



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA-INSTRUMENTACIÓN**

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA Sonda CÓNICA METÁLICA HUECA
PARA IMAGENOLÓGÍA TERAHERTZ DE CAMPO CERCANO**

**TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:
YESENIA ANGÉLICA GARCÍA JOMASO**

**TUTOR PRINCIPAL:
DR. NASER QURESHI, CCADET, UNAM**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., JUNIO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. AUGUSTO GARCÍA VALENZUELA

Secretario: DR. JESÚS GARDUÑO MEJÍA

1er. Vocal: DR. NASER QURESHI

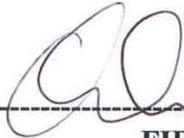
2do. Vocal: DRA. LAURA OROPEZA RAMOS

3er. Vocal: DR. CARLOS GERARDO TREVIÑO PALACIOS

Lugar donde se realizó la tesis: CCADET, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. NASER QURESHI



FIRMA

La cosa más bella que podemos experimentar es lo misterioso. Es la fuente de toda verdad y ciencia. Aquél para quien esa emoción es ajena, aquél que ya no puede maravillarse y extasiarse ante el miedo, vale tanto como un muerto: sus ojos están cerrados... Saber que lo impenetrable para nosotros existe realmente, manifestándose como la prudencia máxima y la belleza más radiante que nuestras torpes capacidades pueden comprender tan solo en sus formas más primitivas... este conocimiento, este sentimiento se encuentra en el centro de la verdadera religiosidad.

A.E. Lo que creo (1930).

A mis padres, Lucía y Alejo†.

Agradecimientos

Sin duda, el mayor crédito es para mis padres. Siempre estaré agradecida por su apoyo durante la mayor parte de mi formación académica. Por su gran ejemplo de humildad, amor y trabajo. A todos mis hermanos (Lázaro, Saúl, Josefina, Liborio, Rosy, Loly, Gaudencio y Alejo), les agradezco infinitamente el apoyo y cariño que siempre me han brindado.

A Octavio y a mi pequeña Ollín, por ser una gran motivación y por crecer conmigo cada día. Con ustedes cada amanecer es una nueva aventura. Gracias por ser mis fieles cómplices de vida.

Al Dr. Naser por aceptarme como su estudiante, por compartir su pasión por la ciencia conmigo y por todo el apoyo durante esta etapa.

Al inagotable doctor Gaudencio Paz y su fiel amigo Joel Pérez, por compartir su trabajo y experiencia en el laboratorio con tanta paciencia y siempre con la mejor disposición de ayudar.

A mis sinodales, por su disposición para la revisión de este trabajo y por las buenas sugerencias realizadas.

Al Dr. Jesús Garduño, por abrirme las puertas de su laboratorio de pulsos ultracortos y por su disposición de apoyo.

Al Dr. Carlos Treviño y a la Dra. Laura Oropeza por su apoyo para la fabricación de las sondas al inicio de este trabajo.

A Itz y Anays, por estar siempre compartiendo su experiencia conmigo, por brindarme su confianza y por ser mi apoyo en todo momento.

A Guillermo (Momo), por sus buenos comentarios, su buen humor y por haber sido mi guía durante tantas horas de viaje a ICTP.

A mis compañeros de generación, a mis compañeros del laboratorio de pulsos ultracortos y a todos los profesores que compartieron sus conocimientos conmigo.

A CCADET-UNAM por haberme recibido.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de estudios de posgrado.

Agradezco el apoyo del proyecto PAPIIT IN106316 y al proyecto Fronteras de la ciencia 344 por el financiamiento para la adquisición de material.

Índice general

1. Introducción	
1.1 . Introducción a la banda terahertz.....	(4)
1.1.1. Fuentes y detectores terahertz.....	(5)
1.1.2. Aplicaciones.....	(9)
2. Antecedentes de microscopía THz de campo cercano	
2.1. Uso del sistema de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo.....	(15)
2.2. Sondas cónicas.....	(20)
2.3. Formas de caracterizar el spot terahertz de banda ancha.....	(24)
3. Diseño y fabricación de sondas cónicas	
3.1. Simulación electromagnética de sondas cónicas.....	(26)
3.2. Fabricación de sondas cónicas.....	(32)
4. Desarrollo instrumental y resultados	
4.1. Sistema de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo.....	(38)
4.2. Caracterización de lentes de Si para coleccionar radiación terahertz.....	(39)
4.3. Detección de radiación THz confinada en las aperturas de las sondas cónicas.....	(44)
4.4. Caracterización del spot THz usando el método del filo de la navaja.....	(48)
4.4.1. Prueba de la navaja a la sonda cónica de 90°.....	(51)
4.4.2. Prueba de la navaja a la sonda cónica de 30°.....	(57)
5. Conclusiones	

Apéndice A. Hoja de datos de la antena TERA8-1

Apéndice B. Hoja de datos de la lente de enfoque FSL-12

Bibliografía

Capítulo 1

Introducción

La imagenología terahertz ha atraído la atención de diversos grupos científicos en los últimos años debido a sus potenciales aplicaciones en medicina, seguridad, control de calidad en dispositivos semiconductores, etc. Hasta hoy, los sistemas desarrollados para imagenología terahertz consisten en dos partes básicas [1]: generación de radiación terahertz y detección a través de ondas. En este trabajo se plantea la aplicación de un sistema de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo (THz-TDS) para la generación y detección de esta radiación utilizando antenas fotoconductoras. Se propone el uso de sondas cónicas con aperturas menores a la longitud de onda de 1 THz ($300\ \mu\text{m}$) y lentes de enfoque comerciales de silicio para que el sistema THz-TDS funcione como una de microscopía terahertz de campo cercano. La función de las sondas es concentrar la radiación electromagnética proveniente de la fuente de radiación e interactuar con una muestra en estudio.

Se describe el modelado de la sonda en el software *COMSOL Multiphysics* el cual, por medio del método de elemento finito realiza cálculos complejos que resuelven las ecuaciones diferenciales para describir el comportamiento electromagnético de la sonda. El punto de interés de las simulaciones es verificar la viabilidad del funcionamiento de esta, definiendo así, óptimas características geométricas que permitan concentrar la radiación terahertz en la apertura. Por otra parte, se detalla la fabricación usando distintos métodos.

Se presenta también la caracterización del sistema THz-TDS haciendo uso de distintas lentes comerciales de silicio con la finalidad de optimizar la intensidad del pulso terahertz de banda ancha en el dominio del tiempo. También, se muestra la caracterización del *spot* terahertz que emerge de la apertura de la sonda cónica mediante el método del filo de la navaja. A partir de este análisis es posible conocer el diámetro que tiene este a diferentes frecuencias terahertz ($0.1-3$) a partir del ancho a media altura (FWHM: full-width at half-maximum) del perfil gaussiano de la intensidad THz. Este valor se asocia a la resolución espacial del sistema de microscopía, siendo este apto para hacer imagenología hiperespectral.

1.1. Introducción a la banda terahertz

La radiación terahertz (THz) o infrarrojo lejano, es una estrecha banda de frecuencias dentro del espectro electromagnético ubicada entre 100 GHz y 30 THz (Figura 1.1). Esta banda fue estudiada en un principio en campos como la astronomía y la ciencia analítica. Sin embargo, el avance tecnológico en fotónica y nanotecnología ha incentivado las aplicaciones en diversos campos tales como: tecnologías de la información y comunicación; biología y ciencias médicas; evaluación no destructiva; seguridad nacional, control de calidad de alimentos y productos de agricultura; monitoreo del ambiente global; computación ultrarrápida, entre otras [2]. La motivación principal para trabajar en este rango de frecuencias es la gran cantidad de interacciones complejas radiación-materia. Esto significa, que la radiación terahertz interactúa con las resonancias vibracionales y rotacionales de una gran cantidad de moléculas haciendo posible la existencia de “huellas digitales” características en cuanto a absorción de estos grupos moleculares [3]. Además, esta radiación puede pasar a través de papel, tela, plástico, semiconductores incluso algunas paredes, haciendo posible su aplicación en sistemas de seguridad conocidos como T-Ray.

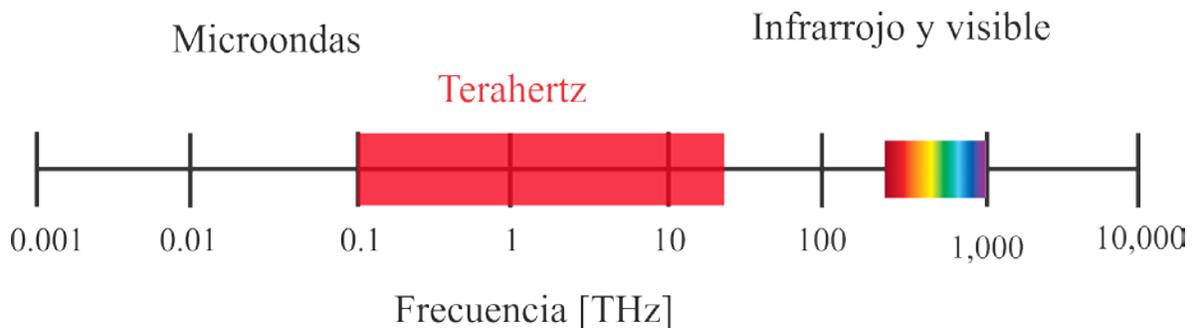


Figura 1.1. Diagrama esquemático que muestra la banda terahertz en el espectro electromagnético.

La dificultad para generar y detectar esta radiación ubicada por su frecuencia entre la electrónica y la óptica fue un impedimento para su estudio durante mucho tiempo. Considerando frecuencias menores a 100 GHz ($\lambda = 3\text{ mm}$), los componentes electrónicos pueden adquirirse con facilidad sin embargo, para estas frecuencias no son funcionales debido a la limitante velocidad de saturación del electrón. Para frecuencias mayores a 10 THz ($\lambda = 30\text{ }\mu\text{m}$) es posible tener fuentes térmicas para generar radiación en el infrarrojo medio y visible [1], sin embargo para frecuencias menores a esta, no es posible utilizar estos dispositivos ya que de acuerdo a la mecánica cuántica (la energía de un fotón es $h\nu$, donde h es la constante de Planck $\times 10^{-34}\text{ Js}$ y ν la frecuencia), la energía de los fotones correspondientes a frecuencias menores a 10 THz es muy cercana al ruido térmico. Así el régimen terahertz es un puente natural entre la mecánica cuántica, la teoría electromagnética clásica y sus interacciones con los materiales. Por lo tanto, muchos

1.1.1. FUENTES Y DETECTORES TERAHERTZ

avances tecnológicos para trabajar en este *gap* de frecuencias se han originado de la fusión de estos dos distintos puntos de vista tomando ideas y conceptos ambos [1].

Las principales aplicaciones de la tecnología terahertz tienen dos enfoques definidos: sensado y comunicaciones. Destacan, dos métodos avanzados para el análisis de materiales, que son la espectroscopía en el dominio del tiempo (TDS) y la espectroscopía en el dominio de la frecuencia.

1.1.1. Fuentes y detectores terahertz

En la década de 1960 y cerca de 1970, los desafíos para el uso de esta banda de frecuencias fueron muy evidentes. En ese tiempo, la más intensa fuente de radiación terahertz fue reportada por primera vez por H. A. Gerbbie et al. , que fue un láser de HCN (ácido cianhídrico) que operó a la frecuencia de 1.12 THz [4]. El espectrómetro para infrarrojo lejano (FTIR por sus siglas en inglés) y los métodos de cómputo para obtener la transformada de Fourier fueron las herramientas útiles para análisis de datos experimentales a estas frecuencias. Para la detección se utilizaron métodos incluyendo detectores piroeléctricos, bolómetros y algunos tipos de diodos detectores [1].

Alrededor de 1970, la disponibilidad de pulsos ópticos ultracortos generados a partir de láseres pulsados de femtosegundos, y el desarrollo de tecnologías en semiconductores incluyendo los interruptores fotoconductivos (antenas fotoconductoras) abrieron la puerta al campo de la optoelectrónica terahertz [5][6][7].

En la actualidad, sobresalen en la literatura tres métodos para el desarrollo de fuentes terahertz. El primero de ellos, es la generación óptica de terahertz la cual ha esparcido las investigaciones en este ámbito en las décadas pasadas. El siguiente método es el desarrollo de THz-QCL (láser de cascada cuántica- THz) y el tercer método es a partir del uso de dispositivos electrónicos de estado sólido. La generación óptica de radiación terahertz usando láseres pulsados o continuos tiene dos categorías, en la primera de ellas se genera una fotocorriente ultrarrápida en un interruptor fotoconductor o semiconductores usando campo eléctrico para la aceleración de cargas. La segunda categoría es la generación de ondas terahertz por efecto de óptica no lineal como rectificación óptica (generada por excitación láser de femtosegundos), generación de diferencia de frecuencia (DFG por sus siglas en inglés), u oscilación óptica paramétrica.

La Tabla de la Figura 1.2 muestra las fuentes terahertz desarrolladas hasta el momento, las cuales han sido resultado de los avances científicos y tecnológicos para este *gap* de frecuencias en el espectro electromagnético. Dentro de la misma tabla se muestran las características más importantes de las fuentes como su clasificación, su frecuencia de trabajo y temperatura de operación, la potencia típica de salida, el año en que se dieron a

1.1.1. FUENTES Y DETECTORES TERAHERTZ

conocer y el modelo comercial. Destacan las fuentes terahertz más potentes que son a partir de láseres de electrones libres que tienen un máximo de potencia de salida de 5 kW en un rango de frecuencias de (0.1-4.8) THz y los láseres terahertz que tienen potencias promedio de salida de 20 W y 500 W y otros, con un máximo de potencia de 500 kW a frecuencias en el rango de (1.28 a 4.8) THz.

Por otra parte, al tener esta gran variedad de fuentes terahertz existe también gran cantidad de detectores para diferentes frecuencias mostrados en la tabla de la Figura 1.3. Con base en las características de las fuentes es posible elegir dentro de esta gran gama de detectores el que se ajuste al funcionamiento de estas fuentes principalmente en cuanto a frecuencia de operación y potencia.

Figura 1.2. Fuentes terahertz existentes [8].

Source	Classification	Frequency (THz)	Operation temp	Typical power output	Year	Commercial	Ref.
Mercury	Thermal	Broadband	Room	~10s μ Ws	1950s	Bruker, Sciencetch	
SiC global	Thermal	Broadband	Room	μ Ws	<1950s		
Cosmic background	Thermal	Broadband	Room				
BWO	Vacuum electronic	0.65	Room	50 mW ^b	2008	No	[65]
		0.1	Room	1.56 mW ^a	2013	No	
		0.2	Room	10 kW ^b	2015	No	
Free electron lasers	Vacuum electronic	0.1–4.8	Room	4.56 mW ^a			
		1.28–2.73		20 W ^b			
				30 mW ^a			
Gunn diodes	Solid state electronic	0.1	Room	5 kW ^b	2001	No	[66]
		0.3	Room	20 W ^a	2007	No	
				500 kW ^b			
Frequency multiplication devices	Solid state electronic	0.7–1.1	Room	500 W ^a			
		0.1–0.17	Room	50 μ W ^a	2007	No	[67]
Gas	Lasers	0.5–5 (discrete)	Room	Up to 150 mW	1970s	Edinburgh Instruments, Coherent	[69]
Quantum cascade	Lasers	4.4	8 K	23 μ W ^a	2014	No	[68]
		4.4	10 K	0.625 mW ^a	2016	Virginia Diodes	[68]
		3.4	10 K	16 mW ^a	2016		
		3.4	77 K				
		3	178 K				
		3.15	129 K				
		3	225 K				
Quantum cascade	Lasers	4.4	8 K	2 mW ^b	2002	No	[70]
		4.4	10 K	0.02 mW ^a	2006	No	[71]
		3.4	10 K	139 mW ^a CW	2014	No	[72]
		3.4	77 K	248 mW ^a (pulsed)	2014	No	[73]
		3	178 K	1 W ^b	2008	No	[74]
		3.15	129 K	20 mW ^a	2014	No	
		3	225 K	420 mW ^b	2009	No	
		8.4 mW ^a					
		20 μ W ^b					

1.1.1. FUENTES Y DETECTORES TERAHERTZ

Difference frequency generation using 2 MIR QCLs	Lasers	5	Room	100 nW ^a	2007	No	[75]
		3.5	Room	2.5 μW ^a CW 10 μWs pulsed ^b 10 nW ⁺ 80 nW ^b 1 nW ⁺ 1.9 mW ^b (predict maximum) 100 mW) 200 nW ⁺			

Figura 1.3. Detectores terahertz existentes [8].

Table 2. Terahertz detectors.

Detector	Freq. (THz)	Rv (V W ⁻¹)	NEP	Frame rate/ response time	FPA size	Year	Commercial	Ref.
Schottky barrier diode (SBD)	0.11–0.17	2000	13.2 ^d	42 ns ^b	Single detector	2007	VDI	
SBD	0.9–1.4	100	113.7 ^d	25 ns ^b				
SBD	1.1–1.7	100	113.7 ^d	25 ns ^b				
SBD	0.86	273	42d	–1 μs ^b	Single detector	2013	—	[76]
SBD	0.28	336	290 pW ^c		4 × 4			
Photoconductive	0.1–4.0	—	—	—	Single detector	2011 1985	EKSPLA	
Folded dipole antenna	0.6–1.0	800 (1.027 THz)	66 ^d (1.027 THz)	—	Single detector	2011	STM	
FET FPA	0.7–1.1	115 × 103 (0.856 THz)	12 nW ^c (0.856 THz)	25 Hz ^a	32 × 32	2012	STM	
VOx micro-bolometer	2.5	72 × 103 (2 μA)	37 ^d (15 Hz mod.)	68 ms ^b	Single detector	2013	—	[77]
Bolometer	2.5	5620 (100 nA)	3.6 μW ^c	194 ms ^b	5 × 5	2015	—	[78]
Bolometer	4.25	—	24.7 pW ^c	50 Hz ^a	384 × 288	2013	INO	
Bolometer	2.54	—	76.4 pW ^c					
Golay cells	0.2–20	10 × 103 (12.5 Hz modulation)	10 × 103d	25 ms ^b	Single detector	2009	Microtech	
Micro-bolometer	1.0–7.0	—	<100 pW ^c (4 THz)	30 Hz ^a	320 × 240	2014	NEC	
LiTaO3 Pyroelectric	0.1–300	—	96 nW ^c (50 Hz mod.)	50 Hz ^a	320 × 320	2014	Ophir Photonics	
Pyroelectric	0.3, 1.0, 3.010	18.3 × 103 (10 Hz mod.)	440 ^d	10 Hz ^a	Single detector	2009	QMC	
Hot electron Bolometer	0.89	0.095	7.4 × 103 ^d	200 Hz ^a	Single detector	2007	—	[79]
SixGey:H micro-bolometer	0.934	170	200 ^d	1 ms ^b	Single detector	2010	—	[80]
α-Si micro-bolometer	2.4	14 × 106 5.9 × 106	30 pW ^c 68 pW ^c	—	320 × 240	2011	CEA-Leti	[81]
Nb5N6 micro-bolometer	0.1	100.5	398 ^d (2 mA)	1 KHz ^a	Single detector	2008	—	[82]

1.1.1. FUENTES Y DETECTORES TERAHERTZ

Table 2. Continued

	Freq. (THz)	Rv (V W ⁻¹)	NEP	Frame rate/ response time	FPA size	Year	Commercial Ref.
Vox micro-bolometer	2.8	200 × 103	35 pWc	30 Hza	160 × 120	2008	Infrared Systems
Antenna QW cavity	2.0–4.0	12.6 × 10 (2.5 THz)	32 pWc (2.5 THz)	25 Hza	320 × 240	2014	CEA-Leti [83]
VOx micro-bolometer	3.1	—	280 pWc	16 msb	640 × 480	2008	NEC
Folded dipole antenna	0.65	1.1 × 103 (0.15 V bias)	50d	—	Single detector	2010	STM
FET	0.2–4.3	528 (1.4 THz)	28d (1.4 THz)	—	Single detector	2012	— [84]

1.1.2. Aplicaciones

Aun con la existencia de una gran cantidad de fuentes terahertz mencionadas previamente, las aplicaciones de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo continúan siendo ampliamente utilizadas debido a que es el método más simple, más sencillo de implementar y que se sabe que al incrementar la amplitud terahertz en estos sistemas puede lograrse mejorar la sensibilidad espectroscópica. Esta es la razón por la cual sigue siendo uno de los métodos de caracterización de semiconductores, nanoestructuras de semiconductores a los que puede ser estudiada la dinámica de portadores de $1 \mu m$ de resolución enfocando el haz terahertz con puntas metálicas (Figura 1.4). En un futuro esta resolución se espera sea mejorada excediendo el límite de difracción utilizando superlentes basadas en metamateriales.

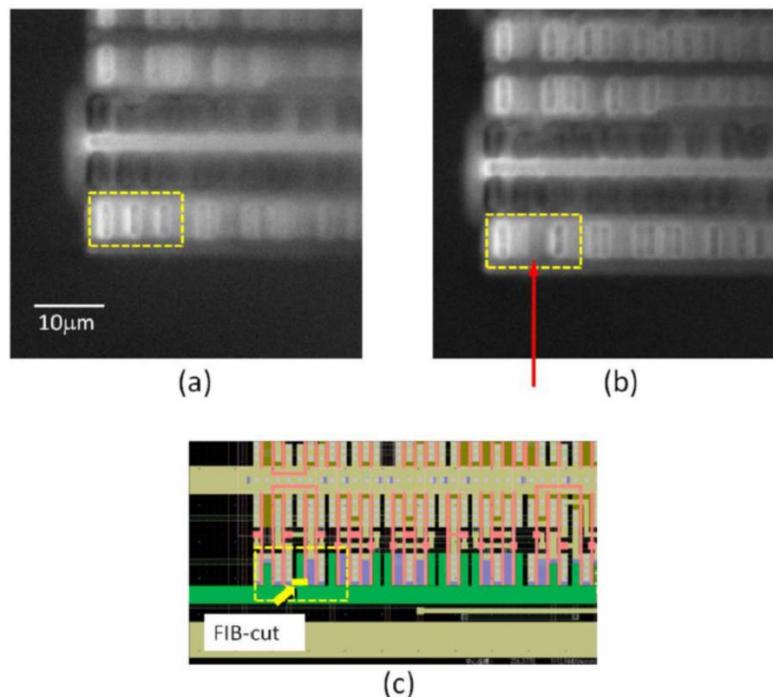


Figura 1.4. a. En esta figura se muestra un chip integrado sin daños. b. Se muestra el defecto creado por un haz de iones, el cual puede ser fácilmente identificado usando espectroscopía THz con resolución $1 \mu m$. c. dibujo en CAD del chip [8].

Otra de las importantes aplicaciones es en microscopía THz de campo cercano con la tecnología THz-STM (THz *Scanning Tunneling Microscopy*) donde se manejan pulsos terahertz de duración de subpicosegundos habilitando la imagenología con una resolución espacial de $\sim 2 nm$ lo que resulta admirable a estas frecuencias y se espera sean mejoradas. En la Figura 1.5.b se muestra las imágenes en frecuencias terahertz de un nano-hilo de arseniuro de indio utilizando la tecnología

THz-STM usando pulsos terahertz ultrarrápidos en el campo cercano. En este experimento la onda evanescente de estos pulsos interactúa a niveles de sublongitud de onda con los nano-hilos.

