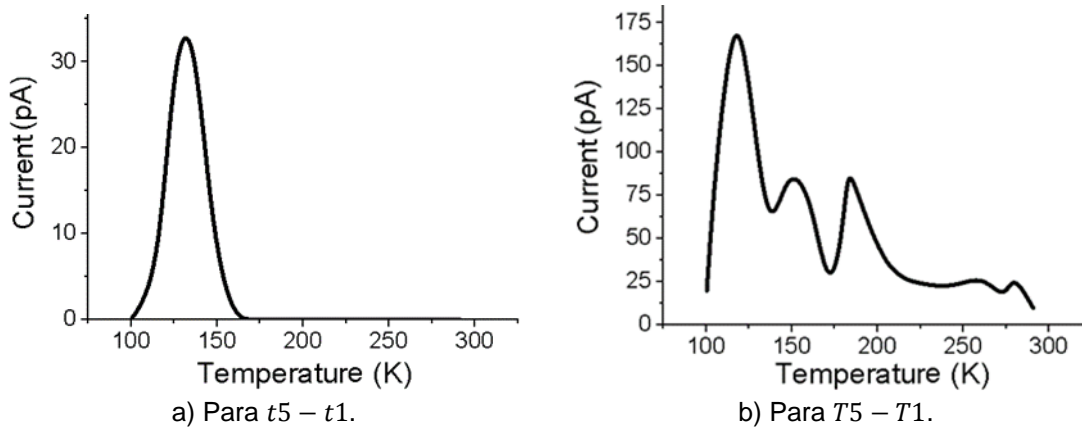


Figura 9 Espectros obtenidos.

4. Discusión

Un sistema analógico de razón de ventana múltiple tiene como desventaja utilizar una cantidad mayor de dispositivos electrónicos para un sistema de una sola razón ventana. Los resultados que se obtiene 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 permitiendo obtener un mayor número de espectros resultantes en un solo escaneo. El experimento ha sido realizado a temperaturas de 100 a 300 K, 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 430 nm (color azul), todo esto realizado a una presión de 1×10^{-4} mbar

y con la instrumentación necesaria para el control de temperatura y presión utilizando LabVIEW como interfaz de control.

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 más información que pueda ser utilizada para la mejora de la resolución y comprobación de la existencia de espectros. En figuras 8 y figura 9 se muestran algunos espectros a distintas temperaturas, estos espectros pueden o no pueden ser trampas. Para confirmar la existencia de espectros que posiblemente pudiera ser de algún defecto se toman en cuenta los resultados obtenidos en todas las razones de ventanas disponibles, la superposición de espectros confirma 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 manera significativa el experimento.

5. Conclusiones

Al usar un sistema digital de medición de transitorios, se mejora la resolución en el análisis de espectros usados en experimentos de espectroscopia de transitorios de niveles profundos (DLTS) gracias a la cantidad de muestreadores y retenedores que se pueden usar en un solo experimento reduciendo el costo y el tiempo para un experimento típico de DLTS. Además, se elimina el nivel de DC utilizando un bloque supresor de línea base y se utiliza un filtro digital para eliminar el ruido existente en la señal de lectura del convertidor analógico-digital. Con esto, se mejora relación señal a ruido (S/N) en comparación con un sistema de razón de ventana que utiliza muestreadores y retenedores analógicos debido al filtrado digital que permite realizar la placa C2000 Piccolo TSM320F28027 de Texas Instruments.

El filtrado se puede realizar sin complicaciones de cálculo en la placa C2000 Piccolo TSM320F28027. El filtro FIR permite eliminar cualquier tipo de retraso y señales de

alta frecuencia sin afectar la lectura, medición y proceso del computador o microcontrolador utilizado. Debido a este hecho, la placa C2000 puede usarse como un sistema digital de razón de ventana múltiple modificando la programación de Simulink en tiempo real y modificando la cantidad de razones de ser necesario.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Acosta Ortiz, S.E., Niveles profundos en semiconductores, *Revista Mexicana de Física*, 1988.
- [2] AvilaGarcia, A., Computerized digitizing technique for dlts measurements, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1994.
- [3] Avila García Alejandro, Computerized dlts system to characterize deep levels in semiconductors, *Revista Mexicana de Física*, 2002.
- [4] Holzlein K., Fast computer-controlled deep level transient spectroscopy system for versatile applications in semiconductors, *Review of Scientific Instruments*, 1986.
- [5] Komin, V., Identification of defect levels in cdte/cds solar cells using deep level transient spectroscopy, *Photovoltaic Specialists Conference*, 2002.
- [6] Losson E, New method of deep level transient spectroscopy analysis: a five emission rate method, *Materials Science and Engineering*, 1993.
- [7] Martinez J, A new sequential four-rate-window dlts system, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1987.
- [8] Micocci, G. P., Photoinduced current transient spectroscopy in inse single crystals, *Solar Energy Materials*, 1990.
- [9] Rancour, D. P., A sensitive technique for detecting low concentrations of deep level traps: Current source deep level transient spectroscopy, *Journal of Applied Physics*, 1995.
- [10] Reddy, C. V., A simple and inexpensive circuit for emission and capture deep level transient spectroscopy, *Review of Scientific Instruments*, 1996.
- [11] Reddy P, Development of computer controlled deep level transient spectroscopy system, *IETE Technical Review*, 1998.

- [12] Schmidt F., Low rate deep level transient spectroscopy - a powerful tool for defect characterization in wide bandgap semiconductors, *Solid-State Electronics*, 2014.
- [13] Weiss S., Deep level transient fourier spectroscopy (dlfts) a technique for the analysis of deep level properties, *Solid-State Electronics*, 1988.
- [14] Zhou J., Deep level transient spectroscopy system designed by labview, in *Advanced Information and Computer Technology in Engineering and Manufacturing, Environmental Engineering, Advanced Materials Research*, 2013.