

Caracterización de antenas fotoconductoras en los THz

Andres Felipe Escobar Mejía⁽¹⁾⁽²⁾, Juan Pablo Ciafardini⁽²⁾, Jose Alberto Bava⁽¹⁾⁽²⁾, Jorge O. Tocho⁽¹⁾

andrese@ciop.unlp.edu.ar, jpciafardini@fcaglp.unlp.edu.ar, bava@ciop.unlp.edu.ar, jorget@ciop.unlp.edu.ar

⁽¹⁾ Centro de Investigaciones Ópticas (CIOP, CONICET, CIC, UNLP, Cam. Centenario y 506 – Manuel B. Gonnet (1897))

⁽²⁾ Dpto. Electrotecnia, Fac. de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata, Calle 48 y 116 - La Plata (1900).

Abstract

This paper describes an experimental model for determining the characterization of a photoconductive antenna in the terahertz band, in order to detect images in this frequency band. The photoconductive antennas consist of a pair of metal electrodes deposited on a semiconductor substrate, e.g., GaAs grown at low temperature, which upon being excited by a ultra-short laser pulse and biased emit signals in the THz band. To characterize and determine its irradiation, a pyroelectric sensor mounted on a rotator with optical precision is used as detector. The results of the measurements and images determined with the experimental set up that is proposed in this work are shown.

I. INTRODUCCIÓN

La radiación en la región de terahertz queda situada entre la radiación de infrarrojo y la radiación de microondas en el espectro electromagnético, es decir, entre el campo de la electrónica y el campo de la fotónica.

La generación y detección de radiación electromagnética con frecuencias de algunos Terahertz (THz) utilizando una excitación impulsiva producida por pulsos de luz ultracortos (entre 100 fs y pocos ps). Estas oscilaciones de THz son ráfagas de un solo ciclo de radiación electromagnética de típicamente 1 ps de duración. Su densidad espectral abarca el rango entre 100 GHz hasta más de 4 THz.

Las muchas ventajas de esta técnica han despertado gran interés en el estudio de propiedades y fenómenos físicos de materiales en el rango de frecuencia de los THz. En las últimas décadas la evolución de los láseres de femtosegundos más compactos y accesibles han permitido el desarrollo de aplicaciones comerciales y de seguridad.

El motivo de detección de imágenes y caracterización de materiales originadas con la excitación con señales de THz generadas por una antena fotoconductoras utilizando excitación impulsiva con láseres ultracortos, nos condujo a la necesidad de caracterizar la emisión de dicha antena.

En este trabajo se describirá un montaje experimental conformado por una antena fotoconductoras como emisor y un sensor piroeléctrico montado sobre un rotador óptico como receptor con la finalidad de caracterizar el emisor.

II. ANTENA FOTOCONDUCTORA EMISORA Y DETECTOR PIROELÉCTRICO

A. Emisor fotoconductor o antena fotoconductoras.

La estructura de la antena fotoconductoras está conformada por un dipolo construido con dos placas metálicas de AuGeNi

impresas sobre un sustrato dieléctrico de GaAs [1], que a su vez se posee una lente dieléctrica de silicio semiesférica (Fig. 1), propuesto por (Rutledge) [2].

Estas antenas se han estudiado intensamente. La razón de su éxito es que las antenas que operan en la presencia de lentes dieléctricas han mejorado significativamente la radiación hacia adelante del haz (relación front to back), evitando al mismo tiempo problemas de onda de superficie que de otra manera dificultan aún más las antenas integradas.

Por otra parte, siempre que su forma es casi elíptica con la fuente en el foco inferior, y la excentricidad es inversamente con el índice de refracción, $e = 1/\sqrt{\epsilon_r}$, pueden proporcionar alta directividad.

La radiación de dipolo THz se puede analizar en dos formas, como campo de Terahertz en función del tiempo y como campo de Terahertz en función de la distribución espacial de la Antena, en ambos casos no se tiene en cuenta el aporte de la lente de Silicio como colimador de haz de Terahertz. [3]

La emisión de la antena fotoconductoras se produce cuando se excita que un pulso laser ultracorto (en el orden de 100 fs y una longitud de onda encima del bandgap) que incide en un semiconductor polarizado, crea una corriente transitoria de algunos picosegundos. Esta corriente dependiente del tiempo irradia y contiene componentes de frecuencia en el rango de frecuencia de los Terahertz.