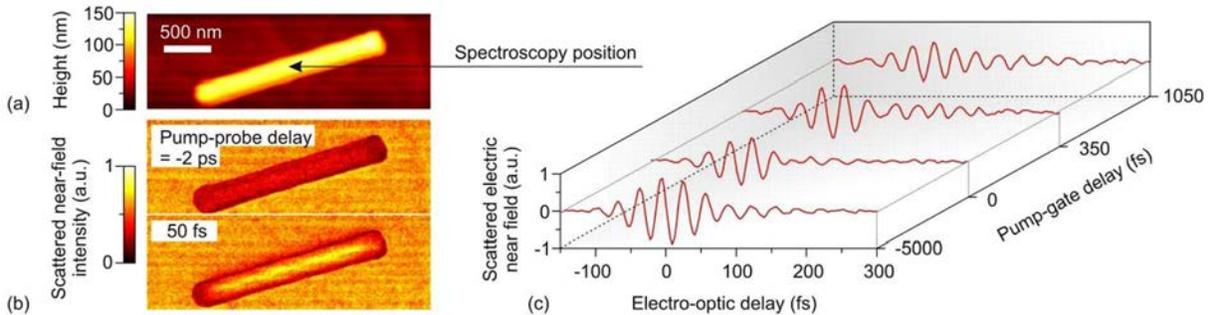


Figura 1.5. a. Imagen en el microscopio de fuerza atómica de un nano-hilo de arseniuro de indio en un sustrato de diamante. b. Imagen instantánea del nano-hilo usando terahertz ultrarrápidos en el campo cercano. La imagen superior es tomada antes de la fotoexcitación por un pulso en el infrarrojo cercano. c. Mediciones hechas en el centro del nano-hilo [8].

Otra aplicación bastante interesante es la del tipo biológico que se practica utilizando espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo. Esta ha sido impulsada por tres tipos de interacción radiación-materia. La primera, es la fuerte absorción de radiación terahertz por el agua. Debido a que los tejidos biológicos presentan un alto contenido en agua, es posible analizarlos con base a la absorción la cual puede estar relacionada con ciertas patologías. La segunda, son las resonancias en biomoléculas resultado de la interacción materia-radiación terahertz permitiendo tener huellas digitales características específicas para cada una de estas. Por último, el bajo daño ocasionado a tejidos biológicos ya que la energía de un fotón de estas longitudes de onda es de 4.1 meV , con la cual no se alcanza a ionizar este tipo de materia como para generar daño. Recientes experimentos indican que la dependencia de la frecuencia y la cantidad de absorción dependen de la sal existente en proteínas y en el DNA. En la actualidad existen buenos avances en cuanto a la interacción de la radiación terahertz con tejidos biológicos sin embargo en sus inicios, se propagó un fuerte escepticismo por parte de la comunidad de ciencias biomédicas debido a que algunos de los primeros trabajos reportados tenían fuertes afirmaciones sobre las capacidades de esta radiación con materia biológica cuyos resultados tenían graves errores generando escepticismo en la comunidad biomédica. Se espera que en los próximos años se tenga una mayor colaboración entre la comunidad biomédica con ingenieros, ópticos y físicos para que estas aplicaciones puedan ser exploradas potencialmente [8].

A pesar de los inconvenientes en áreas biológicas, en la actualidad existen aplicaciones médicas realizadas por diversos grupos de investigación en cuanto a la detección de distintos tipos de cancer. La primera imagen de mediciones *in vivo* de cancer

1.1.2. APLICACIONES

se ha reportado por Wallace et. al. [25] donde sugieren que la radiación terahertz puede ser usada para indicar márgenes de un tumor previo a una cirugía para extraer este tipo de anomalías. Esta imagen es mostrada en la Figura 1.6. La ventaja de estas pruebas de detección no son invasivas y pueden observarse características en el interior sin necesidad de alguna cirugía.

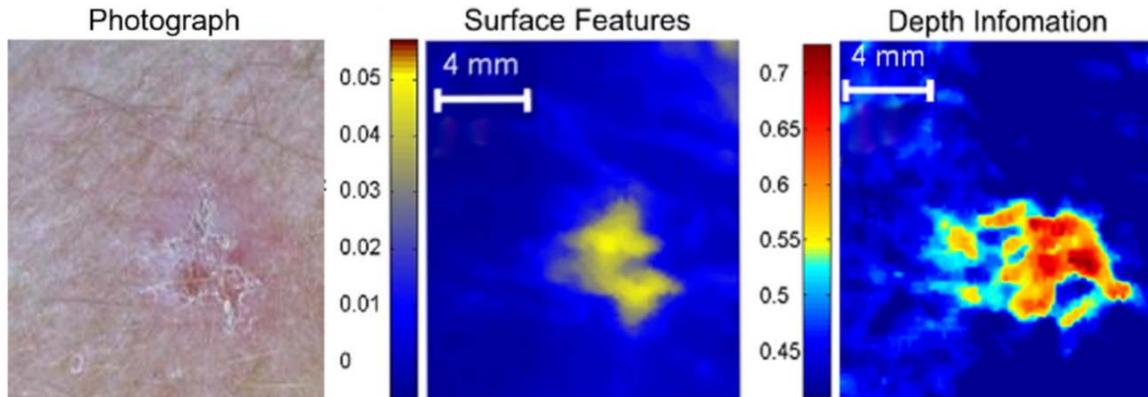


Figura 1.6. A la izquierda se muestra la imagen en el espectro visible de donde se aprecian únicamente características superficiales de la lesión por cáncer de piel. Las imágenes central y de la derecha muestran las primeras imágenes de cáncer *in vivo* utilizando el sistema TeraView Ltd, Cambridge, UK donde puede observarse la fuerte absorción en la superficie y en el interior del tejido [8].

Otro de los ámbitos actualmente estudiados a frecuencias terahertz es en comunicaciones donde ha surgido la necesidad de incrementar el ancho de banda para poder tener alta capacidad de transmisión de datos de manera inalámbrica debido al aumento desmedido de la cantidad de usuarios. Hasta la fecha los avances realizados son para una ventana por debajo de $0.4 THz$ los cuales han sido probados satisfactoriamente en sistemas inalámbricos de corto alcance.

Una de las aplicaciones más conocidas en este rango de frecuencias son los sistemas de imagenología en seguridad como el que se muestra en la Figura 1.7 llamado radar de imagenología del JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). Este sistema opera a un trasreceptor heterodino a frecuencia de $340 GHz$ el cual utiliza la combinación radar e imagenología pasiva para obtener imágenes y hacer visible objetos ocultos los cuales puedan representar una amenaza a la seguridad. El hecho de que este tipo de sistemas puedan ser funcionales se debe a la capacidad de penetración de tiene esta radiación en diferentes tipos de materiales como telas, polímeros, piel, entre otros. La tendencia a futuro de estos sistemas es hacia la compactación mediante el uso de transistores de estado sólido que reemplacen los diodos Shottky que se emplean como fuentes y detectores.

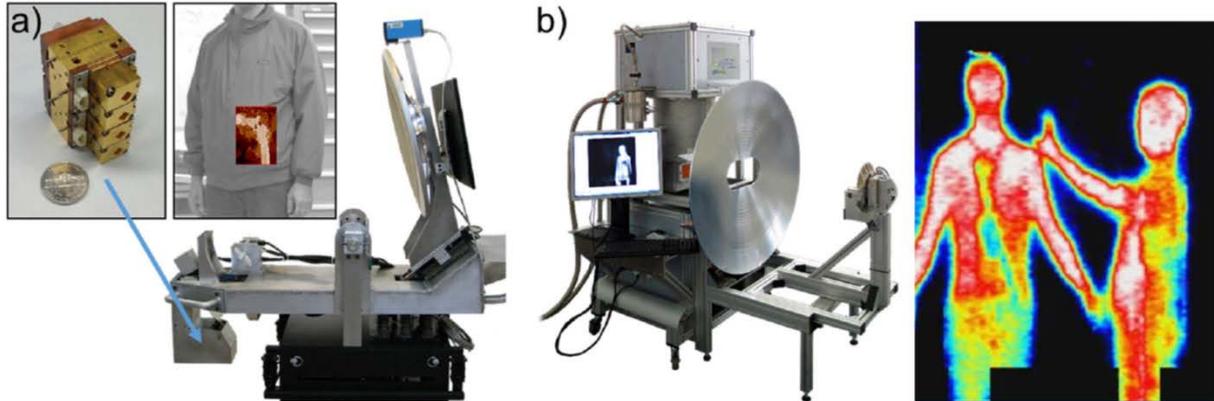


Figura 1.7. a. Radar de imagenología JPL's que muestra una imagen instantánea que revela el arma oculta bajo la ropa de la persona la cual fue obtenida con un trasreceptor heterodino a 340 GHz. b. E escenario de un punto de control para detección mediante imagenología [8].

Capítulo 2

Antecedentes de microscopía THz de campo cercano

Durante mucho tiempo, la microscopía en frecuencias del infrarrojo (IR) estuvo limitada por la baja potencia luminosa de fuentes térmicas IR que fuera suficiente para realizar el enfoque de esta radiación hasta el límite de difracción [9]. Esta limitante pudo ser superada en años posteriores con el advenimiento de los láseres pulsados, sin embargo, la barrera del límite de difracción seguía presente. En 1994, Fritz Keilmann fue precursor en explorar los conceptos de microscopía de campo cercano en el infrarrojo lejano motivado por el desarrollo del microscopio de efecto túnel (STM), el microscopio de fuerza atómica (AFM) y la microscopía óptica de escaneo en el campo cercano (SNOM). Este primer trabajo realizado consistía en el uso de láseres y fuentes de microondas como fuentes de radiación que excitaban sondas cónicas metálicas con aperturas menores a la longitud de onda en estudio, las cuales tenían la función de interactuar con una muestra en el campo cercano. Trabajar en el campo cercano significa que la separación espacial entre una fuente de radiación confinada por una sonda con apertura menor a longitud de onda y una muestra debe ser menor que la misma longitud de onda [10]. En la Figura 2.1.a se muestra uno de los esquemas del trabajo de Keilmann donde se observa la forma de la sonda cónica la cual era de 30° de ángulo completo, con apertura en la punta de $200 \mu\text{m}$ a través de la cual se propagó un haz en el infrarrojo lejano. Utilizó el método del filo de la navaja para verificar que el tamaño del spot emergiendo de la punta fuera menor que la longitud de onda. Como detector utilizó un sensor IR situado a una distancia aproximada de $300 \mu\text{m}$ desde la punta cónica. El resultado de este experimento fue una medición de tamaño de spot de $250 \mu\text{m}$ mostrado en la gráfica de la señal respecto a la posición de la navaja en la Figura 2.1.b.

De sus resultados observó que había un rápido decrecimiento de transmitancia del haz al propagarse a través de la sonda debido a la alta reflexión inducida por la frecuencia de

corde. Para mejorar esto, introdujo dos alambres de tungsteno de diámetro $25 \mu\text{m}$ donde uno de ellos actuó como plano de tierra y el otro como antena mitigando así los efectos de la frecuencia de corte de la onda. Sus resultados de transmitancia respecto a distintos tamaños de apertura son mostrados en la Figura 2.1.c.

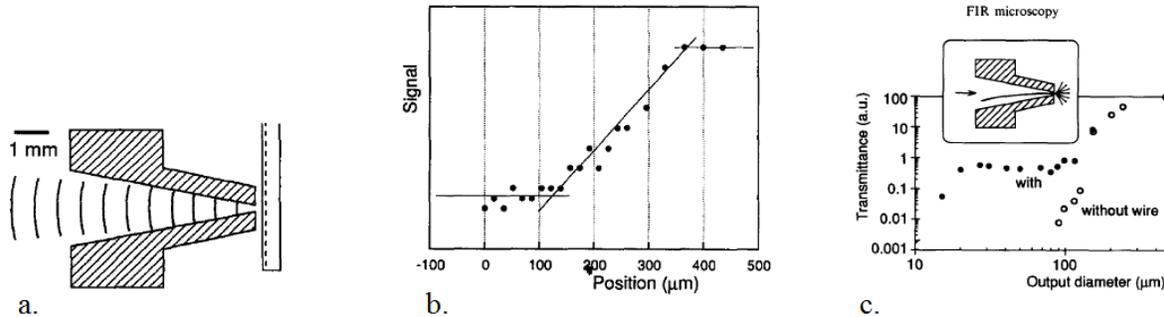


Figura 2.1. a. Diagrama de la guía de onda para enfocar radiación en el infrarrojo lejano. b. Señal medida por el detector IR al salir de la apertura de $250 \mu\text{m}$. c. Transmitancia de la guía de onda con un alambre de tungsteno de $25 \mu\text{m}$. [9].

En aquellos años, Keilmann demostró por primera vez que bajo estas condiciones de trabajo en el campo cercano podían mitigarse los efectos del límite de difracción que impedían que los sistemas de microscopía en este rango de frecuencias tuviesen una mejor resolución espacial al hacer imágenes. Ahora bien, la nueva limitante sería la fabricación de las aperturas de las sondas debido a su tamaño físico. Fue así como se abrieron las puertas a este concepto de microscopía en el infrarrojo lejano que se toma como base en este trabajo de investigación donde se experimenta con esta radiación también conocida como banda terahertz.

Después de tres años del trabajo de Keilmann, se presentó por primera vez un sistema de imagenología terahertz en el campo cercano desarrollado por S. Hunsche, M. Koch, I. Brener y M. C. Nuss quienes lograron una resolución espacial de $\lambda/4$ enfocando radiación terahertz dentro sondas metálicas con punta de aperturas menores a la longitud de onda y haciendo escaneo de una muestra en el campo cercano de la apertura. Esto se realizó en un sistema de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo (THz-TDS) que se describe posteriormente [11].

Para que S. Hunsche y su equipo, pudieran aplicar la técnica THz-TDS como sistema de microscopía terahertz de campo cercano, fue necesario el uso de sondas para confinar la radiación en aperturas menores que la longitud de onda que interactuaran con la superficie de una muestra situada en el campo cercano. Esto es ilustrado en la Figura 2.2. Esta fue la manera de como se pudo crear por primera vez una imagen en el campo cercano la cual es

2.1.USO DEL SISTEMA DE ESPECTROSCOPIA TERAHERTZ EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

mostrada en la Figura 2.3.

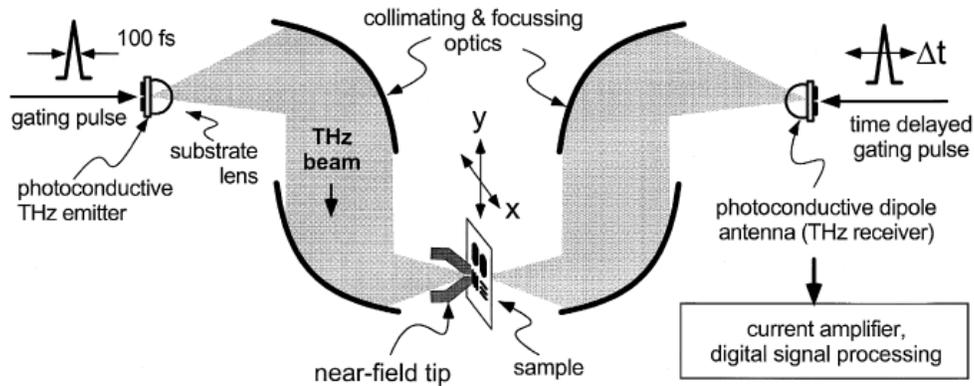


Figura 2.2. Esquemático de del primer sistema de microscopía terahertz de campo cercano [11].

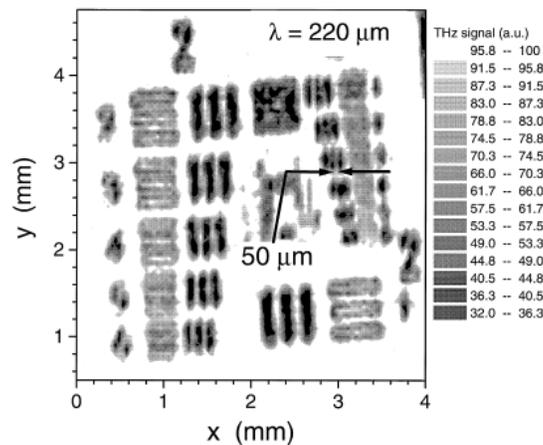


Figura 2.3. Primera imagen de campo cercano en la literatura de un patrón de prueba donde se obtuvo una resolución de 50 μm [11].

2.1. Uso del sistema de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo

Un sistema de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo (THz-TDS por sus siglas en inglés) es una técnica electro-óptica donde pulsos ópticos de sub-pico segundos y/o femto segundos son utilizados para generar y detectar radiación terahertz de banda

2.1. USO DEL SISTEMA DE ESPECTROSCOPIA TERAHERTZ EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

ancha. Esto ocurre debido a que se producen efectos ópticos no lineales por la interacción entre el pulso óptico y un material generalmente un semiconductor [1][12]. Este tipo de sistema ha sido ampliamente estudiado desde hace décadas, destacando el trabajo de Martin Van Euter y Daniel Grischkowsky donde lo describen en su trabajo como un sistema repetitivo que opera en modo transmisión basado en la excitación de un dipolo Hertziano de una antena por un láser de sub picosegundos [13]. A este tipo de antenas se le conoce como *switches* o antenas fotoconductoras y consisten en un par de líneas coplanarias delgadas generalmente de oro fabricadas mediante técnicas de microfabricación sobre un sustrato semiconductor. Al ser excitado por la luz infrarroja genera portadores de carga (que por características del material) tienen tiempos de vida muy cortos del orden de picosegundos. Al aplicar un campo eléctrico estático a una de las antenas que es nombrada emisora, se genera un rápido cambio en las corrientes generadas entre las líneas de la antena debido a la excitación infrarroja sobre el semiconductor comenzando así a radiar en frecuencias terahertz de acuerdo a las ecuaciones de Maxwell ($E_{radiado}(t) \sim \partial J / \partial t$). La generación de radiación terahertz por este tipo de antenas es mostrada en la Figura 2.4

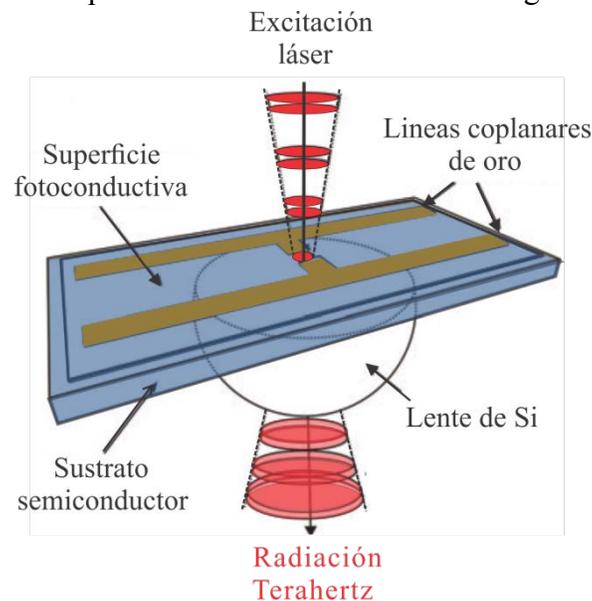


Figura 2.4. Esquemático de la generación de radiación terahertz mediante una antena fotoconduccionada la cual es colimada por una lente hiperhemisférica de Silicio.

El campo eléctrico terahertz radiado puede ser expresado con la ecuación diferencial 1:

$$E_{THz} \propto ev \frac{\partial n}{\partial t} + en \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1)$$

donde, E_{THz} es el campo eléctrico terahertz radiado, e es la carga del electrón, v es la velocidad relativa entre un electrón y un hueco (electrón y hueco, portadores de carga negativa y positiva respectivamente), n es la densidad volumétrica de portadores, $\partial n / \partial t$

2.1. USO DEL SISTEMA DE ESPECTROSCOPIA TERAHERTZ EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

es la derivada parcial de la densidad volumétrica de portadores de carga respecto al tiempo y $\partial v/\partial t$ es la derivada parcial de la velocidad relativa entre portadores de carga respecto al tiempo. Así, $ev \frac{\partial n}{\partial t}$ representa la radiación electromagnética debida a la tasa de cambio de la densidad de carga en el tiempo y $en \frac{\partial v}{\partial t}$ representa la radiación electromagnética proporcional a la aceleración de portadores de carga en el semiconductor debido a la aplicación del campo eléctrico estático [14].

La detección en el espacio libre de esta radiación pulsada de banda ancha se realiza mediante muestreo fotoconductor a través de la excitación al semiconductor de la antena receptora de las mismas características que la emisora. Durante un corto tiempo de muestreo, el pulso terahertz induce una pequeña fotocorriente en el receptor que es tan rápida que no es posible medirla con electrónica convencional, por tal motivo, se tiene una corriente promedio (de muchos de pulsos idénticos) que puede ser detectada mediante técnicas de Lock-in como función del retardo entre el pulso terahertz de la antena emisora y la receptora [1]. Por tal razón, en este tipo de sistemas no es posible tener mediciones en tiempo real, si no que el pulso terahertz obtenido es el promedio de millones de pulsos. El espectro (dominio de la frecuencia) se obtiene aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) del pulso terahertz en el dominio del tiempo. El diagrama típico de un sistema THz-TDS se ilustra en la Figura 2.5.

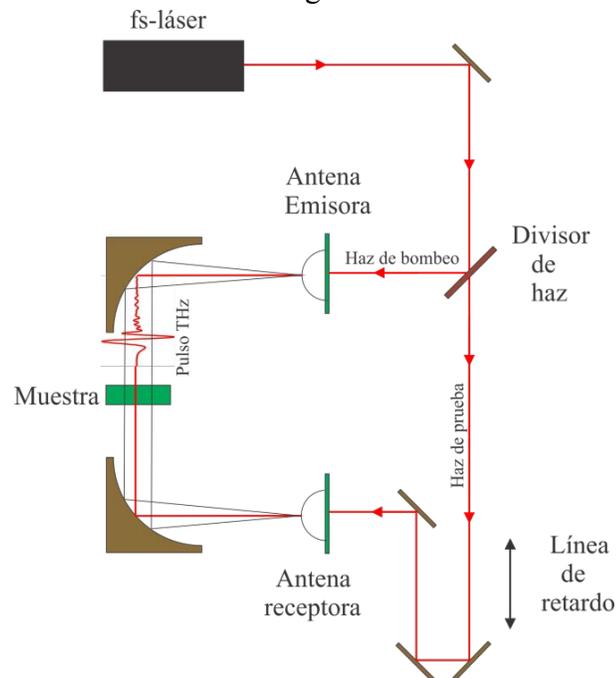


Figura 2.5. Esquemático de un sistema típico de espectroscopia terahertz en el dominio del tiempo (THz-TDS).

2.1.USO DEL SISTEMA DE ESPECTROSCOPIA TERAHERTZ EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

La amplitud del campo eléctrico de un pulso terahertz típico en el tiempo y su espectro son mostrados en la Figura 2.6. Este tipo de sistemas ha sido una herramienta potencial para mediciones espectroscópicas de las propiedades en el infrarrojo lejano de materiales como dieléctricos y semiconductores, superconductores, líquidos y gases [15].

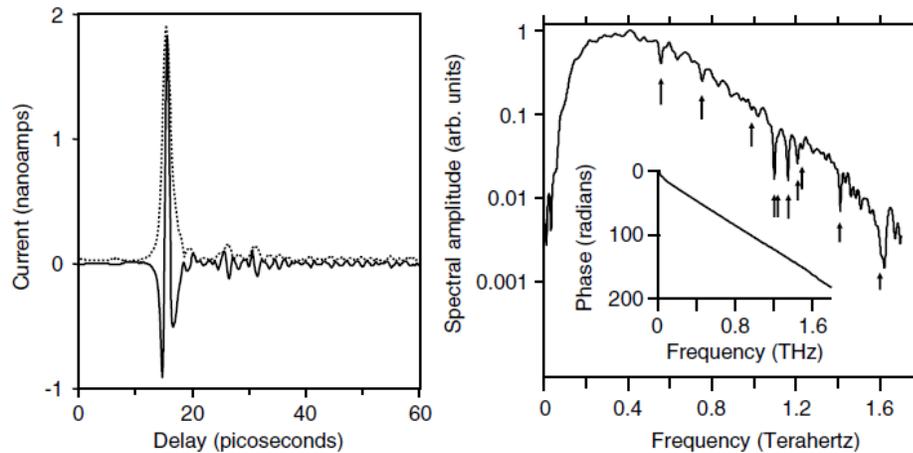


Figura 2.6. A la izquierda se muestra la gráfica con la forma de onda típica de un pulso terahertz en el tiempo en espacio libre. A la derecha se muestra la gráfica del espectro del pulso en el tiempo obtenido a partir de la FFT. Puede observarse en el espectro líneas de absorción de vapor agua que son medibles [1].

