

Técnica para medir transmitancia en capas dieléctricas en el rango de radiofrecuencia

Bautista Elivar N.*, Pérez Pérez E. G., Carbajal Pacheco J.
*Universidad Politécnica de Pachuca, Departamento de Ingeniería en Mecatrónica,
 Laboratorio de Óptica y Optomecatrónica
 Ex hacienda de Santa Bárbara, carretera a Pachuca-Cd. Sahagún Km. 14, Hidalgo, México.*
 (Recibido: 21 de septiembre de 2011; Aceptado: 27 de febrero de 2012)

En el presente trabajo estudiamos la transmitancia de señales en el rango de radiofrecuencia en vidrio óptico y en una capa vidrio-dieléctrico, empleando un arreglo en el que la señal portadora es un diodo laser rojo y la señal moduladora es una señal en el rango de radiofrecuencias. El presente trabajo tiene un impacto para medir transmitancia en materiales transparentes en el rango de radiofrecuencias.

Palabras clave: Transmitancia, radiofrecuencia, dieléctricos.

In this paper we study the transmittance of radiofrequency signals in optical glass and glass-dielectric layer, using an electro-optical arrangement in which the carrier signal is a red laser diode and the modulating signal is a signal in the range of radio-frequency generator functions, performing a frequency sweep in the range of radio waves. This work has an impact for measuring transmittance in transparent materials in the radio frequency signals.

Keywords: transmittance, radio frequency signals, glass-dielectric layer.

1. Introducción

Es conocido que los vidrios son materiales con propiedades físicas y químicas muy útiles. Son aislantes eléctricos, soportan bien el choque térmico, no se oxidan ni se corroen y presentan buenas propiedades mecánicas. Por ello, se utilizan vidrios en una gran cantidad de aplicaciones. Sin embargo, la propiedad más interesante que tienen estos materiales y que más se explota es su transparencia a la luz visible. Al momento de seleccionar un vidrio para determinado dispositivo es fundamental conocer sus propiedades ópticas, que generalmente se reportan solo para el rango ultravioleta, visible e infrarrojo. Como sabemos, la mayoría de los vidrios son transparentes en el visible y tienen un comportamiento diferente en la zona ultravioleta e infrarroja del espectro. Una de las medidas para caracterizar ópticamente un vidrio es la transmitancia. Este tipo de medidas se realizan con un espectrofotómetro como se muestra en la figura 1.

Para este arreglo, se utiliza como fuente de luz una lámpara que tenga una emisión intensa en todo el intervalo de longitudes de onda que se quiere analizar. La emisión de la lámpara pasa a través de un monocromador que selecciona la luz de una determinada longitud de onda. Esta luz monocromática se divide mediante un divisor de haz que separa en dos haces de luz con la misma intensidad (50% cada uno) aproximadamente. Uno de los haces pasa directamente al detector, mientras que el otro atraviesa la muestra antes de llegar al mismo. Posteriormente el detector compara la luz que llega a los dos sensores y calcula la cantidad de luz que ha transmitido la muestra. La operación se repite variando la longitud de onda de la luz que sale del monocromador con lo que se obtiene el espectro de absorción. Este tipo de sistemas tiene el inconveniente de que en ocasiones la lámpara no es muy

estable, y no funciona igual durante la toma de dos espectros, además de la lentitud, o la posibilidad de que accidentalmente puede variar la posición de algún elemento; adicionalmente, el sistema es muy sensible al ángulo de incidencia, si no es ortogonal el haz a la superficie óptica se introduce un efecto notable sobre la intensidad transmitida para cada longitud de onda, de hecho la forma del espectro transmitido es diferente dependiendo de la longitud de onda de la fuente. Por lo general, se tienen caracterizaciones de la transmitancia en materiales dieléctricos en el rango visible, infrarrojo y ultravioleta o cercanos a éstos. Sin embargo, nuestro trabajo consiste de medir transmitancia de señales en el rango de radiofrecuencia en dieléctricos, donde el espectro de radiofrecuencia esta situado entre 3 Hz y los 300 GHz [2].

