

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA  
A.C.**



**Instrumentación para espectroscopía en  
terahertz de biomoléculas**

Tesis presentada por:

Ing. Ruth Julieta Medina López

Como requisito parcial para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias (Óptica).

Asesor de tesis:  
Dr. Enrique Castro Camus

Septiembre de 2011

## **Resumen**

En este trabajo se presenta la construcción de un espectrómetro en terahertz (THz) para el estudio de biomoléculas en solución.

Durante el proceso de construcción del espectrómetro fue necesario enfrentar diversos retos de ingeniería que incluyeron diseñar e implementar varios componentes tales como una plataforma traslacional automatizada, necesaria para el control fino de posicionamiento de componentes ópticos y una celda para muestras en solución enfriada por agua, diseñada para evitar la pérdida de humedad y el cambio de temperatura de la muestra. También fue necesario realizar la unión de dos mesas ópticas sin preparación previa, de este trabajo se obtuvo un novedoso método que compite con las soluciones comerciales. El sistema de espectroscopía fue probado y se logró la medición de un pulso de THz demostrando que funciona adecuadamente y está listo para realizar mediciones de transmisión de muestras de proteínas en solución acuosa.

A Daniel

A mis padres, Mario y mis hermanos

## Lista de Publicaciones

### Artículos

- S. C. Corzo-Garcia, R. J. Medina-Lopez, S. Anderson, E. Castro-Camus, R. Carriles and A. Ruiz-Marquez. *Reliable and economical method to join optical tables*. Optics and Lasers in Engineering **49**,11, 1251 (2011).

### Trabajos en conferencias y presentaciones

- R. J. Medina-Lopez, S. C. Corzo-Garcia, S. Anderson, E. Castro-Camus, R. Carriles and A. Ruiz-Marquez. *Stably joined optical tables*. SPIE Optics + Photonics, San Diego, CA ,EE. UU., 22–25 August 2011.
- S. C. Corzo-Garcia, R. J. Medina-Lopez, S. Anderson, E. Castro-Camus, R. Carriles and A. Ruiz-Marquez. *Interferometric characterization of joined optical tables* International Commission of Optics (ICO-22), Puebla, Pue. , Mexico., 15–19 August 2011.

## Agradecimientos

Agradezco a Conacyt por la beca recibida, sin ella estos estudios hubieran sido imposibles.

Agradezco a mi director de tesis, el Dr. Enrique Castro Camus, por su apoyo y sus enseñanzas a lo largo de este trabajo.

Agradezco al Dr. Ramón Carriles Jaimes por sus asesorías y sus excelentes clases; a Enrique Noé Arias por su apoyo en la programación del microcontrolador usado en el circuito electrónico de la plataforma traslacional, presentado en el Capítulo 5; al personal del taller mecánico y al Ing. Armando Ruiz Márquez por facilitar el uso y brindar los servicios del taller.

Muchas gracias a Sofía Carolina Corzo García por su apoyo y colaboración en el desarrollo del proyecto de unión de mesas ópticas presentado en el Capítulo 3 y por el diseño mecánico de la plataforma traslacional presentado en el Capítulo 5. A Michael Johnston por el emisor y detector fotoconductor y a Chenupati Jagadish por el sustrato en el que se fabricó el detector, todos estos usados en el sistema de espectroscopía descrito en el Capítulo 6.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Proteínas . . . . .	2
<b>2. Espectroscopía en el dominio del tiempo</b>	<b>4</b>
2.1. Emisores de THz . . . . .	7
2.1.1. Antenas fotoconductoras . . . . .	7
2.1.2. Rectificación óptica . . . . .	8
2.2. Detectores . . . . .	8
2.2.1. Antenas fotoconductoras . . . . .	8
2.2.2. Muestreo electroóptico . . . . .	9
<b>3. Unión de mesas ópticas</b>	<b>10</b>
3.1. Introducción . . . . .	10
3.2. Preparación de la unión . . . . .	11
3.3. Circuito neumático de las mesas ópticas . . . . .	12
3.4. Modelado teórico . . . . .	13
3.5. Caracterización . . . . .	15
<b>4. Celda enfriada para muestras en solución</b>	<b>20</b>
4.1. Diseño mecánico . . . . .	20
<b>5. Plataforma traslacional</b>	<b>25</b>
5.1. Circuito electrónico . . . . .	26
5.1.1. Circuitos de control y de potencia . . . . .	26
5.1.2. Circuito de alimentación . . . . .	29
5.2. Interfaz gráfica . . . . .	30
<b>6. Espectrómetro en THz</b>	<b>35</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>39</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>46</b>

# Capítulo 1

## Introducción

Los Terahertz se refieren al rango espectral que va de  $3\text{ cm}^{-1}$  hasta alrededor de  $600\text{ cm}^{-1}$ , conocida también como la región del infrarrojo lejano [1]. Esto corresponde al rango de frecuencias entre 0.1 y 20 THz, donde 1 THz equivale a  $33.33\text{ cm}^{-1}$ ,  $0.004\text{ eV}$  o  $300\text{ }\mu\text{m}$  longitud de onda [2].

La espectroscopía en terahertz surgió hace alrededor de 20 años, con la demostración de que pulsos de casi un solo ciclo de radiación del infrarrojo lejano, podían ser generados, propagados en el espacio libre y posteriormente detectados en el dominio del tiempo, midiendo su perfil temporal [3].

Existen muchos ejemplos de sistemas y fenómenos que pueden ser estudiados con radiación en THz. Entre ellos se encuentran la formación de excitones en semiconductores [4], el transporte de carga en semiconductores [5], la detección de drogas y explosivos [6] y el estudio de la dinámica vibracional y de solvatación de las proteínas [7–9]. Este último tema ha atraído gran atención recientemente [10]. En esta tesis se plantea construir un espectrómetro de transmisión en THz para el estudio de proteínas en solución acuosa. La

espectroscopía en Terahertz está, hasta ahora, incursionando en el campo de la bioquímica. Existen alrededor de 60 grupos alrededor del mundo que usan espectroscopía en THz de una manera u otra [5, 11–17]. Algunos de estos grupos realizan estudios en el área de química física, que incluyen: Espectroscopía en fase gaseosa, Estudios de imágenes en Terahertz, Imágenes en tres dimensiones, Líquidos polares y no polares, Medios biológicos, Materiales de estado sólido, Fuentes y detectores de THz [1, 18]. En este trabajo, es de principal interés el área de Espectroscopía en Terahertz para materiales biológicos, así que nos enfocaremos más en él.

De neste modo se presenta en el capítulo 5 el diseño e implementación de la automatización de una plataforma traslacional necesaria para el control fino del retraso temporal de uno de los brazos del sistema de espectroscopía, en el capítulo 4 se explica el diseño mecánico de una celda para muestras en solución con sistema de enfriamiento y en el capítulo 3 se desarrolla un nuevo método para unión de mesas ópticas con rigidez y estabilidad comparables a una mesa óptica sencilla.

## 1.1. Proteínas

El uso de espectroscopía en Terahertz para estudiar sistemas biológicos es acertado, dado que las proteínas tienen movimientos colectivos que caen, precisamente, en la región de infrarrojo lejano del espectro [1, 18]. Se han encontrado modos vibracionales en la región espectral de 5 a  $200\text{ cm}^{-1}$  en una gran variedad de procesos químicos, desde solvatación hasta cambios conformacionales en proteínas [19].



La espectroscopía vibracional en Terahertz de sistemas biomoleculares es ampliamente reconocida por su sensibilidad a los factores que influyen en el movimiento colectivo de estos sistemas [7]. Estudios anteriores de polipéptidos [20], proteínas [21, 22], ADN [23], azúcares [24] y otras biomoléculas [25] han examinado la dependencia de la absorción de THz de factores tales como el grado de hidratación y formas amorfas contra formas cristalinas.

Las proteínas son las macromoléculas más versátiles de los seres vivos y desempeñan funciones cruciales en prácticamente todos los procesos biológicos. Funcionan como catalizadores, transportan y almacenan otras moléculas como el oxígeno, proporcionan apoyo mecánico y protección inmunológica, generan movimiento, transmiten impulsos nerviosos y controlan el crecimiento y la diferenciación [26].

Las proteínas son compuestos orgánicos presentes en todos los organismos vivos. Las moléculas de proteínas consisten en una o varias cadenas largas (polipéptidos) de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos siguiendo una secuencia característica [26, 27]. Esta secuencia se denomina estructura primaria de la proteína. Estos polipéptidos se pueden plegar en estructuras regulares como la hélice alfa,  $\beta$ -planos, giros y bucles, en lo que se denomina estructura secundaria de la proteína [26]. El acomodo tridimensional de las hélices o láminas se conoce como estructura terciaria [27]. La estructura cuaternaria se refiere a las cadenas de polipéptidos ensamblados en estructuras de múltiples subunidades [26].

## Capítulo 2

# Espectroscopía en el dominio del tiempo

La espectroscopía en el dominio del tiempo (THz-TDS, por sus siglas en inglés), se ha convertido en una técnica usada ampliamente y en la gran mayoría de los estudios de THz. Sin embargo, aunque las mediciones se hacen en el dominio del tiempo, no es una técnica inherentemente resuelta en tiempo. La espectroscopía en el dominio del tiempo provee una medición directa del campo eléctrico del pulso de THz,  $E_{out}(t)$ . El espectro de THz incidente en el detector puede ser derivado de la forma de onda de transmisión,  $E_{in}(f)$

$$E_{out}(t) = \int_0^{\infty} E_{in}(\omega)T(\omega)e^{i\phi(\omega)}e^{i2\pi\omega t}d\omega, \quad (2.1)$$

donde  $T$  es la función de transmisión de la muestra [28]. Esta técnica tiene ventajas sobre otros métodos en el infrarrojo lejano como la determinación simultánea de coeficiente de absorción e índice de refracción, además debido a que funciona por medio de detección coherente es inmune al ruido ambiental

[18].