Retomando la idea de las sondas con puntas afiladas desarrolladas en el trabajo de Keilmann utilizadas para confinar la radiación terahertz en aperturas menores que la longitud de onda en el infrarrojo lejano, se tuvo la limitante la forma de fabricación de estas debido a sus características físicas. En los años siguientes surge la idea en el grupo de investigación de R. W. McGowan, G. G Allot y D. G rischkowsky en 1999 de fabricar sencillamente aperturas menores que la longitud de onda terahertz. Destaca en la literatura el trabajo precursor realizado utilizando guías de onda circulares con diámetros submilimétricos con el fin de conocer el comportamiento que tiene la propagación de radiación terahertz a través de ellas. Trabajaron con diámetros de diámetros de 240 μm y 280 μm observando que se presentaban una propagación muy dispersiva con bajas pérdidas en el rango de 0.65 a 3.5 THz [16], demostrando que es posible la propagación de radiación terahertz a través de estas guías de onda.

Como en todo, existe un límite para la propagación de ondas a través de pequeñas aperturas y está fundamentado con la teoría de difracción para pequeñas aperturas desarrollado por H. A. Bethe en 1942, donde establece que el campo difractado puede ser considerado causa de un momento magnético en el plano de la apertura y un momento eléctrico perpendicular a este [17]. El campo eléctrico transmitido por aperturas mucho menores que la longitud de

2.1. USO DEL SISTEMA DE ESPECTROSCOPÍA TERAHERTZ EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

onda e está regido por la ley de potencia d^3 , así cada factor de dos en la reducción del tamaño de la apertura ocasiona una atenuación de la amplitud de la onda de al menos dos órdenes de magnitud. A frecuencias terahertz, esta ley impone severas limitaciones al usar aperturas menores que $\sim \lambda/100$, sin embargo el equipo de

Oleg Mitrofanov de manera experimental observan que el campo evanescente transmitido en aperturas de $1 \mu\text{m}$ se desvía significativamente de la teoría de Bethe [18]. Ellos fabricaron dispositivos que integran la fuente terahertz con la sonda en el campo cercano. Para distintas aperturas de la sonda demuestran que es posible transmitir modos terahertz en aperturas de $\lambda/100$ con una resolución espacial de $3 \mu\text{m}$ que puede usarse para microscopía de transmisión. La Figura 2.7 muestra la estructura del dispositivo realizado por Mitrofanov y su equipo.

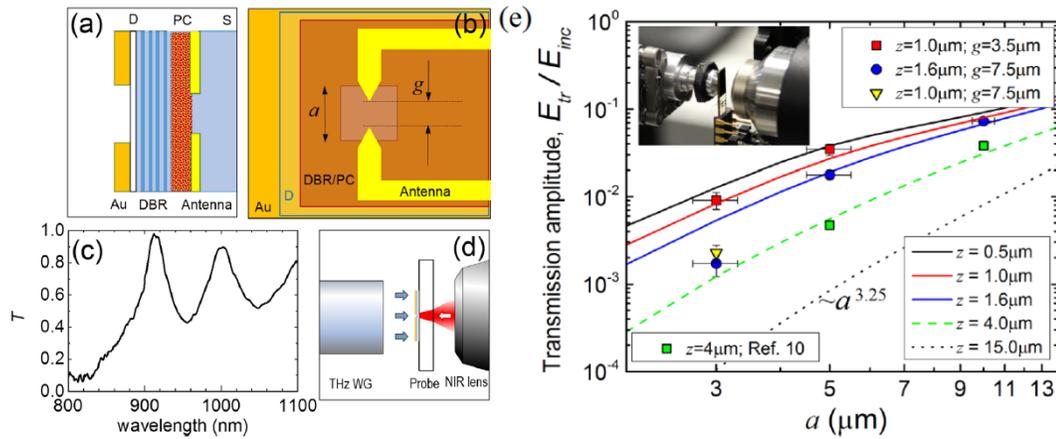


Figura 2.7. Esquemático de la sección transversal de la sonda. a. Diagrama b. Integración de la sonda THz de campo cercano: Au-plano con la apertura, D: capa dieléctrica aislante, DBR: reflector de Bragg, PC: capa fotoconducciona de LTGaAs, S: sustrato de safiro c. transmisión óptica del espectro de la sonda de heteroestructura normalizada para la transmisión a través del sustrato de safiro. d. Diagrama esquemático del experimento, e. Amplitud del campo terahertz transmitido para distintos tamaños de apertura [18].

2.2. Sondas cónicas

Para que un sistema de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo pueda operar como uno de microscopía terahertz de campo cercano es necesario concentrar la radiación terahertz proveniente de una fuente en aperturas menores a la longitud de onda milimétrica según la frecuencia con la que se esté trabajando. Esto, con el fin de obtener alta resolución al hacer imágenes terahertz, lo cual depende directamente del tamaño de spot enfocado. Por tal razón, para el desarrollo de este trabajo se ideó hacer este tipo de sondas cónicas metálicas huecas con aperturas micrométricas para enfocar radiación terahertz en el campo cercano.

Existen en la literatura trabajos acerca de sondas cónicas para frecuencias terahertz. Uno de estos es el reportado por Keilmann en 1994 de cual fue descrito anteriormente donde utiliza elementos de enfoque con punta para el infrarrojo lejano o terahertz.

En años más recientes Shuchang Liu et al., estudiaron la concentración de radiación terahertz de banda ancha emitida por un sistema THz-TDS usando arreglos periódicos de conos. En su trabajo, optimizan las propiedades geométricas de las aperturas individuales (de interés de este trabajo). La radiación emitida por el sistema THz-TDS con antenas fotoconductoras es colimada con espejos parabólicos e introducida en las guías de onda cónicas con diferentes ángulos. La finalidad de su trabajo es determinar experimentalmente y en simulación, el ángulo en la punta cónica en el cual exista una mayor transmisión de campo eléctrico. Para esto, idean utilizar una guía de onda circular con apertura de $400 \mu m$ (diámetro D_2 , Figura 2.8) que toman como referencia llamándole de ángulo 0° . Fijando el tamaño de la apertura a $400 \mu m$, experimentan y simulan ángulos de 30° , 60° y 90° modificando la apertura de entrada del cono (diámetro D_1 en la Figura 2.4) para obtener la transmisión de campo eléctrico en cada una de las guías de onda. Utilizan un factor de concentración de amplitud de campo espectral dado por la ecuación 2.

$$f_E(\nu) = \frac{t_a(\nu)}{t_{ref}(\nu)} \quad (2)$$

En este factor de concentración, $t_a(\nu)$ es la amplitud del espectro de transmisión medido para cada guía de onda cónica de ángulo α por separado y $t_{ref}(\nu)$ es la amplitud del espectro de transmisión de la guía de onda circular de ángulo 0° que consideran como referencia. Con base en la teoría electromagnética de guías de onda circulares consideran siguiente la ecuación (3) que determina la frecuencia de corte de este tipo de guías.

$$\nu_c = \frac{1.841c}{\pi D_2} \quad (3)$$

2.2. SONDAS CÓNICAS

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y D_2 es el diámetro de la apertura en la punta. En sus resultados experimentales observaron un mayor factor de concentración en el espectro terahertz en la punta con el ángulo $\alpha = 30^\circ$ respecto a las otras guías de onda cónicas. Esta guía de onda tiene un diámetro de entrada (D_1) de 3 mm y una apertura de $400 \mu\text{m}$ con un ángulo completo de 30° como se muestra en la Figura 2.8 [19].

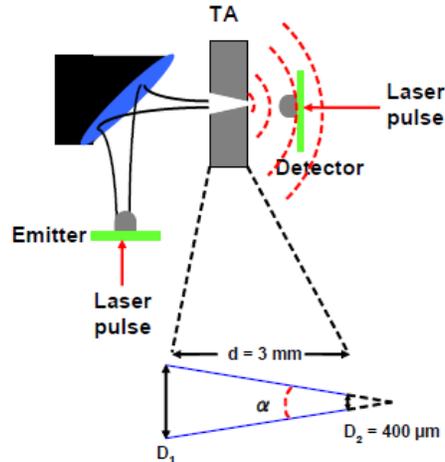


Figura 2.8. Diagrama esquemático de sistema THz-TDS donde se muestra el haz colimado por un espejo parabólico en la apertura de 3 mm y apertura en la punta de $400 \mu\text{m}$ [19].

Los resultados que obtuvieron son mostrados en la Figura 2.9.b donde utilizando el factor de concentración de amplitud de campo espectral variando el diámetro D_1 el cual modifica el ángulo de las sondas. Estos resultados fueron verificados usando simulación 3D en FDTD.

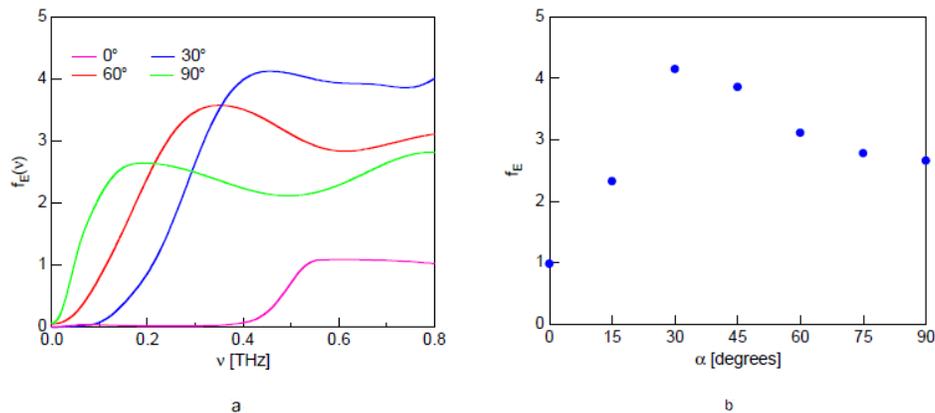


Figura 2.9. a. Muestra las mediciones experimentales de las propiedades de transmisión espectral donde se muestra que el ángulo óptimo para confinar la radiación terahertz es de 30° . b. Muestra la concentración del campo eléctrico terahertz como función del ángulo. [19].

2.2. SONDAS CÓNICAS

Otro trabajo desarrollado con este tipo de guía de onda cónica para hacer imagenología terahertz de campo cercano usando aperturas de sub-longitud de onda sin frecuencia de corte fue desarrollado por el mismo Shuchang Liu, Oleg Mitrofanov y Ajay Nahata [20]. En su trabajo logran confinar radiación terahertz de banda ancha con una guía de onda cónica sin frecuencia de corte. Ellos fabricaron la guía de onda cónica en dos piezas con una ajustable separación en cada una de estas. Para fabricar su diseño ellos consideraron investigaciones previas de Shuchang y Mitrofanov enunciadas a continuación: que la concentración del campo eléctrico terahertz es máxima cuando se tiene un ángulo del cono de 30° , la velocidad de grupo se reduce dentro de la guía de onda cónica y que la supresión de transmisión terahertz debajo de la frecuencia de corte está asociada con el tamaño de la apertura de salida. Ellos utilizaron un sistema THz-TDS con antenas fotoconductoras y lentes hiperhemisféricas de silicio para enfocar el campo eléctrico terahertz en la apertura. Figura 2.10.

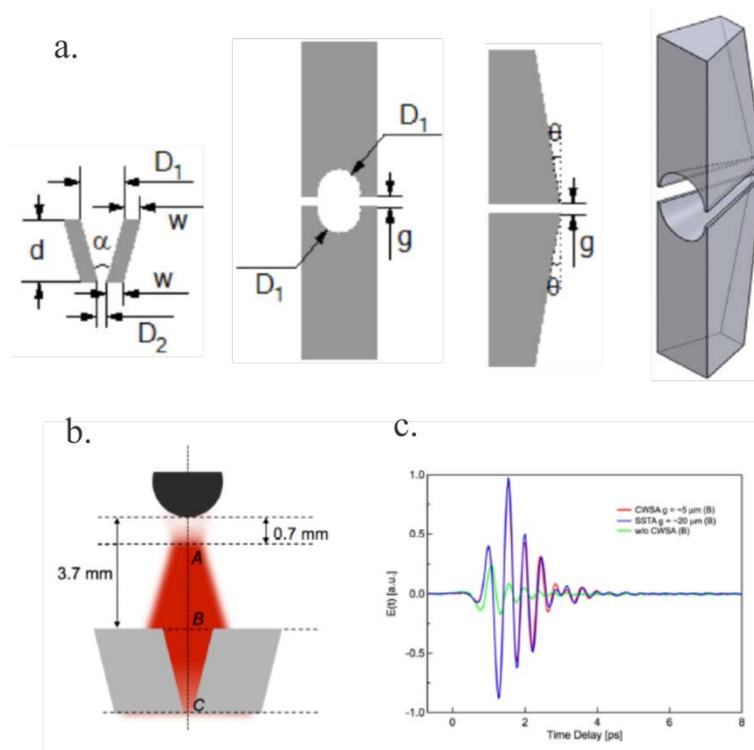


Figura 2.10. a. Se muestran las tres figuras de izquierda a derecha los trazos en el plano donde características de la sonda fabricada, y a la derecha se muestra la forma física de la sonda en dos partes separadas por un gap de aire. b. Muestra la forma de enfocar la radiación terahertz proveniente del sistema THz-TDS. c. Gráfica de tres de los pulsos en el tiempo obtenidos bajo tres circunstancias distintas [20].

2.2. SONDAS CÓNICAS

Hicieron mediciones variando la distancia de separación entre las piezas que forman la guía de onda y lograron hacer imagenología terahertz de campo cercano de un patrón en forma de U. Debido a que las antenas fotoconductoras emiten radiación de banda ancha hicieron un análisis para cada frecuencia y determinar la resolución de las imágenes. Esto se muestra en la Figura 2.11.

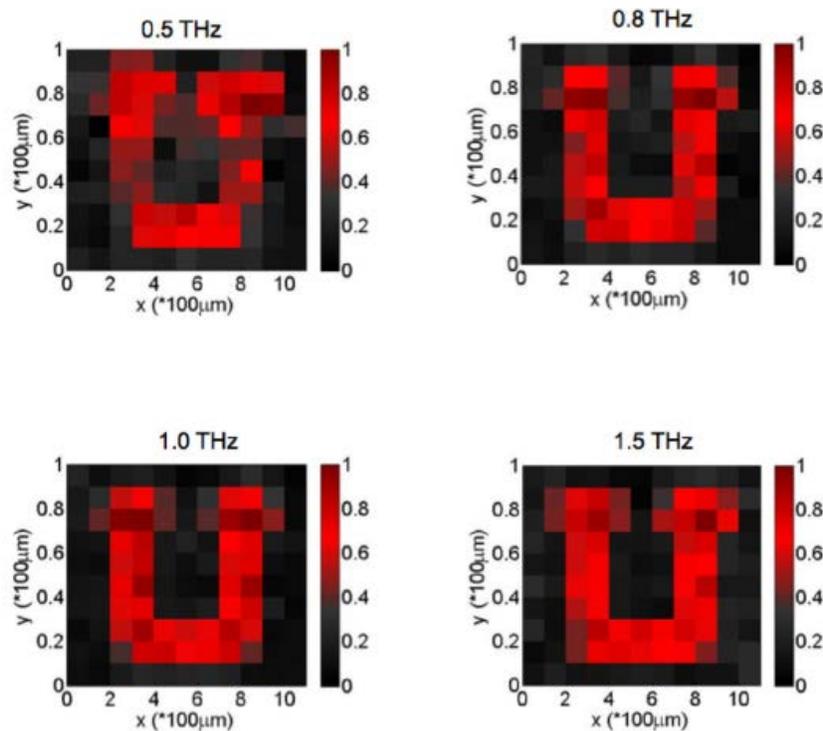


Figura 2.11. Imágenes obtenidas para distintas frecuencias THz [20].

El análisis realizado por este grupo de trabajo, para obtener distintas resoluciones de imagen para las frecuencias dentro del ancho espectral emitido por su fuente de radiación se toma como base para este trabajo donde también se hace un análisis espectral de los pulsos en el tiempo utilizando la técnica de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo y el método de la navaja que será descrito en capítulos posteriores. En el trabajo de Mitrofanov y su equipo logran distintos tamaños de *spot* con los que fueron realizadas las imágenes de la Figura 2.11.

2.3. Formas de caracterizar el *spot* terahertz

Siendo la resolución la mínima distancia de separación que puede ser diferenciada entre dos regiones claramente distinguibles, es una de las características fundamentales de los sistemas de microscopía e imagenología. Para poder determinarla, es necesario analizar el tamaño y la posición que tiene el *spot* con el cual una muestra será interrogada. Así, el tamaño y posición del *spot* determinaran la resolución de la imagen, esto significa que si se tiene una *spot* de menores dimensiones, la resolución del sistema se verá mejorada y mientras el tamaño de *spot* incrementa, la calidad de la imagen disminuirá.

Existen en la literatura distintos métodos para medir el tamaño de *spot*. Uno de ellos es el procedimiento de *pin-hole* el cual tiene la desventaja, la dificultad para hacer el agujero y tener así un haz concéntrico terahertz. Otro de los métodos es el de hendidura que según experimentos reportados en la literatura, no es tan efectivo dado a que se generan efectos debido a difracción terahertz. Y por otra parte está el método del filo de la navaja con el cual se omiten los efectos de difracción existentes en los otros métodos mencionados.

El método de la navaja ha sido ampliamente utilizado principalmente en sistemas ópticos para la caracterización de haces Gaussianos monocromáticos. Este método ha sido aplicado y demostrado por gran cantidad de grupos de trabajo para sistemas a frecuencias terahertz. En este trabajo, el método de la navaja combinado con un sistema de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo son la herramienta clave para determinar la resolución del sistema de microscopía en el que se genera radiación terahertz de banda ancha mediante una antena fotoconductiva.

En esta técnica, el filo de una navaja es desplazado de forma perpendicular a la dirección de propagación del haz terahertz con la finalidad de bloquear gradualmente la potencia transmitida hacia el detector del sistema, de tal manera que la potencia disminuirá hasta que la señal detectada sea atenuada por completo. La descripción matemática de este método se enuncia a continuación [21]:

La distribución de intensidad de un solo modo transversal circularmente simétrico de un *spot* láser se expresa con la ecuación 4.

$$I_z = I_0 e^{-2r^2/\omega^2(z)} \quad (4)$$

donde I_0 es la intensidad máxima correspondiente a la parte central del *spot*, $\omega(z)$ es el radio del haz a la distancia z el cual se simplificará únicamente como ω . Cuando un haz Gaussiano es bloqueado por el filo de una navaja en cualquier posición en X , la potencia detectada es expresada matemáticamente con la ecuación (5).

2.3. FORMAS DE CARACTERIZAR EL SPOT TERAHERTZ

$$P(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^x I_0 \exp\left[\frac{-2x^2}{\omega^2}\right] \exp\left[\frac{-2y^2}{\omega^2}\right] dx dy \quad (5)$$

donde y es el eje paralelo al bloqueo del haz realizado por el filo de la navaja, y situado a una distancia x del centro del haz terahertz.

Y la potencia total del láser sin ser ocultado es expresada en la ecuación (6).

$$P_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_0 \exp\left[\frac{-2x^2}{\omega^2}\right] \exp\left[\frac{-2y^2}{\omega^2}\right] dx dy \quad (6)$$

De tal manera que si $t = \frac{2x}{\omega}$, la potencia de medida con la navaja en distintas posiciones en X es:

$$\frac{P(x)}{P_0} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega} \int_{-\infty}^x \exp\left[\frac{-2x^2}{\omega^2}\right] dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^t \exp(-t^2) dt \quad (7)$$

De acuerdo al método del filo de la navaja 90/10, la diferencia de posiciones entre X_1 y X_2 donde $P(X_1) = 90\%$ y $P(X_2) = 10\%$ esta dada a partir de la ecuación 7. Siendo esta longitud igual al diámetro del *spot*. La ubicación de una navaja en un sistema típico THz-TDS es mostrado en la Figura 2.12, donde además se ilustra el método de la navaja.

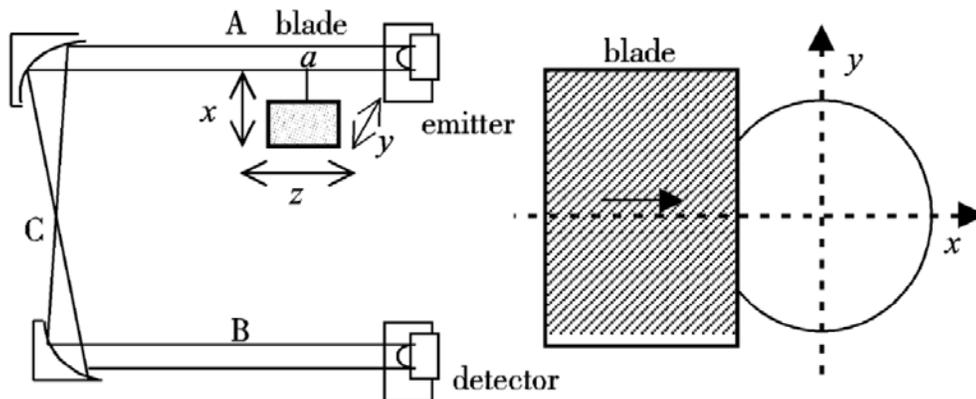


Figura 2.12. A la izquierda se muestra el esquema de una configuración típica THz-TDS usando espejos parabólicos y se observa la ubicación de la navaja en este sistema. A la derecha se muestra este método donde una navaja debe ser desplazada para bloquear la radiación terahertz proveniente de un emisor [21].

Capítulo 3

Diseño y fabricación de sondas cónicas

Uno de los principales enfoques de este trabajo de investigación se basa en la fabricación de sondas cónicas metálicas huecas de aperturas comparables con la longitud de onda terahertz emitada por antenas fotoconductoras de ancho espectral de $\sim 2 - 3 \text{ THz}$ (antenas fotoconductoras comerciales utilizadas). En primera instancia, se consideró idear diseños en el *software* COMSOL *Multiphysics* con la finalidad de determinar las dimensiones adecuadas de la sonda de tal manera que se tuviera confinado el campo eléctrico en la punta de estos dispositivos y así poder utilizarlos en un sistema de microscopía. La primera sonda simulada y fabricada fue la de ángulo completo de 91.42° . Posteriormente se encontraron en la literatura trabajos reportados por varios grupos de investigación donde ya se había estudiado a este tipo de sondas de manera experimental, tales es el caso de los grupos de Keilmann, Nahata, Mitrofanov [9][19][20], entre otros mencionados en el capítulo 2. Con base en sus trabajos se llevó a cabo la segunda simulación de sondas cónicas de 30° .

3.1. Simulación electromagnética de sondas cónicas

Con el *software* COMSOL *Multiphysics*, es posible realizar aproximaciones numéricas de las ecuaciones diferenciales que describen fenómenos físicos. En este trabajo, se modelan fenómenos electromagnéticos a través del método de elemento finito (FEM: *Finite Element Method*).

