



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y
TECNOLOGIA AVANZADA

Diseño, construcción y control de un sistema bi-
direccional para generación de imágenes aplicando
técnicas de microscopia fototérmicas

TESIS

Para Obtener el grado de

Maestro en Tecnología Avanzada

Presenta:

Ing. Blanca Rosa Briseño Tepepa

Director :

Dr. Alfredo Cruz Orea

Co-Director:

Dr. José Luís Jiménez Pérez





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

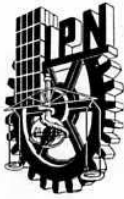
CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México D.F el día 07 del mes Junio del año 2006, el (la) que suscribe Ing. Blanca Rosa Briseño Tepepa alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro B041027, adscrito a CICATA LEGARIA, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Alfredo Cruz Orea y cede los derechos del trabajo intitulado Diseño, construcción y control de un sistema bi-direccional para generación de imágenes aplicando técnicas de microscopia fototérmicas, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección tepepa27@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Blanca Rosa Briseño Tepepa

Nombre y firma



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 11:00 horas del día 31 del mes de mayo del 2006 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-IPN para examinar la tesis de grado titulada: Diseño, construcción y control de un sistema bi-direccional para generación de imágenes aplicando técnicas de microscopia fototérmicas

Presentada por el alumno:

Briseño <small>Apellido paterno</small>	Tepepa <small>materno</small>	Blanca Rosa <small>nombre(s)</small>							
Con registro: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 5px;">B</td> <td style="padding: 2px 5px;">0</td> <td style="padding: 2px 5px;">4</td> <td style="padding: 2px 5px;">1</td> <td style="padding: 2px 5px;">0</td> <td style="padding: 2px 5px;">2</td> <td style="padding: 2px 5px;">7</td> </tr> </table>			B	0	4	1	0	2	7
B	0	4	1	0	2	7			

aspirante al grado de: **MAESTRIA EN TECNOLOGIA AVANZADA**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

Dr. Alfredo Cruz Orea

Codirector de tesis

Dr. José Luis Jiménez Pérez

Dr. Julio G. Mendoza Álvarez

Dr. José Luis Herrera Pérez

Dr. José Francisco Sánchez Ramírez

Dr. Miguel Ángel Aguilar Frutis

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. José Antonio Irán Díaz Góngora



**CENTRO DE INVESTIGACION
EN CIENCIA APLICADA Y
TECNOLOGIA AVANZADA**

Dedicatoria

De una manera muy especial agradezco, a mi esposo Adolfo Rojas Pacheco, a mi hija Blanca Olivia Rojas Briseño , a mi mamá Blanca Rosa Tepepa Zamora, y a mi hermano Armando Briseño Tepepa, por su gran amor y apoyo, por estar siempre a mi lado y que nunca dejar de creer en mí.

A mis tías María Antonieta Tepepa Zamora, Mirna Tepepa Zamora, Sonia Tepepa Zamora, Janette Tepepa Zamora, Edelmira Tepepa Zamora, a todos mis primos y tíos que siempre han estado a mi lado apoyándome.

Agradecimientos

En primer lugar y de manera muy especial agradezco al Dr. Alfredo Cruz Orea, Investigador del CINVESTAV-IPN, por su apoyo y paciencia en la dirección y realización de este proyecto de tesis y por su amistad

Al Dr. José Luis Jiménez Perez, Profesor del CICATA-IPN por el apoyo en el proyecto de tesis.

Al Ing. Damián Jacinto Méndez CINVESTAV-IPN por su apoyo en cuestiones de programación y por su amistad.

Al Dr. José Antonio Diaz Góngora, Director del CICATA-IPN (Unidad Legaria.)

Al Dr. José Antonio Calderón Arenas, Ana Leticia Cardona Gómez, Laura Yadira Vega Haro, Andrés Bautista Huerta, todos de CICATA-IPN, quienes siempre me han mostrado una buena disposición para los asuntos administrativos.

Dr. Miguel Ángel Aguilar Frutis, Dr. José Luis Herrera Pérez, Dr. Francisco Sánchez Ramírez, Dra. Roció Alejandra Muñoz Hernández, por su valiosa ayuda y enseñanzas académicas en cada curso.

A CONACYT, CICATA –IPN y CINVESTAV-IPN por la valiosa ayuda económica que me otorgaron.

Glosario de Términos

Calor específico: es el calor ganado por unidad de peso necesario para establecer un incremento de temperatura sin que tenga lugar un cambio de estado.

Difusividad térmica: Es la relación entre la conductividad térmica y el calor específico multiplicado por su densidad

Fenómeno Fototérmico :Es un proceso de foto-inducción, es decir absorción de luz y conversión de esta en calor

Espectroscopia: estudia los efectos de la interacción radiación-materia y es una herramienta que se aplica a varias áreas de la ciencia. De esta manera se puede obtener información acerca de sus propiedades, tanto microscópicas como macroscópicas para diversos tipos de materiales

Onda térmica: es la respuesta de un medio a una fuente de calentamiento periódico

Técnica Fotopiroeléctrica: fue desarrollada por Coufal, Mandelis, Ghizoni y Miranda, usando como sensor películas delgadas de un material piroeléctrico, estas se encontraban en contacto con una muestra sólida al cual se hace incidir una luz monocromática cuya intensidad es modulada a una frecuencia determinada. La absorción de la luz incidente, causa que la temperatura de la muestra fluctúe, creando un gradiente de temperatura en el material y la película piroeléctrica. Como resultado de ese cambio de temperatura, la película piroeléctrica cambia su polarización produciendo un momento dipolar neto el cual se traduce en un voltaje de salida.

Material piroeléctrico: Es aquel que tiene la capacidad de detectar cambios de temperatura mediante la generación de una señal eléctrica.

Longitud de onda: Es la distancia entre el principio y el final de una onda completa (ciclo). La **longitud de onda** se define como la separación espacial existente entre dos puntos cuyo estado de movimiento es idéntico. La longitud de onda se representa con la letra griega λ (lambda)

Absorción: Cuando una onda alcanza una superficie, una parte de su energía se puede reflejar, pero un porcentaje de ésta es absorbida por el nuevo medio.

Refracción: Es la desviación que sufren las ondas en la dirección de su propagación, cuando pasa, de un medio a otro diferente.

Difracción: Hablamos de difracción cuando una onda, ante determinados obstáculos o aperturas, en lugar de seguir la propagación en la dirección normal, se dispersa.

Fase: de una onda expresa la posición relativa de un monte o valle de esta onda, con respecto a otra onda

GLOSARIO DE SÍMBOLOS

Símbolo	Nombre	Unidades
λ	Longitud de onda	nm
I_0	Intensidad del haz de luz	(W/cm ²)
ϕ	Defasamiento de señal fotoacústica	(°)
η	Eficiencia de luz absorbida	Sin unidades
θ	Fase de señal fotoacústica	(°)
ω	Frecuencia de modulación	(rad/seg)
l	Espesor	(cm)
c	Calor específico	(J/gr°K)
ρ	Densidad del materia	(gr/cm ³)
k	Conductividad térmica	(W/cm°K)
α	Difusividad Térmica	
a_s	Coefficiente de difusión térmico	(cm ⁻¹)
f_c	Frecuencia de corte	Hz
T_0	Temperatura ambiente	(°K)
$\sqrt{k\rho C}$	efusividad	Ws ^{1/2} /(cm ² K)
β	Coefficiente de Absorción óptico	(cm ⁻¹)
P_0	Presión Inicial	Pascal (Pa)
V_0	Volumen inicial	Cm ³
γ	coeficiente de calores específicos	
δV	Incremento del volumen	cm ³
$\mu_\beta = \frac{1}{\beta}$	Longitud de absorción óptica	cm
l_s	Longitud de la muestra	cm
ΔT	Diferencia de Temperatura	(°K)
S	Superficie	cm ²
p	Coefficiente Piroeléctrico	
ϵ	Constante dieléctrica	W / cmk
K	Conductividad Térmica	
H	Capacidad Calorífica	

Índice de figuras

<i>Fig 2.1. Ondas Térmicas</i>	20
Fig. 2.1 Sección transversal de la celda fotoacústica cerrada convencional	23
Fig 2.3.1 Sistema Piroeléctrico Unidimensional.	32
Fig. 2.3.2 Propiedades que podemos detectar con la formación de imágenes térmicas	38
Fig. 2.4 Los factores que afectan la resolución Fototérmica .son ópticos y geométricos	39
Fig. 2.4.1 Imagen por microscopia Fotoacústica de un circuito integrado.	40
Fig. 2.5 Señal fotoacústica a una fase ϕ , expresada como una función de las señales de fase 0° y 90°	42
Fig 3.1 Sistema mecánico X-Y	45
Fig 3.2 Diagrama de Diseño Conceptual	46
Fig 3.3 Diagrama Conceptual el Sistema Completo.	47
Fig. 3.4 Generador de movimiento mecánico	48
Fig 3.2.1 Diagrama de bloques de etapa de adquisición de datos	49
Fig 3.3 Panel frontal	51
Fig 3.4 Diagrama de panel frontal y trasero	51
Fig 3.5 Conexión de RS-232	52
Fig 3.5 Labview	53
Fig.3.6 Pantalla de Posicionamiento De Ejes	55
Fig.3.6.1 Diagrama de flujo para Posicionamiento De Ejes	56
Fig.3.6.2 Diagrama de flujo para Proporcionar el desplazamiento	57
Fig 3.7 Posicionamiento De Ejes	57
Fig 3.8 Diagrama de Bloques para Adquisición de datos	58