Un arreglo esquemático básico para realizar experimentos de THz-TDS, se muestra en la figura 2.1. Un láser es usado para producir pulsos que son divididos en dos, llamados de bombeo y de prueba. Los pulsos de bombeo son usados para generar monociclos de radiación de THz con duración de alrededor de 1 ps en un emisor. Los pulsos de THz son usualmente enfocados sobre una muestra para ser medidos posteriormente. El haz láser de prueba es combinado para viajar colinealmente con el haz de THz, después ambos haces llegan al simultáneamente al sistema de detección. Debido a que los pulsos de bombeo y de prueba son divididos del mismo haz pulsado, se encuentran perfectamente sincronizados [29].

Los experimentos de THz-TDS consisten en medir la evolución temporal del pulso electromagnético de THz. Tomando un pulso de referencia, en ausencia de muestra, se compara el cambio de un pulso al pasar por una muestra en estudio. Un análisis espectral nos da la información de absorción y dispersión sufridas por el pulso al pasar por la muestra. Es posible medir esta evolución temporal gracias a una plataforma de retraso motorizada que retrasa un brazo del sistema con respecto al otro, como se muestra en la figura 2.1.

Una ventaja de la espectroscopía en Terahertz es que el transiente de campo eléctrico que se genera es medido directamente, su perfil temporal, no simplemente su intensidad y esto determina la amplitud y la fase de cada uno de los componentes espectrales que forman el pulso. La amplitud y la fase están directamente relacionadas con el coeficiente de absorción y el índice de refracción de la muestra y así el valor complejo de la permitividad es obtenido

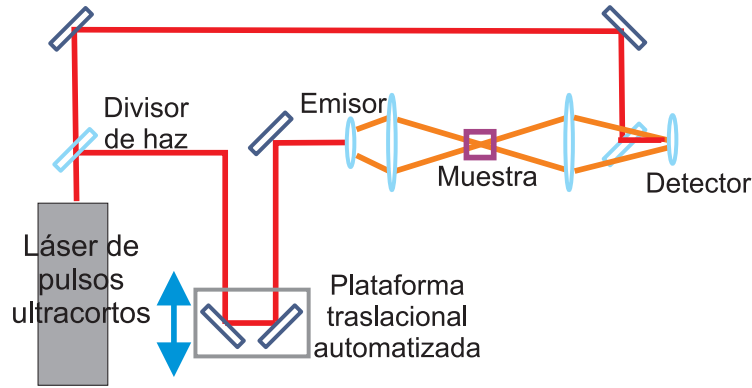


Figura 2.1: Esquema de un arreglo experimental para espectroscopía en THz

sin recurrir a las ecuaciones de Kramers-Kronig [18].

Existen dificultades para la creación de fuentes de pulsos de THz. Los componentes electrónicos, por ejemplo transistores, no pueden trabajar a estas frecuencias tan altas. Existen también fuentes ópticas, como láseres de estado sólido los cuales se ven afectados por la energía térmica ( $kT$ ) porque es de magnitud comparable con la de los fotones de THz ( $\sim \text{meV}$ ), por lo tanto una de sus limitantes es la dificultad de estos componentes de operar a temperatura ambiente [30]. Investigaciones recientes sugieren el uso de láseres de cascada cuántica (QCL por sus siglas en inglés) para generar luz en la región del infrarrojo medio y lejano del espectro [2]. Aún más prometedoras son las técnicas ópticas para producir THz empleando láseres pulsados ultracortos ( $\sim \text{fs}$ ) en el rango de la región visible a infrarrojo cercano; esto agrega la posibilidad de hacer estudios resueltos en tiempo en infrarrojo lejano con resolución temporal por debajo de picosegundos [1, 2, 18].

Los mecanismos para generar pulsos de THz pueden variar desde rectificación óptica en cristales electroópticos hasta radiación por aceleración

ultrarrápida de portadores en el caso de un material semiconductor con o sin tensión aplicada [19].

Los métodos de detección de pulsos de THz más utilizados son antenas fotoconductoras [18, 31] y muestreo electroóptico [31]. En comparación, la primera técnica tiene una responsividad alta y típicamente mejor razón señal ruido [31].

## 2.1. Emisores de THz

### 2.1.1. Antenas fotoconductoras

El uso de antenas fotoconductoras es el método más antiguo utilizado para generar y detectar pulsos de THz. Éste proceso se basa en usar un pulso láser con energía mayor al bandgap del sustrato (por ejemplo, GaAs) el cual genera portadores en la banda de conducción de un semiconductor con un voltaje de polarización aplicado [1, 18]. El voltaje de polarización acelera los portadores creando un pulso electromagnético. Este tipo de fuente puede producir un ancho de banda de hasta 20 THz [18]. El ancho del pulso de THz depende de la duración del pulso de excitación láser y de la aceleración de los portadores [1].

Se ha demostrado que es posible generar pulsos de THz simplemente excitando un material semiconductor como GaAs o InP. La excitación conlleva a la generación de radiación en el infrarrojo lejano. Alimentando el semiconductor con un voltaje de polarización externo produce radiación en THz de un modo más eficiente [18, 19, 32].

### 2.1.2. Rectificación óptica

Una opción popular para la generación de pulsos de THz, cuando se trabaja con láseres amplificados, es el uso de rectificación óptica en un medio no lineal. Se basa en el uso de materiales con propiedades ópticas no lineales de segundo orden [33]. Cuando la luz interactúa con un medio no lineal y ocurre una mezcla de ondas de dos frecuencias, el resultado es la suma y la resta de las frecuencias. En el caso de que ambas frecuencias sean iguales, se genera segundo armónico y pulsos de dc [18]. Debido al gran ancho espectral del pulso de femtosegundos, no se obtiene una señal de dc, sino la envolvente del pulso óptico que cae en el rango de THz [33]. Los materiales usados generalmente son TeZn, GaAs y GaP [18].

## 2.2. Detectores

### 2.2.1. Antenas fotoconductoras

El modo de operación de la antena fotoconductoras como detector es similar al modo de fuente. La diferencia consiste en que no se aplica un voltaje de polarización, sino que el transiente de THz funciona como tal. Consiste en una línea de transmisión puenteada por una antena con un espacio en el centro. El pulso ultracorto excita los portadores. Si este pulso ultracorto llega cuando el pulso de THz se encuentra en el espacio entre los contactos, los portadores viajarán de un lado a otro de la antena acelerados por el campo de THz,  $E_{THz}$ . Los electrones viajan a través de un medidor de corriente. La magnitud de la corriente será proporcional a la amplitud del pulso de THz

en el momento del traslape de ambos pulsos por la antena. La forma de onda completa del transiente se determina cambiando el retraso relativo entre los pulsos [1].

### 2.2.2. Muestreo electroóptico

La detección electroóptica se basa en el efecto Pockels en el cual un voltaje aplicado causa birrefringencia en el cristal detector. Cuando el pulso de muestreo óptico viaja a través del cristal al mismo tiempo que un punto del pulso de THz, su polarización es ligeramente rotada. La magnitud de la rotación es proporcional a la magnitud del campo de THz y la dirección de rotación es proporcional al signo del campo. De esta manera, la amplitud del pulso, como función del tiempo, es mapeada escaneando el retraso relativo del pulso óptico y el de THz, al cristal detector. La señal es colectada con un amplificador de fase cerrada lock-in para modular el brazo de generación de THz o el haz de bombeo (cuando se desarrolla un experimento de tipo bombeo-prueba). El camino del haz de THz del transmisor al receptor se mantiene en un atmósfera libre de humedad usando nitrógeno seco o vacío para minimizar la absorción en THz de vapor de agua [18].

La radiación de Terahertz es detectada con muestreo electroóptico con un cristal cortado en la orientación  $\langle 110 \rangle$  ZnTe con grosor de 0.5-1.0 mm típicamente, aunque para aplicaciones de gran ancho de banda se utilizan cristales de alrededor de  $10 \mu\text{m}$  [18].

# Capítulo 3

## Unión de mesas ópticas

### 3.1. Introducción

En la mayoría de las aplicaciones industriales y de investigación [34–36], los arreglos ópticos se vuelven cada vez más grandes y complejos; por esta razón es una necesidad común la expansión de la superficie de trabajo. La mayoría de los fabricantes de componentes optomecánicos ofrecen mesas preparadas bajo pedido adecuadas a las necesidades del comprador y listas para ser unidas. Estas compañías también ofrecen modificar mesas ya existentes para ser unidas. Estas opciones no siempre son lo más conveniente y en ocasiones es imposible. Las mesas ópticas preparadas por el fabricante para ser unidas son aproximadamente 25 % más costosas que una mesa similar sin preparar. Por todo lo anterior, es deseable un método más práctico y menos costoso para unir mesas ópticas. [37]

En este capítulo se presenta un método para unir mesas ópticas ya existentes sin ninguna preparación previa para este propósito. Se unieron dos mesas



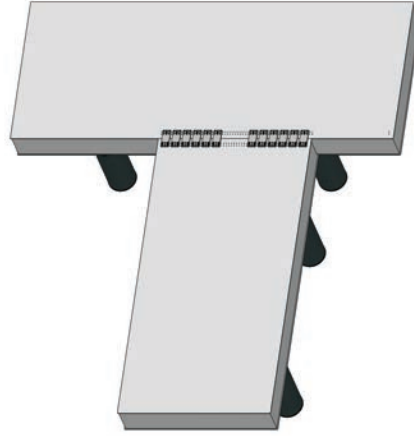


Figura 3.1: Mesas ópticas unidas en forma de “T” descentrada

(3000 mm × 1500 mm × 310 mm, Thorlabs PTR 52514; y 3750 mm × 1500 mm × 310 mm, Thorlabs PTR 52515) en forma de “T” descentrada (ver figura 3.1) y la rigidez de la unión, al aplicar un estrés mecánico, fue evaluada por medio de un interferómetro de Michelson.

## 3.2. Preparación de la unión

Dos mesas ópticas fueron unidas utilizando veinticuatro placas de acero inoxidable, maquinadas como se muestra en la figura 3.2. Doce de ellas se fijaron en la parte superior de la mesa, en la unión, usando los barrenos M6 de la superficie. Se barrenó y machueleó la superficie inferior de las mesas para colocar las doce placas restantes con tornillos M6.