Con este *software* se tiene la opción de utilizar un asistente de modelo que funge como guía para cualquier tipo de fenómeno físico a simular. Al iniciar un modelo, el asistente guía al usuario a elegir un tipo de dimensión de espacio de simulación que puede ser 0D, 1D, 2D o 3D. Seguido a esto, el usuario debe seleccionar la física a trabajar. En esta parte, hay distintos módulos de trabajo y cada uno de estos tiene diversos enfoques según el área científica estudiada. Finalmente, el usuario selecciona el tipo de estudio a trabajar, el cual puede ser en el dominio de la frecuencia (frecuencia propia, valor propio), estacionario, en

3.1. SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE SONDA CÓNICAS

el dominio del tiempo o algún otro estudio personalizado. Una vez realizado este simple procedimiento se tiene la interfaz de trabajo dividida en tres columnas donde las dos primeras de izquierda a derecha (líneas discontinuas verde y azul) serán las que se manejarán para realizar los modelos que pueden ser observados en la tercera columna (línea discontinua morada). Esto es ilustrado en la Figura 3.1.

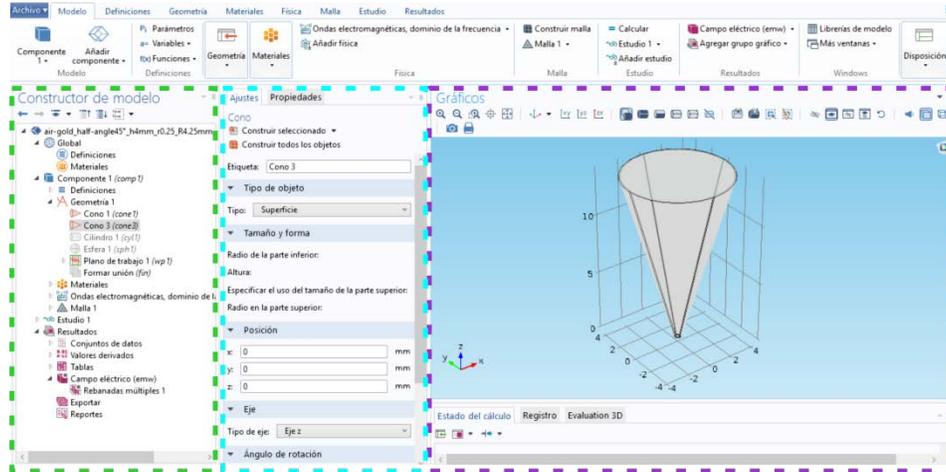


Figura 3.1. Interfaz gráfica del software COMSOL Multiphysics.

Dentro de la interfaz de trabajo o modelado existen procedimientos ya definidos para realizar el diseño siguiendo un orden y evitar conflictos. A continuación, se describen los pasos a seguir para hacer una simulación donde se especifican algunas consideraciones para el modelado realizado en este trabajo.

Creación de la geometría. En esta parte fue posible definir el tipo de geometría, en este trabajo es un cono donde se tomó como especificación inicial su diámetro mayor de 10 mm ya que es el diámetro de la lente hiperhemisférica de silicio que utilizó en un principio en el sistema THz-TDS para colimar la radiación THz proveniente de la antena emisora.

Seguido a esto, es necesario establecer el tipo de material o materiales que formen la geometría creada. En este trabajo fue utilizado el oro como material de la superficie del cono debido a que las propiedades de este elemento tienen buen funcionamiento a frecuencias terahertz. Estas propiedades son la conductividad de Drude y la profundidad de penetración donde la conductividad es de $45.2 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ y la profundidad de penetración a 1 THz es de 74.9 nm [13]. Otro de los materiales usados fue aire tanto en la parte hueca del interior así como en el exterior del cono.

El siguiente paso, es la configuración de la física que se eligió en un principio con el

3.1. SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE SONDA CÓNICAS

asistente de modelo. Para este trabajo se utilizó la física de ondas electromagnéticas en el dominio de la frecuencia donde este *software* emplea la ecuación de onda eléctrica para dar solución a la simulación, además de utilizar la ecuación de conductor eléctrico perfecto y considera como cero los valores iniciales del vector del campo eléctrico.

Debido a que experimentalmente se hará incidir radiación terahertz a partir del diámetro mayor del cono hacia su apertura micrométrica, en la simulación es necesario agregar un puerto que hará la función de esta fuente de radiación y hacer una aproximación de lo que debería pasar en el experimento real. Fue introducido en este caso un puerto circular situado en el diámetro mayor del cono y se especificó una potencia de 1W saliendo de este puerto.

En cualquier simulación electromagnética un punto clave para tener una simulación confiable es la elección del mallado. En este trabajo se hizo una configuración manual teniendo la consideración que dentro de la longitud correspondiente a $300 \mu m$ (λ de $1 THz$) existieran cinco elementos de la malla.

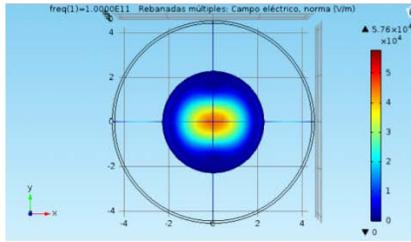
Otras condiciones por definir son especificaciones en el estudio. En esta parte es posible definir la frecuencia a la que se trabaja incluso pueden hacerse barridos de frecuencia y obtener distintas soluciones a la vez. En este trabajo se simuló a una frecuencia de $0.3 THz$ puesto que trabajar con frecuencias mayores significa tener un análisis más complejo en cuanto a la cantidad de elementos establecidos con el mallado para solucionar. En el software, tener una simulación lo más real posible implica mayor demanda mayor capacidad computacional con la que no se contaba al momento de hacer las simulaciones.

La finalidad de la simulación electromagnética fue verificar que bajo las especificaciones dadas para el diámetro mayor del cono y una apertura micrométrica existiera una confinación de campo eléctrico en esta. Como se mencionó antes para las simulaciones se recurrió a investigaciones ya reportadas en la literatura donde el equipo de trabajo de Shuchang Liu et al. [19], reportan que a un ángulo de 30° y aperturas micrométricas se tiene una óptima confinación de radiación terahertz de banda ancha, agregando a esto también las investigaciones hechas previamente por Keilmann [9].

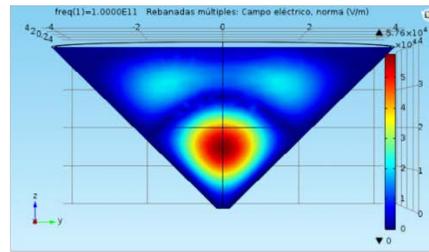
Con base en las consideraciones mencionadas, se realizó la simulación electromagnética mostrada en la Figura 3.2 para la guía de onda cónica de ángulo medio de 45.71° , diámetro en la punta de $300 \mu m$, diámetro de entrada $4.25 mm$ y $4 mm$ altura donde pudo verificarse que el campo eléctrico terahertz tiende a confinarse en la punta del cono a la frecuencia de simulación de $0.1 THz$. La Figura 3.3 muestra las mismas condiciones de simulación pero a una frecuencia de $0.2 THz$.

3.1. SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE SONDA CÓNICAS

a. Vista en el plano XY



b. Vista en el plano YZ



c. Vista en el plano XZ

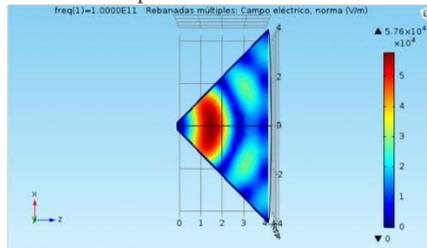
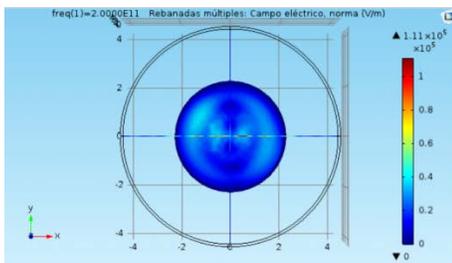
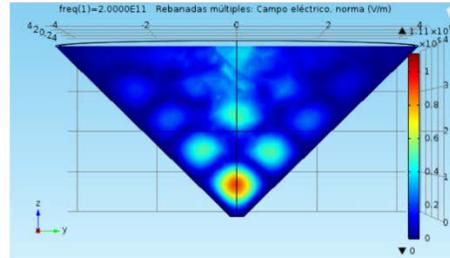


Figura 3.2. Tres diferentes visualizaciones de la simulación electromagnética de la sonda cónica de 91.42° a frecuencia 0.1 THz en el *software* COMSOL *Multiphysics*.

a. Vista en el plano XY



b. Vista en el plano YZ



c. Vista en el plano XZ

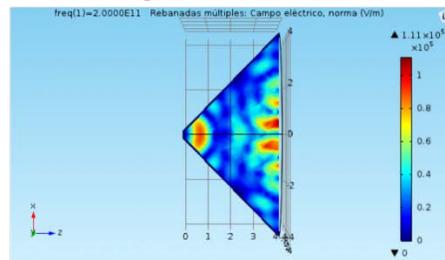


Figura 3.3. Tres diferentes visualizaciones de la simulación electromagnética de la sonda cónica de 91.42° a frecuencia 0.2 THz en el *software* COMSOL *Multiphysics*.

De las simulaciones mostradas en las Figuras 3.2 y 3.3, pudo notarse funcionamiento de la sonda a diferente frecuencia terahertz.

3.1. SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE SONDA CÓNICAS

Por otra parte, se realizó la simulación de la sonda cónica de 30° de ángulo completo, radio en la apertura de $500 \mu m$ y altura de $12 mm$ a una frecuencia de $0.3 THz$. La simulación de la sonda mostrada en la Figura 3.4 fue la mayor frecuencia de simulación y requirió un tiempo muy prolongado de simulación (aproximadamente de 6 a 12 horas). Fue posible observar la confinación del campo eléctrico terahertz en la apertura de la punta pudiéndose así verificar los resultados obtenidos por los grupos de investigación mencionados anteriormente. En la misma figura, la radiación terahertz más intensa puede ser observada en el tono rojo ($\sim 8-9.72 \times 10^4 V/m$).

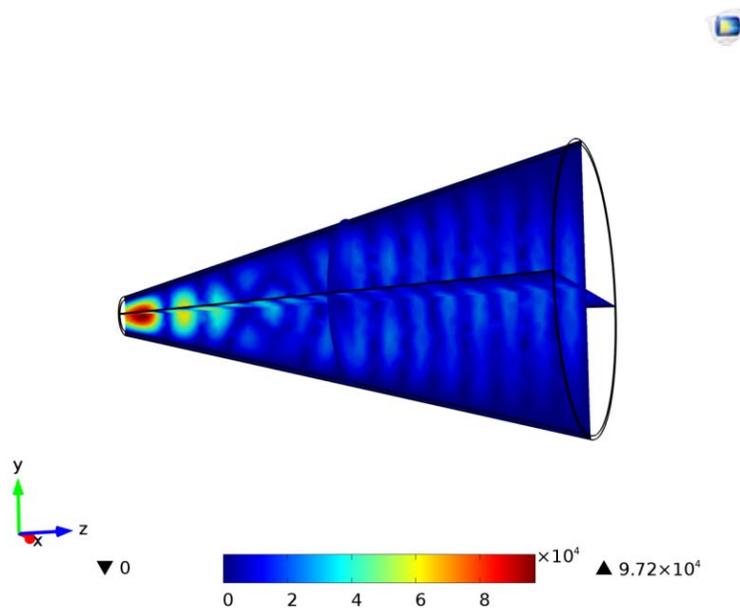


Figura 3.4. Simulación electromagnética en el *software* COMSOL *Multiphysics* donde se observa confinación de radiación terahertz en la guía de onda cónica de ángulo completo de 30° .

En la Tabla 3.1 se realizan algunas observaciones sobresalientes de las simulaciones realizadas.

Tabla 3.1. Observaciones de las simulaciones realizadas en el *software* COMSOL *Multiphysics*.

Ángulo de la sonda	Observaciones
30°	El modo es el transversal eléctrico. En esta simulación únicamente se verificó que la radiación terahertz puede ser transmitida a través de la sonda cónica y confinada en la punta. Debido a la complejidad por el número de reflexiones existentes dentro de esta guía, las simulaciones se vuelven más tardadas

3.1. SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE SONDA CÓNICAS

conforme la frecuencia terahertz es incrementada debido a que el *software* COMSOL requiere mayor capacidad computacional y se utilizó radiación terahertz monocromática a diferencia de las condiciones reales en el sistema THz-TDS donde se tiene radiación de banda ancha.

- 91.42° En la simulación de esta sonda cónica, se realizaron diferentes pruebas, por ejemplo, variando la altura del cono y/o aumentando el diámetro de la apertura. Sin embargo, en ninguno de los casos la radiación terahertz se confinó en la apertura. En estas simulaciones se probaron únicamente las frecuencias monocromáticas de 0.1 THz y 0.2 THz. De acuerdo a los experimentos realizados en [19] y los realizados en este trabajo en sondas con esta medida angular experimentalmente sí transmiten la radiación terahertz de banda ancha lo cual será mostrado en el capítulo 4.
-

3.2. Fabricación de sondas cónicas

Al inicio de este trabajo, mientras se entendía el funcionamiento del *software* COMSOL *Multiphysics* y se exploraba la manera de hacer simulaciones, se analizaban a la vez las posibles maneras de fabricar las sondas cónicas. Se tenían dos posibles métodos de fabricación, uno de ellos es mediante el uso de impresión 3D y el otro mediante maquinado.

Una vez realizadas las simulaciones donde se verificó el funcionamiento de las sondas a frecuencias terahertz e n cuanto a co nfinación del campo eléctrico en las aperturas y después de ha cer una i nvestigación m ás pr ofunda, donde s e e ncontraron t rabajos ya reportados en la literatura sobre el uso de estas sondas, para lo cual se utilizó el primer método de fabricación mencionado.

Se utilizó el *software* de diseño CAD (diseño asistido por computadora) SolidWorks. En este *software* fue posible realizar los di seños de las sondas cónicas (Figura 3.5), los cuales tenían como parámetro principal la longitud del diámetro de entrada. Este se basó en las dimensiones de una lente hiperhemisférica de silicio con la que en principio se contaba para co lectar la radiación terahertz p roveniente de la an tena emisora en el sistema THz-TDS. Se realizaron los diseños de conos de alturas 4 mm, 7 mm entre otros y tamaños de apertura 150 μm , 250 μm , 500 μm etc. A los diseños se les añadió una pieza cilíndrica para poder acoplarlos a la montura que sostiene a la antena emisora y lente hiperhemisférica.

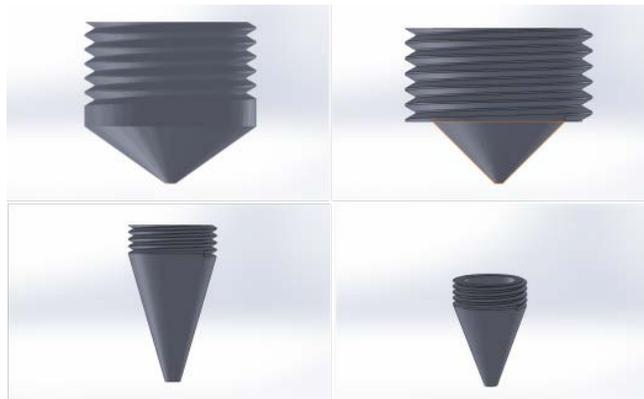


Figura 3.5. Diseños algunas sondas cónicas con diferentes dimensiones realizados en el *software* SolidWorks con la finalidad de fabricarlos mediante impresión 3D.

Una vez fabricados algunos de estos diseños con el polímero PLA (ácido poliláctico), se observó que las aperturas contaban con aperturas mayores a las diseñadas, esto se debía a la resolución que tienen las impresoras 3D utilizadas. Por eso se utilizó el sistema evaporación térmica de la Figura 3.6 para deposición de películas delgadas con el que cuenta el grupo de fotónica de microondas de CCADET para depositar en el interior de estos prototipos una película de 200 nm de plata.

3.2. FABRICACIÓN DE SONDAS CÓNICAS



Figura 3.6. Sistema de evaporación térmica de metales usada para deposición de películas delgadas.

Aunque este método de fabricación parecía ser muy prometedor, al final no resultó así dado que existía sobre las paredes de la sonda un material (usado como material de soporte durante la impresión 3D) que al someter al vacío existente dentro de la campana de evaporación donde se fundía la plata contaminó el ambiente de deposición y la capa de metal no se adhirió correctamente.

Después de esto, se procedió a fabricar la primera sonda de 90° de ángulo completo, utilizando un torno (máquina para mecanizado de metales) que se encuentra en el taller mecánico del grupo de fotónica de microondas del CCADET y un avellanador cónico 90° de 90° (es un tipo de broca utilizada para hacer cortes en metales). Este método de fabricación fue bastante sencillo y se utilizó un esmeril para pulir la punta para hacer la apertura. El único inconveniente que se tuvo fue que la apertura no quedó con las dimensiones deseadas ni simétrica. Uno de los conos fabricados es mostrado a la izquierda de la Figura 3.7. Los experimentos realizados con esta sonda de 90° son mostrados en el capítulo 4.

Después de probar el segundo método de fabricación, surgió la idea de probar un método más el cual es llamado revestimiento y colado dental [24] con el fin de fabricar un cono de 30° de ángulo completo. Para esto, se maquinó en el torno una punta cónica de aluminio a ese ángulo la cual serviría como molde para la fabricación. La fabricación se llevó a cabo por un técnico especializado en un laboratorio dental y se utilizó la aleación NPG +2 la cual está compuesta por Cu 78.7%, Al 7.8%, Au 2% y el porcentaje restante no es especificado por el fabricante pero lo componen Ni, Fe, Zn y Mn. Es importante mencionar que los metales principales que componen la aleación tienen buenas propiedades como buena conductividad y profundidad de penetración (Tabla 3.2).

3.2. FABRICACIÓN DE SONDAS CÓNICAS

Tabla 3.2. Conductividad eléctrica (σ_0) y profundidad de penetración (δ) a frecuencias THz de algunos metales [23].

Propiedad	Cu	Ag	Au	Al
$\sigma_0(10^6 \text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	59.6	63.0	45.2	37.8
δ a 1 THz (nm)	65.2	63.4	74.9	81.9

Se obtuvieron tres prototipos cónicos huecos con la superficie interior en cierto grado lisa aunque no fueron del todo estéticos en la parte exterior y tampoco tenían aperturas. Para dar mejor estética se realizó el pulido interior y exterior de los tres conos y un cuidadoso pulido en la punta para lograr aperturas micrométricas que fueron observadas con un microscopio. En la Figura 3.7 pueden observarse a la derecha dos de los tres conos fabricados con este método en una vista lateral y superior. La Figura 3.8 muestra una de las aperturas de uno de los conos fabricados con este método vista con un microscopio.

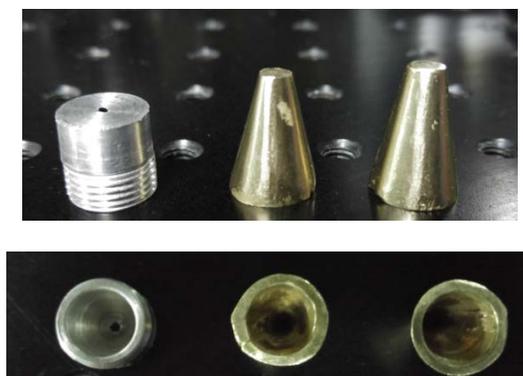


Figura 3.7. A la izquierda se muestra el cono fabricado en el taller mecánico de CCADET con el torno y avellanador de 90° de ángulo completo. A la derecha se muestran dos de los tres conos de 30° de ángulo completo fabricados con el método de revestimiento y colado dental.



Figura 3.8. Se muestra la apertura de uno de los conos fabricados con el método de revestimiento y pulido dental.

3.2. FABRICACIÓN DE SONDAS CÓNICAS

Esta sonda fue montada en el sistema THz-TDS para convertirlo en un sistema de microscopía terahertz y se realizaron las pruebas correspondientes se describen en el capítulo 4.

En este trabajo, se fabricaron sondas cónicas de bajo costo comparados con los costos métodos de fabricación empleados en los trabajos reportados en la literatura. Con estas sondas fabricadas se logró confinar la radiación terahertz en las aperturas de estas sondas que era uno de los enfoques principales a desarrollar. A partir del método de revestimiento y colado dental es posible fabricar sondas con mejores características para mejorar los resultados que se han obtenido en este trabajo que son descritos posteriormente.

La comparación de los tres métodos de fabricación de sondas cónicas de bajo costo empleados en este trabajo es mostrada en la Tabla 3.3 donde se mencionan algunas ventajas y desventajas de cada método.

Tabla 3.3. Comparación de los métodos de fabricación de sondas cónicas de bajo costo.

Método de fabricación	Ventajas	Desventajas
Impresión 3D	El diseño es sencillo en algún <i>software</i> CAD.	La calidad del diseño de las puntas cónicas impresas depende mucho de la resolución de la impresora 3D. Debe limpiarse muy cuidadosamente el material de soporte que utiliza la impresora una vez fabricada la sonda, de no ser así el metal no se adherirá correctamente a las paredes interiores del cono.
Maquinado	Es posible fabricar con alta facilidad conos de 60° y 90° de ángulo completo. El cono queda uniforme en el interior.	Si se desea fabricar sondas cónicas para otros ángulos deben fabricarse cortadores especiales. No se tiene un control para la realización de las aperturas.



3.2. FABRICACIÓN DE SONDAS CÓNICAS

Sondas cónicas de 90°



Aperturas aproximadamente 1 mm.

Revestimiento y colado dental

Es sencillo fabricar en el torno moldes cónicos sólidos. El cono queda uniforme en el interior.

Es necesario tener el equipo dental para su fabricación. No se tiene un control para la realización de las aperturas de los conos. Para hacer las aperturas se utilizó un esmeril por esta razón las aperturas obtenidas no quedaron simétricas.

Sondas cónicas 30°



De los tres métodos de fabricación trabajados, el método de revestimiento y colado dental fue el de los mejores resultados ya que se logró fabricar las sondas cónicas de 30°, las cuales eran de mayor interés de acuerdo a los trabajos reportados en la literatura. A partir de este método pueden fabricarse sondas de una gran variedad de ángulos. Se pueden mejorar los modelos fabricados haciendo aperturas más simétricas y depositando en la parte interior huecas metálicas como oro, plata o cobre las cuales tienen propiedades aptas para terahertz (conductividad y profundidad de penetración). Los dos métodos de fabricación restantes no resultaron ser tan eficientes para la fabricación de este tipo de sondas.

Capítulo 4

Desarrollo instrumental y resultados

En este capítulo se describe el sistema de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo (THz-TDS) que se ha utilizado para la caracterización de distintas lentes de silicio (Si) que colectan la radiación terahertz emitida por una antena fotoconductive y se ilustra en la Figura 4.1. Se presentan resultados de los distintos pulsos terahertz obtenidos con cada lente de silicio así como su gráfica espectral. Se muestra la configuración del sistema de microscopía terahertz basado en el sistema THz-TDS al que se le adaptó una sonda cónica metálica hueca de 30° y/o 90° de ángulo completo y se presentan las correspondientes señales emergiendo de las aperturas. Para poder determinar la resolución espacial del sistema de microscopía basado en espectroscopía fue necesario realizar la prueba del filo de la navaja. Puesto que la radiación emitida por la antena fotoconductive es de banda ancha, se realizó el análisis espectral para determinar a qué frecuencia el sistema tendría una mejor resolución espacial.