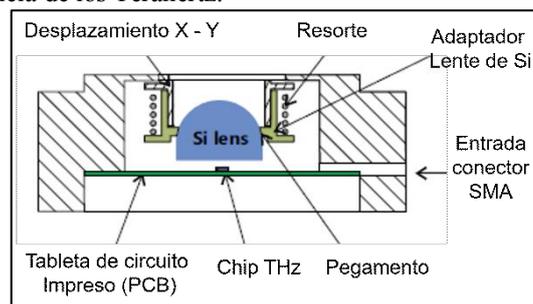


Fig. 1 –Esquema de antena fotoconductoras emisora.

La fuente de radiación de una antena fotoconductoras, puede ser modelada como una antena dipolo Hertziana, cuyo tamaño es más pequeño que la longitud de onda de la radiación emitida. Comparando el ancho del dipolo, $50 \mu\text{m}$, con la longitud de onda emitida, analizando los extremos del ancho de banda, tenemos que $0.1 \text{ THz} \rightarrow 3000 \mu\text{m}$ y $4 \text{ THz} \rightarrow 75 \mu\text{m}$, en relación con el ancho del dipolo obtenemos una relación de 0.016λ y 0.66λ respectivamente, verificando así que el

modelado como dipolo Hertziano es válida, además el tamaño del spot del láser w que foto-excita la antena es mucho más pequeño que la longitud de onda emitida, como se indica en la Tabla 1. Es de interés el campo de radiación a larga distancia de la fuente, es decir el campo lejano ($r \gg \lambda_{THz}$), como se ilustra en la Fig. 2.

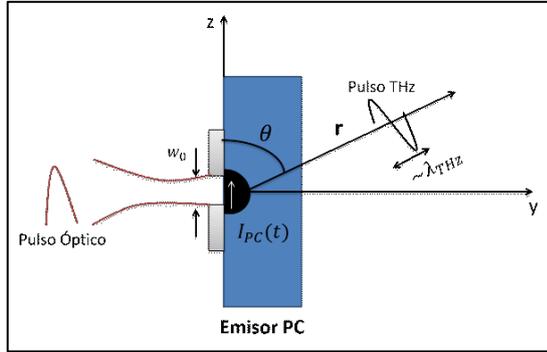


Fig. 2 – Modelado de la Antena Fotoconductor como dipolo Hertziano

La radiación Terahertz del dipolo en el espacio libre en función del tiempo puede ser expresado como: [3]

$$E_{THz}(t) = \frac{\mu_0 w \text{sen}\theta}{4\pi r} \frac{d}{dt_r} [I_{PC}(t_r)] \hat{\theta} \quad (1)$$

Donde $I_{PC}(t_r)$ es la fotocorriente generada en la fuente en el tiempo de retardo $t_r = t - r/c$.

Donde:

$$I_{PC}(t) = \int_0^\infty I_{opt}^0 e^{-(t-t')^2/\tau_p^2} e^{-t'/\tau_c} \mu_e E_{DC} [1 - e^{-t'/\tau_s}] dt' \quad (2)$$

$$= \mu_e E_{DC} I_{opt}^0 \int_0^\infty e^{-(t-t')^2/\tau_p^2 - t'/\tau_c} [1 - e^{-t'/\tau_s}] dt'$$

TABLA I – Parámetros y valores numéricos.

Parámetro	Definición	Valor numérico
μ_0	Permeabilidad del vacío	$4\pi \cdot 10^{-7}$
μ_e	Movilidad electrónica en el Arseniuro de Galio	$9200 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
τ_s	Tiempo de relajación del momentum dipolar	0.03 ps
τ_c	Tiempo de vida de los portadores	0.5 ps
τ_p	Duración temporal del pulso óptico	$2\sqrt{\ln(2)}\tau_p = 0.08 \text{ ps}$
E_{DC}	Campo eléctrico aplicado	$E_{DC} = V_{DC}/A$
V_{DC}	Voltaje DC aplicado	$V_{DC} = \{0, 10, \dots, 50\} \text{ V}$
A	Distancia entre electrodos de la Antena	$A = \{10, 20, \dots, 50\} \mu\text{m}$
w	Tamaño del spot del haz	$10 \mu\text{m}$
r	Distancia de medición	$r = \{10, 20, \dots, 100\} \text{ cm}$
I_{opt}	Potencia del pulso gaussiano incidente	10^{12} W

La simulación del campo E_{THz} en función de la distancia se puede observar en la Fig. 3 la distancia de medida desde la antena.