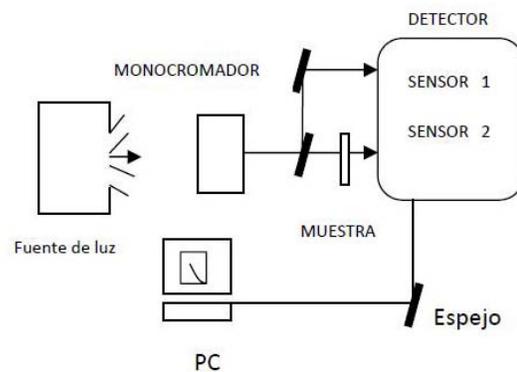


Figura 1. Espectrofotómetro.

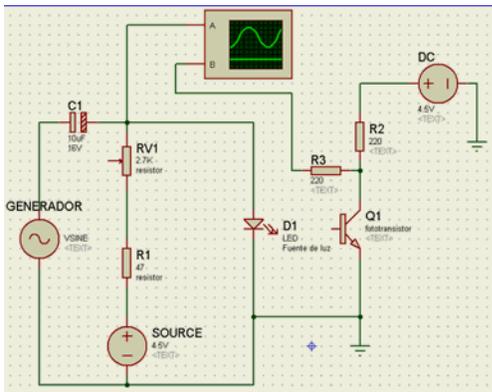
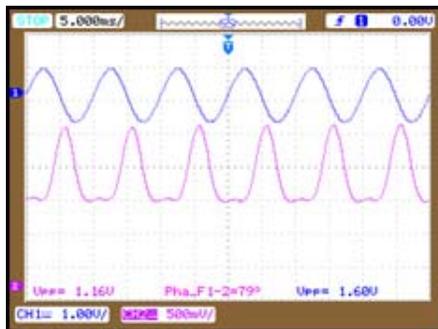


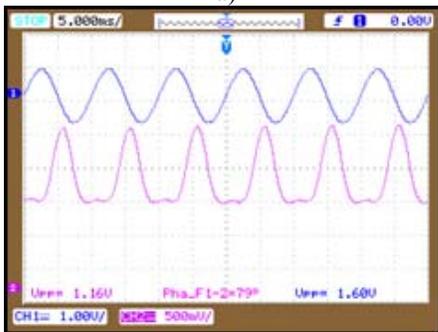
Figura 2. Circuito interconectado a un generador de funciones y un diodo laser.



Figura 3. Arreglo experimental empleado.



a)



b)

Figura 4. a) Desfasamiento entre la señal de entrada y salida en el arreglo con filtro gaussiano y b) con material dieléctrico.

Tabla1. Características del vidrio Soda Lime Float.

Índice de refracción (0.5893 μm, línea D de sodio)	1.523
Coefficiente de esfuerzo óptico	(psi) = 2.18 x Retardation (μm) / thickness (in)
Densidad	(2500 kg/m ³)
Coefficiente de esfuerzo térmico	0.62 MPa/°C
Conductividad térmica a 75^o F	0.937 W.m/m ² .°C
Calor específico a 75^o F	0.88 kJ/kg.°C
Coefficiente de expansión lineal a 75^o F	8.3 x 10 ⁻⁶ mm/mm.°C