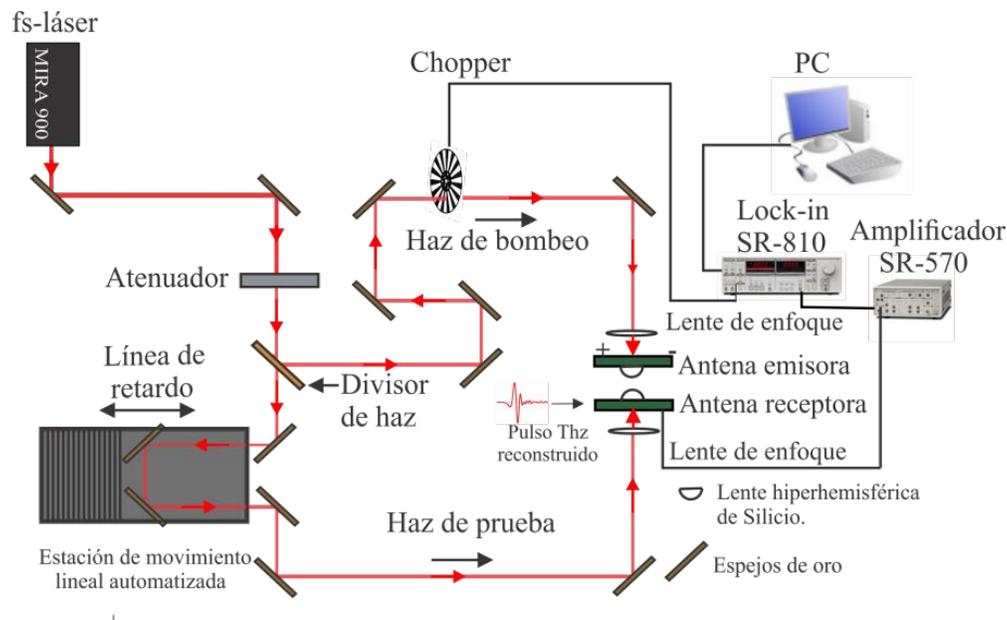


Figura 4.1. Esquemático del sistema de espectroscopía THz-TDS desarrollado en el trabajo doctoral del Dr. Gaudencio Paz [14].

4.1. Sistema de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo

El arreglo experimental de THz-TDS utilizado se muestra en la Figura 4.1. Un láser pulsado de Titanio:Zafiro (Coherent Mira 900) es utilizado como fuente de pulsos ópticos de femtosegundos en el infrarrojo cercano. Este láser emite pulsos con una frecuencia de repetición de 76 MHz y duración de aproximadamente 200 fs a una longitud de onda de 800 nm . Un par de espejos reflejan el haz pulsado hacia un atenuador de plata el cual evita que la potencia irradiada por el láser cause algún daño a los elementos del sistema. El sistema THz-TDS es una configuración óptica de tipo prueba-bombeo, esto significa que un divisor de haz refleja la mitad de la potencia a uno de los caminos ópticos y transmite la otra parte por otro camino. En el esquemático, el haz de bombeo es reflejado por una configuración de espejos y direccionado hacia un *chopper* que modula el haz de pulsos a una frecuencia de 2 kHz . El haz es de nuevo reflejado en un espejo que lo direccionará hacia una lente esférica con una distancia focal de 12 mm . El haz infrarrojo enfocado por la lente excitará el *gap* (apertura tipo dipolo) de la antena emisora provocando la generación de portadores de carga en el semiconductor. La antena emisora es polarizada con un voltaje de 30 V de tal manera que como fue descrito en el capítulo 2, el campo eléctrico estático aplicado a la antena acelerará a los portadores de carga en el dipolo de la antena induciéndose a sí una fotocorriente en las terminales dipolo tal como lo predice Maxwell en sus ecuaciones. Las cargas aceleradas provocarán que la antena comience a radiar a frecuencias terahertz. Una lente de silicio es utilizada para coleccionar la radiación terahertz que emite la antena en todas direcciones. En este trabajo se utilizan las lentes comerciales: HSL-101 la cual es de tipo hiperhemisférica, CSL-12 que es de tipo colimadora y la FSL-D12 que es de enfoque, todas del distribuidor comercial *Batop optoelectronics*.

Por otra parte, el haz de prueba es sometido a un retardo temporal al mover los dos espejos situados sobre la estación de movimiento automatizada como se ilustra en el esquemático del sistema. Al mover estos espejos, se varía la longitud de camino óptico del haz de prueba con la finalidad de que tenga un retardo temporal respecto al haz de bombeo. La estación de movimiento lineal es controlada a través de una interface gráfica creada en el software LABVIEW y tiene una resolución mínima de movimiento de $1.25\text{ }\mu\text{m}$ correspondiente a un tiempo de 4.16 fs . El haz es enfocado por una lente esférica (10 mm de distancia focal) en el dipolo de la antena receptora que a la vez es excitada por la radiación terahertz proveniente de la antena emisora (esta radiación es coleccionada por una lente de silicio). De esta manera la antena receptora detecta y reconstruye un pulso terahertz en el tiempo a base del promedio de millones de pulsos de la manera descrita en el capítulo 2.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LENTES DE Si PARA COLECTAR RADIACIÓN TERAHERTZ

Las antenas fotoconductoras utilizadas en el sistema THz-TDS son de tipo comercial TERA8-1 comercializada por la compañía alemana *MenloSystems* cuya estructura es ilustrada en la Figura 4.2. El patrón de la antena está fabricado en oro sobre el material fotoconductor arseniuro de galio crecido a bajas temperaturas (LT-GaAs). También puede observarse que el patrón de la antena tiene un *gap* de $5\ \mu\text{m}$, que es la región de la antena donde es enfocado el haz infrarrojo. Para realizar el enfoque se utiliza un sistema de microscopía básico y cámaras CCD.

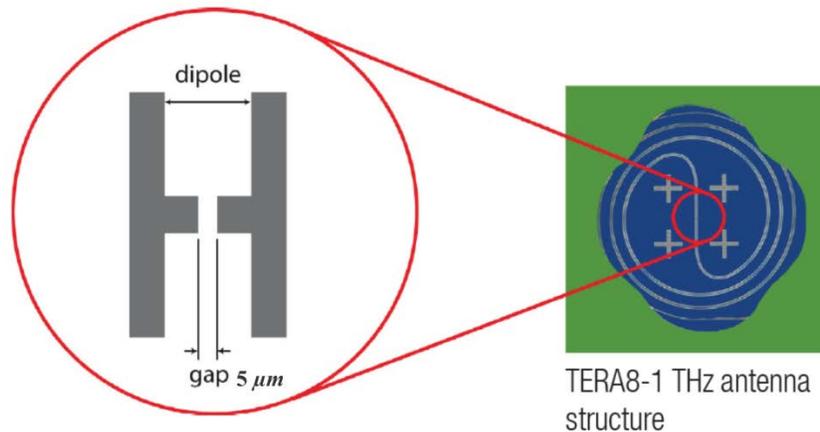


Figura 4.2. Estructura de la antena fotoconductoras comercial TERA8-1 [Apéndice A].

La instrumentación utilizada para la reconstrucción del pulso terahertz en el tiempo consiste en un amplificador de corriente modelo SR-570, el cual es un amplificador de instrumentación que pre-amplifica la señal de corriente (del orden de picoamperes) detectada en la antena receptora. La señal amplificada, es introducida en el amplificador Lock-in SR-810, que es configurado con una constante de tiempo de $300\ \text{ms}$ y una sensibilidad de $2\ \text{mV/nA}$ (Lock-in) y/o $10\ \text{mV/nA}$ (Lock-in) en las mediciones hechas en este trabajo.

4.2. Caracterización de lentes de Si para coleccionar radiación terahertz

La manera de coleccionar la radiación terahertz principalmente en la antena emisora es sumamente importante para tener una mejor transmisión de radiación hacia el receptor y análogamente una mejor detección terahertz. La combinación del tipo de lente con la alineación correcta respecto al dipolo de la antena resultará en una mayor intensidad del pulso y una menor duración temporal que se traduce a un espectro de mayor intensidad y de mayor ancho espectral. La Figura 4.3 muestra la gráfica en el tiempo y en la frecuencia que tiene la antena comercial utilizada teniendo las condiciones óptimas de potencia y alineación.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LENTES DE Si PARA COLECTAR RADIACIÓN TERAHERTZ

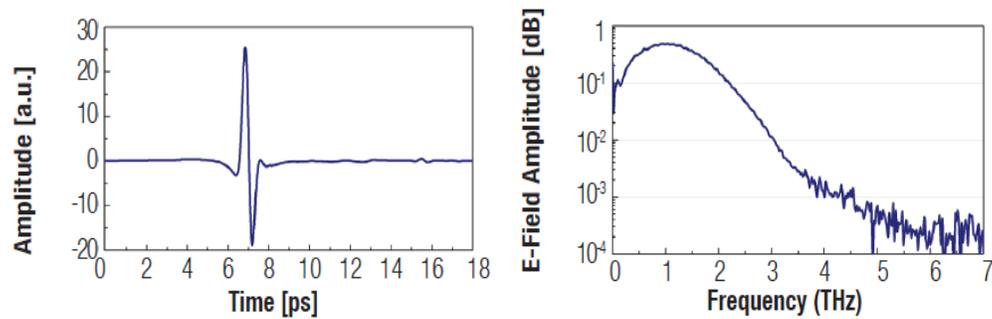


Figura 4.3. A la izquierda, pulso terahertz en el tiempo y a la derecha su espectro [Apéndice A].

De la manera mencionada previamente, en este trabajo se llevó a cabo la caracterización de tres distintas lentes comerciales de silicio. En la actualidad se trabajó con los tres modelos, mientras que en el receptor siempre se mantuvo la lente hiperemisférica HSL-10. Estas lentes son mostradas en la Figura 4.4.

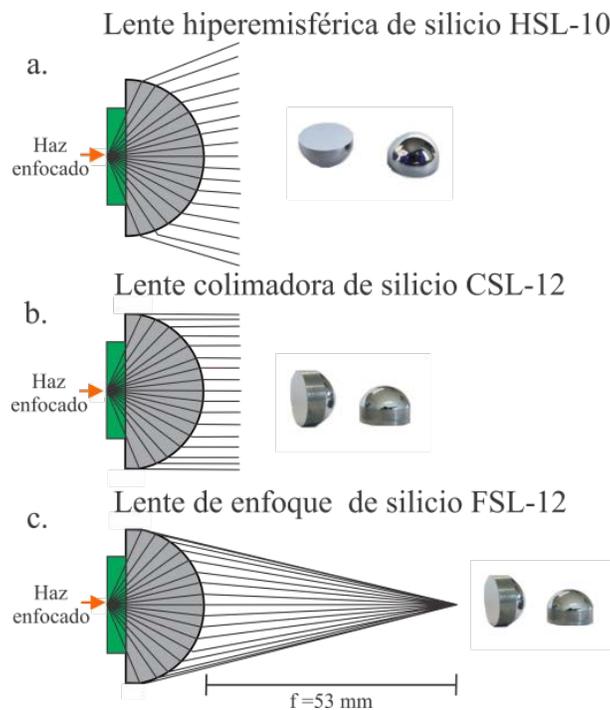


Figura 4.4. A la izquierda se muestran los esquemas de las lentes de silicio utilizadas para coleccionar la radiación terahertz en las antenas emisora y receptora. A la derecha, los modelos comerciales del fabricante *Batop Optoelectronics*.

El arreglo experimental con el que se trabajó en el laboratorio de pulsos ultracortos es mostrado en la Figura 4.5.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LENTES DE Si PARA COLECTAR RADIACIÓN TERAHERTZ

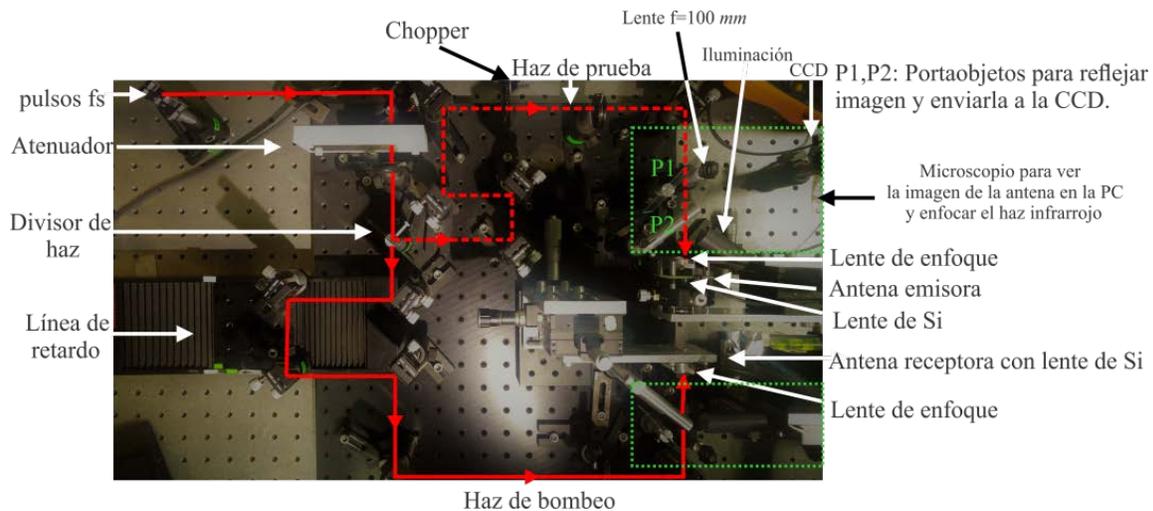


Figura 4.5. Sistema experimental THz-TDS montado en el laboratorio.

De los datos obtenidos se tienen los resultados experimentales de la gráfica de la Figura 4.6 que muestra la comparación del campo eléctrico detectado en el tiempo de la caracterización de las distintas lentes de silicio. Aunque los pulsos ocurrieron en diferentes tiempos puede notarse una clara diferencia en la amplitud del campo eléctrico colectado por la lente de enfoque FSL-12 con una amplitud de 22.66 mV que supera al pulso obtenido para la lente hiperhemisférica de 2.14 mV y al pulso obtenido con la lente colimadora de 7.15 mV . La razón de que exista esta diferencia tan notable se debe a la manera de colectar la radiación emitida por la antena por cada lente y la correcta alineación que se tenga respecto al dipolo de la antena. Por una parte, la lente hiperhemisférica está diseñada para sistemas que utilizan espejos parabólicos. En la Figura 4.4.a puede observarse que existe divergencia de la radiación, esto significa que se pierde un porcentaje que se verá reflejado en una menor intensidad del pulso. Con la lente colimadora no existe tal divergencia de la radiación THz sin embargo se observó durante las pruebas que esta lente tiene una alta sensibilidad a desalineaciones, lo cual se manifestó en la forma del pulso el cual presenta algunos reflejos no deseados instantes de tiempo después del pulso de mayor amplitud. En el caso de la lente de enfoque se consiguió una buena alineación respecto al dipolo de la antena que fue sin duda por el uso del posicionador de lentes CXY1 de *Thorlabs* con el que no se contaba al probar las lentes hiperhemisférica y colimadora. La forma de colectar la radiación en particular que tiene la lente de enfoque es de gran importancia en sistemas de microscopía terahertz debido a que es ideal tener el campo eléctrico confinado en una menor área, para poder interrogar muestras de tamaño comparable a la longitud de onda de la frecuencia de trabajo. Por otra parte, una buena intensidad del pulso es de gran ayuda cuando se desea analizar muestras que tienen fuerte absorción a este rango de frecuencias.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LENTES DE Si PARA COLECTAR RADIACIÓN TERAHERTZ

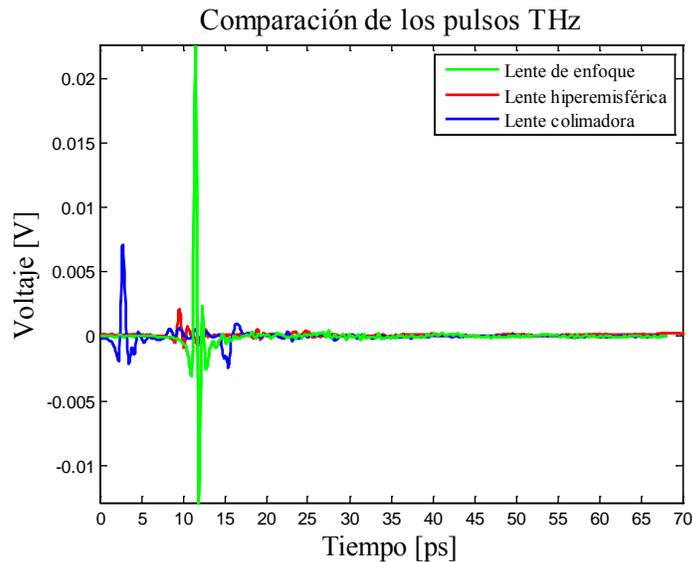


Figura 4.6. Gráfica que muestra la comparación de la intensidad del campo eléctrico de los pulsos THz en el tiempo obtenidos al coleccionar la radiación THz de la antena emisora con las tres distintas lentes de silicio.

Por otra parte, las gráficas espectrales obtenidas al aplicar la FFT al pulso terahertz reconstruido a partir de 1 promedio de millones de pulsos en dominio del tiempo son mostradas en la Figura 4.7. Como era de esperarse, el espectro obtenido a partir de la lente de enfoque presenta un comportamiento menos ruidoso, de mayor ancho, mayor amplitud espectral y su máximo en magnitud se posiciona a una frecuencia THz mayor que los obtenidos en los otros casos. Estos datos son resumidos en la Tabla 4.1.

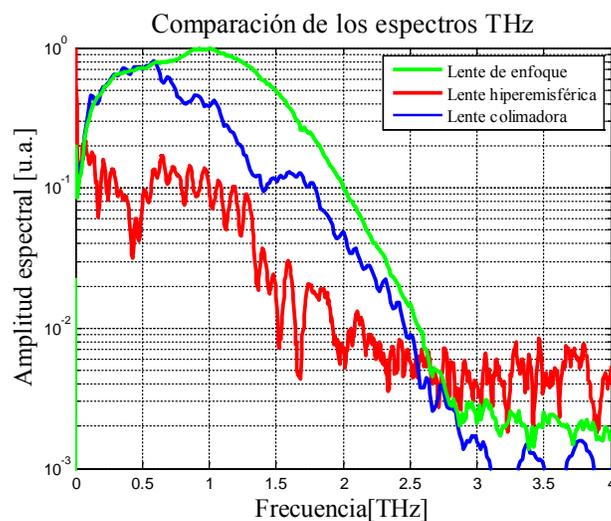


Figura 4.7. Gráfica que muestra la comparación espectral de los pulsos THz obtenidos coleccionando la radiación de la antena emisora con las tres distintas lentes de silicio.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LENTES DE Si PARA COLECTAR RADIACIÓN TERAHERTZ

Tabla 4.1. Se muestra la frecuencia del máximo de magnitud de los espectros THz y el ancho de banda de cada espectro obtenido de cada lente de Si.

Tipo de lente de Si	Frecuencia en el máximo de magnitud [THz]	Ancho de banda [THz]
Hiperhemisférica HSL-10	0.644	2
Colimadora SCL-12	0.600	3
Enfoque CSL-12	1	3

El espectro resultante obtenido a partir de la lente de enfoque es comparable con los datos proporcionados por el fabricante que son mostrados en la gráfica espectral de la Figura 4.3. Para determinar el ancho espectral de la Tabla 4.1, se considera el ancho hasta donde la señal comienza a ser ruidosa. Puede notarse que el ancho espectral para las lentes colimadora y de enfoque es muy similar sin embargo están diferenciados en la frecuencia correspondiente al máximo en magnitud.

4.3. Detección de radiación THz confinada en las aperturas de las sondas cónicas

Lograr confinar radiación terahertz en un área de dimensiones comparables con su longitud de onda es de gran interés en aplicaciones de microscopía de campo cercano, ya que la mejora en la resolución espacial depende del tamaño del *spot* emergiendo por una apertura. Esta es la principal motivación de este trabajo, confinar la radiación terahertz en aperturas en la punta de sondas cónicas con diferentes ángulos.

Como se mencionó en el capítulo 3, se fabricaron sondas cónicas metálicas huecas con dos distintos ángulos: 90° y 30° . La primera sonda estudiada fue la de 90° de ángulo completo utilizando las configuraciones mostradas en la Figura 4.8. En el arreglo 4.8.a fue utilizada la lente hiperhemisférica y en el 4.8.b la lente de enfoque en la antena emisora.

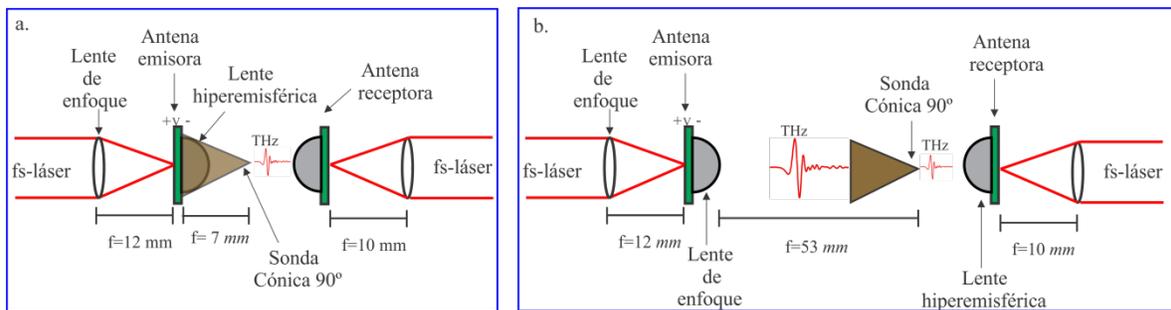


Figura 4.8. Esquemático de las configuraciones experimentales utilizadas para las pruebas a la sonda cónica de 90° . a. Configuración sonda 90° -lente hiperhemisférica. b. Configuración sonda 90° -lente colimadora.

Con base en los datos experimentales obtenidos con ambas configuraciones, se obtuvieron las gráficas de la Figura 4.9. En ambos casos se utiliza la misma configuración en el lock-in en cuanto a constante de tiempo de 300 ms y sensibilidad de 2 mV/nA . En la gráfica de comparación de los pulsos THz puede notarse que estos ocurren en diferentes tiempos ya que los experimentos fueron realizados en distintos momentos de las pruebas experimentales. Puede notarse además que los pulsos difieren en la forma y en amplitud. La diferencia en la forma de los pulsos se debe a la manera de alinear las lentes respecto al dipolo de la antena y a ligeras desalineaciones en la colocación de la sonda cónica, sin embargo puede notarse que los espectros tienen una magnitud y un ancho de espectral aproximadamente de 2 THz , ambas características muy similares debido a que la apertura de salida del cono es la misma para las dos configuraciones.

4.3. DETECCIÓN DE RADIACIÓN THz CONFINADA EN LA APERTURAS DE LAS SONDAS CÓNICAS

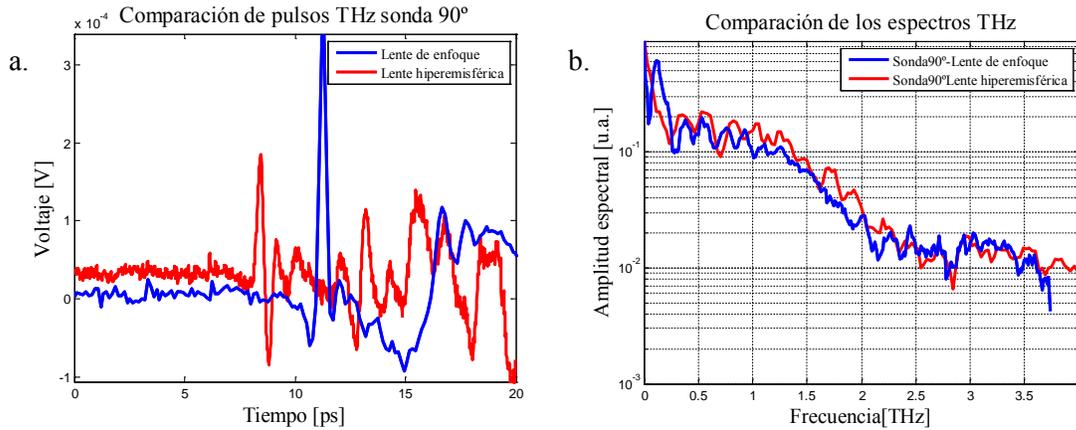


Figura 4.9. a. Gráfica que muestra la comparación del campo eléctrico terahertz confinado en la apertura de la sonda cónica de 90° con la lente hiperhemisférica y la lente de enfoque. b. Gráfica de comparación del espectro de los pulsos THz emergiendo de la apertura del cono de 90° con los dos tipos de lentes.