Cuando es ensamblada la mesa óptica, es muy importante presionar ambos segmentos uno contra el otro mientras se encuentren flotadas. Después, se deben desflotar las mesas y ser flotadas nuevamente para liberar las patas

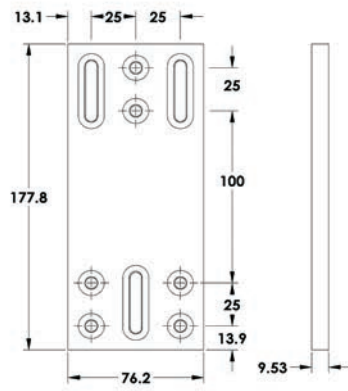


Figura 3.2: Esquema de las placas de acero inoxidable usadas en la unión. Las dimensiones de las placas son mostradas en mm

del estrés mecánico al que son sometidas. De este modo la deformación y el estrés que sufre el sistema recae en los bordes de la unión de las mesas y evita que las placas absorban el esfuerzo.

### 3.3. Circuito neumático de las mesas ópticas

La superficie de la mesa es un plano que, como cualquier otro, requiere tres puntos independientes para definirlo. En una mesa óptica, estos tres puntos son determinados por tres de las patas del sistema de flotación neumático. Estas tres patas son llamadas maestras y están equipadas cada una con un sensor activo de altura, nos referiremos a las demás como patas esclavas. Estas últimas son pasivas controladas cada una por una pata maestra. Dado que hablamos de la unión de dos mesas (ver figura 3.1), tenemos en total ocho patas, dejando muchas posibilidades de conexiones entre ellas.

En una consulta directa con el fabricante de mesas ópticas, nos recomendó no conectar patas esclavas debajo de un segmento de mesa con una

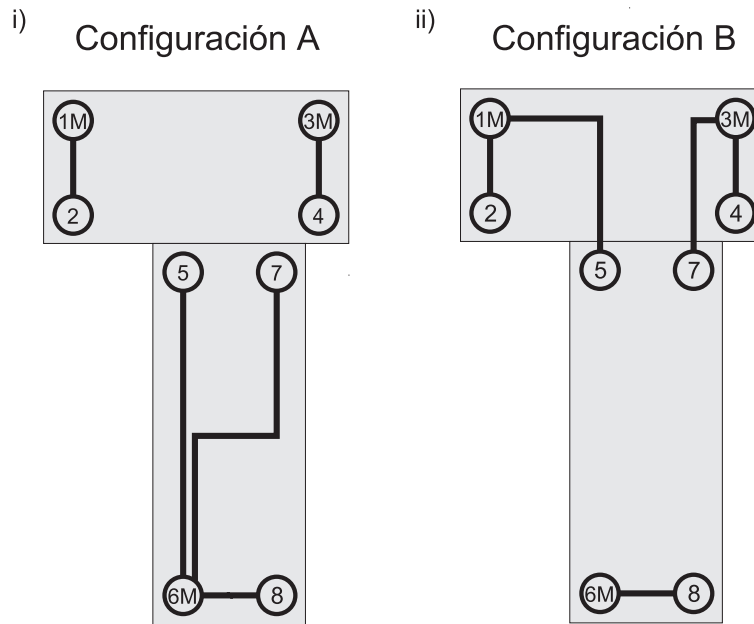


Figura 3.3: i) Configuración A sugerida por el fabricante, sistema neumático de patas maestras (M) y esclavas. ii) Configuración B, sistema neumático de patas maestras (M) y esclavas.

pata maestra del otro segmento. La configuración recomendada por el fabricante se muestra en la figura 3.3i) y nos referiremos a ésta como configuración A. Debido a que también es recomendable elegir una configuración maestro-esclavo por la cercanía geométrica de las patas, es decir, decidimos conectar las patas esclavas con la maestra más cercana, dando lugar a la configuración B mostrada en la figura 3.3ii).

### 3.4. Modelado teórico

Realizamos un análisis estático en dos dimensiones para conocer cuál configuración produce el menor estrés en la junta. En equilibrio, las fuerzas de todas las patas conectadas a una maestra son iguales; la torca total produ-

cida por el peso y las fuerzas de las patas, en dos direcciones ortogonales, es cero, para un plano paralelo a la mesa. Por lo tanto para la configuración A

$$F_1 = F_2 \quad (3.1)$$

$$F_3 = F_4 \quad (3.2)$$

$$F_6 = F_5 \quad (3.3)$$

$$F_6 = F_7 \quad (3.4)$$

$$F_6 = F_8 \quad (3.5)$$

$$mg = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 \quad (3.6)$$

$$\tau_x = F_1y_1 + F_2y_2 + F_3y_3 + F_4y_4 + F_5y_5 + F_6y_6 + F_7y_7 + F_8y_8 \quad (3.7)$$

$$\tau_y = F_1x_1 + F_2x_2 + F_3x_3 + F_4x_4 + F_5x_5 + F_6x_6 + F_7x_7 + F_8x_8 \quad (3.8)$$

donde  $F_i$  es la fuerza en la  $i$ -ésima pata ubicada en  $(x_i, y_i)$ ,  $m$  es la masa total de la superficie de la mesa,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  y  $\tau_x$  y  $\tau_y$  son las torcas producidas por el peso de la mesa en los ejes  $x$  y  $y$ . Esto fue calculado numéricamente utilizando divisiones de  $(1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm})$  de la distribución de masa. Realizando el mismo procedimiento para la configuración B obtenemos

$$F_1 = F_2 \quad (3.9)$$

$$F_1 = F_5 \quad (3.10)$$

$$F_3 = F_4 \quad (3.11)$$

$$F_3 = F_7 \quad (3.12)$$

$$F_6 = F_8 \quad (3.13)$$

$$mg = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 \quad (3.14)$$

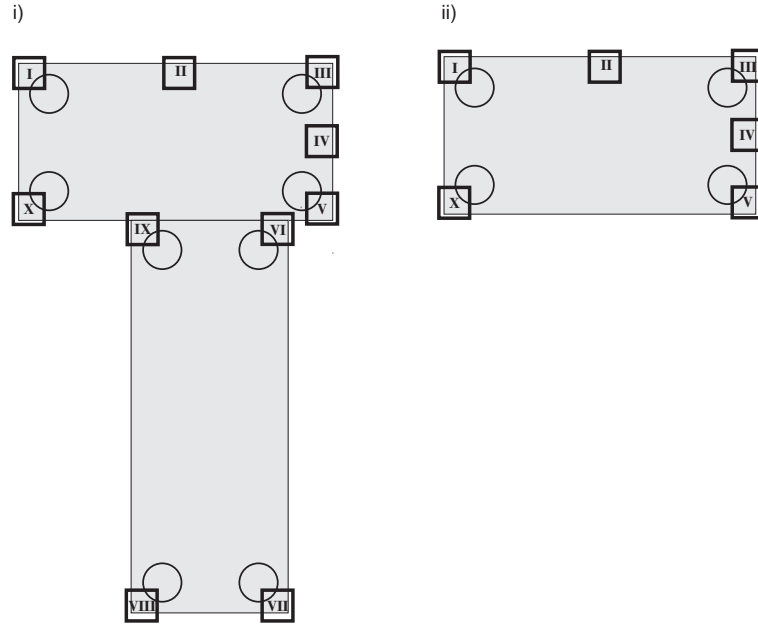


Figura 3.4: i) Posiciones donde fue aplicada la carga de prueba en un sistema de mesas ópticas acopladas. ii) Posiciones donde la carga de prueba fue aplicada en una mesa óptica.

$$\tau_x = F_1y_1 + F_2y_2 + F_3y_3 + F_4y_4 + F_5y_5 + F_6y_6 + F_7y_7 + F_8y_8 \quad (3.15)$$

$$\tau_y = F_1x_1 + F_2x_2 + F_3x_3 + F_4x_4 + F_5x_5 + F_6x_6 + F_7x_7 + F_8x_8 \quad (3.16)$$

resolviendo ambos sistemas obtenemos las fuerzas en cada pata. Con estas fuerzas es posible calcular la torca parcial aplicada en cada lado de la junta que a su vez nos dará una medida de cuál configuración produce el mayor esfuerzo en la unión.

### 3.5. Caracterización

Usamos un interferómetro de Michelson para evaluar la rigidez de la junta. Con éste medimos la deformación de la mesa en forma de “T” cuando

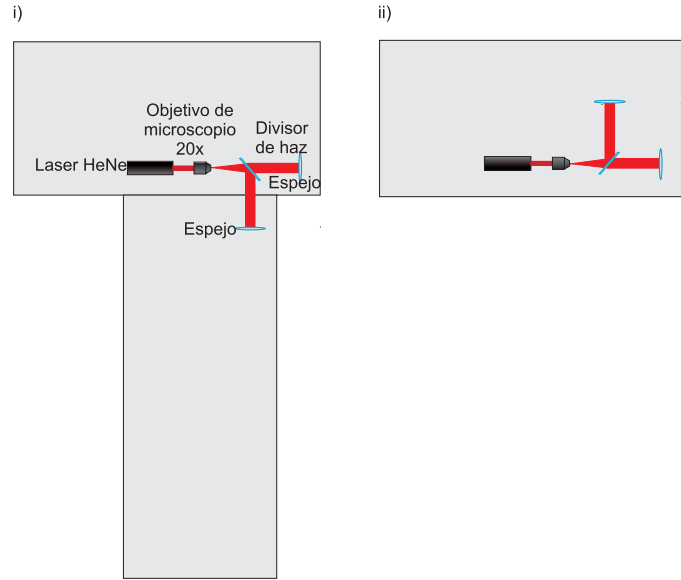


Figura 3.5: i) Interferómetro de Michelson en un sistema de mesas ópticas acopladas con un brazo pasando sobre la unión. ii) Interferómetro de Michelson en una mesa óptica

se aplicaba un peso de 745 N en las posiciones etiquetadas de la I a la X en la figura 3.4. Para el interferómetro se utilizó un láser HeNe con longitud de onda de  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  y se colocó de modo que uno de sus brazos pasara por encima de la unión como se muestra en la figura 3.5i). La deformación producida por el peso aplicado fue cuantificada contando las franjas de interferencia, el número de franjas  $N$  fue utilizado para calcular el ángulo de deflexión de la mesa

$$\theta = \arctan \frac{N \cdot \lambda}{h_b} \quad (3.17)$$

donde  $h_b$  es la altura del haz medida desde la superficie de la mesa. La incertidumbre asociada es una franja completa, equivalente a  $\delta\theta \approx 3,5 \mu\text{rad}$ .