El circuito empleado se muestra en la figura 2, consiste en un circuito emisor y un receptor. En el circuito emisor se interconecta un diodo laser (D1) a un generador de funciones marca *BK PRECISION 4040A*, con un rango 200 Hz a 20 MHz [1]. Para monitorear las señales de entrada y salida ambas se interconectan a un osciloscopio marca *Agilent Technologies DSO1022 A, 200 MHz 2GS/a*. Mediante el generador de funciones, introducimos señales variantes en el rango de radiofrecuencia. El circuito emisor en conjunto con el diodo láser convierte la señal eléctrica de entrada en una señal óptica, por lo que se tiene un circuito electro-óptico. En la literatura se puede encontrar que A. Chebbour *et al.* [3] reportó el empleo de un diodo laser para aplicarlo al control lineal de un motor para un interferómetro heterodino usando una frecuencia de modulación triangular. G. Beheim and K. Fritsch, reportan el empleo de un diodo laser para medir desplazamientos usando frecuencias de modulación [4]. T. Gharbi *et al.* [5], reportan el empleo de diodo laser modulado en frecuencia para medición de vibración a baja frecuencia. Yanong Ning *et al.* caracterizan dos diodos laser comerciales para usos interferométricos [8]. Anna Kozłowska *et al.* emplean diodos laser para arreglos en interferómetros de rejilla modulándolo a través de la variación de corriente [9]. P.Hariharan, describe el efecto de desplazamiento de fase de la longitud de onda del diodo laser al introducir variaciones de corriente [10].

2. Principio de funcionamiento

El diagrama del circuito emisor se presenta en la figura 2. Este circuito integra un capacitor de 10 uF a 16 V, una resistencia variable de 2 KΩ. Variando la resistencia en este rango se obtienen diferentes valores de corriente obteniendo diferentes intensidades de luz en un diodo laser marca *Sharp Modelo LTM080MD*, λ=632.8 nm, 3 mW. También se emplea una resistencia de 47 Ω que funciona como la resistencia mínima del circuito. Se utiliza una

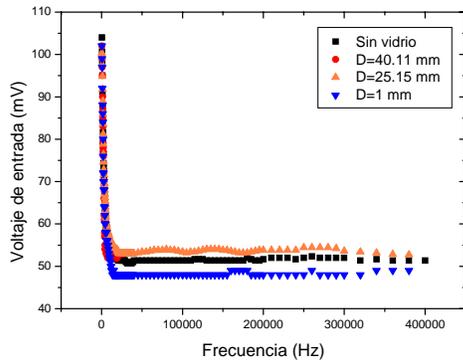


Figura 5. Grafica de frecuencia contra voltaje de entrada sin vidrio, para D=40.11mm, D=25.15 mm y D=1 mm

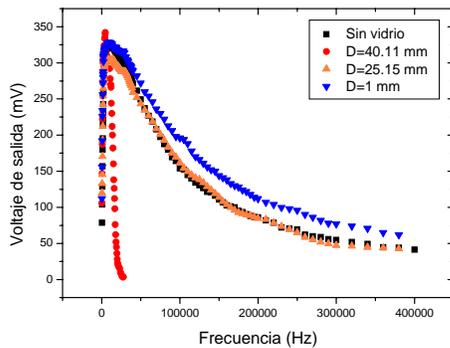


Figura 6. Frecuencia contra voltaje de salida sin vidrio, para D=40.11mm, D=25.15 mm y D=1 mm.

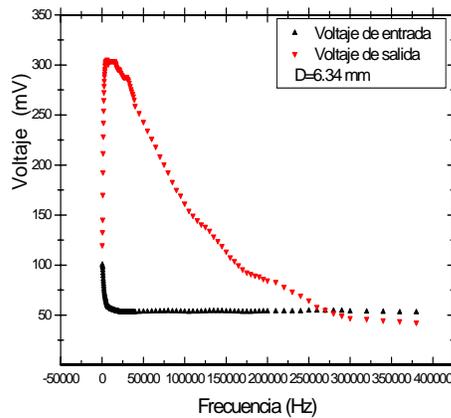


Figura 7. Grafico de frecuencia contra voltaje de entrada y salida en un vidrio de espesor de 6.34 mm.

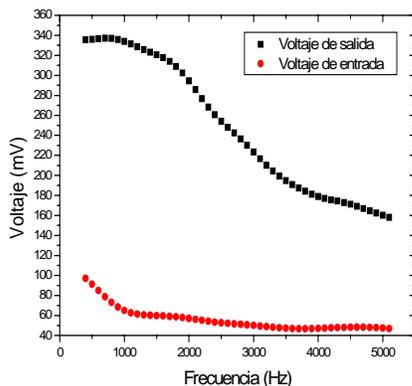


Figura 8. Grafico de frecuencia contra voltaje en vidrio de espesor de 6.34 mm con película dieléctrica de 1 mm.