Fig 3.9 Tabla de datos *.dat	59
Fig. 3.10 Celda Fotoacústica	60
Fig 3.11 Diagrama de montaje experimental de celda fotoacústica	61
Fig 3.12. Montaje experimental de celda fotoacústica	62
Fig 3.13 Fotografía de montaje experimental de celda fotoacústica	63
Fig 3.14. Montaje experimental con piroeléctrico	64
Fig 3.15 fotografía de celda con piroeléctrico	65
Fig 4.1 Chip	66
Fig. 4.2 a) Muestra con área acotada que indica el área de barrido en 2D de la señal fotoacústica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución del sistema x-y de $50 \mu m$. Frecuencia constante de 25 Hz.	68
Fig. 4.3 a) Muestra con área acotada que indica el área de barrido en 2D de la señal fotoacústica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución del sistema x-y de $100 \mu m$. Frecuencia constante de 125 Hz.	69
Fig. 4.4 a) Muestra con área acotada que indica el área de barrido en 2D de la señal fotoacústica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución del sistema x-y de $100 \mu m$. Frecuencia constante de 25 Hz.	70
Fig. 4.5 a) Muestra con área acotada que indica el área de barrido en 2D de la señal fotoacústica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución del sistema x-y de $50 \mu m$. Frecuencia constante de 25 Hz.	71
Fig 4.6 Imagen sin corrimiento en la fase	72
Fig 4.7 Imagen obtenida a frecuencia de 25 Hz en un área de 2x2mm . Con un corrimiento de fase de 2°	72
Fig 4.8 Imagen obtenida a frecuencia de 25 Hz en un area de 2x2mm . con un corrimiento de fase de 20°	73
Fig. 4.9 a) Muestra con área acotada que indica el área de barrido en 2D de la señal piroeléctrica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución del sistema x-y de $50 \mu m$. Frecuencia constante de 25 Hz.	74
Fig 4.10 a) Muestra. Área acotada indica área de barrido en 2D de la señal fotopiroeléctrica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución de sistema x-y $150 \mu m$. Frecuencia constante de 2 Hz.	76
Fig 4.11 a) Muestra. Área acotada indica área de barrido en 2D de la señal piroeléctrica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución de sistema x-y 150 micrómetros. Frecuencia constante de 2 Hz	77

Índice general

<i>RESUMEN</i>	13
<i>ABSTRACT</i>	14
<i>Capítulo 1</i>	
1.1 Introducción	15
Referencias	18
<i>Capítulo 2</i>	
<i>Técnicas Fototérmicas</i>	
2.1 Ondas Térmicas	19
2.2 Espectroscopia Fotoacústica	
2.2.1 Introducción	22
2.2.2 El modelo teórico de Rosencwaig y Gersho	23
2.2.3 Obtención de la señal acústica	26
2.2.4 Casos Especiales	27
2.3 Detección Piroeléctrica	
2.3.1 Sensores piroelectricos	30
2.3.2 Teoría de Espectroscopia FotoPiroeléctrica de Sólidos	32
2.4 Imágenes Obtenidas a partir de ondas térmicas	37
2.5 Método de Separación en la Fase de la señal fototérmica	43
<i>Capítulo 3</i>	
<i>Diseño conceptual del Sistema bidireccional para la obtención de imágenes por técnicas fototérmicas</i>	45

3.2 Software	49
3.2.1 Software e interfase de funcionamiento	49
3.3 Controladores de motores	50
3.3.1 Panel Frontal de un Controlador del Sistema	51
3.3.2 Diagrama de Conexión de cable RS-232 con PC	52
3.4 Software de automatización lab-view	52
3.5.1 Principales usos	53
3.6 Posicionamiento de los ejes del motor	55
3.7 Adquisición de datos	57
3.8 Montaje Experimental	
3.8.1 Celda Fotoacústica	60
3.9 Montaje Experimental. Piroeléctrico	64

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1 Imágenes de circuitos integrados obtenidas por microscopia fotoacústica.	66
4.2. Sistema No-Automatizado.	67
4.3 Sistema Automatizado.	69
4.4 Análisis de la señal fotoacústica a diferentes ángulos de fase	72
4.5 Resultados con sensor piroeléctrico	74
4.6 Piroeléctrico con material biológico	75
4.7 Luz incidiendo en sensor Piroeléctrico con material biológico	77

Capítulo 5

<i>Conclusiones y perspectivas.</i>	79
--	-----------

Apéndices A

Manual de usuario.	81
--------------------	----

Resumen

Existe un gran interés en la microscopia fototérmica (MFT) y su aplicación en la obtención de imágenes superficiales y localizar defectos en profundidad, por medio de la interacción de una onda térmica con el material analizado.

En este trabajo de tesis se muestra los resultados del diseño, construcción y control de un sistema bi-direccional para obtención de imágenes aplicando técnicas fototérmicas. Se obtuvieron imágenes de superficies y en profundidad de microcircuitos y material biológico. Se utilizó un microposicionador lineal con resolución de 495 nm , automatizando el barrido y la adquisición de la señal fotoacústica y fotopiroeléctrica en cada punto del barrido. El mismo dispositivo puede ser usado en microscopia con otras técnicas fototérmicas. El sistema detecta diferentes características ópticas y térmicas de la muestra. En la superficie se obtienen imágenes con las características ópticas (mediante la amplitud de la señal) y a profundidad imágenes con características térmicas (mediante la fase).

Podemos apreciar el potencial uso en el diagnóstico no destructivo de materiales a través de visualización de rasgos bajo la superficie no detectados por métodos ópticos convencionales.

También se reporta el diseño e implementación de un programa hecho con el software Labview 7.0 para el funcionamiento visual del micro-posicionador con este software se para obtener amplitud y fase de la señal fotoacústica o de la técnica fototérmica en función de las coordenadas de posición de una muestra.

Abstract

Exists a great interest in the photothermal spectroscopy (MFT) and its application in the obtaining of superficial images and to locate defects in depth, by means of the interaction of a thermal wave with the analyzed material. In this thesis work one is the results of the design, construction and control of a bidirectional system for obtaining of technical images applying photothermal. Images of surfaces and in depth of microcircuits and biologic agents were obtained. I use a linear micropositioner with resolution of 495 nm, automating the sweeping and the acquisition of the sound and photopyroelectric signal in each point of the sweeping. The same device can be used in spectroscopy with other photothermal techniques. The system detects different optical and thermal characteristics from the sample. In the surface images with the optical characteristics (by means of the amplitude of the signal) and to depth are obtained images with thermal characteristics (by means of the phase). We can appreciate the potential use in I diagnose nondestructive of materials through visualization of characteristics under the surface not detected by conventional optical methods. Also one reports the design and implementation of a program made with software Labview 7,0 for the visual operation of the micro-positioner with this software to obtain amplitude and phase of the sound signal or the photothermal technique based on the coordinates of position of a sample.

Capítulo 1

1.1 Introducción

Las técnicas fototérmicas son técnicas relativamente nuevas cuyo uso en el estudio de es materiales tan versátil que va desde la aplicación en sólidos y polvos hasta líquidos y gases.[1,2]. En los últimos años su aplicación se ha ido difundiendo gradualmente hacia una gran variedad de campos como: la ciencia de materiales, la agricultura, la medicina, la contaminación, etc.[2,3]. Se ha demostrado que las técnicas fototérmicas constituyen un medio efectivo para realizar estudios no destructivos en la materia. Entre otras cosas permitiendo el estudio de las propiedades ópticas y térmicas en materiales que mediante la aplicación de técnicas convencionales sería muy difícil realizar.

Los fenómenos fototérmicos forman una clase muy general de fenómenos físicos en los cuales la energía luminosa, al ser absorbida por un material, es transformada en calor, vía procesos de des-excitación no radiativos. El diseño básico de un experimento fototérmico consiste en una fuente de radiación cuyo haz de luz modulado se hace incidir sobre una muestra, generando en su interior ondas térmicas, las cuales, al ser detectadas son transformadas en una señal eléctrica que posteriormente es amplificada. Comúnmente se dispone de un sistema de almacenamiento de datos, conectado a dicho amplificador, para llevar a cabo posterior análisis de la información obtenida. La señal fototérmica detectada depende no solo de la cantidad de calor generado en la muestra sino también de cómo se difunde el calor a través de ella. La cantidad que mide la razón de flujo de calor a través de un medio se denomina difusividad térmica. La importancia de esta cantidad física se debe a que al igual que el coeficiente de absorción óptico, es única para cada material.