Estas mediciones se llevaron a cabo en cada posición para ambas confi-

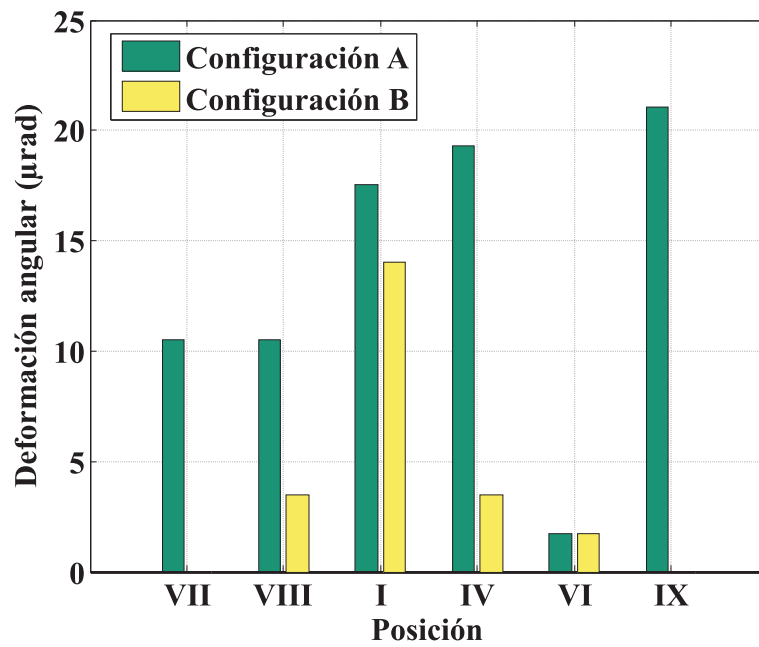


Figura 3.6: Deformación angular en microradianes medida con el interferómetro cuando se aplicaba peso en cada posición para ambas configuraciones; configuración sugerida por el fabricante (Configuración A) y una segunda opción de configuración (Configuración B).

guras del sistema neumático para ser comparadas y encontrar la mejor. Los ángulos de deformación son presentados en la figura 3.6 como función de la posición donde fue aplicada la fuerza. Primero, es importante notar que aún en el peor caso (configuración A, posición VI) la deformación fue pequeña ( $\sim 20 \mu\text{rad}$  o  $\sim 4 \text{arcsec}$ ) y que esta deformación ocurrió en la aplicación de un estrés inusualmente grande comparado con el uso diario (745 N). Además es interesante notar que la deformación fue mayor o igual para la configuración A, en todas las posiciones, que para la configuración B.

Con este experimento fue posible determinar que la configuración B es mejor. Para obtener la cuantificación de qué tan comprometida es la rigidez de uno de los segmentos de la mesa en “T” por la presencia del otro segmento, se llevó a cabo otro experimento. El interferómetro de Michelson fue usado nuevamente, ahora ubicándolo con ambos brazos en un mismo segmento de la mesa unida y fue aplicada la misma fuerza de prueba (745 N) en las diferentes posiciones como se muestra en las figuras 3.4ii) y 3.5ii).

Las deformaciones medidas con el interferómetro eran iguales dentro del rango de incertidumbre para ambos casos. Esto demuestra que el estrés en la unión no afecta de manera significativa la estabilidad mecánica de los segmentos.

Se comprobó que la elección correcta de configuración maestro-esclavo de las patas resulta en una menor deformación de la mesa. También se demostró que la rigidez mecánica de las mesas unidas y uno de sus segmentos es comparable. De este modo, estoy presentando un nuevo método para unir mesas ópticas, el cual es menos costoso y más práctico que las opciones que ofrecen los fabricantes de mesas ópticas.



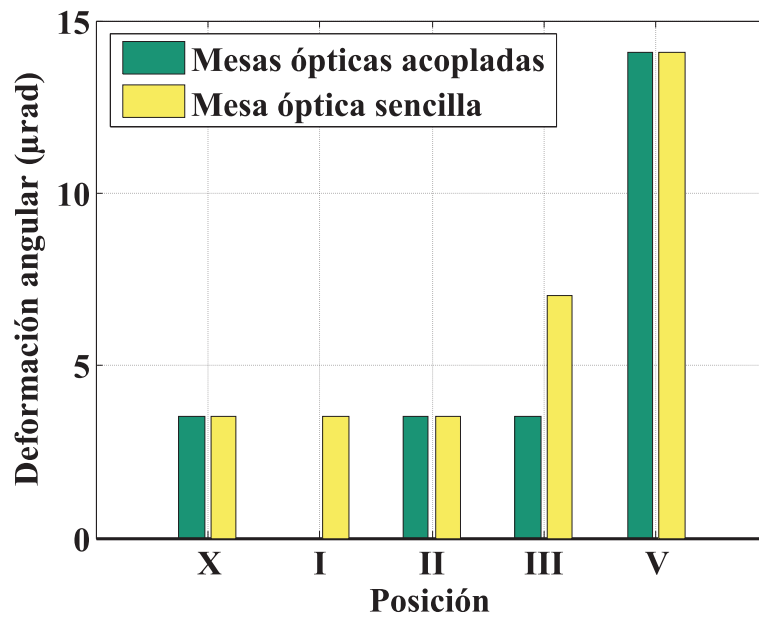


Figura 3.7: Deformación angular en microradianes medida con el interferómetro cuando se aplicaba peso en cada posición en una mesa óptica y en un sistema de dos mesas ópticas acopladas.

# Capítulo 4

## Celda enfriada para muestras en solución

### 4.1. Diseño mecánico

Para poder realizar experimentos de espectroscopía en solución como es el caso de las proteínas y otras biomoléculas suspendidas en agua es necesario contar con una celda adecuada para mantener la muestra.

Para hacer esto posible se diseñó y fabricó una montura mecánica capaz de ser situada en el arreglo de espectroscopía en THz, además esta montura fue diseñada para evitar el calentamiento de la muestra biológica por medio de un sistema de enfriamiento y evitar la pérdida de humedad de las muestras en solución.

Monturas similares para muestras líquidas se encontraron disponibles comercialmente, hasta donde se pudo investigar, ninguna con sistema de enfriamiento, y los precios de estas monturas son altos, entre los 500 y 1000

dólares.

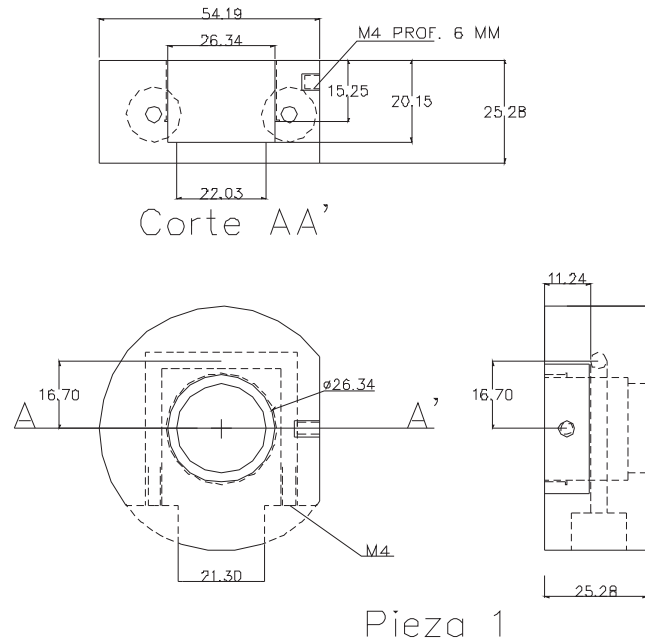
La celda fabricada está formada principalmente de dos piezas mecánicas, a las que nos referiremos como hembra y macho, ambas maquinadas en aluminio en forma cilíndrica. La pieza hembra está diseñada de tal manera que contiene los canales del sistema de enfriamiento. La pieza macho es atornillada dentro de la hembra para sostener la muestra entre ambas.

El sistema de enfriamiento de la celda consta de un canal interno por el cual circula agua. El diseño se realizó colocando el canal a la altura de la muestra en la pieza hembra de la celda. Este canal fue maquinado barrenando tres canales de modo independiente en forma de “U”, como se muestra en la figura 4.1. Dos de estos canales forman la entrada y salida de agua y el tercero, la base de la “U”, se realizó barrenado de modo transversal y tapando y sellando la entrada de la broca con un tornillo. El sistema de enfriamiento es alimentado con agua por medio de unas magueras y conectores M4 llamados “rápidos”, enroscados a la entrada y salida de la celda.

La pieza hembra fue diseñada además con una perforación central por donde pasará el haz de THz. A la perforación se le maquinó una cuerda interior para enroscar la pieza macho y un escalón para colocar un empaque que selle la muestra para evitar la pérdida de humedad. La pieza fue rebaja de modo lateral para asegurar la estabilidad de la montura en el arreglo, fijándola con un barreno machueado M4.

La pieza macho de la celda tiene, del mismo modo, una perforación central y es enroscada al interior de la pieza hembra; razón por la cual se le fabricó una cuerda exterior, ver figura 4.3.