Tabla 2 . Características del vidrio con deposición de una película dieléctrica.

Dimensiones del vidrio (mm)	12.5 x 17.5 x 6.34
Tolerancia dimensional (mm)	±0.381
Espesor del dieléctrico (mm)	1.00
Calidad de la superficie (λ)	4-6/inch
Calidad de la superficie	80-50
Sustrato	Soda Lime Float Glass
Reflexión (%)	50.00
Transmisión (%)	50.00
Recubrimiento	Superficie frontal : Diélectrico, ±5% R/T @ 550nm Superficie posterior: AR 1/4λ MgF ₂ @ 550nm

fuelle de voltaje marca *Agilent E3631A*, con el cual se suministra el voltaje requerido para el diodo láser. El circuito emisor se interconecta a las terminales de salida de un generador de funciones. Con el generador de funciones introducimos señales de radio frecuencia, en el rango de 400 a 400,000 Hz, con amplitud de 100 mV. La señal de radiofrecuencia es transportada por medio del haz laser del diodo. De esta manera la señal de radiofrecuencia es la señal moduladora y la del diodo laser es la señal portadora. El circuito receptor consiste en un fototransistor comercial común, el cual responde en el rango visible (400 nm a 700 nm), dos resistencias limitadoras de 220 Ω (R2 y R3), una fuente de voltaje de 4.5 V. Cuando el fototransistor recibe la señal luminosa emitida por el diodo, activa la base del fototransistor cerrando el lazo del circuito, circulando una corriente variable en función de la intensidad de la luz. A través de R3 obtenemos la señal de salida para medir la variación de corriente en el lazo, visualizada en el osciloscopio para grabar datos. La muestra transparente la colocamos entre el diodo laser y el fototransistor. Obtenemos datos al medir mediante el osciloscopio, el voltaje de salida a una frecuencia específica. Cuando el haz de luz atraviesa la muestra parte de la luz es absorbida y parte es transmitida. La luz transmitida es recibida por el fototransistor y medimos el voltaje de salida en el osciloscopio. De esta manera colectamos un conjunto de datos, que nos permite graficar frecuencia contra voltaje de salida o entrada. Es importante señalar que a diferencia del sistema tradicional para medir transmitancia, que mide intensidad de luz, nosotros medimos voltajes. Otro aspecto a remarcar, es que nuestro sistema es independiente del ángulo de incidencia, a diferencia del sistema tradicional cuya incidencia angular influye en los datos. El circuito se muestra en la figura 2 y el arreglo experimental en la figura 3.

3. Análisis de la señal

Llamemos señal portadora a la señal del láser rojo, y moduladora la señal de radiofrecuencia obtenida mediante el generador de funciones. Al introducir las dos señales al circuito emisor se obtiene una superposición de señales que se puede expresar como

$$E = E_0(1 + a \cos \omega_m t) \cos \omega_c t \quad (1)$$

donde $f(t) = E_0 \cos \omega_c t$ es la señal portadora de alta frecuencia o del láser. La señal moduladora de baja frecuencia obtenida mediante el generador de funciones la representamos como

$$h(t) = 1 + a \cos \omega_m t \quad (2)$$

donde, a es la amplitud de modulación. Normalmente se presentan cientos de ciclos de la portadora durante un ciclo de la señal moduladora. Para analizar el espectro de las dos señales que se suman mediante el circuito emisor, es necesario realizar la convolución de las dos señales.

4. Resultados experimentales

Empleando el osciloscopio, se muestra el desfase entre la señal de voltaje de entrada (línea amarilla) en el circuito emisor y la señal de voltaje de salida en el fototransistor del circuito receptor (línea verde) después de que el haz de luz láser ha pasado por la muestra de vidrio con dieléctrico, Figura 4. Se registra como voltaje de entrada, al voltaje que se proporciona de la fuente al circuito emisor, y el voltaje de salida es el voltaje medido en el circuito receptor.