Una aplicación de las técnicas fototérmicas es la de obtener imágenes a partir de las características térmicas y ópticas de una muestra.

Existe un gran interés en aplicar la microscopia fototérmica para la obtención de imágenes de superficies y en profundidad de materiales sólidos. La obtención de una imagen usando técnicas fototérmicas permite, entre otras cosas, la localización de posibles defectos, superficiales o en profundidad, de la muestra a ser estudiada por medio de la interacción de una onda térmica con la muestra [4]. En la aplicación de las técnicas fototérmicas para microscopía en 1980 G. Busse reporta la obtención de imágenes de las características superficiales de un metal por medio de ondas térmicas, usando por primera vez detección piezoeléctrica. [4] En 1980 Richard White reporta que por medio de ondas térmicas, generadas por un haz electrónico, con diferentes modulaciones, es posible obtener imágenes de regiones P-dopadas en una oblea de silicio [5].

En 1985 Shu-Yi Zhang y Li Che reportan el uso de la microscopia fototérmica en circuitos integrados de metal óxidos semiconductor usando una fuente de excitación láser y detección piezoeléctrica. El haz de calentamiento láser es modulado en el rango de frecuencia de 25Hz a 300KHz y la cintura del haz enfocado hasta 2 μm . La mejor resolución lograda por estos autores en la estructura de sub-superficie es del orden de 5 μm . Seleccionando las frecuencias de operación del haz modulado podemos obtener una imagen a través de la señal fototérmica que despliega las características por debajo de la superficie aún en la presencia de características con fuerte contraste óptico en la superficie de la muestra.[6]

Se ha usado la técnica de microscopia fotoacústica para detectar regiones inhomogéneas en la difusión de implantes iónicos en semiconductores [5], a su vez esta técnica ha sido usada en la detección de defectos en profundidad de circuitos integrados [6]. A pesar de estas aplicaciones, usando varias de técnicas fototérmicas, existen pocos reportes sobre la obtención de imágenes usando un sensor piroeléctrico. Existen dos posibles configuraciones en el caso del uso de este sensor dependiendo de la incidencia del haz luminoso utilizado, ya sea sobre la muestra o sobre el sensor. En el caso de la configuración de detección directa (la luz modulada incide en la muestra y el sensor se encuentra por debajo de esta) se reporta en la referencia [7]. Recientemente fue reportado la obtención de imágenes con el sensor en la configuración de detección inversa (en este caso la luz modulada incide en el sensor y la muestra se encuentra por debajo del sensor).

El propósito de este trabajo es el diseño, construcción y control de un sistema bi-direccional para generación de imágenes aplicando técnicas de microscopia fototérmicas. Se usarán dos técnicas fototérmicas, fotoacústica y fotopiroeléctrica, para obtener imágenes de superficies y en profundidad de diversas muestras en un plano bi-direccional a través de técnicas de mapeo y el desarrollo de un manual de usuario para investigación usando el sistema construido.

Este trabajo se divide en 5 capítulos, los cuales se estructuran de la siguiente forma: en el presente capítulo se escribe una introducción sobre el propósito de este trabajo. En el capítulo 2 se describen los fundamentos de dos técnicas fototérmicas (Fotoacústica, Fotopiroeléctrica), así como la teoría acerca de ondas térmicas, de fase para el análisis de datos obtenidos a partir de la señal fototérmica.

En el capítulo 3 se muestra el diseño conceptual de todos los componentes de los que consta el control bi direccional para la obtención de imágenes aplicando técnicas fototérmicas. Así como de las etapas con las que se cuenta en cada una de las partes de la automatización de la plataforma x-y tal como la comunicación con los diferentes puertos de la PC para la adquisición de datos y la automatización del sistema. Dentro del software se da una explicación de cada una de las pantallas gráficas del programa realizado en plataforma G Lab-view. También se muestra el montaje experimental, tanto para celda fotoacústica como para celda piroeléctrica así como una explicación de los sistemas con los cuales se realizaron los experimentos.

En el Capítulo 4 Se muestran los resultados obtenidos, tanto para el sistema semi-automatizado así como automatizando y utilizando las dos técnicas fototérmicas mencionadas (Fotoacústica y Fotopiroeléctrica) así como los resultados de proyección de la

señal fototérmica a diferentes ángulos de fase como una herramienta de contraste de imágenes.

Finalmente, en el capítulo 5 se describen conclusiones de esta tesis y se discuten perspectivas de la misma.

Referencias

- [1] Rosencwaig, A., Gersho, A., *J. Appl. Phys.*, **47**, 64 (1976)
- [2] D. Bicanic, "Photoacoustic and Photothermal Phenomena III", Berlin (1992)
- [3] A. Mandelis and P. Hess Eds., *Progress in Photothermal and Photoacoustic Science and Technology*, USA (1997)
- [4] G. Busse, A. Rosencwaig, *Appl. Phys. Lett.*, 36, 815 (1980)
- [5] A. Rosencwaig, R.M. White, *Appl. Phys. Lett.*, 38, 165 (1981)
- [6] S.Y. Zhang and L. Chen, *Can. J. Phys.*, 64, 1316(1986)
- [7] M. Mieszkowski and A. Mandelis, *J. Opt. Soc. Am. A* 7 , 552 (1990)

Capítulo 2

Técnicas Fototérmicas.

2.1 Ondas Térmicas

Una onda térmica es la respuesta de un medio a una fuente de calentamiento periódico. Cuando una fuente de energía incide sobre la superficie de un sólido opaco, el sólido absorberá parte de esta energía y producirá un flujo localizado de calor. Si la fuente de calor es modulada, un flujo periódico es producido por la muestra. El resultado de este flujo de calor se llama onda térmica. Las ondas térmicas pueden ser producidas en el interior de un material que haya absorbido energía. Estas ondas interactuarán con las características térmicas de un material de una manera análoga como la luz interactúa con las características ópticas en los procesos de dispersión, reflexión y refracción en las interfaces. De esta manera las ondas térmicas pueden ser usadas para la evaluación y mapeo de materiales.

Las ondas térmicas pueden ser detectadas de varias maneras. Por ejemplo cuando un haz de luz modulado incide sobre la superficie de una muestra, este genera un campo de ondas térmicas, causando un gradiente en el índice de refracción. Si se lanza un rayo de prueba paralelo a la superficie de la muestra este será desviado armónicamente, este fenómeno es conocido como *efecto mirage* o Espectroscopia Fototérmica por reflexión de haz (PDS).. La radiación de cuerpo negro puede ser también monitoreada debido a la oscilación térmica de la superficie (Espectroscopía fototérmica infrarroja).

Las ondas térmicas también pueden ser detectadas con sensores en contacto con la muestra, por ejemplo un piroeléctrico, esta técnica es conocida como Espectroscopia Fotopiroeléctrica, o pueden ser detectadas a través de un medio de transductor como el aire, en el caso de la Espectroscopía Fotoacústica.

A continuación escribimos las ecuaciones que describen este tipo de ondas:

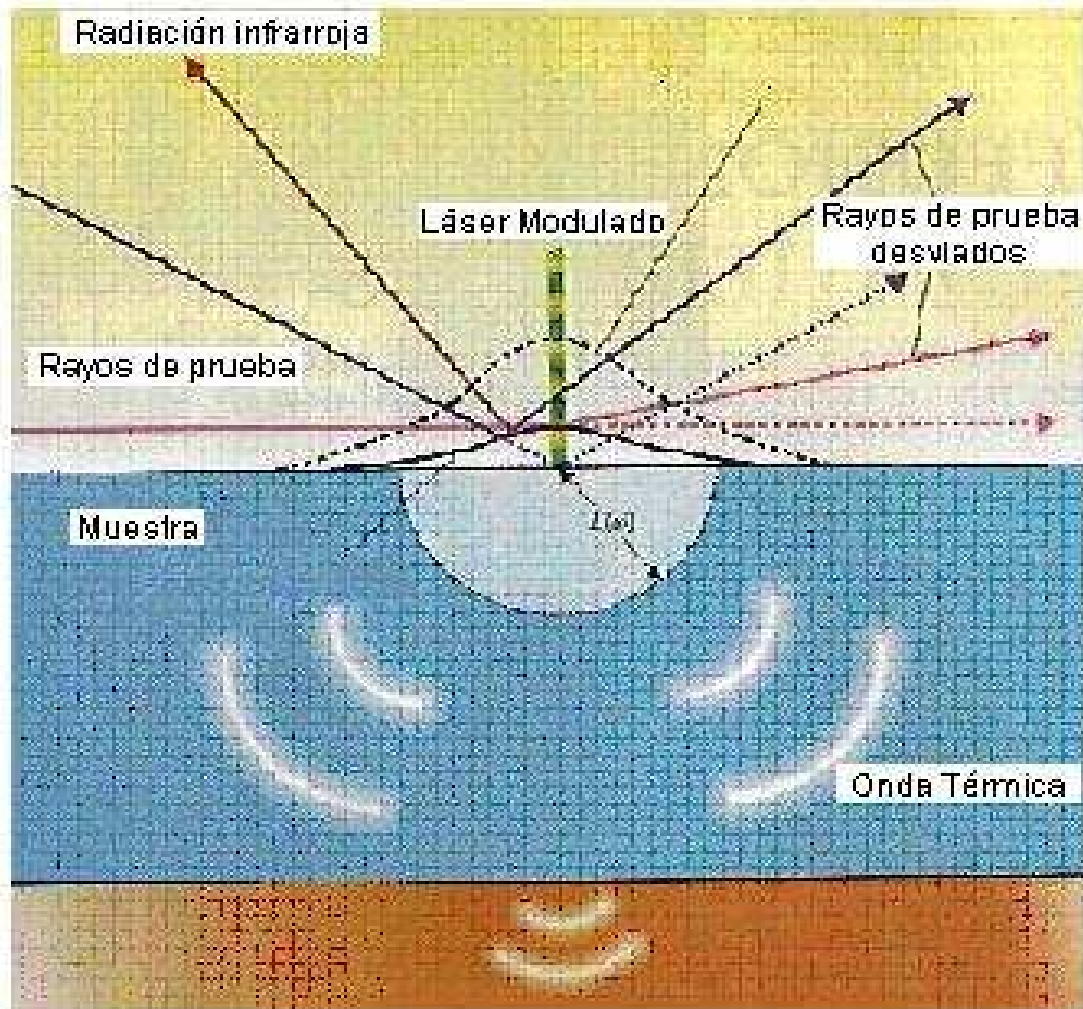


Fig.2.1 Ondas Térmicas

Considerando el caso de un haz modulado es incidiendo sobre una muestra, la intensidad de la luz absorbida a una profundidad x en la muestra puede describirse como:

$$I(x, t) = I_0 \exp(-\beta x) \frac{1}{2} (1 + \cos \omega t) \quad (2.1)$$

Donde I_0 es la intensidad de la luz incidente
 β , es el coeficiente de absorción óptica
 x , es la distancia en profundidad en la muestra
 $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia de modulación

La energía absorbida por unidad de longitud es obtenida por la derivada:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = \beta I_0 \exp(-\beta x) \frac{1}{2} (1 + \cos \omega t) \quad (2.2)$$

La energía térmica consiste de componentes CD y CA. El termino CA es el que genera las variaciones en temperatura que contribuye a las ondas térmicas. Las variaciones de temperatura en la muestra son gobernadas por la ecuación de difusión de calor que tiene una solución de la forma [1]

$$\Delta T(x, t) = A \exp(i\omega t \pm \sigma x) \quad (2.3)$$

Donde:

$$\sigma = (1+i)\sqrt{\omega/2\alpha} \quad (2.4)$$

Para un material semi-infinito, por consideraciones físicas, se toma el signo negativo en la ecuación (2.3).

Así la ecuación (2.3) es amortiguada por un factor e^{-1} en una distancia llamada “**Longitud de difusión térmica**”

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (2.5)$$

Donde

α es la difusividad térmica de la muestra, $\alpha = \kappa / \rho c$

Donde

k es la conductividad térmica

ρ es la densidad

c es el calor específico de la muestra

A continuación describimos la teoría de dos técnicas fototérmicas (fotoacústica y fotopiroléctrica) para la detección de ondas térmicas.

2.2 Espectroscopía Fotoacústica

2.2.1. Introducción

En la investigación básica y aplicada, el efecto fotoacústico ha sido un campo de investigación científica por más de un siglo. En 1880, Alexander Graham Bell descubrió que cuando una haz luminoso, periódicamente interrumpido, se hace incidir sobre la superficie de un sólido colocado en el interior de un recipiente herméticamente cerrado, se detecta una respuesta audible, mediante un tubo de audición acoplado al recipiente.

El efecto fotoacústico involucra el fenómeno de generación y propagación de ondas térmicas y acústicas, cuando la perturbación producida por la absorción de radiación modulada por parte de la muestra conduce al calentamiento periódico de la misma.

La primera descripción teórica del efecto fotoacústico en sólidos sobre la base de las ondas térmicas fue dada en 1976 por Rosencwaig y Gersho[1]. Rosencwaig también estableció la espectroscopia fotoacústica (PAS) como una herramienta para estudios ópticos en sólidos [1].

El efecto fotoacústico implica la generación de ondas acústicas u otros efectos termoelásticos, para una muestra sobre la cual incide un haz energético modulado, como radiación electromagnética, electrones, protones, ultrasonido etc. [6].

Este fenómeno se denomina efecto fotoacústico en materiales sólidos.

2.2.2 El modelo teórico de Rosencwaig y Gersho

La primera interpretación teórica del efecto fotoacústico en sólidos fue dada por Rosencwaig y Gersho en 1976 [1]. El modelo teórico de Rosencwaig y Gersho se considera como principal mecanismo de la señal fotoacústica a la difusión del calor, generado en la muestra, hacia el gas en el interior de la celda. Ellos realizaron un análisis unidimensional del flujo de calor en la celda y demostraron que solamente una capa relativamente delgada de aire en su interior, de unas décimas de centímetro de espesor, adyacente a la superficie del sólido, responde térmicamente al flujo de calor periódico proveniente del sólido. Esta capa de aire sufre un calentamiento y un enfriamiento alternado y funciona como un pistón vibratorio, el cual genera la señal fotoacústica detectada.

Considerando una celda cilíndrica como se muestra en la [figura 2.2]. La celda tiene un diámetro D y longitud L . Si L es pequeña comparada con la longitud de onda de la señal acústica, entonces el micrófono detecta la presión promedio producida en la celda.

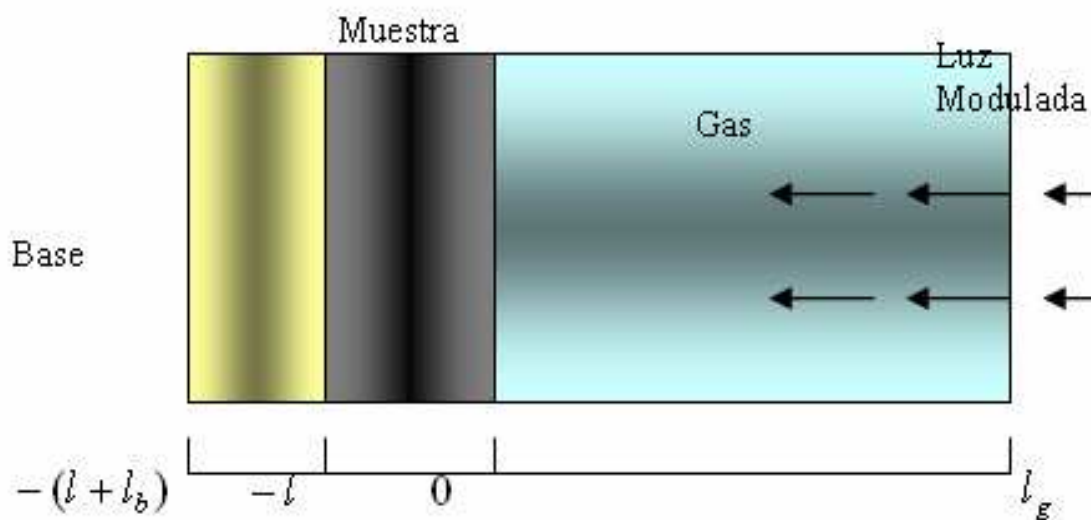


Fig. 2.2 Sección transversal de la celda fotoacústica cerrada convencional

Sea l es espesor de la muestra. La superficie frontal de la muestra esta expuesta al gas de la celda y la superficie trasera se encuentran en contacto con una base, la cual suponemos de conductividad térmica baja y espesor l_b . Así, la longitud de la columna de gas será $l_g = L - l - l_b$. Suponemos también que el soporte y el gas no absorben luz.

Si tenemos un haz de luz monocromático, modulado sinusoidalmente, con longitud de onda λ incidente sobre la muestra con intensidad I_0 , se puede describir temperoralmente como:

$$I(t) = \frac{1}{2} I_0 (1 + \cos(\omega t)) \quad (2.2.1)$$

Donde I_0 es el flujo de la luz monocromática incidente. Si β denota el coeficiente de absorción óptica de la muestra sólida para la longitud de onda λ , entonces la densidad de energía producida en cualquier punto x debido a la luz absorbida en este punto del sólido es:

$$\frac{1}{2} \beta I_0 e^{\beta x} (1 + \cos(\omega t)) \quad x \in (-l, 0) \quad (2.2.2)$$

La ecuación de difusión de calor para la muestra tomando en cuenta la fuente de calor distribuida puede escribirse como:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \alpha_s^{-1} \frac{\partial \phi}{\partial t} - A e^{\beta x} (1 + e^{j\omega t}) \quad x \in (-l, 0) \quad (2.2.3)$$

con $A = \frac{\beta \eta I_0}{2 \kappa_s}$. Aquí ϕ es la temperatura y η es la eficiencia a la cual la luz absorbida, de longitud de onda λ , es convertida a calor por procesos de desexcitación no-radiativa.