La muestra es colocada entre dos ventanas delgadas de vidrio (entre 2 y



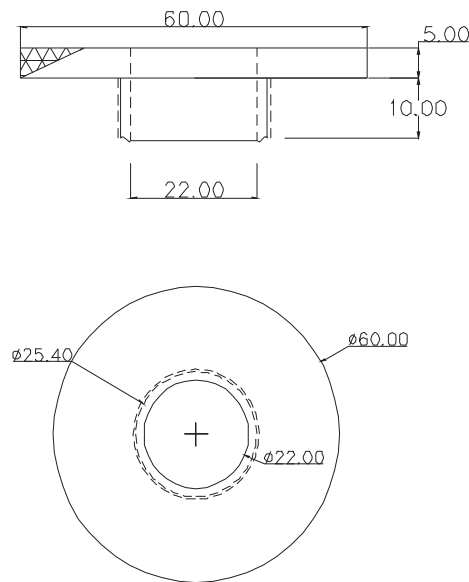
No. De piezas	1
Tolerancia general	0.1 mm
Acotaciones	mm
Material	Aluminio

Figura 4.1: Diseño pieza mecánica hembra para celda de muestras de biomoléculas



Figura 4.2: Fotografía de pieza hembra de celda para muestras de biomoléculas

## Pieza 2



No. De piezas	1
Tolerancia general	0.1 mm
Acotaciones	mm
Material	Aluminio

Figura 4.3: Diseño pieza mecánica macho para celda de muestras de biomoléculas



Figura 4.4: Fotografía de pieza macho de celda para muestras de biomoléculas

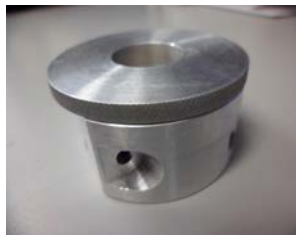


Figura 4.5: Fotografía de celda para muestras de biomoléculas ensamblada

4 mm cada una) dentro de la pieza hembra. La pieza macho contiene un escalón en la parte inferior para sujetar un segundo empaque. Al ser enroscada la pieza macho en el interior de la hembra, las placas de vidrio que sujetan la muestra son selladas por ambos empaques.

Con el diseño especial de esta celda, es posible mantener la temperatura de la muestra; esto nos asegura que los cambios en el pulso de THz detectados por el sistema de espectroscopía sean debido a movimientos de la biomolécula y no al incremento de la temperatura. El sistema de enfriamiento requiere un sistema adicional de control de temperatura y de bombeo de agua, no incluidos en este trabajo. La celda también nos permite colocar la muestra dentro del sistema para realizar los estudios de espectroscopía en THz de muestras biológicas en solución sin tener pérdidas de humedad por fugas.

# Capítulo 5

## Plataforma traslacional

En este capítulo se describen el diseño y construcción de un circuito electrónico y la interfaz gráfica programada en Matlab para la automatización de una plataforma traslacional.

En todo arreglo experimental que realice estudios en el dominio del tiempo es necesario por lo menos una plataforma traslacional para medir la evolución temporal del pulso [29,30,33]. Con el haz pulsado ya dividido, se puede dar un retraso temporal relativo entre las divisiones. Esto se logra incrementando o disminuyendo la diferencia de camino óptico entre las divisiones, mediante una plataforma traslacional.

El sistema de automatización de la plataforma está formado principalmente por dos partes: un *software* de control en el cual, por medio de una interfaz gráfica, el usuario da instrucciones para el motor; y un circuito electrónico para la comunicación entre la interfaz y el sistema mecánico de la plataforma. La interfaz gráfica mantiene comunicación bidireccional con el circuito de control; envía intrucciones y recibe datos de las entradas de señal

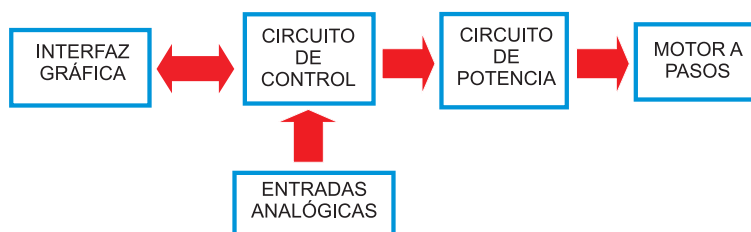


Figura 5.1: Diagrama de bloques sistema automatizado de envío y recepción de datos para control de un motor a pasos

disponibles.

## 5.1. Circuito electrónico

El circuito electrónico está formado por un circuito de control y uno de potencia. El circuito de control es el encargado de administrar la comunicación; recibe los datos de distancia y dirección de la computadora, los traduce en secuencia de datos para el movimiento del motor a pasos, además toma las lecturas de los dispositivos conectados a las entradas de señal y las manda a la computadora para ser graficadas. El circuito de potencia entrega el voltaje y corriente necesarias para el encendido de los embobinados del motor en el orden asignado por el circuito de control.

### 5.1.1. Circuitos de control y de potencia

El circuito de control está formado principalmente por un microcontrolador PIC 16F877A, el cual es preprogramado para recepción de datos, interpretación y envío de datos; y un circuito integrado MAX232 encargado de administrar entradas y salidas y controlar los voltajes de la comunicación bi-



direccional, 5 V para el PIC y 7.5 V para el puerto serial RS-232. El MAX232 establece una comunicación de tipo serial con la computadora por medio del conector DB9 mostrado en la figura 5.2.

El circuito de control es alimentado con 5 V y dado que el motor necesita 12 V para su buen funcionamiento, es necesario el circuito de potencia. El acoplamiento entre ambas etapas se logra mediante optoacopladores. Con éstos se controla el flujo de corriente en un transistor (polarizando su base fotosensible) con el encendido o apagado de un led. De este modo por medios ópticos podemos obtener dos circuitos acoplados con voltajes independientes.

El circuito de potencia está formado por un circuito integrado ULN2003, el cual le entrega al motor la corriente requerida y protege el resto del circuito de cargas inductivas provenientes de los embobinados.

La figura 5.2 muestra los circuitos electrónicos de control y de potencia. Los pines 2 – 5 y 9 – 10 del microcontrolador PIC son empleados como entradas analógicas, ya que de fábrica vienen configurados éstos con convertidores analógico-digital (ADC por sus siglas en inglés) de 10 bits cada uno. Esto quiere decir que para una señal de entrada analógica en el rango de 0 a 5 V se obtiene un número digital de 0 a 1023; obtenemos una resolución de 0.004887 V. A cada una de estas entradas le fueron colocadas unos conectores tipo BNC, usados comúnmente en los aparatos de medición electrónicos como osciloscopio y Lock-in. En la figura 5.2 sólo se muestra conector para un sólo pin del PIC.

Del mismo modo que en el circuito de control, en el circuito de potencia sólo se muestra un optoacoplador y las conexiones hasta el motor de sólo uno de sus embobinados. Esto se repite para los pines 37 – 39 del PIC,

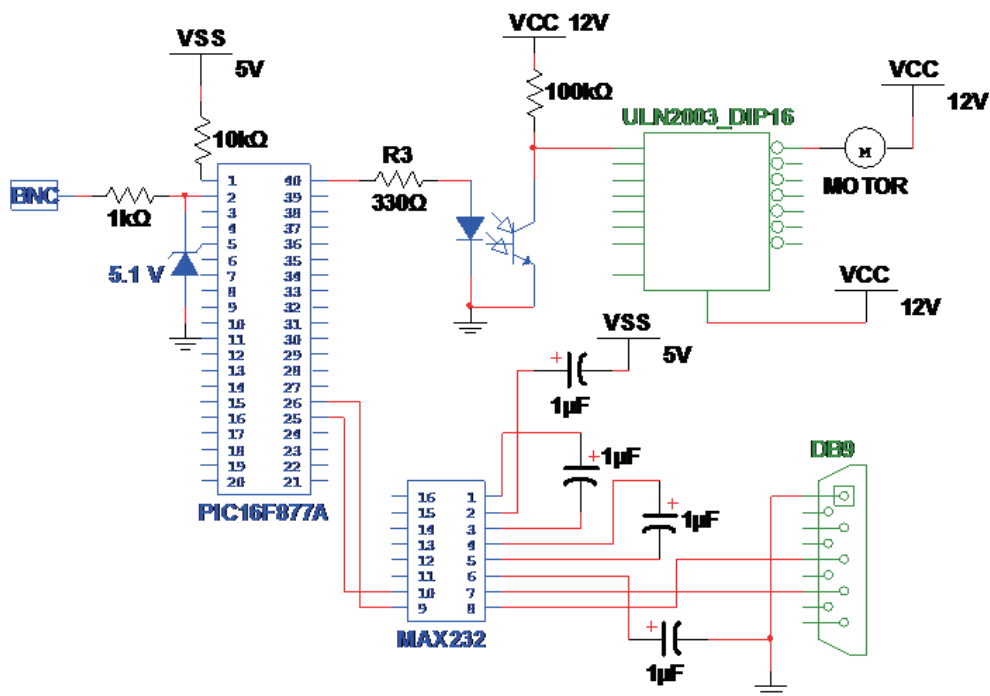


Figura 5.2: Esquema de circuitos de control y de potencia de automatización de una plataforma traslacional

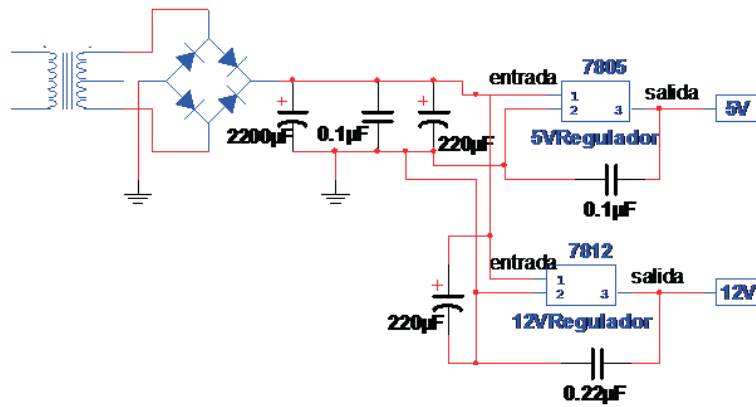


Figura 5.3: Esquema del circuito de alimentación

correspondientes a los otros tres embobinados del motor.