Se realizaron mediciones del haz láser con diversas señales variables en frecuencia, generadas por un osciloscopio, en un rango de 400 a 400,000 Hz, para diferentes vidrios Soda

Lime Float Glass de la marca *Newport*, sus características se muestran en la Tabla 1. En cada gráfica, se midió el voltaje de salida pico a pico en milivolts. Se graficó frecuencia contra voltaje de entrada sin vidrio y con vidrios de espesor $D=40.11\text{mm}$, $D=25.15\text{ mm}$ y $D=1\text{ mm}$, figura 5. La figura 5, muestra que el voltaje de entrada tiene una amplitud máxima de 100 mV, y se mantiene constante en un rango entre los 53.8 mV y 54 mV para los 30,000 y los 400,000 Hz. En la figura 6, se muestra frecuencia contra voltaje de salida sin vidrio, para $D=40.11\text{mm}$, $D=25.15\text{ mm}$ y $D=1\text{ mm}$, se muestra que el voltaje de salida tiene un pico en 334 mV a una frecuencia de 10,500 Hz, teniendo un decaimiento de voltaje hasta 32 mV.

Se puede observar en la figura 6 que el valor máximo de voltaje de salida es de 305.6 mV para una frecuencia de 6200 Hz en un vidrio de 25.15 mm de espesor, comparando con un vidrio de espesor 1 mm que tiene un valor de

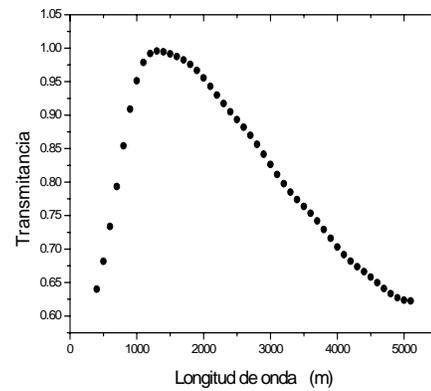


Figura 9. Transmitancia para el vidrio con deposición de película dieléctrica medida con la técnica propuesta.

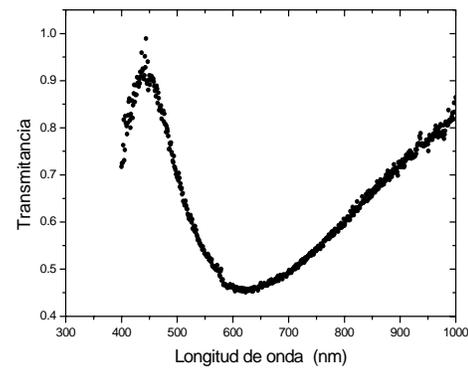


Figura 10. Transmitancia de vidrio con deposición de película dieléctrica medida con un espectrómetro comercial.

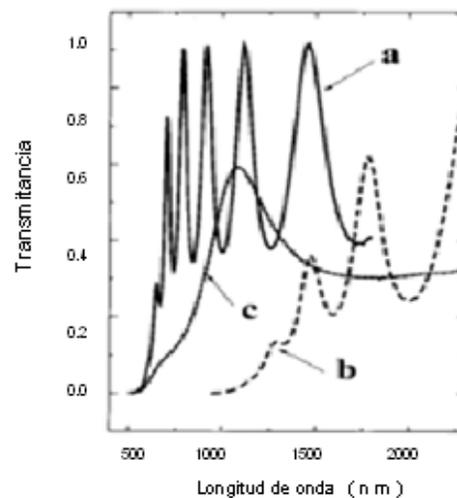


Figura 11. Típico espectro de transmisión en el visible e infrarrojo cercano, de películas dieléctricas depositados en sustratos transparentes, en (a) película transparente a $\lambda > 1000\text{ nm}$ y suficiente espesor para mostrar un patrón de franjas, en (b) película absorbente, en (c) película delgada que no muestra patrón de interferencia.