De aquí en adelante suponemos que $\eta = 1$, suposición razonable para la mayoría de los sólidos a temperatura ambiente. Las ecuaciones de difusión de calor para el soporte y el agua, suponiendo que estas no absorben la luz modulada, serán:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \alpha_b^{-1} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad x \in -(l+l_b, l) \quad (2.2.4)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \alpha_s^{-1} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad x \in (0, l_g) \quad (2.2.5)$$

Resolviendo estas ecuaciones y utilizando las condiciones de continuidad para la temperatura y el flujo en las superficies de la muestra, encontramos la solución explícita para θ , la cual es la amplitud de la temperatura en la frontera sólido-gas $x = 0$ dada por [1]

$$\theta = \frac{\beta I_0 \mathcal{P}_0}{2\kappa_s (\beta^2 - \sigma_s^2)} \left[\frac{(r-1)(b+1) \exp(\sigma_s l) - (r-1)(b-1) \exp(-\sigma_s l) + 2(b-r) \exp(-\beta l)}{(g+1)(b+1) \exp(\sigma_s l) - (g-1)(b-1) \exp(-\sigma_s l)} \right] \quad (2.2.6)$$

Donde

$$b = \frac{k_b a_b}{k_s a_s} \quad (2.2.7)$$

$$g = \frac{k_g a_g}{k_s a_s} \quad (2.2.8)$$

$$r = (1-j) \frac{\beta}{2a_s} \quad (2.2.9)$$

El proceso de difusión de calor periódico de la muestra hacia el gas produce una variación de temperatura periódica en el gas dada por:

$$\phi_{ac}(x, t) = \theta \exp(-\sigma_g x + j\omega t) \quad (2.2.10)$$

Analizando la ecuación anterior observamos que a una distancia de $\frac{2\pi}{a_g} = 2\pi\mu_g$ donde

μ_g es la longitud de difusión térmica en el gas, la variación de temperatura periódica en el gas se amortigua casi totalmente. Así que se define una capa superficial en la interfaz muestra-gas cuyo grosor es $2\pi\mu_g$ la cual es capaz de responder térmicamente a la temperatura periódica en la superficie de la muestra.

2.2.3 Obtención de la señal acústica

El proceso de difusión de calor de la muestra hacia el gas origina una variación periódica en la temperatura del gas, la cual esta dada por la ecuación (2.2.10)

En esta ecuación notamos que a una distancia $2\pi\mu_g$ en la que μ_g es la longitud de difusión térmica, la variación periódica en la temperatura en el gas se amortigua casi totalmente (a un 0.19% de su valor inicial). Por lo tanto podemos considerar que una capa de gas, de espesor $2\pi\mu_g$, adyacente a la superficie de la muestra, responde térmicamente a las variaciones periódicas de la temperatura en la superficie de la muestra. En esta capa de gas, el promedio espacial de la temperatura es:

$$\tilde{\phi}(t) = \left(\frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \right) \theta \exp(\omega t - \frac{\pi}{4}) \quad (2.2.3.1)$$

Y donde el desplazamiento de el pistón se puede estimar utilizando la ley de gases ideales:

$$\delta x(t) = 2\pi\mu_g \frac{\tilde{\phi}(t)}{T_0} = \frac{\theta\mu_g}{\sqrt{2T_0}} \exp(j(\omega t - \frac{\pi}{4})) \quad (2.2.3.2)$$

Donde $T_0 = \phi_0 + \phi_E$

donde ϕ_0 es la temperatura ambiente en las paredes de la celda y ϕ_E es el incremento de la temperatura debido a la componente estacionaria del calor absorbido.

El incremento en la presión en la celda puede determinarse si suponemos que el resto del gas responde adiabaticamente a la acción del pistón

$$\delta P(t) = \frac{\gamma P_0}{V_0} \delta V = \frac{\gamma P_0}{T_0} \delta x(t) \quad (2.2.3.3)$$

Donde P_0 y V_0 representan la presión ambiental y el volumen del gas en la cámara, respectivamente, γ es la razón de calores específicos y $-\delta V$ es el incremento en el volumen

Podemos reescribir $\delta P(t)$ como:

$$\delta P(t) = Q \exp(j(\omega t - \pi/4)) \quad (2.2.3.4)$$

Donde

$$Q = \frac{\mathcal{P}_0 \theta}{\sqrt{2} l_g a_g T_0} \quad (2.2.3.5)$$

la formula explicita de Q

$$Q = \frac{\beta_0 \mathcal{P}_0}{2\sqrt{2} K_s l_g a_g T_0 (\beta^2 - \sigma_s^2)} \left(\frac{(r-1)(b+1)\exp(\sigma_s l) - (r+1)(b-1)\exp(-\sigma_s l) + 2(b-r)\exp(-\beta l)}{(g+1)(b+1)\exp(\sigma_s l) - (g-1)(b-1)\exp(-\sigma_s l)} \right) \quad (2.2.3.6)$$

2.2.4 Casos Especiales

La expresión total encontrada para $\delta P(t)$ es difícil de interpretar debido a la complicada expresión que tiene Q . Por lo cual, se examinarán algunos casos especiales en los cuales Q se transforma en una expresión relativamente simple. Estos casos se agrupan de acuerdo a la opacidad óptica de los sólidos, determinada por la relación entre la longitud de absorción óptica $\mu_\beta = \frac{1}{\beta}$ y el espesor l_s del sólido

Para cada categoría de opacidad óptica, se consideran tres casos de acuerdo a la magnitud relativa de la longitud de difusión térmica μ_s respecto de l_s y μ_β . Además para facilitar la escritura es conveniente definir

$$Y = \frac{\mathcal{P}_0 I_0}{2\sqrt{2} l_g T_0} \quad (2.2.4.1)$$

Caso 1 Sólidos ópticamente transparentes ($\mu_\beta \gg l_s$)

En este caso la luz se absorbe a través del espesor de la muestra

Caso 1.1 Sólidos térmicamente Delgados ($\mu_s \gg l_s, \mu_s \gg \mu_\beta$)

En este caso $\exp(-\beta l) \cong 1 - \beta l, \exp(\pm \sigma_s l) \cong 1$ y $|r| \gg 1$

$$Q \cong \frac{(1-j)\beta l}{2a_g} \cdot \frac{\mu_b}{k_b} Y \quad (2.2.4.2)$$

Las propiedades térmicas del soporte aparecen en la expresión de Q

Caso 1.2 Sólidos térmicamente Delgados ($\mu_s \gg l_s, \mu_s \ll \mu_\beta$)

En este caso $\exp(-\beta l) \cong 1 - \beta l, \exp(\pm \sigma_s l) \cong (1 \pm \sigma_s l)$ y $|r| \ll 1$

$$Q \cong \frac{(1-j)\beta l}{2a_g} \cdot \frac{\mu_b}{k_b} Y \quad (2.2.4.3)$$

Las propiedades térmicas del soporte aparecen en la expresión de Q

Caso 1.3 Sólidos térmicamente gruesos ($\mu_s \ll l_s, \mu_s \ll \mu_\beta$)

En este caso $\exp(-\beta l) \cong 1 - \beta l, \exp(-\sigma_s l) \cong 0$ y $|r| \ll 1$

$$Q \cong -j \frac{\beta \mu_s}{2a_g} \cdot \frac{\mu_b}{k_s} Y \quad (2.2.4.4)$$

Ya que $\mu_s \ll l_s$, en este caso las propiedades térmicas del materia soporte son reemplazadas por aquellas del sólido. La luz que se absorbe dentro de la longitud de difusión térmica μ_s es la que contribuye a la señal, a pesar del hecho que la luz se absorbe a través de la longitud l_s del sólido.

Caso 2. Sólidos Ópticamente Opacos ($\mu_s \ll l_s$)

En este caso la luz se absorbe a través de una longitud pequeña comparada con l_s . Se tiene $\exp(-\beta l_s) \cong 0$

2.1 Sólidos Térmicamente Delgados ($\mu_s \gg l_s, \mu_s \gg \mu_\beta$)

$$Q \cong \frac{(1-j)}{2a_g} \cdot \frac{\mu_b}{k_b} Y \quad (2.2.4.5)$$

Ahora tenemos “opacidad fotoacústica” al igual que opacidad óptica, en el sentido que la señal acústica es independiente μ_s y de β , respectivamente. La señal varía como ω^{-1} y depende de las propiedades térmicas del soporte.

2.2 Sólidos térmicamente Gruesos ($\mu_s \langle l_s, \mu_s \rangle \mu_\beta$)

$$Q \cong \frac{(1-j)}{2a_g} \cdot \frac{\mu}{k_s} Y \quad (2.2.4.6)$$

Q es análogo a la ecuación 2.2.4.5 pero ahora aparecen los parámetros térmicos de la muestra.