### 5.1.2. Circuito de alimentación

Debido a los diferentes volajes necesarios para el buen funcionamiento de los circuitos diseñados y a la necesidad de la portabilidad y practicidad del dispositivo, fue necesario diseñar un tercer circuito que entregara 5 y 12 V DC y que fuera alimentado con 120 V AC de la toma del servicio de electricidad.

Este circuito, figura 5.3, está formado por un transformador 10:1 que entrega 12 V RMS (16.97 V pico) de corriente alterna, un puente de diodos como rectificador de onda completa, una serie de capacitores como filtros y un par de reguladores. Estos reguladores entregan un voltaje de salida fijo. Se emplearon un regulador 7805 que entrega 5 V para el circuito de control y un 7812 con salida de 12 V para el circuito de potencia.

## 5.2. Interfaz gráfica

En el software Matlab se programó la interfaz gráfica capaz de traducir las instrucciones de desplazamiento y dirección del usuario en instrucciones para el PIC y enviarlas por medio de comunicación serial, además de recibir los datos enviados de los convertidores analógico-digital y graficarlos.

Los parámetros de movimiento y lectura ajustables por el usuario mediante la interfaz gráfica son:

- Desplazamiento: el usuario podrá dar una posición relativa inicial de la plataforma y una posición final, durante este trayecto se tomarán mediciones de los ADCs.

- Número de puntos: la plataforma hará el recorrido indicado en desplazamiento tomando lecturas cada  $X$  distancia, siendo

$$X = \text{desplazamiento} / \text{numero de puntos}.$$

- Fijar cero: al apretar este botón el usuario fijará un cero relativo asignándolo a la posición actual.

- Lecturas por punto: es el número de lecturas de los ADCs que tomará y promediará en cada destino.

- Tiempo entre lecturas: es el tiempo en  $ms$  que esperará el programa para tomar lecturas entre cada Lectura por punto.

- Tiempo de inicio de lecturas: es el tiempo en  $ms$  que esperará el programa para tomar lectura después de haberse desplazado.

- Repeticiones: número de veces que deberá realizar el recorrido con los tiempos y cantidad de lecturas asignados.

- Ir a: la plataforma se moverá a la posición deseada sin tomar lecturas.

Además esta interfaz está acondicionada con un botón de *STOP* de emergencia, cuatro áreas de gráficos donde muestra las lecturas tomadas y la transformada de Fourier del canal 1 del ADC, como función de la posición relativa; así como también tiene una salida de información de lecturas para almacenamiento en archivos con extensión \*.txt y la posibilidad de extensión a un segundo control de motor a pasos.

El diagrama de flujo de la secuencia de instrucciones y toma de decisiones del programa se muestra en las figuras 5.4 y 5.5.

En conclusión se diseñó e implementó la automatización de una plataforma traslacional. Se obtuvo una resolución en desplazamiento de la plataforma de  $2.604 \mu\text{m}$  ( $1.302 \mu\text{m}$  para medios pasos del motor). Se logró implementar un programa que grafica los datos tomados del sistema de espectroscopía como función del retraso temporal del haz generador de THz. Esto es importante porque sólo de este modo es posible obtener la evolución temporal del pulso.

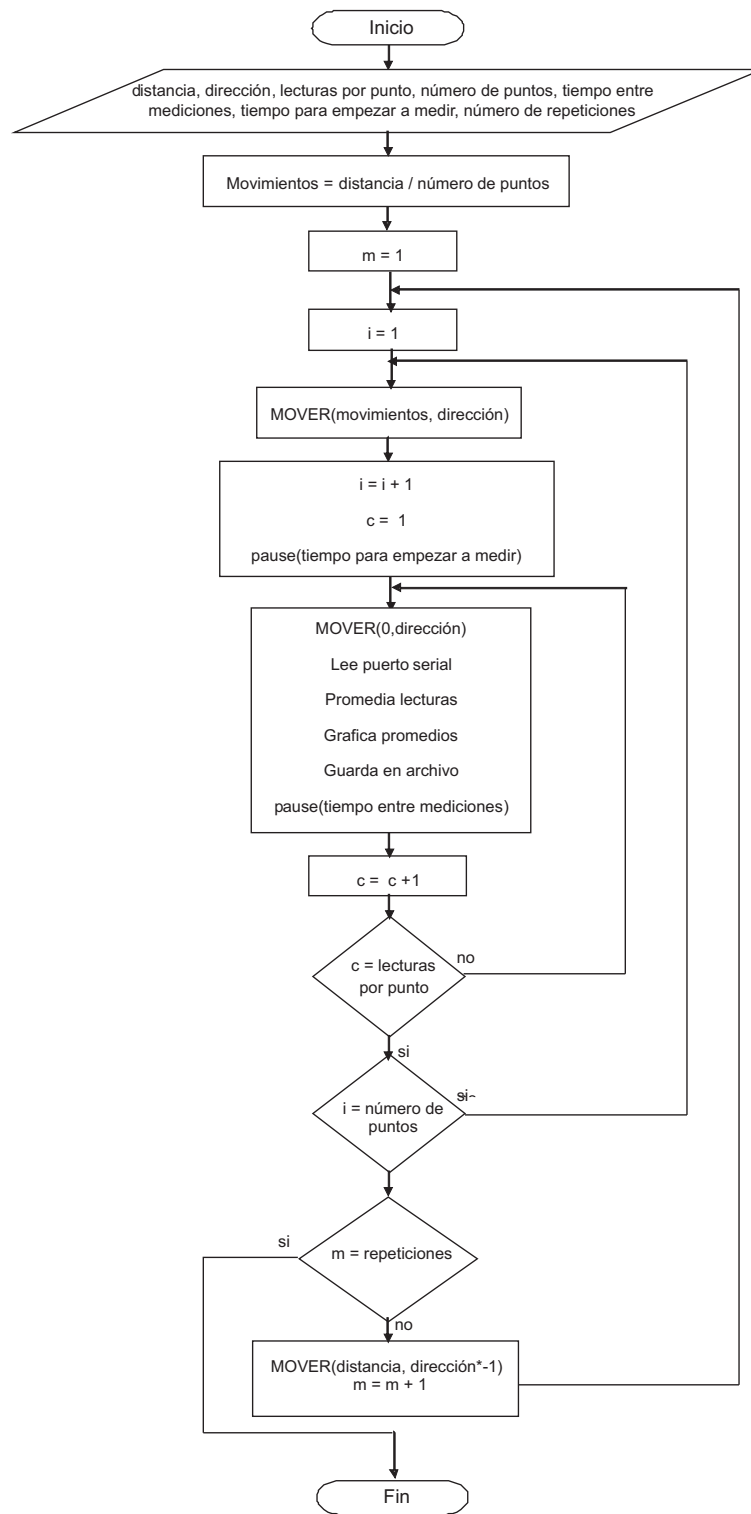


Figura 5.4: Diagrama de flujo de la interfaz gráfica en Matlab

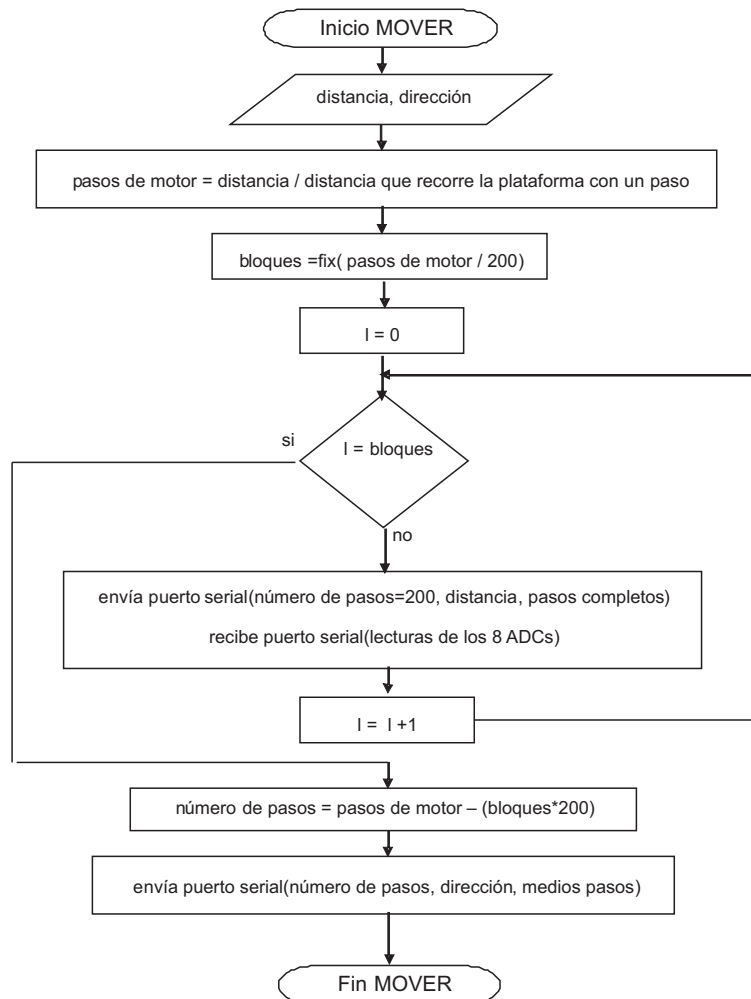


Figura 5.5: Diagrama de flujo de la función MOVER

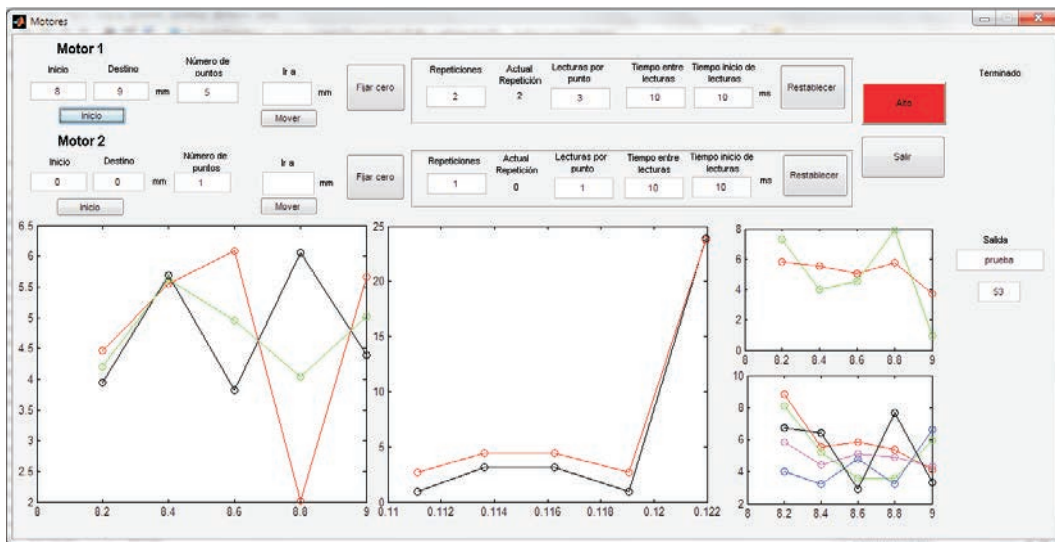


Figura 5.6: Interfaz gráfica de control de motor a pasos de plataforma traslacional. Las gráficas que muestra la interfaz son los datos recibidos de los ADCs como función de la posición relativa de la plataforma



# Capítulo 6

## Espectrómetro en THz

Después de haber diseñado y construido los componentes presentados en los capítulos del 5 al 3, se ensambló el sistema.