A medida que nos alejamos de la antena generadora la amplitud campo E_{THz} va decayendo en un factor de $1/r$ como se muestra en la Fig. 3, ajustándose la curva con un factor de correlación de $R = 1$.

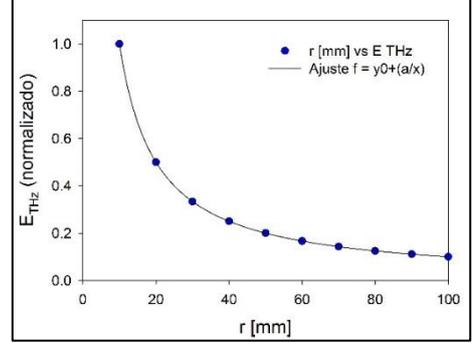


Fig. 3 - Simulación de la amplitud del campo E_{THz} con la distancia.

Los parámetros y sus respectivos valores numéricos que se utilizaron durante el cálculo, para los dos modelos, se muestran en la Tabla 1 a continuación:

La antena fotoconductor emisora (Ekspla, THz Emitter) [1] posee una potencia radiada de emisión en los THz que excede los $10 \mu\text{W}$ con un bombeo de láser de 30mW y 150 fs de duración del pulso (Figura 4 a)).

B. Detector Piroeléctrico

El detector es un sensor piroeléctrico, esta es la propiedad que presentan ciertos materiales que sometidos a cambios de temperatura experimentan cambios en la polarización eléctrica, por lo que dichos cambios de temperatura inducen un campo eléctrico en el interior del material, causado por movimiento de cargas positivas y negativas en los extremos opuestos de la superficie (Fig. 4) [3].

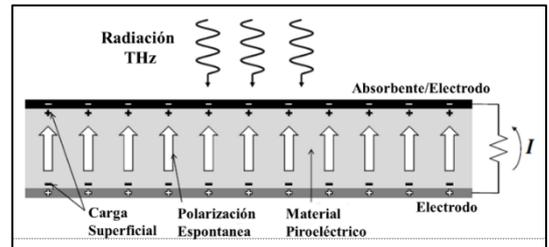


Fig. 4 –Esquema de un sensor piroeléctrico.

Luego aparecerán cargas superficiales en una dirección determinada cuando el material piroeléctrico experimenta un cambio de temperatura. [5]

$$\Delta P = \vec{p} \cdot \Delta T \quad (6)$$

Donde P es el vector de polarización y p es el coeficiente piroeléctrico y T es la temperatura.

El sensor por efecto piroeléctrico que se utiliza (Fig. 5 b)) es el THZ-I-BNC de Gentec-EO [5], pudiendo medir por debajo de 50 nW con una resolución de 1 nW en un rango de frecuencia entre los $0,1$ y 30 THz (3000 a 10 mm)

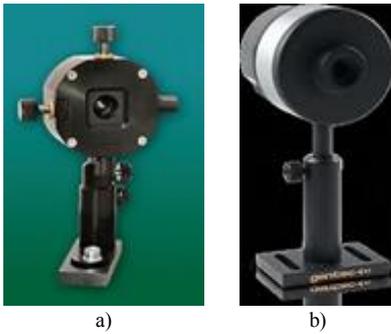


Fig. 5 – a) Antena fotoconductor y b) sensor piroeléctrico.

III. Montaje Experimental

El objetivo del ensayo es determinar la forma de emisión de la antena fotoconductor con la finalidad de conocer su diagrama de emisión.

En la Fig. 6 se observa el ensayo implementado. La antena fotoconductor (Fig. 5 a)) es excitada a través de un haz de laser proveniente del oscilador Mai Tai (Spectra Physics) de 120 fs, 80 MHz y 800 nm de longitud de onda, entre los electrodos, los cuales a su vez se los polariza con una tensión de continua conmutada electrónicamente de decenas de voltios, logrando con esto generar emisiones en los terahertz.

En frente de la antena se coloca el detector piroeléctrico (Fig. 5 b)), permitiendo así registrar la señal emitida por la antena de dos formas diferentes, la primera, llevando la señal del detector a un preamplificador, filtrarla y amplificarla (100 veces, en este caso) y visualizarla en un osciloscopio digital; la segunda forma es llevar directamente la señal a un amplificador Lock-In y programando el envío de datos por vía serial (Fig. 6).