2.3 Sólidos Térmicamente Gruesos ($\mu_s \ll l_s, \mu_s \langle \mu_\beta$)

$$Q \cong -j \frac{\beta \mu_s}{2a_g} \cdot \frac{\mu_s}{k_s} Y \quad (2.4.2.8)$$

En este caso tratamos de un sólido muy opaco. Sin embargo, como $\mu_s \langle \mu_\beta$ este sólido no es fotoacústicamente opaco, ya que solo la luz absorbida dentro de la longitud de difusión térmica μ_s contribuirá a la señal acústica. De esta manera, aun cuando el sólido es ópticamente opaco, la señal acústica será proporcional a $\beta \mu_s$.

2.3 Detección Piroeléctrica.

La técnica fotopiroeléctrica fue desarrollada por Coufal, Mandelis, Ghizoni y Miranda, usando como sensor películas delgadas de un material piroeléctrico, estas se encontraban en contacto con una muestra sólida la cual se le hacía incidir una luz monocromática cuya intensidad era modulada a una frecuencia determinada. La absorción de la luz incidente, causaba que la temperatura de la muestra fluctuara, creando un gradiente de temperatura en el material y la película piroeléctrica. Como resultado de ese cambio de temperatura, la película piroeléctrica cambiaba su polarización produciendo un momento dipolar neto el cual se traducía en un voltaje de salida.[4]

2.3.1 Sensores piroeléctricos

Un material piroeléctrico es aquel que tiene la capacidad de detectar cambios de temperatura. Estos sensores, producen cargas eléctricas superficiales cuando son calentados. La señal eléctrica que de ellos se obtiene, proviene de la remoción de esta carga mediante electrodos metálicos colocados en la superficie del material. Un cambio de temperatura en el material produce un cambio en la carga de la polarización. Entonces se genera una señal eléctrica que es proporcional a la tasa de cambio de la carga, y por esta razón no puede ser empleado para medir temperaturas fijas.

Existen sensores piroeléctricos hechos a partir de cristales piezoeléctricos, donde los cambios de temperatura inducen tensiones en el cristal, lo que genera cargas sobre la superficie del cristal o lo que se conoce como el efecto piezoeléctrico. También se emplean polímeros como sensores de temperatura tales como el (fluoruro de polivinideno) o (fluoruro de polivinilo), en forma de películas delgadas. Estos materiales, son tratados de manera que se conviertan en dieléctricos polarizados permanentemente. Tales materiales, se conocen como electretos y funcionan también como materiales piezoeléctricos.

Los electretos dipolares son polarizados generalmente por aplicación de un campo eléctrico al material a temperaturas ambiente o mediante un cambio de temperatura alta a temperatura baja, seleccionando previamente las temperaturas alta y baja más apropiadas, de acuerdo a las características del material.

Algunas ventajas la técnica de fotopiroeléctrica en comparación con la técnica fotoacústica son:

- ✓ Se obtiene una sensibilidad similar o mejor que la posible con el micrófono
- ✓ El Piroeléctrico responde a un mayor rango de frecuencias desde muy bajas del orden de mHz hasta MHz
- ✓ El transductor puede ser operado en un rango mayor de temperaturas
- ✓ La configuración muestra-transductor es compacta y puede ser usada en experimentos con espacios limitados.

2.3.2 Teoría de Espectroscopia Foto Piroeléctrica de Sólidos

El efecto Piroeléctrico consiste en la inducción espontánea y rápida polarización en un cristal piezoeléctrico como resultado del cambio de la temperatura en el cristal.[4]
La geometría del sistema Piroeléctrico mostrado en la figura (2.3.1)

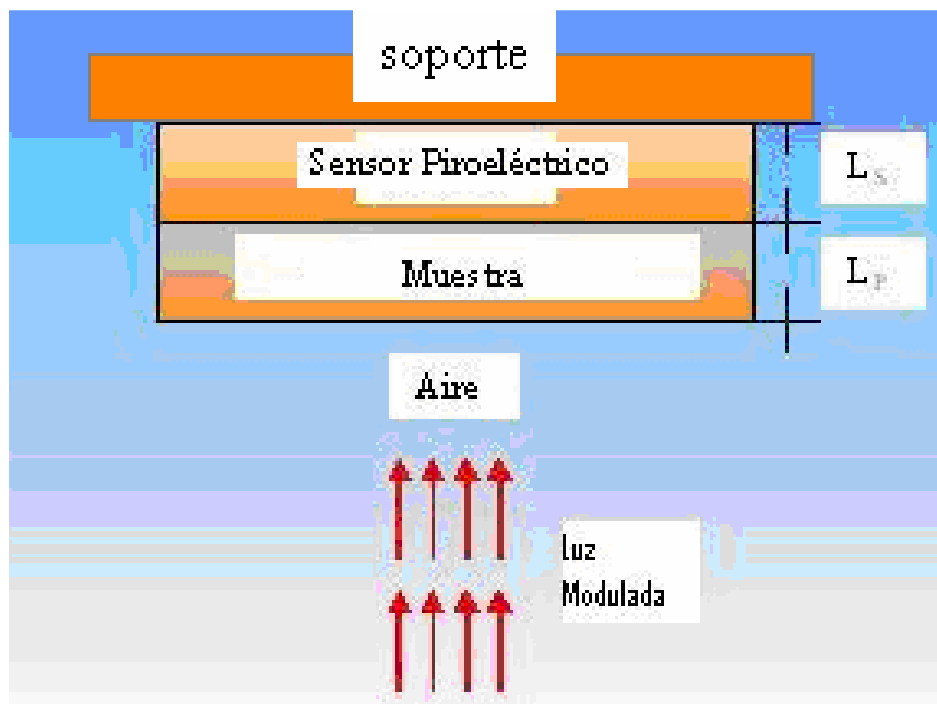


Fig 2.3.1 Sistema Piroeléctrico Unidimensional.

Una muestra sólida de espesor L_s es irradiada por una luz monocromática de longitud de onda λ , su intensidad es modulada con una frecuencia angular de ω_o por un chopper. La muestra tiene un coeficiente de absorción óptico $\beta_s(\lambda)$ y esta en contacto con un transductor piroeléctrico de espesor L_p . El coeficiente de absorción óptico y el coeficiente del detector son $\beta_p(\lambda)$ y p respectivamente. El sistema muestra/transductor es soportado

por un material transparente. La celda piroeléctrica es abierta y se asume que la luz modulada incide uniformemente en la superficie de la muestra. La luz absorbida se convierte en calor y este incrementa periódicamente la temperatura que finalmente detecta el sensor Piroeléctrico. Esta temperatura modulada produce una diferencia de potencial entre la parte superior e inferior del Piroeléctrico. Este voltaje da una señal eléctrica $V[\omega_o, \beta_s(\lambda)]$.

La carga acumulada en el Piroeléctrico es igual a la unidad de carga por el incremento de temperatura

$$Q = p\Delta T \quad (2.3.2.1)$$

Para una película delgada de Piroeléctrico de espesor L_p expuesta por una variación sinusoidal de temperatura, la carga promedio inducida en el Piroeléctrico es

$$\langle Q \rangle = p\langle \Delta T \rangle = (p/L_p) \operatorname{Re} \left(\int_{\text{espesor de película piroeléctrica}} T(x) e^{i\omega_o t} dx \right) \quad (2.3.2.2)$$

$$\langle Q \rangle = p\langle \Delta T \rangle = (p/L_p) \operatorname{Re} \left(\int_{L_p} T(x) e^{i\omega_o t} dx \right) \quad (2.3.2.3)$$

El voltaje promedio en el Piroeléctrico es dado por :

$$V = \langle Q \rangle / C \quad (2.3.2.4)$$

Donde C es la capacitancia por unidad de área de la película. Por dos placas cargadas paralelas de espesor L_p y una constante dieléctrica K la ecuación 2.3.2.4 será:

$$V(\omega_o) = \left[\frac{pL_p \theta_p(\omega_o)}{K\epsilon_0} \right] \exp(i\omega_o t) \quad (2.3.2.5)$$

Donde

$$\theta(\omega_o) = \frac{1}{L_p} \int_{L_p} T_p(\omega_o, x) dx \quad (2.3.2.6)$$

ϵ_0 es la constante de permitividad del vacío $8.85418 \times 10^{-12} \text{ C/Vm}$. $T_p(\omega_o, x)$ es la temperatura en el grueso del piroeléctrico resultado de la conducción de calor en el proceso de absorción del sólido. Las ecuaciones de difusión de calor para esta configuración piroeléctrica son:

$$\frac{d^2}{dx^2}T_g(\omega_o, x) - \left(\frac{i\omega_o}{\alpha_g}\right)T_g(\omega_o, x) = 0 \quad x \geq 0 \quad (2.3.2.7)$$

$$\frac{d^2}{dx^2}T_s(\omega_o, x) - \left(\frac{i\omega_o}{\alpha_s}\right)T_s(\omega_o, x) = -(I_0\beta_s\eta_s/2k_s)\exp(\beta_s x) \quad -L_s \leq x \leq 0 \quad (2.3.2.8)$$

$$\frac{d^2}{dx^2}T_p(\omega_o, x) - \left(\frac{i\omega_o}{\alpha_p}\right)T_p(\omega_o, x) = -(I_0\beta_p\eta_p e^{-\beta_s L_s}/2k_p)\exp(\beta_p x + L_s) \quad -(L_p + L_s) \leq x - L_s \quad (2.3.2.9)$$

$$\frac{d^2}{dx^2}T_b(\omega_o, x) - \left(\frac{i\omega_o}{\alpha_b}\right)T_b(\omega_o, x) = 0 \quad x \leq -(L_p + L_s) \quad (2.3.2.10)$$

La dependencia armónica con respecto del tiempo de todas las temperaturas es:

$$T_j(\omega_o, x, t) = T_j(\omega_o, x)e^{i\omega_o t} = 0 \quad j = g, s, p, b \quad (2.5.2.11)$$

Donde α_j y k_j son la difusividad térmica y conductividad térmica respectivamente del j-ésimo medio, además

η_s y η_p Son las eficiencias de conversión no radiativas para la muestra y piroeléctrico respectivamente

I_0 es la intensidad de la luz en la superficie de la muestra.