Por otra parte, con base en la simulación en software COMSOL *Multiphysics* de la sonda cónica de 30° y la información encontrada en la literatura como los trabajos de Keilmann, Shuchang Liu y Oleg Mitrofanov [9][20], en cuanto al estudio de sondas cónicas como las fabricadas en este trabajo se esperaba que utilizar sondas con este ángulo mejoraría la transmisión de radiación terahertz. La idea de montar la configuración de la Figura 4.10 donde una lente de enfoque es utilizada para concentrar la radiación de banda ancha en la punta de la sonda motivó aún más a tener mejores resultados en la amplitud del campo eléctrico detectado.

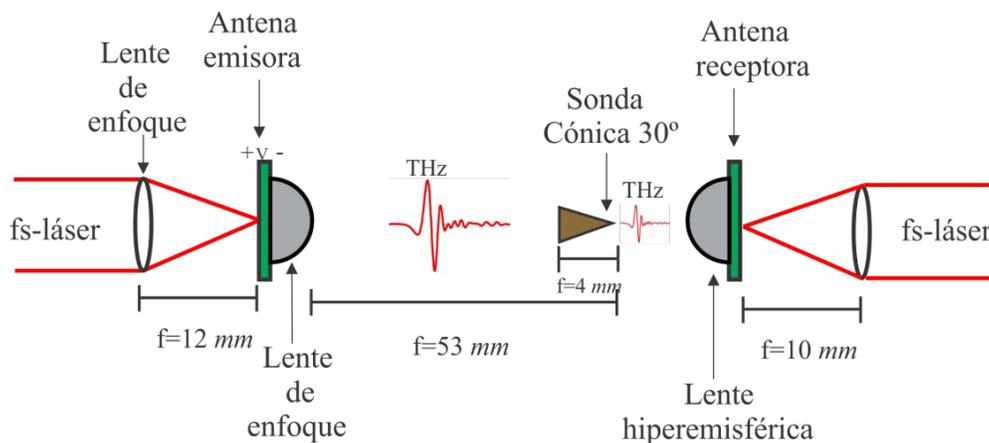


Figura 4.10. Esquemático de la configuración experimental utilizada para las pruebas a la sonda cónica de 30° . La punta con apertura de la sonda cónica es posicionada en el plano focal de la lente de enfoque de silicio.

4.3. DETECCIÓN DE RADIACIÓN THz CONFINADA EN LA APERTURAS DE LAS SONIDAS CÓNICAS

Inicialmente se trabajó con la sonda cónica de 30° de altura 1.7 mm sin embargo en los resultados obtenidos se notó que la confinación de campo eléctrico no superaba a los resultados obtenidos con la sonda cónica de 90°, esto pudo deberse a que existían mayores pérdidas por reflexión en las paredes de la sonda cónica debido a que la radiación debía pasar por un camino de mayor longitud. Por esta razón, se modificó la altura de la sonda y se dejó de una longitud de 4 mm.

Dado a que la radiación terahertz no la podemos detectar mediante instrumentos electrónicos u ópticos como una cámara CCD, para tener una idea de cómo es la forma del *spot* situado en el foco de la lente o su tamaño, lograr alinear el sistema mostrado en la Figura 4.9 no fue una tarea tan sencilla. Existen cámaras THz pero son demasiado costosas y no se cuenta con ellas en el laboratorio, por lo tanto, la alineación del sistema se llevó a cabo con el haz infrarrojo del láser, considerando que la radiación terahertz radiada por la antena emisora y colectada por la lente de enfoque debería seguir la misma dirección de propagación del pulso óptico. La sonda se montó en una estación lineal de movimiento aproximadamente a la distancia focal proporcionada por el fabricante, sin embargo, al ser distancias en el orden de milímetros se realizó un escaneo moviendo la estación lineal en la dirección de propagación del haz hasta encontrar la mayor amplitud THz emergiendo por la sonda cónica.

El campo eléctrico detectado en la apertura de la sonda es mostrado en la gráfica de la Figura 4.11.a. En la parte superior derecha de la gráfica se tiene el pulso THz de referencia el cual es introducido a la sonda con una amplitud de 13.94 mV. Al comparar esta intensidad con la que emerge de la sonda de 0.24 mV resulta una relación de varias decenas de diferencia, además el pulso muestra algunas oscilaciones dispersas en el tiempo durante poco más de 50 ps. Las oscilaciones tardías en el tiempo indican un comportamiento multimodo donde las componentes de frecuencia están interfiriendo entre sí. Por otra parte, en la Figura 4.11.b se muestra el espectro del pulso emergiendo por la sonda, donde se observa la frecuencia de corte de la sonda ubicada en 102.50 GHz. Esto significa que de acuerdo con la ecuación 3, considerando que la apertura de la sonda es circular, esta debe tener un radio de 857.67 μm . Se notó que esta longitud es superior a la que realmente tiene la sonda esto puede deberse a que la apertura no es simétrica. Tener la apertura un tamaño considerablemente grande es la razón por la que en el espectro solo pasan frecuencias de longitud de onda comparable con las dimensiones de la apertura. Puede observarse además que las frecuencias que se propagan a través de la sonda se encuentran en el rango de 102.50 GHz hasta 527.30 GHz. Si la apertura tuviera dimensiones menores se podrían propagar dentro de esta las frecuencias mayores ubicadas en la banda espectral del pulso THz de referencia (3 THz). Aun que se esperaba tener buenos resultados con aperturas de menores dimensiones, los resultados obtenidos son suficientes para la realización de un análisis espectral y determinar así la resolución que tiene el sistema de microscopía THz

4.3. DETECCIÓN DE RADIACIÓN THz CONFINADA EN LA APERTURAS DE LAS SONDAS CÓNICAS

propuesto, lo cual es descrito posteriormente para las ambas sondas.

Como comentario adicional, se menciona que se cuenta con sondas de ángulo 30° de aperturas mucho menores a las de la sonda probada sin embargo se menciona que se realizaron pruebas correspondientes obteniendo pulsos THz considerablemente de muy baja relación señal-ruido, que no permitían un análisis confiable. Aun se siguen haciendo pruebas mejorando la alineación de la sonda ubicada en el plano focal de la lente de enfoque para conseguir pulsos de mejores características y poder analizarlos.

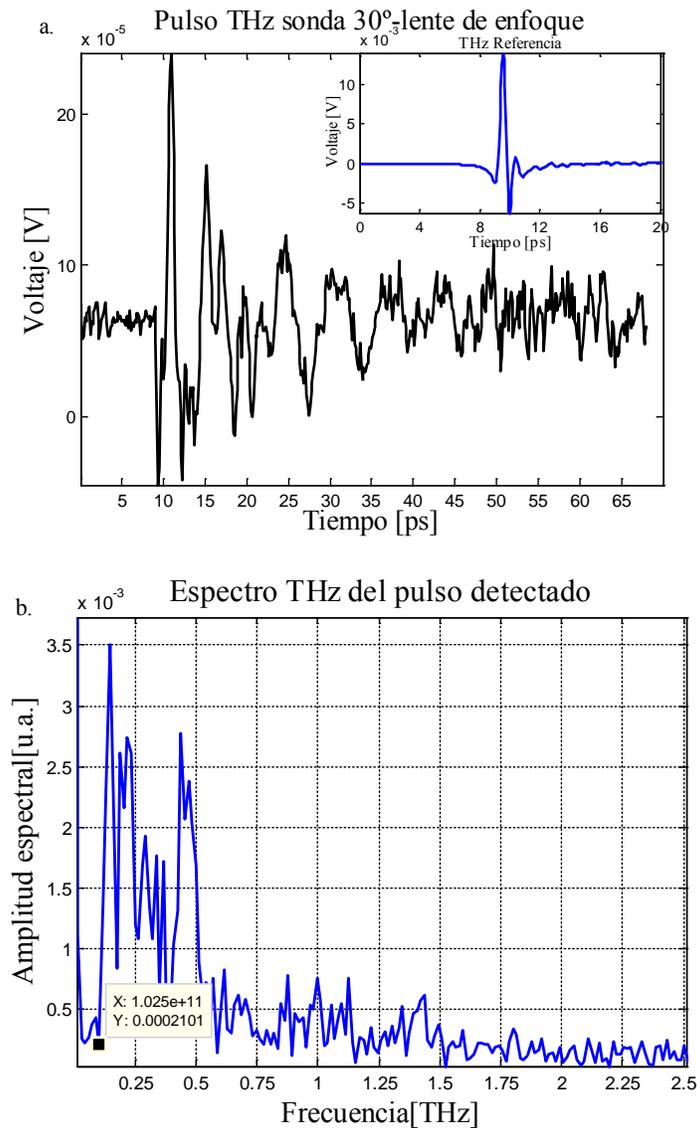


Figura 4.11. a. Gráfica del campo eléctrico terahertz confinado en la apertura de la sonda cónica de 30° . b. Espectro del pulso terahertz obtenido.

4.4. Caracterización del *spot* THz usando el método del filo de la navaja

Un sistema de microscopía basado en THz-TDS y antenas fotoconductoras utiliza sondas con pequeñas aperturas para confinar el campo eléctrico en el tiempo el cual tiene unos cuantos picosegundos de duración y un espectro THz de banda ancha. En estos sistemas, la resolución es una característica muy importante que depende directamente del tamaño de la apertura y del *spot* con el cual una muestra es interrogada. Así, es posible definir la resolución como la mínima distancia de separación que puede ser diferenciada entre dos regiones claramente distinguibles.

En este trabajo se muestran los resultados del método de la navaja el cual fue utilizado para medir el perfil del haz terahertz de banda ancha de tipo transmisión en el sistema THz-TDS. El esquema de la Figura 4.12.a muestra el montaje experimental para aplicar este método y la Figura 4.12.b muestra un esquema donde la navaja debe desplazarse en los ejes XY de tal manera que esta cubra el *spot* terahertz por completo.

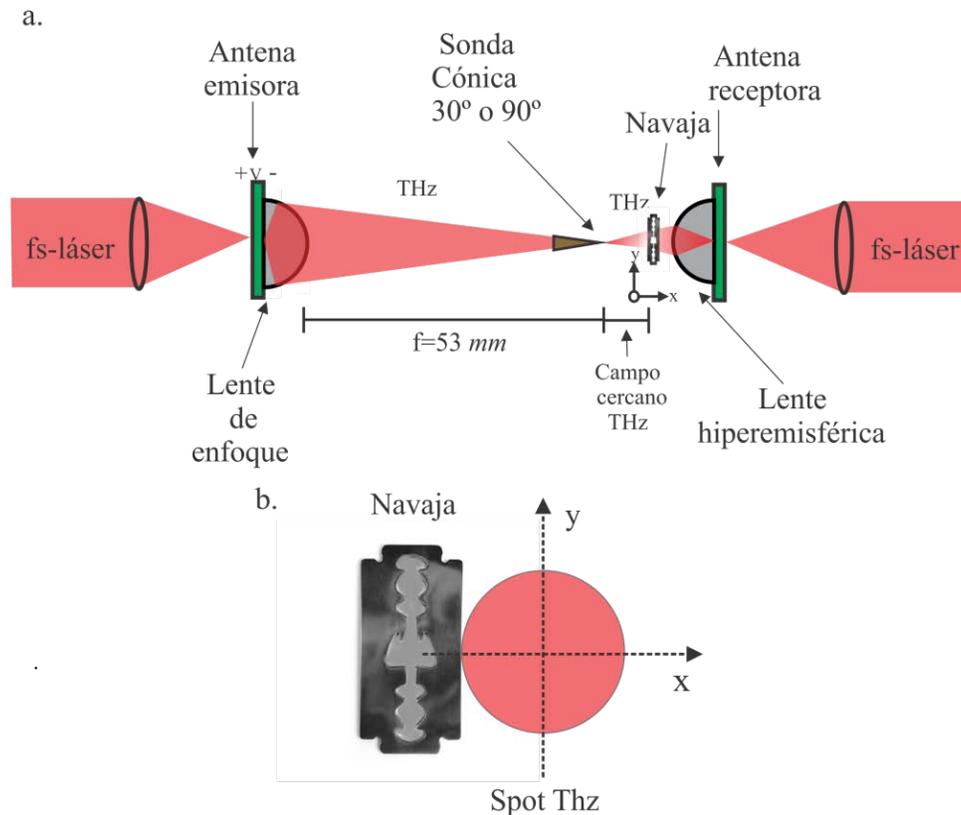


Figura 4.12. a. Esquemático que muestra la configuración montada para la prueba de la navaja usando las sondas cónicas de 30° y 90°. b. Corte del *spot* terahertz con una navaja.

4.4. CARACTERIZACIÓN DEL SPOT THz USANDO EL MÉTODO DEL FILO DE LA NAVAJA

El sistema de barrido utilizado en este trabajo consta de dos platinas, una para cada eje las cuales tienen acoplado un motor a pasos para su movimiento automatizado como se ilustra en la Figura 4.13. Este sistema es controlado a través de una interfaz gráfica programada en el software LABVIEW. Para hacer el barrido, es necesario que el paso de los motores esté en el orden de micrómetros, para esto, se tiene el *Driver* R208 el cual tiene la capacidad de dividir un paso del motor en distintas fracciones de este. En el sistema utilizado un paso de $20 \mu m$ es acortado hasta una octava parte de este quedando así pasos de $2.5 \mu m$. Se utilizó una interfaz gráfica la cual es configurada introduciendo valores como la longitud de escaneo, el número de pixeles a realizar, la cantidad de pasos por pixel y un delta de X o delta de Y según sea el caso. Entenderemos por pixel a cada medición en el sistema THz-TDS para la obtención de un pulso terahertz emergiendo de la sonda. Las mediciones en todas las pruebas realizadas fueron en una ventana de $10240 \mu m$ (línea de retardo de $\sim 65 ps$) a 512 puntos (significa que se toman 512 mediciones en $10240 \mu m$) con una constante de tiempo en el lock in de $300 ms$. Estas características son necesarias para tener un pulso reconstruido como el de la Figura 4.11.a. y obtener así su espectro aplicando la FFT como el ilustrado en la Figura 4.10.b. El programa para hacer el barrido en el eje X o Y repite tantas mediciones según los pixeles configurados y proporciona los datos en un archivo de texto para ser analizados. De esta manera la navaja es desplazada

teniendo las mediciones de los pulsos para cada posición de la navaja hasta cubrir por completo el área que ocupa la apertura de la sonda cónica. En la Figura 4.13 puede apreciarse a la derecha en la pantalla de la interfaz gráfica un recuadro que muestra uno de los barridos realizados donde las partes más claras representan la mayor intensidad de los pulsos medidos. Conforme la navaja va tapando el haz THz cambian los tonos hacia el azul y la parte negra corresponde a las mediciones donde la navaja ha cubierto el haz y la intensidad ha disminuido por completo.

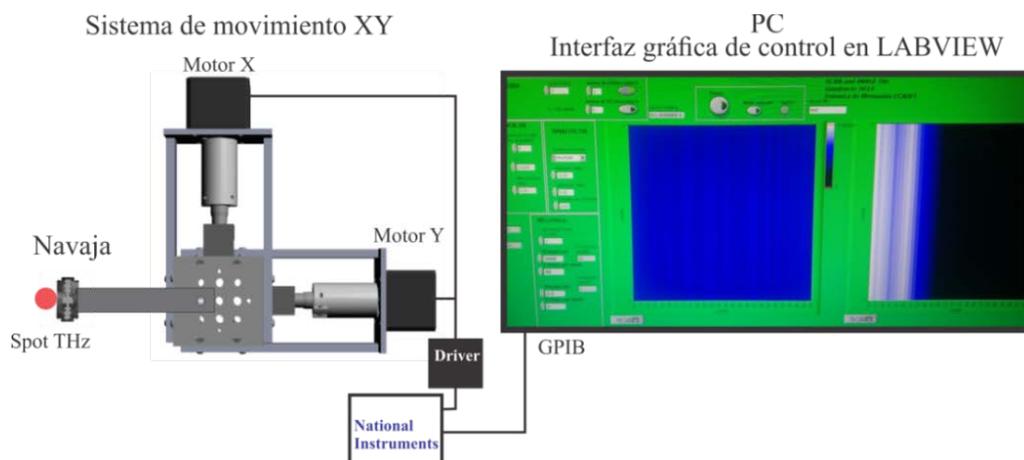


Figura 4.13. Esquemático del sistema de movimiento automatizado XY para la prueba de la navaja.

4.4. CARACTERIZACIÓN DEL SPOT THz USANDO EL MÉTODO DEL FILO DE LA NAVAJA

Considerando que el perfil del haz terahertz es de tipo Gaussiano, para cada sonda se realizó el barrido XY con base en la Figura 4.14. Para el escaneo en X el dy equivale a $2.5 \mu m$ y dx tiene una longitud distinta para cada caso. Para el escaneo en Y se aplica la misma consideración de manera inversa.

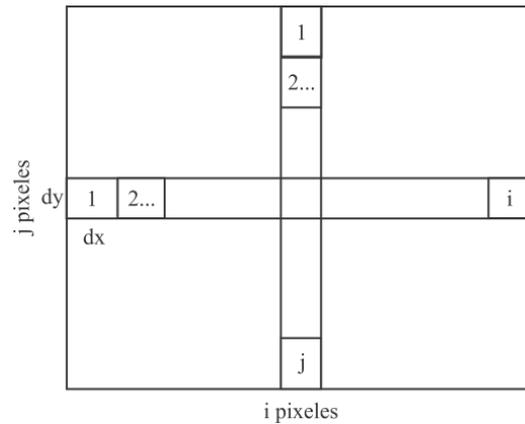


Figura 4.14. Consideración para el escaneo en XY para la prueba de la navaja

4.4.1. Prueba de la navaja a la sonda cónica de 90°

A partir de las mediciones del sistema THz-TDS y el sistema de barrido automatizado se realizó la prueba de la navaja haciendo el barrido a la sonda cónica de 90° en el eje X mostrado en la Figura 4.15, con las siguientes características de escaneo: se configuró en la interface en LABVIEW (50×1) *pixeles* correspondiente a un área total de escaneo de (5000×2.5) μm teniendo dimensiones para cada pixel de (100×2.5) μm , en otras palabras $dx=100 \mu\text{m}$ y $dy=2.5 \mu\text{m}$. Para el escaneo en Y se configuró un $dx=2.5 \mu\text{m}$ y $dy=50 \mu\text{m}$, así el barrido total fue de (1×38) *pixeles* correspondiente a un área total de escaneo de (2.5×1900) μm . Por razones de tiempo, la longitud de barrido para el eje Y fue disminuido, debido a que durante el experimento en el eje X se observó que en una menor longitud de desplazamiento la navaja podía cubrir por completo la apertura. Esta es la razón por la que difiere la longitud de barrido para ambos casos.

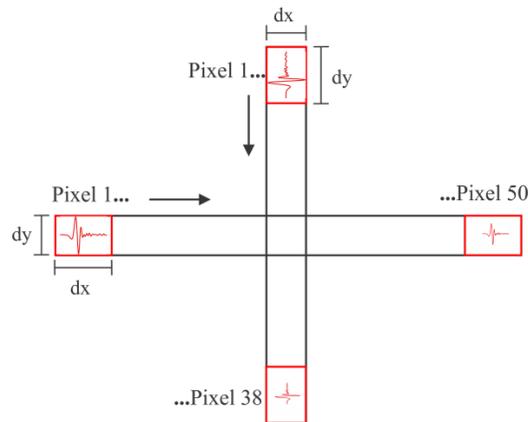


Figura 4.15. Esquema del barrido para la prueba de la navaja en la apertura de la sonda de 90°.

Los datos obtenidos fueron analizados obteniendo para el eje X cincuenta gráficos en el tiempo y sus correspondientes espectros. Se realizó una comparación de los pulsos en el tiempo y en dominio de la frecuencia y se observó que los pulsos solo difieren en intensidad en ambos casos, teniendo el mismo comportamiento en cuanto a la aparición de máximos y mínimos en las señales (en el tiempo ocurrían siempre después de 8 ps y en las gráficas espectrales ocurrían siempre en las mismas frecuencias). A partir de esto, se consideró analizar el espectro del primer pulso donde se tenía la intensidad máxima de la señal para extraer de este la frecuencia de corte de 43.5 GHz , determinando que apertura en el eje X es de un orden de magnitud superior a la longitud de onda de 1 THz .

Debido a que la radiación emitida por la antena emisora es de banda ancha, fue necesario hacer un análisis espectral de las mediciones para obtener la resolución del sistema a determinadas frecuencias. Para esto, considerando que todos los espectros tienen el mismo comportamiento, se seleccionó del primer espectro del barrido en X las

4.4.1. PRUEBA DE LA NAVAJA A LA Sonda CÓNICA DE 90°

frecuencias donde se observaron máximos en la amplitud espectral. Las frecuencias seleccionadas son: (0.103, 0.117, 0.132, 0.190, 0.205, 0.366, 0.513, 0.557, 0.776) THz. Con base en esto, fue posible obtener una gráfica de dx respecto a la amplitud espectral para cada uno de los espectros obtenidos (en cada pixel) en las nueve frecuencias seleccionadas. Esta gráfica es mostrada en la Figura 4.16.

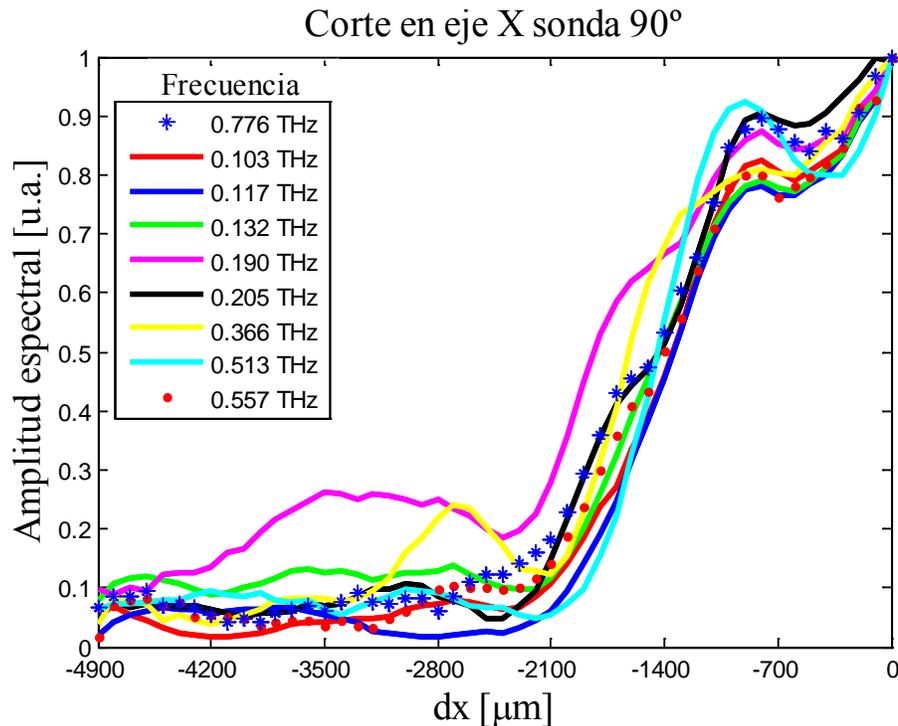


Figura 4.16. Gráfica de la amplitud espectral respecto a la posición de la navaja en el eje X. Comparación de la amplitud de cada espectro medido en cada pixel en las frecuencias donde se tuvieron máximos en amplitud con la sonda cónica de 90°.