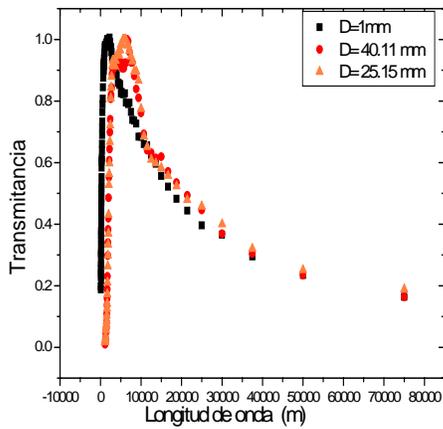


Figura 12. Transmitancia para diferentes espesores de 40.11 mm, 25.15 mm y 1 mm.

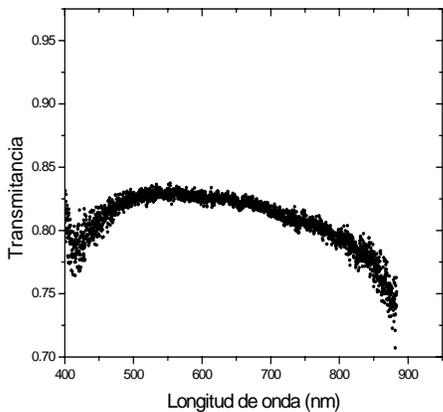


Figura 13. Transmitancia de vidrio de espesor 1 mm, registrada con un espectrómetro comercial.

Tabla 3. Características de la película dieléctrica MgF2.

Constante de red	$a=4.621\text{Å}; c=3.053\text{Å}$
Densidad	3.17g/cm^3
Rango de transparencia	$0.12 - 8.5\mu\text{m}$
Conductividad térmica	0.0075W/m/K
Coefficiente de expansion	$\alpha_a=13.7 \times 10^{-6}/\text{K}; \alpha_c=8.48 \times 10^{-6}/\text{K}$
Indíces de refracción	@405nm $n_o=1.3836,$ $n_e=1.3957$
Coefficiente de absorción	$40 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ a $2.7\mu\text{m}$

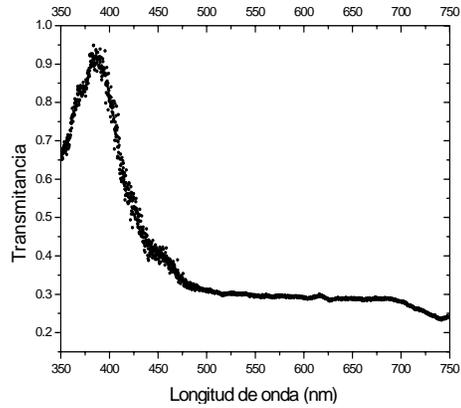


Figura 14. Transmitancia del vidrio con espesor de 40.11 mm, medida con un espectrofotómetro comercial.

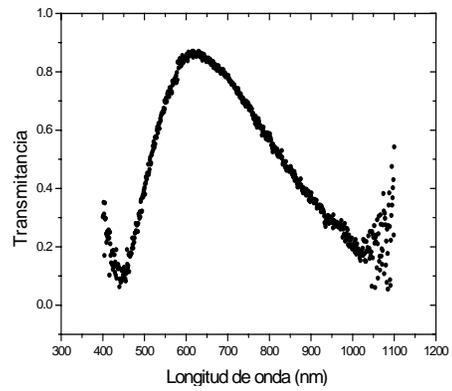


Figura 15. Transmitancia del vidrio con espesor de 25.11 mm, medida con un espectrofotómetro comercial.

voltaje de salida máximo en 328 mV para una frecuencia de 11000 Hz.

También se hace incidir el haz de laser sobre un vidrio de 6.34 mm de espesor que contiene una capa dielectrica de 1 mm de espesor, ver Tabla 2.

En la figura 7, se obtiene un valor maximo de voltaje de salida de 304 mV una frecuencia de 8500 Hz. A los 16500 Hz inicia el decaimiento de voltaje de salida de 301.6mV hasta 42.6mV en 380 KHz.