Las ecuaciones anteriores están acopladas por las condiciones de continuidad de temperatura y flujo de calor en todas las interfaces.

$$T_i(\omega_o, \text{interfase}) = T_{ji}(\omega_o, \text{interfase}) \quad \text{y} \quad k_i \frac{\partial}{\partial x} T_i(\omega_o, \text{interfase}) = k_j \frac{\partial}{\partial x} T_j(\omega_o, \text{interfase}) \quad (2.3.2.12)$$

Las soluciones complejas a las ecuaciones (2.3.2.7) a la (2.3.2.10) son:

$$T_g(\omega_o, x) = C_1 \exp(-\sigma_g x) \quad (2.3.2.13)$$

$$T_s(\omega_o, x) = \left(\frac{I_0\beta_s\eta_s}{2k_s(\sigma_s^2 - \beta_s^2)}\right)\exp(\beta_s x) + C_2 \exp(-\sigma_s x) + C_3 \exp(-\sigma_s x) \quad (2.3.2.14)$$

$$T_p(\omega_o, x) = \left(\frac{I_o \beta_p \eta_p \exp(-\beta_s L_s)}{2k_p(\sigma_p^2 - \beta_p^2)} \right) \exp[\beta_p(x+L_s)] + C_4 \exp(-\sigma_p x) + C_5 \exp(-\sigma_p x) \quad (2.3.2.15)$$

$$T_b(\omega_o, x) = C_6 \exp(\sigma_b x) \quad (2.3.2.16)$$

Donde la cantidad de interés es la temperatura en el Piroeléctrico $T_p(\omega_o, x)$ los coeficientes pueden determinarse por un método de resolución de matrices [4]

La cantidad compleja $V(\omega_o)$ escrita en amplitud y fase para es:

$$V(\omega_o) = |V[\omega_o]| \exp(i\omega_o t - \phi(\omega_o)) \quad (2.3.2.17)$$

CASOS ESPECIALES

Las clasificaciones usadas son adoptadas desde la teoría de Rosencwaig y Gersho.

A. Piroeléctrico ópticamente opaco y térmicamente grueso

1. Muestra Ópticamente Opaca ($\mu_\beta \leq L_s$)

Caso A.1 (a) Muestra térmicamente delgada ($\mu_s \gg L_s$), ($\mu_s \gg \mu_\beta$)

El resultado es

$$V(\omega_o) = A \left(\frac{\eta_s \alpha_p}{k_p (1 + b_{sp}) \omega_o} \right) \exp(-i\pi/2) \quad (2.3.2.18)$$

Donde

$$A = pI_o / 2k\epsilon_o$$

En este caso el voltaje en el Piroeléctrico es independiente de β_s . Esto puede determinar una saturación en el piroeléctrico. La señal depende de las propiedades del gas y el piroeléctrico

Caso A.1 (b) Muestra térmicamente gruesa ($\mu_s \ll L_s$), ($\mu_s \gg \mu_\beta$)

El resultado es

$$V(\omega_o) = A \left(\frac{\eta_s \exp(-\sigma_s L_s)}{\sigma_p (k_p \sigma_p + k_s \sigma_s)} \right) = A \left(\frac{\eta_s \alpha_p}{k_p (1 + b_{sp}) \omega_o} \right) \exp \left[- \left(\frac{\omega_o}{2\alpha_s} \right)^{\frac{1}{2}} L_s \right] \times \exp \left[-i \left[\frac{\pi}{2} \right] - i \left(\frac{\omega_o}{2\alpha_s} \right)^{\frac{1}{2}} L_s \right] \quad (2.3.2.19)$$

La amplitud de la señal decrece más rápidamente que ω_o^{-1} . Las propiedades del gas en contacto con la muestra son remplazadas por las del sólido.

Caso A.1 (c) Muestra térmicamente gruesa $(\mu_s \leq L_s), (\mu_s \langle \mu_\beta)$

$$V(\omega_o, \beta_s) = A\beta_s \left(\frac{\eta_s b_{sg} \alpha_s \sqrt{\alpha_p}}{k_p (1+b_{sp}) \omega_0^{3/2}} \right) \exp \left[- \left(\frac{\omega_0}{2\alpha_s} \right)^{\frac{1}{2}} L_s \right] \times \exp \left[-i \left[\frac{\pi}{4} \right] - i \left(\frac{\omega_0}{2\alpha_s} \right)^{\frac{1}{2}} L_s \right] \quad (2.3.2.20)$$

A este caso lo llamamos "Espectroscopia de Transmisión Térmica" donde el voltaje es proporcional a β_s

2. Muestra Ópticamente Transparente $(\mu_\beta \rangle L_s)$

Caso A.2 (a) Muestra térmicamente delgada $(\mu_s \rangle \rangle L_s), (\mu_s \geq \mu_\beta)$

$$V(\omega_o, \beta_s) = A \left(\frac{\eta_s + (\eta_s - \eta_p) \beta_s L_s}{k_p (1+b_{gp}) \omega_0} \right) \exp(-i\pi/2) \quad (2.3.2.21)$$

El voltaje es proporcional a $\beta_s L_s$ ya que $(\eta_s \neq \eta_p)$

Caso A.2 (b) Muestra térmicamente delgada $(\mu_s \geq L_s), (\mu_s \langle \mu_\beta)$

$$V(\omega_o, \beta_s) = A\alpha_p \left(\frac{\eta_s + (\eta_s - \eta_p) \beta_s L_s}{k_p \omega_0} \right) \exp(-i\pi/2) \quad (2.3.2.22)$$

En este caso es similar al anterior

Caso A.2 (c) Muestra térmicamente gruesa $(\mu_s \leq L_s), (\mu_s \langle \langle \mu_\beta)$

$$V(\omega_o, \beta_s) = A(1 - L_s \beta_s) \left(\frac{\eta_p}{k_p (1+b_{sp}) \omega_0} \right) \exp(-i\pi/2) \quad (2.3.2.23)$$

En este límite la técnica es equivalente a la espectroscopia de transmisión óptica.

En el caso de que el piroeléctrico sea ópticamente opaco y térmicamente delgado se hacen las siguientes sustituciones en las ecuaciones obtenidas para las diferentes condiciones ópticas y térmicas vistas anteriormente.

<i>Piroeléctrico Térmicamente Grueso</i>	→	<i>Piroeléctrico Térmicamente Delgado</i>
$\frac{1}{\sigma_p}$	→	L_p
$k_p \sigma_p$	→	$k_b \sigma_b$

A partir de las dos técnicas expuestas, fotoacústica y fotopiroeléctrica, se plantea ahora la obtención de imágenes con estas técnicas.

2.4 Imágenes Obtenidas a partir de Ondas Térmicas

Las imágenes obtenidas a partir de ondas térmicas puede detectar y mapear macroscópicamente y microscópicamente las características térmicas de una imagen bajo la superficie de una muestra. [1]

Los fenómenos fototérmicos son dependientes no solo de las propiedades ópticas de la muestra sino también de características térmicas. **Las características térmicas.** Son aquellas regiones de materiales, que en su mayor parte son homogéneos, que exhiben variaciones locales relativas a los parámetros térmicos como densidad ρ , calor específico c y la conductividad térmica k .

Las características térmicas locales surgen por menores interrupciones menores en la estructura de la muestra y generalmente no son detectables con pruebas ópticas y acústicas convencionales pero pueden ser detectados con ondas térmicas.