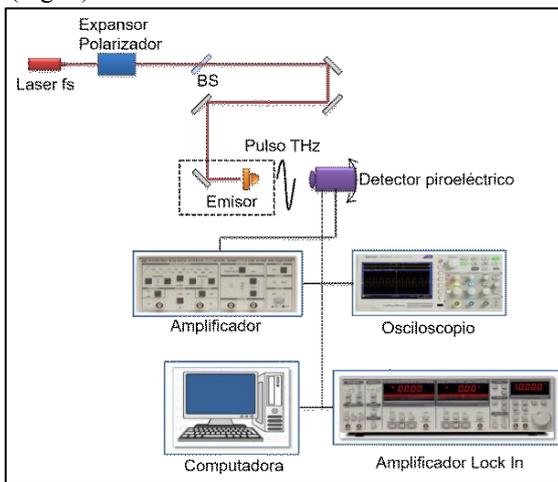


Fig. 6 –Esquema del ensayo experimental.

El sensor piroeléctrico está montado sobre un rotador óptico (Fig. 7) que permite desplazar en forma circular al sensor respecto a la antena fotoconductor con el objetivo de detectar las emisiones en diferentes ángulos de la antena fotoconductor en la banda de los terahertz.



Fig. 7– Montaje del sensor piroeléctrico en el rotador.

El rotador posee una precisión en la determinación angular de 5 minutos de arco.

La señal generada es conmutada a través de la alimentación de tensión continua de la antena fotoconductor, utilizando la salida de onda cuadrada del Lock-In. Esta conmutación a través de una señal cuadrada permite realizar la detección sincrónica a través del Lock-In, sin la necesidad de conmutadores (chopper) mecánicos que son muy inestables en el rango de frecuencias necesarias para la óptima detección.

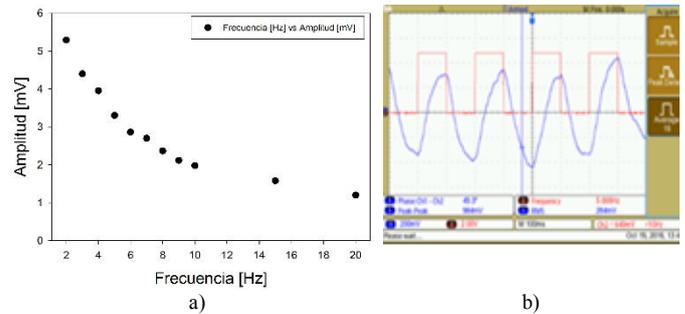


Fig. 8 – a) Diagrama de amplitud detectada en función de la frecuencia de conmutación y b) señales de conmutación y de los THz detectada con osciloscopio

En la Fig. 8 a) se muestra el comportamiento de la amplitud de la señal variando la frecuencia de modulación de la fuente de conmutación entre 2 Hz hasta 20 Hz, notándose que el detector piroeléctrico tiene mayor sensibilidad para frecuencias bajas, siendo la frecuencia recomendada por el fabricante es de 5 Hz.

En la figura 8 b) se observa la señal detectada con el osciloscopio, donde la traza roja es la señal de conmutación generada por el Lock-In y mientras que también se observa superpuesta la señal de los THz detectada por el sensor piroeléctrico (traza azul).

IV. RESULTADOS

La característica de emisión de la antena fotoconductor se determinó moviendo angularmente el detector piroeléctrico y detectando la señal sincrónicamente en amplitud a través de Lock-In. En la Fig. 5 se muestra el diagrama esquemático del montaje, mientras en la Fig. 8 se observa el ensayo experimental montado en el laboratorio.