El sistema de espectroscopía en THz construido utiliza un láser pulsado Ti:Zafiro que produce 300 mW de potencia promedio en pulsos de  $\sim 33$  fs de duración a una tasa de repetición de 80 MHz y cuya longitud de onda central es de 800 nm. Una antena fotoconductiva de Si-GaAs con una separación entre contactos de  $400 \mu\text{m}$  polarizada por una onda cuadrada de 80 V a 10 KHz es utilizada para convertir los pulsos del láser en transientes de radiación en THz. Estos transientes son detectados utilizando un sensor fotoconductor de tres contactos [38] fabricado sobre un sustrato de GaAs implantado con iones de arsénico.

Los dos haces utilizados para generación y detección de THz son separados utilizando un divisor de haz de 25% para la región espectral entre 750 y 850 nm, fabricado en el laboratorio de películas delgadas del Centro de Investigaciones en Óptica. Se utilizaron cuatro espejos parabólicos, dos de

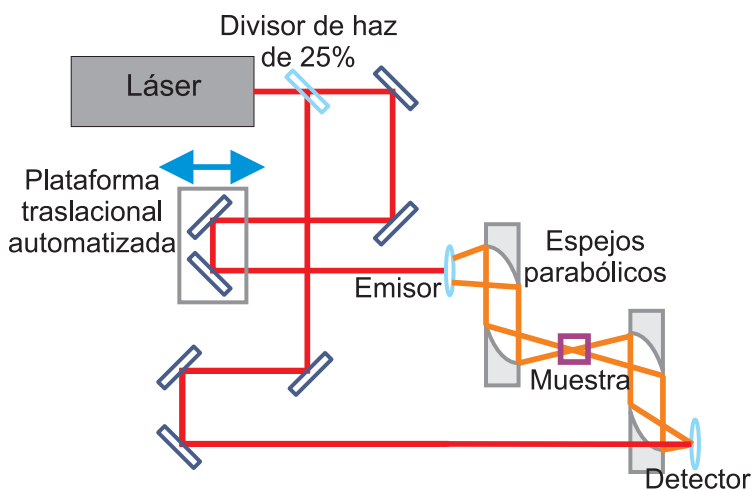


Figura 6.1: Sistema de espectroscopía en THz de biomoléculas construido

longitud focal de 3 in y dos de 6 in, para la recolección y enfoque del haz de THz.

La señal entregada por el detector fotoconductor y sensada usando un amplificador lock-in SR830 amarrado a una referencia de 10 KHz del voltaje usado en el emisor. La señal es digitalizada con las entradas analógicas de la plataforma. El programa de la plataforma mide la corriente eléctrica inducida en el detector fotoconductor como función de la posición de la plataforma como se muestra en la figura 6.2.

Diferenciando la gráfica anterior obtenemos el campo eléctrico de la señal de THz del sistema implementado como función del retraso temporal del pulso, como se muestra en la figura 6.3.

De este modo se logró obtener la señal de THz necesaria para realizar los estudios de espectros de transmisión de muestras de biomoléculas en solución acuosa con un ancho de banda de  $\sim 2$  THz, figura 6.4

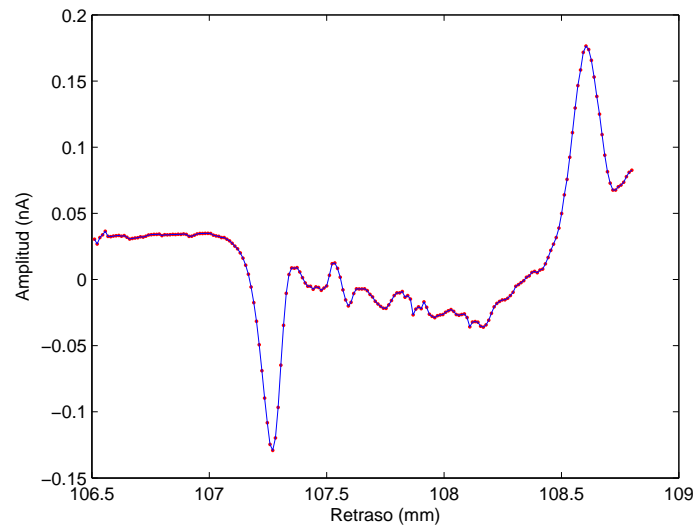


Figura 6.2: Grafica medición obtenida, amplitud medida como función del retraso de la plataforma

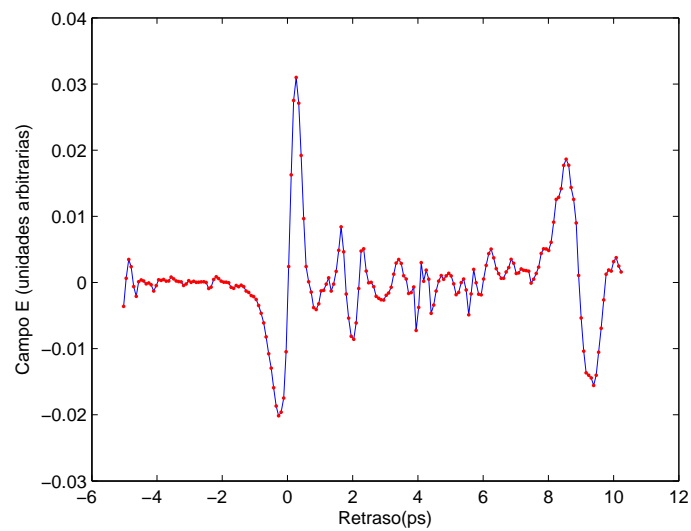


Figura 6.3: Grafica del campo eléctrico del pulso de THz generado como función del retraso temporal

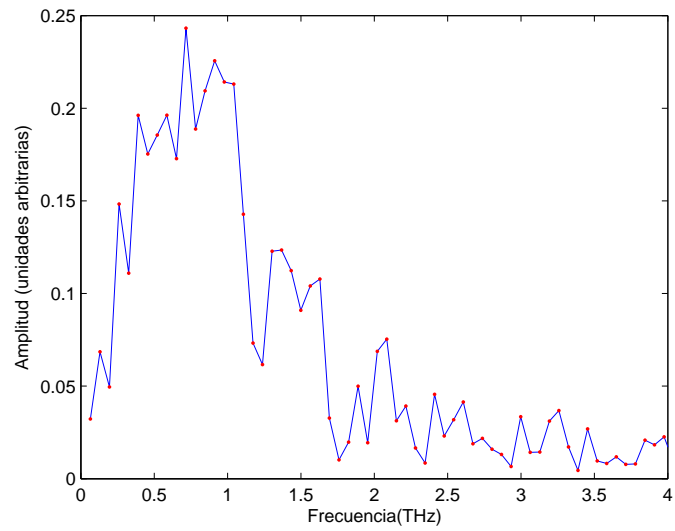


Figura 6.4: Grafica del ancho de banda espectral del pulso de THz

# Capítulo 7

## Conclusiones

Para construir un espectrómetro en THz, se diseñaron y fabricaron algunos componentes necesarios. El primer desafío que se tuvo que enfrentar fue la necesidad de una mesa óptica con una forma de “T”, dada la disponibilidad de dos segmentos de mesa en el Laboratorio de óptica ultrarrápida del Centro de Investigaciones en Óptica, nos dimos a la tarea de desarrollar un método para unir ambos segmentos y caracterizar la rigidez de la estructura resultante. Esta parte del trabajo se reporta en el capítulo 3 donde se muestra evidencia experimental que demuestra que la unión tiene una rigidez comparable a cada uno de los segmentos que componen la “T”.

También fue necesario el diseño y construcción de una plataforma traslacional automatizada para producir un retraso relativo controlado entre los pulsos que se usan en el sistema de espectroscopía. En el capítulo 5 se describen el circuito electrónico y el programa de cómputo que controla la plataforma y obtiene datos usando convertidores analógico digitales. La plataforma tiene una resolución de  $1.302 \mu\text{m}$  que es suficiente para la obtención de señales

de THz.

El manejo de muestras líquidas en espectrómetros es normalmente problemática debido a que los líquidos son difíciles de contener. En el caso de soluciones acuosas para espectroscopía en THz el problema es aún mayor ya que la absorción del agua en esta región espectral es muy alta, además la función dieléctrica del agua tiene una fuerte dependencia a la temperatura. Por tanto fue necesario fabricar una celda adecuada para este tipo de estudios, el proceso de diseño y construcción se expone en el capítulo 4.

Una vez resueltos los problemas antes mencionados, se construyó el espectrómetro de THz. La descripción técnica y la primera medición de señal realizada con este aparato se presentan en el capítulo 6. En conclusión, se logró construir un espectrómetro de THz y los aditamentos necesarios para la medición de espectros de transmisión de muestras de biomoléculas en solución acuosa.