En esta gráfica comparativa, de la posición 0 mm hasta ~ -1000 μm pueden notarse las mediciones en el barrido donde la intensidad es máxima la cual va disminuyendo de manera diferente para las distintas frecuencias hasta llegar a un valor muy cercano a cero cuando la apertura de sonda ha sido cubierta por completo por la navaja. De esta gráfica fue posible extraer las gráficas donde las pendientes de decaimiento de la intensidad son más abruptas dado a que estas nos indican que la longitud del *spot* terahertz es comparable con el diámetro en el eje X de la apertura de la sonda. Estas frecuencias son 0.205 THz y 0.513 THz. El análisis para determinar la longitud del *spot* terahertz de las frecuencias mencionadas consiste en hacer un ajuste de las gráficas de los datos obtenidos utilizando una función de error, en este caso se utilizó una función sigmoide. A partir de la primera

4.4.1. PRUEBA DE LA NAVAJA A LA SONDA CÓNICA DE 90°

derivada de la función de error es posible determinar el diámetro de *spot* a partir del ancho a media altura (FWHM por sus siglas en inglés) del perfil gaussiano resultante el cual está definido a una distancia $1/e$ de la curva resultante. En la Figura 4.17 se muestran las gráficas para determinar el diámetro del *spot* correspondiente a la frecuencia de 0.205 THz.

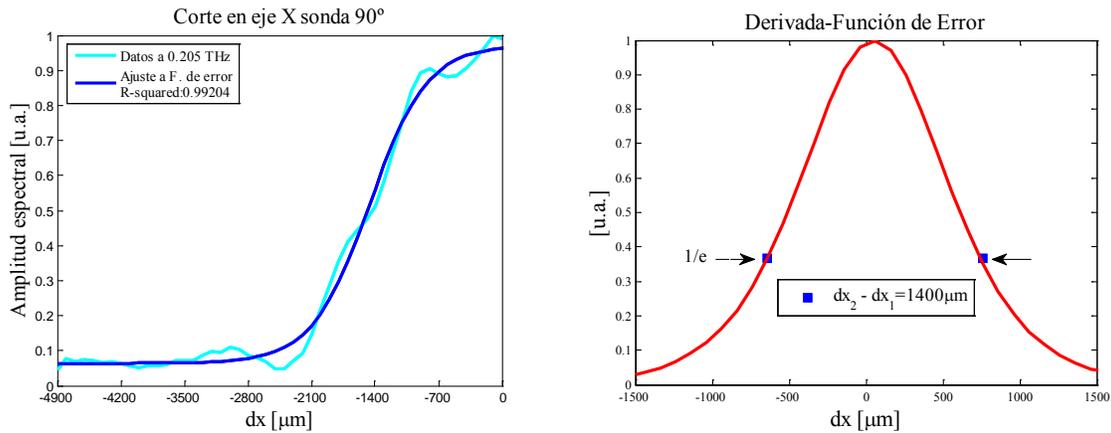


Figura 4.17. A la izquierda se muestra la gráfica de ajuste sigmoide a los datos obtenidos en las mediciones con la sonda cónica de 90°. Con base en este ajuste se obtiene la función de error. A la derecha se muestra el ancho al FWHM del perfil gaussiano resultante al aplicar la primera derivada a la función de error. El ancho que determina la longitud se sitúa a $1/e$.

Se realizó un análisis de datos muy similar al mencionado anteriormente para obtener el diámetro de *spot* a la frecuencia de 0.513 THz. Las gráficas son mostradas en la Figura 4.18. A esta frecuencia se obtiene un diámetro al FWHM en X de 600 μm , el cual es un buen resultado considerando que la apertura de la sonda es superior a esta longitud. Este valor es asociado con la resolución a la frecuencia analizada.

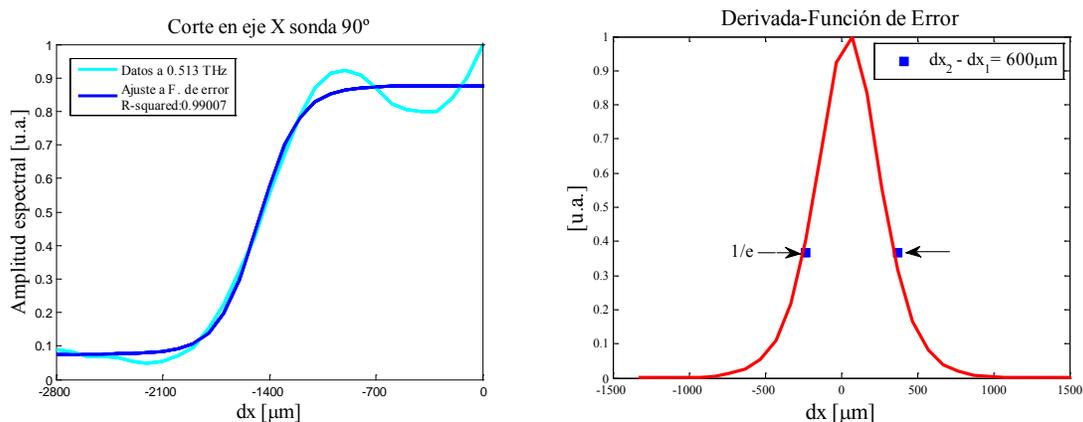


Figura 4.18. A la izquierda se muestra la gráfica del ajuste de los datos obtenidos con la sonda cónica de 90° con una función de error. A la derecha el ancho del perfil gaussiano que define la resolución en el eje X para la frecuencia 0.513 THz.

4.4.1. PRUEBA DE LA NAVAJA A LA SONDA CÓNICA DE 90°

La Tabla 4.2 muestra un resumen de los resultados obtenidos donde es claro que las resoluciones obtenidas para el eje X son comparables con la longitud de onda de las frecuencias correspondientes. Es importante mencionar que en particular la resolución espacial de 600 μm es inferior al tamaño de la apertura de la sonda que es de aproximadamente 1 mm . Estos resultados demuestran la capacidad de esta sonda para transmitir frecuencias terahertz y confinarlas en la apertura.

Tabla 4.2. Diámetro del *spot* THz en el eje X al FWHM para la sonda de 90°.

Frecuencia [THz]	λ THz [μm]	Diámetro del <i>spot</i> al FWHM en el eje X [μm]
0.205	1463.415	1400 ($\sim\lambda$)
0.513	584.795	600 ($\sim\lambda$)

Para complementar la resolución espacial del *spot* completo en ambos ejes, es necesario obtener la resolución o diámetro del *spot* al FWHM en el eje Y a las mismas frecuencias analizadas anteriormente y así poder obtener el tamaño del *spot* terahertz de este sistema de microscopía.

La gráfica de la Figura 4.19 muestra los datos obtenidos del barrido al eje Y siguiendo el mismo procedimiento realizado para el análisis de datos en el eje X donde los máximos en amplitud se presentaron en las mismas frecuencias que se analizaron para el eje X.

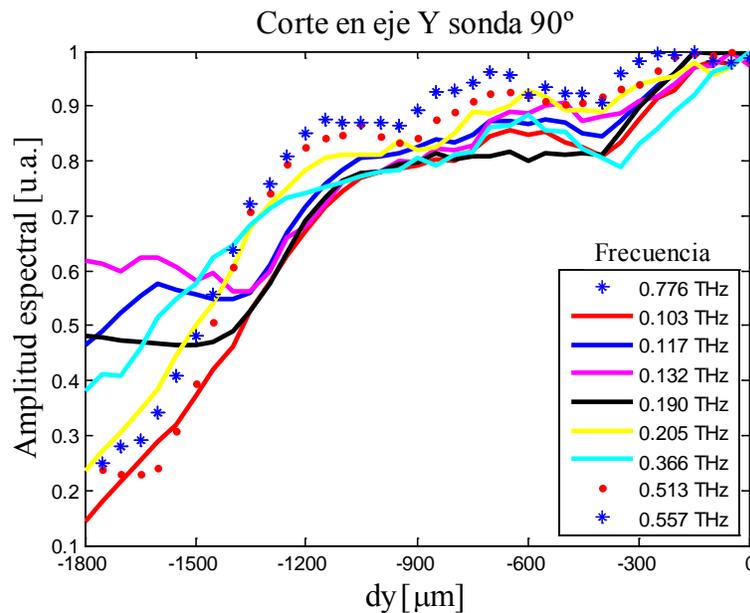


Figura 4.19. Gráfica de amplitud espectral según la posición de la navaja en el eje Y. Comparación de la amplitud de cada espectro medido en cada pixel a las frecuencias donde se tuvieron máximos en amplitud con la sonda cónica de 90°.

4.4.1. PRUEBA DE LA NAVAJA A LA SONDA CÓNICA DE 90°

En las gráficas de la Figura 4.20 es muy notorio que las mediciones realizadas para el barrido en el eje Y no fueron satisfactorias como las obtenidas para el eje X. La gráfica de ajuste de los datos a la función de error, presenta grandes desviaciones las cuales son atribuidas a la inestabilidad del láser MIRA900, el cual se vio afectado durante las mediciones por cambios de temperatura. Esta inestabilidad provoca cambios en la corriente detectada. Además de esto, la apertura de la sonda en este eje presenta una mayor longitud. Esto se ve reflejado en un mayor diámetro de *spot* al obtener el ancho $1/e$ del perfil gaussiano.

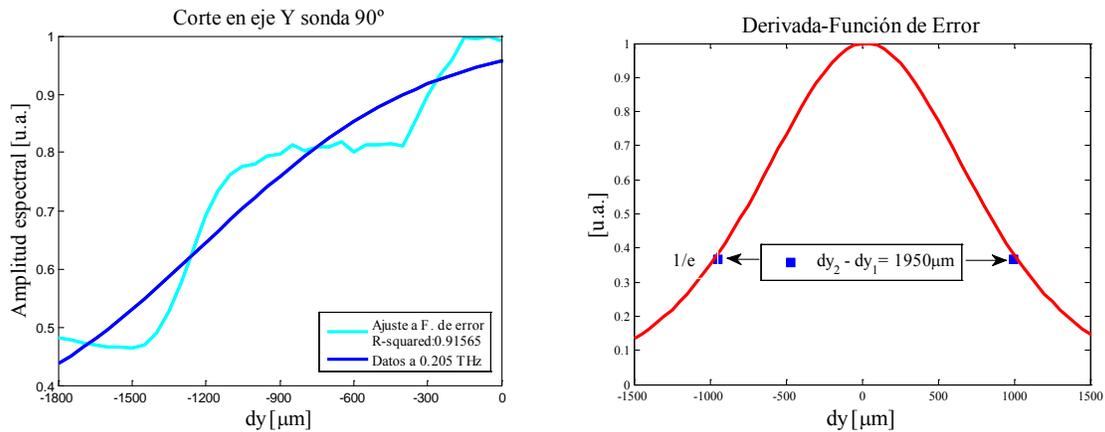


Figura 4.20. A la izquierda se muestra la gráfica del ajuste de los datos obtenidos con la sonda cónica de 90° con la función de error. A la derecha se muestra la resolución en el eje Y a la frecuencia de 0.205 THz a partir del ancho $1/e$ del perfil gaussiano.

Como era de esperarse debido a los inconvenientes mencionados, la resolución en el eje Y para la frecuencia de 0.513 THz

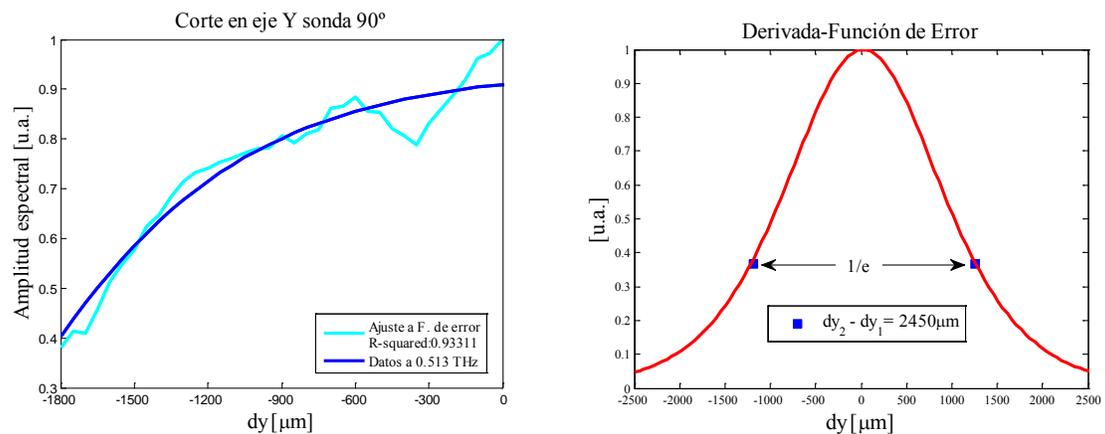


Figura 4.21. Gráficas de ajuste de datos obtenidos con la sonda cónica de 90° con una función de error y de ancho $1/e$ del perfil gaussiano que determina la resolución de 2450 μm a la frecuencia de 0.513 THz.

4.4.1. PRUEBA DE LA NAVAJA A LA SONDA CÓNICA DE 90°

La Tabla 4.3 muestra los resultados principales para el barrido en el eje Y.

Tabla 4.3. Diámetro del *spot* THz en el eje Y al FWHM para la sonda de 90°.

Frecuencia [THz]	λ THz [μm]	Diámetro del <i>spot</i> al FWHM en el eje Y [μm]
0.205	1463.415	1950
0.513	584.795	2450

De los resultados del barrido para los ejes XY es muy notable que las dimensiones de del *spot* THz que emergen de la sonda rebasan en un orden de magnitud la longitud de onda de mayor frecuencia THz dentro del espectro que emite la antena. Como se mencionó previamente, dado a que las dimensiones de la apertura de la sonda cónica son considerablemente grandes, la teoría electromagnética de guías de onda circular predice que existirá una frecuencia de corte cuya longitud de onda está relacionada con las dimensiones de la apertura. Esto significa, que si la apertura es en el orden de milímetros, las frecuencias emergiendo por esta serán de longitudes de ondas similares. Al integrar los resultados obtenidos para ambos ejes, el *spot* terahertz emergiendo por esta guía de onda a la frecuencia de 0.205 THz tiene dimensiones de (1400×1950) μm . Por otra parte las dimensiones de la *spot* a la frecuencia de 0.513 THz es de (600×2450) μm . Es posible concluir que la forma de la apertura no es simétrica por tal razón, las longitudes los ejes difieren considerablemente. En resumen, este experimento se utilizó como base para describir el uso del método de la navaja para posteriormente hacer un análisis espectral del *spot* terahertz obtenido con este sistema, el cual es mejorable por supuesto con la fabricación de guías de onda cónicas de menor apertura.

4.4.2. Prueba de la navaja a la sonda cónica de 30°

Para las pruebas realizadas a la sonda de 30° se tomaron las consideraciones experimentales previamente aplicadas con la sonda de 90°. Para este caso, la configuración del sistema de escaneo XY consistió en hacer un barrido a 2500 μm en ambos ejes puesto a que la apertura tiene menores dimensiones. En este caso, las dimensiones de cada pixel en el eje X son de $(50 \times 2.5) \mu\text{m}$ y en el eje Y de $(2.5 \times 50) \mu\text{m}$. Esto es ilustrado en la Figura 4.22.

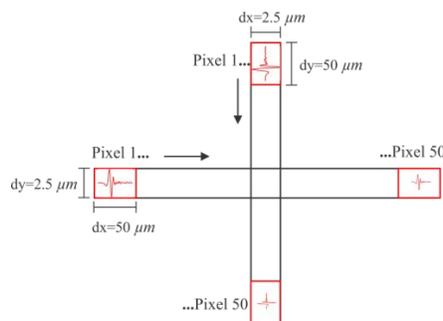


Figura 4.22. Esquema del barrido realizado para la prueba de la navaja con la sonda de 30°.

En el barrido al eje X para esta sonda, las frecuencias donde se observaron máximos en la amplitud espectral son mostradas en la gráfica de la Figura 4.23. Puede observarse en esta gráfica comparativa, el decaimiento de la amplitud espectral producto de la interacción del haz terahertz con la navaja. Se observa que el comportamiento que tiene cada frecuencia es diferente lo que nos indica que las ondas terahertz correspondientes a estas frecuencias están pasando a través de la sonda de diferente manera debido a las reflexiones.

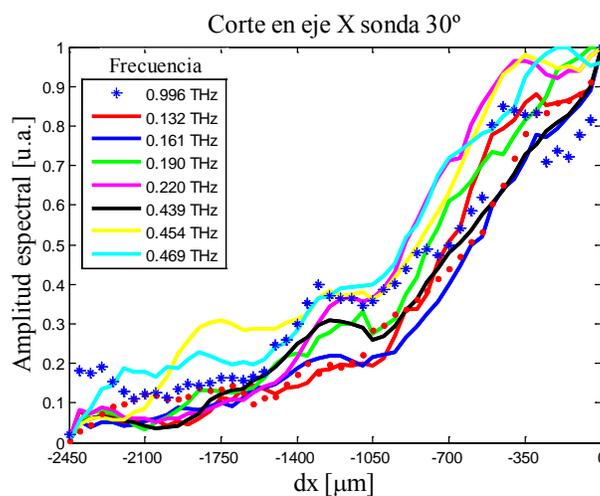


Figura 4.23. Gráfica de amplitud espectral respecto a la posición de la navaja en el eje X. Comparación de los máximos de amplitud espectral del total de espectros obtenidos a diferentes frecuencias con la sonda cónica de 30°.

4.4.2. PRUEBA DE LA NAVAJA A LA SONDA CÓNICA DE 30°

A partir de esta gráfica y de su análisis de para las distintas frecuencias por separado, se hizo la selección de frecuencias donde el diámetro en X de los diferentes *spots* fuera menor. Estas tres gráficas corresponden a las frecuencias de 0.132 THz, 0.146 THz y 0.469 THz mostradas en la Figura 4.23. Para la determinación del diámetro del *spot*, o resolución espacial en el eje X, se realiza el ajuste de los datos de amplitud espectral respecto a la posición de la navaja a una función de error y a partir de la primera derivada de esta, se obtiene la gráfica del perfil gaussiano donde el diámetro del *spot* al FWHM determina la resolución en el eje X. A partir de esto se obtiene la resolución en micrómetros. En las gráficas 4.24, 4.25 y 4.26 se muestran los resultados de este análisis para las frecuencias mencionadas. Considerando que el tamaño de la apertura no es lo suficientemente pequeño, puede notarse en la Tabla 4.4 que la resolución para el eje X, a la frecuencia de 0.132 THz la onda terahertz tiene una longitud de $950\ \mu\text{m}$, esto quiere decir que la longitud obtenida para el *spot* a esta frecuencia corresponde a un valor de $\sim \lambda/2$. Por otra parte, la resolución obtenida para 0.146 THz corresponde a una longitud menor que la longitud de onda a esta frecuencia.

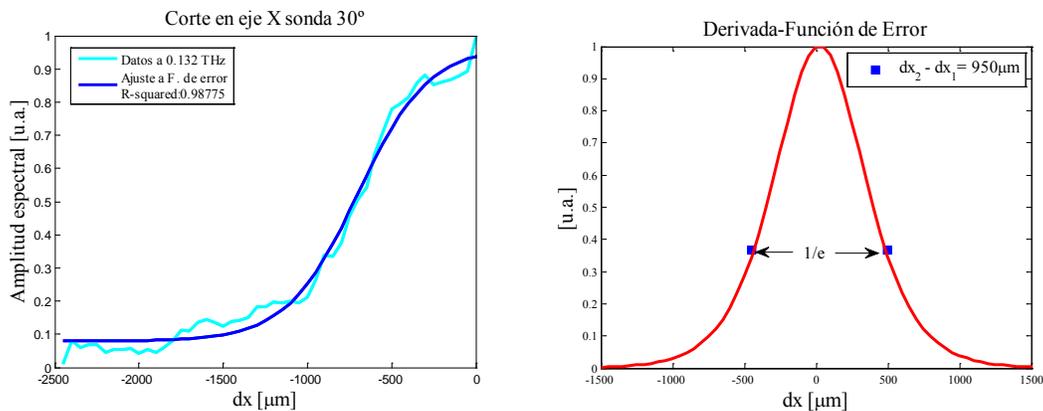


Figura 4.24. Gráficas del ajuste de los datos a una función de error para el escaneo en el eje X con la sonda cónica de 30° y a la derecha, el ancho a 1/e del perfil gaussiano a la frecuencia de 0.132 THz.

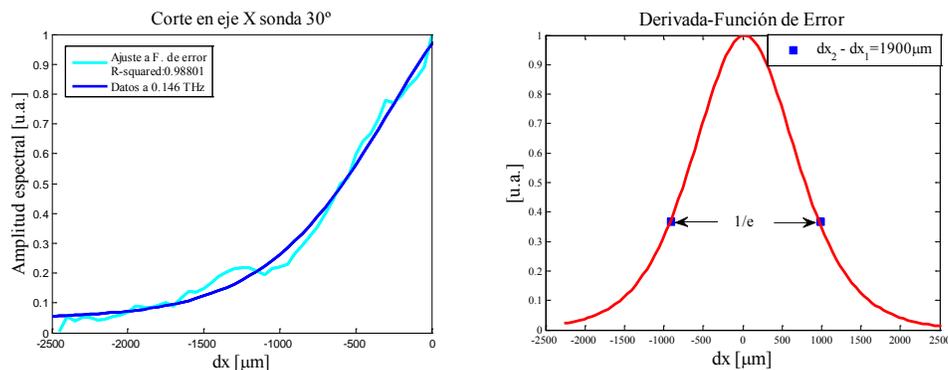


Figura 4.25. Gráficas del ajuste de los datos obtenidos con la sonda cónica de 30° con una función

4.4.2. PRUEBA DE LA NAVAJA A LA SONDA CÓNICA DE 30°

de error para el escaneo en el eje X y a la derecha, el ancho a $1/e$ del perfil gaussiano a la frecuencia de 0.146 THz.

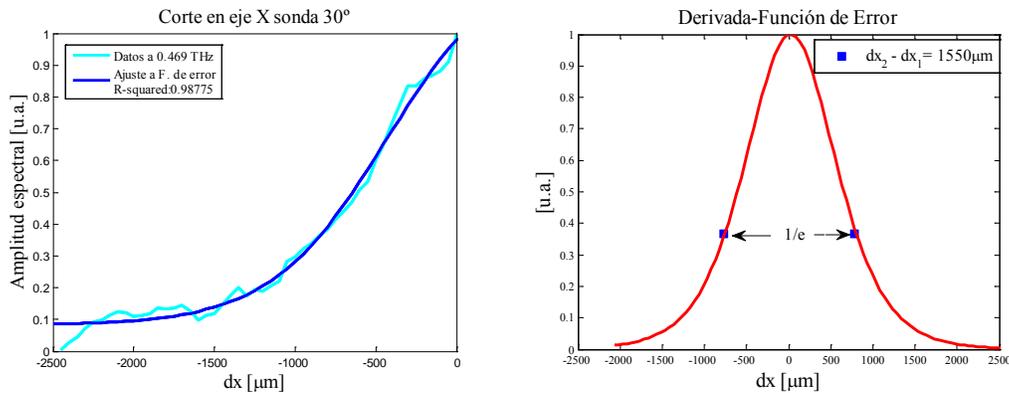


Figura 4.26. Gráficas del ajuste de los datos a una función de error para el escaneo en el eje X con la sonda cónica de 30° y a la derecha, el ancho a $1/e$ del perfil gaussiano a la frecuencia de 0.469 THz.