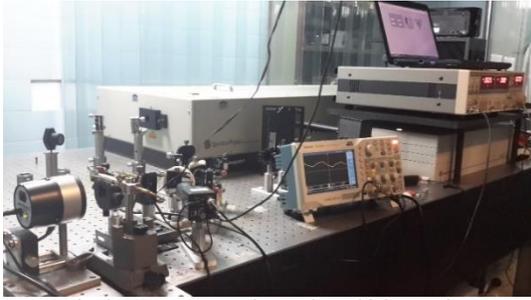
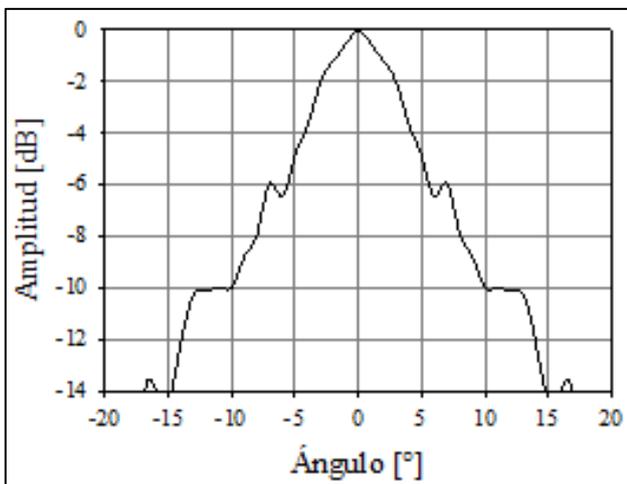
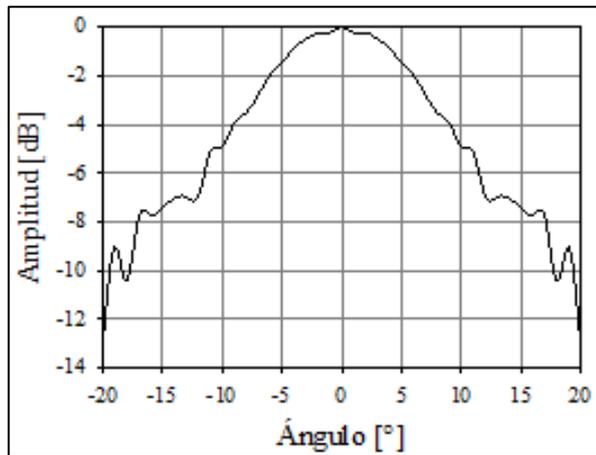


Fig. 9 – Ensayo experimental en el laboratorio.

La señal detectada es la emisión de la antena fotoconductor en diferentes ángulos en el rango de frecuencias limitado por la respuesta del emisor y del detector utilizado. Esto indica la emisión determinada en los diagramas observados en las Fig. 10 a) y b) corresponden a un ancho de banda entre 0,1 y 4 THz.



a)



b)

Fig. 10 Diagrama de radiación de campo eléctrico en campo lejano a) n posición horizontal y b) posición vertical.

Se puede rescatar que el ancho de haz para la posición horizontal es 7.1°, mientras que para la posición vertical de la antena fotoconductor es de 14 °.

V. CONCLUSIONES

Se presenta un montaje experimental para realizar mediciones incoherentes de radiación Terahertz empleando un

detector térmico como lo es el sensor piroeléctrico. Al no tener que estar sincronizado con el láser, que sería el caso de la detección coherente mediante una antena fotoconductor detectora, permite mayor versatilidad de los montajes experimentales, permitiendo así rotar el detector para tomar el diagrama de irradiación de la antena.

Conocer las características de la emisión de la antena nos da una idea de cómo implementar un sistema de imágenes con radiación THz, ya que dependiendo del ancho de haz generado por la antena tendremos la resolución del sistema. Además conociendo que la amplitud detectada varía con la distancia, se puede optimizar tanto el sistema, como el tamaño de las muestras a estudiar, para que la amplitud sea la máxima posible.

De los diagramas obtenidos se concluye que la lente está diseñada para colimar el haz emitido preferentemente en la posición horizontal, ya que como se observa en la figura, el ancho del haz es la mitad del obtenido para la posición vertical.

Referencias

- [1] C. EKSPALA, "EKSPALA THz Emitter and Detector." Vilnius, Lituania.
- [2] D. B. Rutledge and M. S. Muha, "Imaging Antenna Arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 30, no. 4, pp. 535–540, 1982.
- [3] Y. S. Lee, *Principles of terahertz science and technology*. 2009.
- [4] A. F. Escobar Mejia and J. O. Tocho, "Generation and Detection of Terahertz Waves by Photoconductive Antennas," in *Laser Science 2014*, 2014, vol. JTu3A.1.
- [5] C. Gentec-eo, "THZ-I-BNC Pyroelectric Detector." .