El siguiente paso es realizar las mediciones de espectroscopía en THz de transmisión, para esto se mantiene comunicación con la Dra. Alejandra Covarrubias quien es investigadora de Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (IBT-UNAM). La Dra. Covarrubias trabaja con muestras de proteínas hidrofílicas las cuales funcionan como protectoras de actividades enzimáticas bajo condiciones de deshidratación parcial.

# Bibliografía

- [1] M. C. Beard, G. M. Turner, C. A. Shmuttenmaer, *Terahertz spectroscopy*, J. Phys. Chem. B 2002, 106, 7146-7159
- [2] A. G. Davies, E. H. Linfield and M. B. Johnston, *The development of Terahertz sources and their applications*, Phys. Med. Biol. 47, 2002, 3679-3689
- [3] Ch. Fattinger and D. Grischkowsky, *Terahertz beams*, Appl. Phys. Lett. 54, 490, 1989
- [4] J. Cerne, J. Kono, M. S. Sherwin, M. Sundaram, A. C. Gossard and G. E. W. Bauer, *Terahertz Dynamics of Excitons in GaAs/AlGaAs Quantum Wells*, Phys. Rev. Lett. 77, 1131–1134 (1996)
- [5] Patrick Parkinson, James Lloyd-Hughes, Qiang Gao, H. Hoe Tan, Chen-nupati Jagadish, Michael B. Johnston and Laura M. Herz, *Transient Terahertz Conductivity of GaAs Nanowires*, NANO LETTERS, Vol. 7, No. 7, 2007 2162-2165

- 
- [6] Kodo Kawase, Yuichi Ogawa, Yuuki Watanabe, *Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints*, OPTICS EXPRESS, 11, 20, 2003, 2549
- [7] Karen Siegrist, Christine R. Bucher, Idan Mandelbaum, Angela R. Hight Walker, Radhakrishnan Balu, Susan K. Gregurick, and David F. Plusquellic, *High-Resolution Terahertz Spectroscopy of Crystalline Trialanine: Extreme Sensitivity to  $\beta$ -Sheet Structure and Cocrystallized Water*, J. Am. Chem. Soc. 2006, 128, 5764-5775
- [8] V. Makarov and B. Montgomery Pettitt. *Solvation and Hydration of Proteins and Nucleic Acids: A Theoretical View of Simulation and Experiment*, Acc. Chem. Res. 2002, 35, 376-384
- [9] J. Xu, K. W. Plaxco and S. James Allen, *Probing the collective vibrational dynamics of a protein in liquid water by terahertz absorption spectroscopy*, Protein Sci. 2006 15: 1175-1181
- [10] Neil T. Hunt, Lisa Kattner, Richard P. Shanks, and Klaas Wynne, *The Dynamics of Water-Protein Interaction Studied by Ultrafast Optical Kerr-Effect Spectroscopy*, J. Am. Chem. Soc. 2007, 129, 3168-3172
- [11] Stefan A. Maier, Steve R. Andrews, L. Martín-Moreno, and F. J. García-Vidal, *Terahertz surface plasmon polariton propagation and focusing on periodically corrugated metal wires*, Phys. Rev. Lett., 97, 176805, 2006
- [12] Fernandez-Dominguez, A. I., Martín-Moreno, L., García-Vidal, F. J., Andrews, S. R. and Maier, S. A., *Spoof Surface Plasmon Polariton*



- Modes Propagating Along Periodically Corrugated Wires. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 14 (6),2008, pp. 1515-1521
- [13] Markus Walther, Geoffrey S. Chambers, Zhigang Liu, Mark R. Freeman, and Frank A. Hegmann, *Emission and detection of terahertz pulses from a metal-tip antenna*, J. Opt. Soc. Am., 22, 11, November 2005
- [14] Frank A. Hegmann and Mark S. Sherwin, *Generation of picosecond far-infrared pulses using laser-activated semiconductor reflection switches*, Proc. SPIE Vol. 2842, p. 90-105, Millimeter and Submillimeter Waves and Applications III, Mohammed N. Afsar; Ed.
- [15] Joseph Orenstein, *Optical conductivity of a superfluid density wave*, Physica C: Superconductivity, 390, 3, 2003, Pages 243-248
- [16] Patrick Parkinson, Hannah J. Joyce, Qiang Gao, Hark Hoe Tan, Xin Zhang, Jin Zou, Chennupati Jagadish, Laura M. Herz and Michael B. Johnston, *Carrier Lifetime and Mobility Enhancement in Nearly Defect-Free Core-Shell Nanowires Measured Using Time-Resolved Terahertz Spectroscopy*, NANO LETTERS, Vol. 9, No. 9, 2009 3349-3353
- [17] James Lloyd, Kanglin Wang, Adrian Barkan, Daniel M. Mittleman, *Characterization of apparent superluminal effects in the focus of an axicon lens using terahertz time-domain spectroscopy*, Optics Communications 219 (2003) 289–294
- [18] Charles A. Shmuttenmaer, *Exploring dynamics in the far-infrared with terahertz spectroscopy*, Chem. Rev.,2004, 104, 1759-1779

- [19] Gilad Haran, Wei-Dong Sun, Klaas Wynne, Robin M. Hochstrasser, *Femtosecond far-infrared pump-probe spectroscopy: a new tool for studying low-frequency vibrational dynamics in molecular condensed phases*, Chem. Phys. Lett. 274 (1997) 365-371
- [20] Kutteruf, M. R.; Brown, C. M.; Iwaki, L. K.; Campbell, M. B.; Korter, T. M.; Heilweil, E., *Terahertz spectroscopy of short-chain polypeptides* J. Chem. Phys. Lett. 2003, 375, 337-343.
- [21] E. Castro-Camus, MB. Johnston, *Conformational changes of photoactive yellow protein monitored by terahertz spectroscopy*, Chem. Phys. Lett. 455, 289 (2008).
- [22] M. Walther, B. Fischer, M. Schall, H. Helm, Uhd Jepsen, *Far-infrared vibrational spectra of all-trans, 9-cis and 13-cis retinal measured by THz time-domain spectroscopy*, Chem. Phys. Lett. 332 (2000) 389-395
- [23] Markelz, A. G., Roitberg, A., Heilweil, E., *Pulsed Terahertz Spectroscopy of DNA, Bovine Serum Albumin and Collagen between 0.1 and 2.0 THz*, J. Chem. Phys. Lett. 2000, 320, 42
- [24] Walther M, Fischer BM, Jepsen PU. *Non-covalent intermolecular forces in polycrystalline and amorphous saccharides in the far infrared* Chem. Phys. 288, 2003, 261–268
- [25] Korter, T. M.; Plusquellic, D. F., *Continuous-wave terahertz spectroscopy of biotin: vibrational anharmonicity in the far-infrared* Chem. Phys. Lett. 2004, 385 45.

- 
- [26] *Bioquímica*, Jeremy Mark Berg, Lubert Stryer, John Tymoczko, Editorial Reverte, 2008
- [27] *Diccionario de química*, Inmaculada Julián, Editorial Complutense, 1999
- [28] P. Y. Han, M. Tani, M. Usami, S. Kono, R. Kersting, X.-C. Zhang, *A direct comparison between terahertz time-domain spectroscopy and far-infrared Fourier transform spectroscopy*, J. Appl. Phys. vol. 89, no. 4, 15 february 2001, 2357-2359
- [29] P. Y. Han, X-C Zhang, *Free-space coherent broadband terahertz time-domain spectroscopy*, Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 1747-1756
- [30] Peter H. Siegel, *Terahertz technology*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 50, no. 3, march 2001
- [31] Q. Wu and X.-C. Zhang, *Free-space electro-optic sampling of terahertz beams*, Appl. Phys. Lett. 67 (24), 11 December 1995
- [32] G. Klatt, F. Hilser, W. Qiao, M. Beck, R. Gebs, A. Bartels, K. Huska, U. Lemmer, G. Bastian, M.B. Johnston, M. Fischer, J. Faist, T. Dekorsy, *Terahertz emission from lateral photo-Dember currents*, Optics Express, 18, 4939 (2010)
- [33] Ajay Nahata, Aniruddha S. Weling, and Tony F. Heinz, *A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electro-optic sampling*, Appl. Phys. Lett. 69 (16), 14 October 1996
- [34] Carriles, Ramon and Schafer, Dawn N. and Sheetz, Kraig E. and Field, Jeffrey J. and Cisek, Richard and Barzda, Virginijus and Sylvester, Anne

- W. and Squier, Jeffrey A., *Invited Review Article: Imaging techniques for harmonic and multiphoton absorption fluorescence microscopy*, Review of Scientific Instruments, 2009, 80, 8
- [35] Malka, V and Fritzler, S and Lefebvre, E and Aeonard, MM and Burgy, F and Chambaret, JP and Chemin, JF and Krushelnick, K and Malka, G and Mangles, SPD and Najmudin, Z and Pittman, M and Rousseau, JP and Scheurer, JN and Walton, B and Dangor, AE, *Electron acceleration by a wake field forced by an intense ultrashort laser pulse*, Science, 2002, 298, 5598, 1596-1600
- [36] G Doucas and V Blackmore and B Ottewell and C Perry and P G Huggard and Castro-Camus, E and Johnston, M B and J Lloyd-Hughes and M F Kimmitt and B Redlich and A van der Meer, *Longitudinal electron bunch profile diagnostics at 45MeV using coherent Smith-Purcell radiation*, Phys. Rev. Spec. Top.-Accel. Beams, 2006, 9, 092801
- [37] McClimans, M. and Stites, R. and McHugh, J. and Burch, P. and Bali, S., *A simple method to stably float a coupled system of optics tables*, Optics and Laser Technology, 2007, 39, 3, 546-548
- [38] E. Castro-Camus, J. Lloyd-Hughes, MD Fraser, HH Tan, C. Jagadish, and MB Johnston, *Detecting the full polarisation state of terahertz transients*, Arxiv preprint cond-mat/0603388, 2006.