Para la misma placa de vidrio, pero con una pelicula dielectrica de 1 mm de espesor, figura 8, se muestra que a 400 Hz se tiene un voltaje de salida de 335.4 mV, a 700 Hz se tiene un voltaje de salida maximo de 337.12 mV y comienza el decaimiento de voltaje de salida en 1100 Hz con 331 mV.

Es conocido que la transmitancia se mide como el cociente entre la intensidad luminosa de salida y la intensidad luminosa de entrada, Ec. (4).

$$T = \frac{I_s}{I_e} \tag{4}$$

Para nuestra técnica de medición, la transmitancia se obtuvo mediante el cociente del voltaje del circuito emisor y el voltaje del circuito receptor

$$T = \frac{V_s}{V_e} \quad (5)$$

Todas las mediciones realizadas se trataron estadísticamente. La gráfica de transmitancia, con la técnica propuesta, para un vidrio con deposición de una capa dieléctrica se muestra en la figura 9.

En la figura 10, se muestra la transmitancia de vidrio en función de la longitud de onda, con deposición de película dieléctrica medida con un espectrofotómetro marca *Ocean Optics USB4000*, 5.1. Se utilizó un software *Spectra Suit* para *Windows XP* versión 5.1. La medición experimental se realizó en un barrido de 400 nm a 1100 nm de longitud de onda.

En la figura 11, se muestra un gráfico de tres típicos espectros de transmisión de películas delgadas isotrópicas y homogéneas en superficies plano paralelas y depositadas en sustratos transparentes. Nuestros experimentos corresponden a la curva (a), para películas delgadas que no producen un patrón de interferencia [7]. Para graficar la transmitancia del vidrio de diferentes espesores, se midió la transmitancia para diferentes espesores de 40.11 mm, 25.15 mm y 1 mm, con la técnica propuesta, figura 12.

Las gráficas de transmitancia obtenidas con la técnica propuesta corresponden a las curvas típicas que se muestran en la figura 11 (c), lo que representa un adecuado comportamiento de la técnica propuesta medida en radiofrecuencia.

Conclusiones

Se muestran resultados experimentales que muestran que la técnica propuesta es sensible para medir transmitancia de señales eléctricas en placas de vidrio de diferente espesor al compararlos con las curvas típicas de transmitancia en dieléctricos. Proponemos implementar esta técnica para medir transmitancia de señales de radiofrecuencia para sus aplicaciones en laboratorios de metrología y radiometría en materiales transparentes al incorporar un circuito electrónico con un diodo laser y un generador de funciones.

Referencias

- [1]. B.P. Lathi, Sistemas de comunicación, Ed. Mc. Graw Hill, pp 284. (1991)
- [2]. I. García Ruiz, Introducción a las mediciones en radiofrecuencias en laboratorios de calibración, encuentro nacional de metrología eléctrica (2007).
- [3]. Ahmed Chebbour, Tijani Gharbi, and Gilbert Tribillon, *Appl. Opt.* **40**, 5610 (2001).
- [4]. G. Beheim and K. Fritsch, *Electron Lett.*, **21**, 93 (1995).
- [5]. T. Gharbi, A. Courteville, and A.Chebbour, *Appl.Opt.* **36**, 8233 (1997).
- [6]. A. Chebbour, C. Gorecki, and G. Tribillon, *Opt. Commun.* **111**, 1 (1994).
- [7]. I. Chambouleyron, J.M. Martinez, A.C. Moretti, and M. Mulato, *Appl. Opt.* **36**, 8238 (1997).
- [8]. Yanong Ning, K.T.V. Grattan, B.T. Meggitt, and A. W. Palmer, *Appl. Opt.* **28**, 3657 (1989).
- [9]. Anna Kozłowska, Malgorzata Kujawinska, and Christophe Gorecki, *Appl. Opt.* **36**, 8116 (1997).
- [10]. P.Hariharan, *Appl. Opt.* **28**, 27 (1989).