La resolución espacial terahertz para distintas frecuencias seleccionadas es mostrada en la Tabla 4.4. Es muy notable que para frecuencias mayores los diámetros de spot también lo sean al compararlos con la longitud de onda a estas frecuencias. Con base en esto, la sonda cónica de 30° tiene un mejor funcionamiento a frecuencias menores y esto era de esperarse puesto a que la apertura de la sonda en el eje X no era lo suficientemente comparable con longitudes de onda de frecuencias más altas.

Análogamente se realizó el análisis de los datos para el barrido en el eje Y. La Figura 4.27 muestra la comparación a las frecuencias con máximos de intensidad. Las gráficas de la Figura 4.28, muestran la amplitud espectral para las frecuencias donde se obtienen menores diámetros de spot.

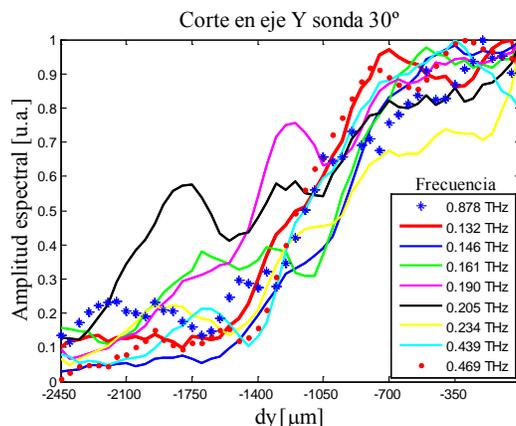


Figura 4.27. Gráfica de comparación de amplitud espectral para las diferentes posiciones de la navaja para el barrido en Y con la sonda cónica de 30°.

4.4.2. PRUEBA DE LA NAVAJA A LA SONDA CÓNICA DE 30°

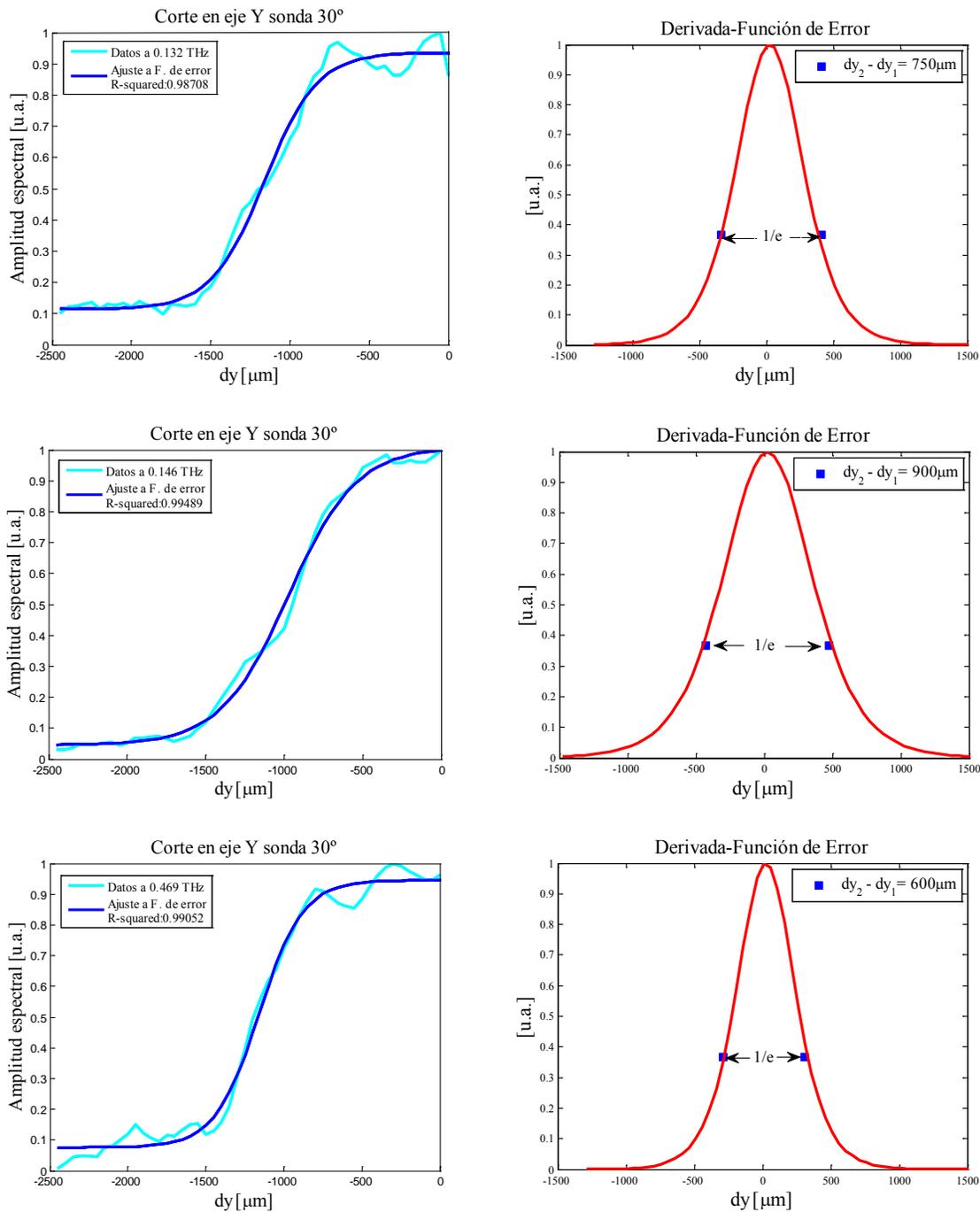


Figura 4.28. A la izquierda se muestran las gráficas de ajuste de los datos a una función de error de tipo sigmoide. A la derecha se muestran los perfiles gaussianos donde se indica la resolución en el eje Y correspondiente a las frecuencias 0.132 THz, 0.146 THz y 0.469 THz con la sonda cónica de 30°.

4.4.2. PRUEBA DE LA NAVAJA A LA SONDA CÓNICA DE 30°

En la Tabla 4.4 puede notarse que en el escaneo al eje Y, se tienen diámetros de *spot* menores que los obtenidos en los datos previamente analizados. Destacan las longitudes de $750\ \mu m$ que corresponde a un valor de ($\sim \lambda/3$) de la frecuencia $0.132\ THz$, también la longitud de $900\ \mu m$ correspondiente a ($\sim \lambda/2$) de la frecuencia $0.146\ THz$ y por último la longitud de $600\ \mu m$ donde se tuvo un valor comparable con la longitud de onda a la frecuencia de $0.469\ THz$. En la Tabla es muy clara la diferencia de resolución entre ambos ejes, esto se debe a que la forma de la apertura no era un círculo perfecto.

Tabla 4.4. Diámetro del *spot* THz al FWHM asociado a la resolución espacial del sistema en los ejes XY para distintas frecuencias.

Frecuencia [THz]	λ THz [μm]	Diámetro del <i>spot</i> al FWHM en el eje X [μm]	Diámetro del <i>spot</i> al FWHM en el eje Y [μm]
0.132	2272.727	950 ($\sim \lambda/2$)	750 ($\sim \lambda/3$)
0.146	2054.794	1900 ($\sim \lambda$)	900 ($\sim \lambda/2$)
0.161	1863.354	1650	1350
0.190	1578.947	1150	1750
0.439	683.371	1600	1540
0.469	639.659	1550	600 ($\sim \lambda$)

Al integrar los resultados de las gráficas de barridos en los ejes XY resultan tres tamaños mayormente significativos: a la frecuencia de $0.132\ THz$ se tiene una resolución de $(950 \times 750)\ \mu m$, a $0.146\ THz$ se tienen una de $(1900 \times 900)\ \mu m$ y finalmente un tamaño de *spot* de $(1550 \times 600)\ \mu m$ a la frecuencia de $0.469\ THz$.

Capítulo 5

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo de muestran la habilidad para con fines de radiación terahertz de banda ancha en aperturas de sondas cónicas de ángulo completo 30° y 90° , utilizando un sistema de espectroscopía terahertz en el dominio del tiempo. El uso de la lente de enfoque comercial y su correcta alineación respecto al dipolo de la antena emisora del sistema, influyó en gran medida para la obtención de los resultados dado a que se logró tener un pulso terahertz de referencia en el dominio del tiempo de mayor intensidad. A partir de esto, la radiación terahertz emergiendo de las sondas pudo ser detectada con una intensidad suficiente para poder realizar la prueba de la navaja y así poder conocer el perfil del haz terahertz de banda ancha al hacer un análisis espectral. Al tener un amplio rango de frecuencias viajando dentro de las sondas cónicas se tuvieron altas pérdidas por reflexiones en las paredes de las sondas que se manifestó con una considerable atenuación de la radiación introducida en los conos respecto a la radiación que fue detectada por la antena receptora. La gráfica de la Figura 4.11.a de la sonda de 30° muestra el comportamiento multimodo dentro de una guía de onda cónica al observarse oscilaciones durante poco más de 50 ps que sugieren que las componentes de frecuencia interfieren entre sí. Del espectro de esta gráfica en el tiempo pudo visualizarse la frecuencia de corte de la sonda en 102.5 THz . A partir de este valor experimental se realizó una estimación del diámetro físico de la apertura con base en la teoría electromagnética para guías de onda circulares y se notó que este valor no coincide con el diámetro real de la sonda. Lo anterior puede deberse a que la apertura no es simétrica sin embargo, la razón aun no es clara. Las dimensiones del *spot* fueron estimadas realizado el método de la navaja a esta sonda donde se obtuvieron tres tamaños de *spot* sobresalientes para tres de las nueve frecuencias analizadas. Se observó que la resolución espacial en el eje X difiere a la resolución espacial en el eje Y. Las menores dimensiones de *spot* obtenidas con esta sonda son de $(950 \times 750)\ \mu\text{m}$ a una frecuencia de 0.132 THz siendo esta la resolución espacial máxima para el sistema de microscopía terahertz alcanzada en este trabajo. Es importante mencionar que a frecuencias bajas como es el caso de 0.132 THz la sonda tuvo un mejor funcionamiento ya que se logró tener longitudes de *spot* de $\sim \lambda/2$ en el eje X y $\sim \lambda/3$ en el eje Y. Otro caso es en la frecuencia de 0.146 THz donde se tuvo una longitud de *spot* correspondiente a $\sim \lambda$ en el eje X y $\sim \lambda/2$ en el eje Y.

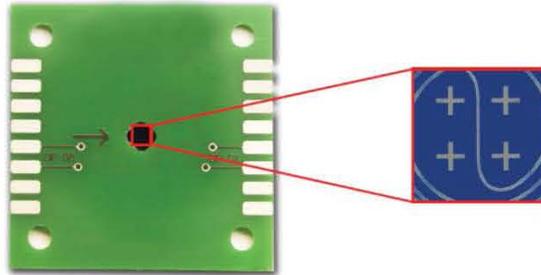
Por otra parte, la resolución espacial del sistema de microscopía resultante para la sonda cónica de 90° se vio afectada por los inconvenientes mencionados al realizar las mediciones, debido a esto, no se obtuvieron buenos ajustes de los datos a la función de error resultando así, bajas resoluciones. Los resultados obtenidos en este trabajo, son motivantes para seguir estudiando este tipo de sondas y lograr confinar el campo eléctrico terahertz en aperturas menores a las utilizadas. Sin embargo se puede concluir que este tipo de sondas no es el más apropiado para microscopía terahertz de campo cercano, debido a las altas pérdidas por reflexiones que ocasionan una fuerte atenuación de la radiación emergiendo de las sondas respecto a la radiación que incide sobre estas, pero por su tamaño, estas son prácticas para insertar en sistemas de tipo THz-TDS. No puede esperarse una buena sensibilidad de los sistemas de microscopía debido a la pequeña intensidad emergiendo por las aperturas. El sistema de microscopía terahertz desarrollado es limitado para el tipo de muestra a analizar, solo pueden considerarse materiales con muy baja absorción a frecuencias terahertz.

Apéndice A

Hojas de datos de la antena TERA8-1

TERA8-1

THz-Antennas for 800 nm

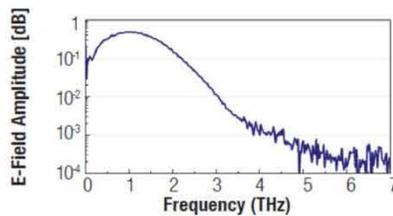
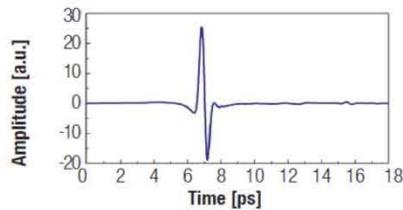


The TERA8-1 is a single dipole structure. The antenna can be used as emitter or as detector. We bring TERA8-1 to the market with our collaborator the IPM, Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik.

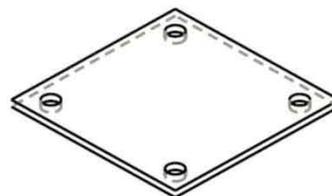
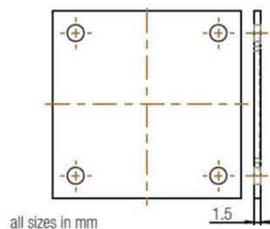
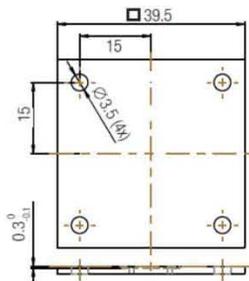
PERFORMANCE DATA

Test Conditions for Data Plots

Optical source: fs fiber laser operating at 780 nm and 100 fs pulse width. Data recorded with 20 μm dipole used on emitter and detector side. Mechanical chopper with 1 kHz lock-in detection and 30 ms integration time. 10 mW of optical input power at emitter and detector side, up to 30 V bias for emitter.



ANTENNA



MenloSystems

KEY SPECIFICATIONS

- >4 THz Bandwidth
- Optimized for Femtosecond Lasers Around 800 nm and Pulse Width <100 fs at 100 MHz Repetition Rate
- High Conversion Efficiency, 10 mW Optical Power Required

APPLICATIONS

- THz Generation & Detection
- THz Imaging

FEATURES

- Chip Mounted on PCB
- 1 Wrapped Dipole Structure on Each Chip
- Low Temperature (LT) Grown GaAS Substrate
- Robust Design without Bonding Wires
- Individual Test Report Included

RECOMMENDED OPTICAL LIGHT SOURCES

- Menlo Systems C-Fiber 780

OPTIONS

- T8-H2
Holder for photoconductive THz antenna including focusing lens for optical beam and Si-lens for THz waves; beam height: 85 mm

TERA8-1



THz-Antennas for 800 nm

SPECIFICATIONS

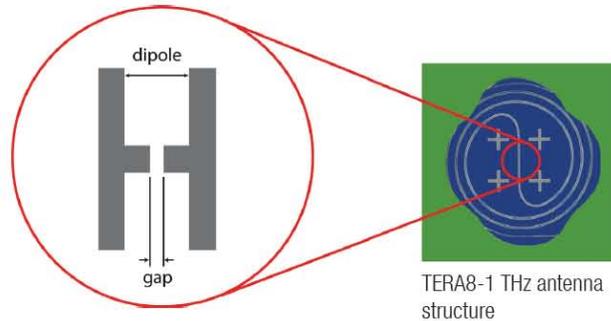
Photoconductive Material	LT-GaAs
Bandwidth	>4 THz
Dipole Structures	20 μm ; our standard length for high bandwidth and high sensitivity
Gap Size	5 μm
Substrate Size	5.0 x 5.0 x 0.35 mm ³
Electrical Connection	Bonded structure on PCB*

*The chip is mounted on a 40 x 40 mm² PCB. Optional alignment package T8-H2 can be ordered separately.

OPERATING CONDITIONS

Average Optical Power	<10 mW
Pulse Duration	<100 fs
Repetition Rate	100 MHz (80...250 MHz)
Bias Voltage	recommended: ± 35 V (max. ± 40 V)

Please refer to operating conditions for the recommended laser parameters and bias voltage. Improper use or experimental conditions are excluded from warranty.



TERA8-1 THz antenna structure

Caution: Maximum optical power 10 mW at 100 MHz laser repetition rate.

ORDERING INFORMATION

Product Code	TERA8-1	Package of TERA8-1 and T8-H2 Holder
--------------	---------	-------------------------------------

For OEM quantities please call for pricing. Prices and Specifications are subject to change without notice.



Menlo Systems GmbH
T+49 89 189 166 0
sales@menlosystems.com

Menlo Systems, Inc.
T+1 973 300 4490
ussales@menlosystems.com

Thorlabs, Inc.
T+1 973 579 7227
sales@thorlabs.com



www.menlosystems.com

www.frequencycomb.com

D-TERA8-1-EN 17/06/15

Apéndice B

Hojas de datos de la lente de enfoque FSL-12

Focusing aspheric silicon substrate Lens FL-12-f53mm
 12 mm diameter, 53 mm focus length

Aspheric focusing lens

material	undoped HRFZ-silicon
specific resistance ρ	>10 k Ω .cm
refractive index n	3.4
diameter	12 mm
height h	8 mm
distance d	8.6 mm
flat surface	polished
aspheric surface	rough (antireflective)
PCA chip thickness t	0.6 mm

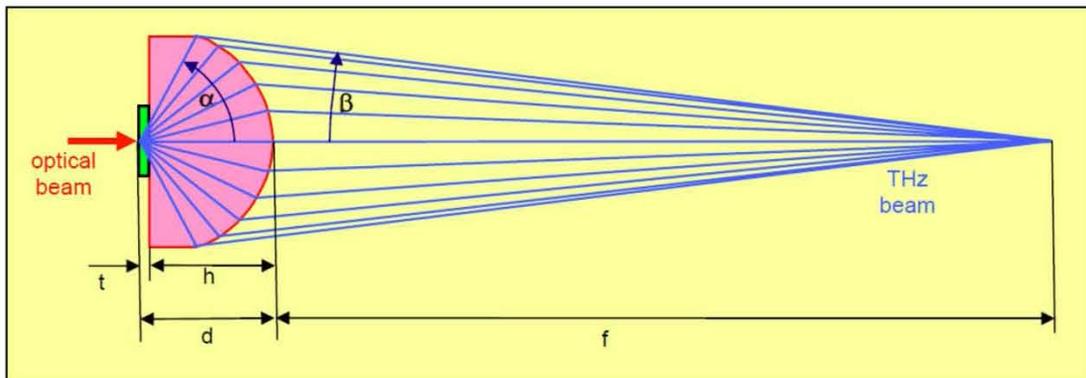


Terahertz beam

focal length f	53 mm
collection angle α	57.6°
convergence angle β	6.8°

Airy disc diameter

at 300 GHz	5 mm
at 1 THz	1.5 mm
at 3 THz	0.5 mm



Patent DE 10 2006 037470 A1

BATOP GmbH
 Wildenbruchstraße 15
 D-07745 Jena
 Germany

Tel: +49 3641 634009 - 0
 Fax: +49 3641 634009 - 20
 E-mail: info@batop.de

Deutsche Bank Jena
 Bank Code: 82070024
 Account No: 3922655

VAT Reg. No: DE 813698804
 Tax Acc. No: 162/106/01639
 Local Court Jena HRB 112769

BANK: DE49 8207 0024 0392 2655 00

Bibliografía

- [1] W. L. Chan, J. Deibel and D. M. Mittleman. Imaging with terahertz radiation. *Reports on Progress in Physics* 70, 1325-1379 (2007).
- [2] M. Tonouchi. Cutting-edge terahertz technology. *Nature photonics* 1, 97-105 (2007).
- [3] Matthew C-Beard, Gordon M.-Turner, Charles-Scmittenmaer, “Terahertz spectroscopy” *American Chemical Society*, Vol. 106, No. 29 (2002).
- [4] H. A. Gerbbie, N. W. B. Stone, F. D. Findlay. A stimulated Emission Source at 0.34 Millimetre Wave-length. *Nature*, 202-685 (1964).
- [5] K. Sakai, M. Tani. Introduction to Terahertz Pulses. *Topics Appl. Phys.* 9,1-31 (2005)
- [6] D. Auston, M. Tani. Picoseconds optoelectronic switching and gating in silicon. *Applied Physics Letters*, 26, 101 (1975).
- [7] C. Lee. Picosecond optoelectronic switching in GaAs. *Appl. Phys. Lett.* 30, 84 (1977).
- [8] S. S. Dhillon et. al. The 2017 terahertz science and technology roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics* 50 043001 (2017)
- [9] F. Keilmann. FIR Microscopy. *Infrared Physics Technology*. No 1, (1995).
- [10] R. Lecaque, S. G. Résillon, C. Boccara. THz emission Microscopy with sub-wavelength broadband source. *Optical Society of America*, Vol.16 No 7(2007).
- [11] S. Hunsche, M. Koch, I. Brener, M.C. Nuss. THz near-field imaging. *Elsevier science*. (1998).
- [12] P. R. Smith, D. Auston, M.C. Nuss. Characterization of an Optoelectronic Terahertz Beam System. *Journal of Quantum Electronics*, Vol. 24, No. 2 (1988).
- [13] M. Van Exter, D. R. Grischkowsky. Subpicosecond Photoconducting Dipole Antennas. *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, Vol. 38 No. 11 (1990).
- [14] G. Paz Martínez. *Instrumentación de una fuente de radiación THz con espectro controlado*. PhD. Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México (2015).
- [15] B. Hu, M. Nuss. Imaging with terahertz Waves. *Optics Letters* Vol 20, No. 16 (1995).
- [16] R. W. McGowan, G. Galliot, D. Grischkowsky. Propagation of ultrawideband short pulses of

terahertz radiation through submillimeter-diameter circular waveguides. *Optics Society of America Vol 24, No. 20* (1999).

[17] H. A. Bethe. Theory of diffraction by Small Holes. *The physical review. Vol. 66, Nis 7 and 8* (1944).

[18] A. M. Acfaden, J. Reno, I. Brener, O. Mitrofanov. 3 μm aperture for near-field terahertz transmission microscopy. *Applied Physics Letters. 104, 011110* (2014).

[19] Shuchang Liu, Z. Vardeny, A. Nahata. Concentration of broadband terahertz radiation using array of conically tapered apertures. *Optical Society of America. Vol 2. No.10* (2013)

[20] Shuchang Liu, Oleg Mitrofanov, A. Nahata. Near field terahertz imaging using sub-wavelength apertures without cutoff. *Optical Society of America. Vol 24. No.3* (2016).

[21] Su Hong, Zhou Hang, Chen Qiong Zhou. Beam profile and frequency distribution characterization of broadband terahertz wave. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering. Vol. 27 No. 2* (2010).

[22] J. Pérez Urquiza. Microscopía THz de campo cercano con sondas tipo Bow-Tie. Master Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México (2015).

[23] Yun Shik Lee. Principles of Terahertz Science and Technology. *Springer. 2009*

[24] H. T. Shillingburg et al. *Fundamentos Esenciales en prótesis fija*, volumen 1. Quintessence S. L., tercera edición, 1988

[25] V. P. Wallace et al. Dermatological Surgery and Lasers Terahertz pulsed imaging of basal cell carcinoma ex vivo and in vivo, *British Journal of dermatology 151: 424-432* (2004).