La dependencia de los parámetros térmicos es fundamental para la obtención de imágenes, para una frecuencia constante, como los ejemplos de la figura

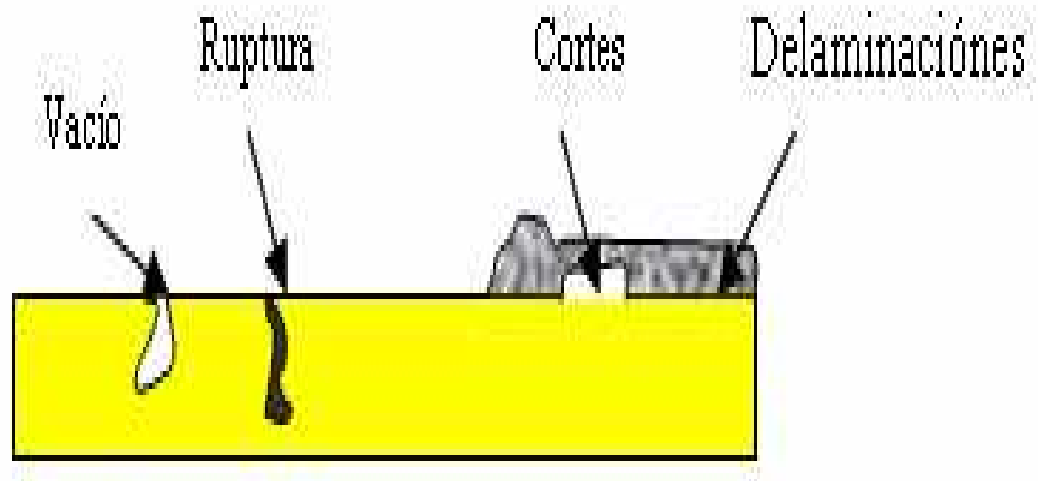


Fig. 2.3.2 Propiedades que podemos detectar con la formación de imágenes térmicas

Los defectos mecánicos en la estructura del material como hendiduras, vacíos o delaminaciones pueden ser detectadas por óptica, rayos X o pruebas acústicas. Aunque en algunas muestras opacas tienen algunas limitaciones, ya que en tamaño micrométrico algunas características no pueden ser mapeadas.

La resolución obtenible con ondas térmicas depende de la longitud de difusión térmica de dichas ondas. Así la longitud de onda térmica es:

$$\lambda_n = 2\pi \left(\frac{2k}{\rho c \omega} \right)^{\frac{1}{2}} = 2\pi \mu_s \quad (2.4.1)$$

Donde

$$\mu_s = \left(\frac{2k}{\rho c \omega} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ Es la longitud de difusión térmica} \quad (2.4.2)$$

El concepto de resolución en la microscopia fototérmica es la combinación de la resolución *óptica* y *térmica* principalmente.

Experimentalmente en metales se han podido detectar defectos a profundidades de décimas de milímetro y en otros casos se han detectado defectos en tan solo 10 micrómetros de profundidad.

Estos casos se conjuntan cuando tenemos una muestra con una superficie "*ópticamente suave*" esto es cuando no hay detalles ópticos visibles, la resolución está ligada con las características térmicas de la muestra para la detección de defectos debajo de la superficie.

La resolución y también la penetración en profundidad pueden ser controladas por la frecuencia de modulación. También es más preciso cuando se asume que el diámetro del tamaño del spot óptico es mucho más pequeño que la longitud de difusión térmica. Esta condición puede ser fácil de cumplir para muchos metales con bajas frecuencias de modulación enfocando óptimamente.

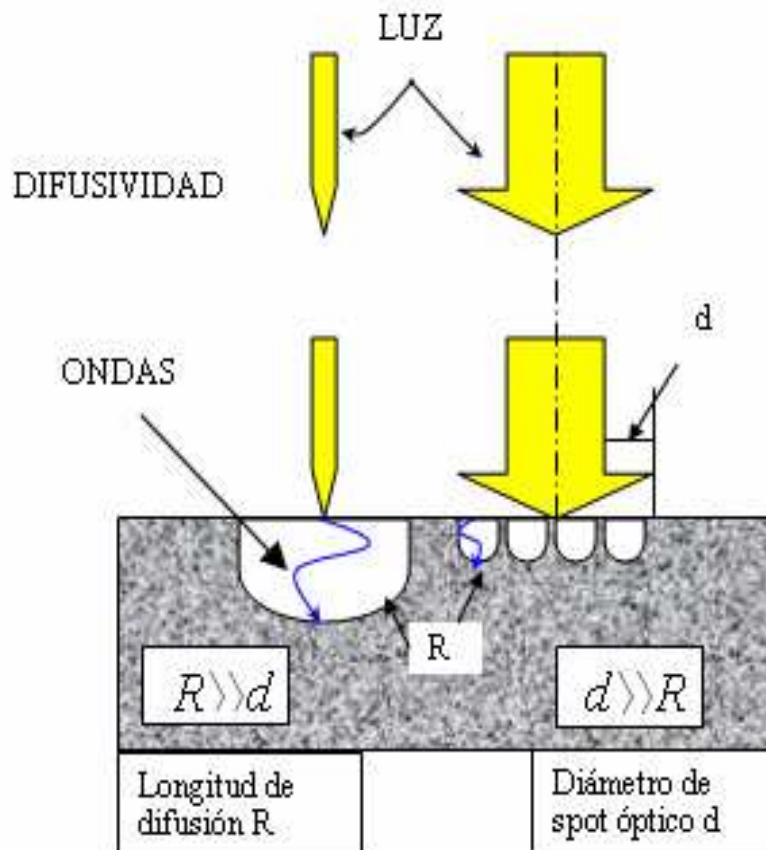


Fig. 2.4 Los factores que afectan la resolución fototérmica son ópticos y geométricos.

Las ondas térmicas pueden profundizar y ser un proceso no destructivo así como puede permitir examinar las muestras en 3D

El proceso con ondas térmicas:

- ✓ La muestra es barrida por un haz luminoso modulado
- ✓ La superficie de la muestra se calienta y las ondas térmicas se propagan..
- ✓ Para mapear las muestras se requiere la detección de las ondas térmicas.

A través de la detección de ondas térmicas es posible también observar otros aspectos de los materiales, que no pueden ser captados por los métodos ópticos convencionales.

Esta propiedad ofrece una nueva técnica de imágenes conocida como Imágenes de ondas térmicas. Se ha convertido en una poderosa herramienta de experimentos no destructivos en sólidos [5].

La detección de imágenes fototérmicas se aplican a la manufactura de semiconductores, incluyendo perfilado profundo no-destructivo y caracterización de regiones dopadas Podemos obtener imágenes de dispositivos electrónicos con estructuras multicapas, medir el espesor de películas delgadas. [3]

Esta técnica se puede usar también para la investigación de variaciones en semiconductores semi-cristalinos.

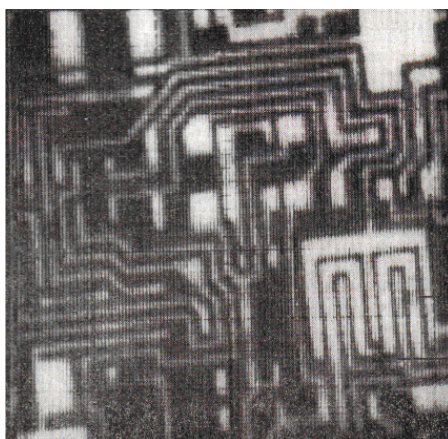


Fig. 2.4.1 Imagen por microscopía Fotoacústica de un circuito integrado. [3]

A continuación describimos una técnica para obtener diferentes contrastes de una imagen superficial y en volumen a partir de una imagen obtenida por técnicas fototérmicas.

2.5 Método de Separación en la Fase de la señal fototérmica.

Supongamos que, la muestra tiene dos centros absorbentes A y B a diferentes profundidades l_A y l_B , respectivamente.. A una frecuencia de modulación fija, la señal fotoacústica es el resultado de las contribuciones de estos dos componentes. El calor generado en estos centros de absorción toma un tiempo finito para distribuirse en la superficie de la muestra, y generar la señal fototérmica.

Este tiempo de retardo es una función del coeficiente de tiempo de que toma el centro en generar el calor y el tiempo de difusión térmica de la muestra. En el caso especial de segregación espacial de componentes A y B, como en muestras de capas, habrá una contribución del tiempo de retraso entre las señales que salen de A y B debido a la diferencia en los correspondientes tiempos de difusión térmica para que el calor alcance la superficie de la muestra.

Hay una diferencia en tiempo en el cual el calor tarda en calentar el gas de la celda fotoacústica, produce un corrimiento de fase θ entre las dos señales. Así, la señal observada S puede ser vista como la resultante de dos vectores (cuyas longitudes S_A y S_B corresponden a las señales A y B, respectivamente) con un ángulo θ entre ellos. Una vez que el ángulo θ es conocido, una variación de la fase a 90° , con respecto a la señal fotoacústica S_A , podría permitir solo observar la contribución de la componente B y viceversa.[6]

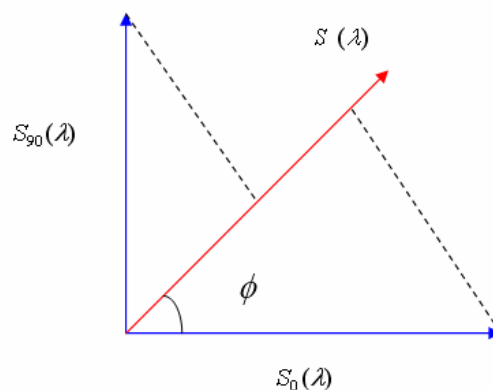


Fig. 2.5 Señal fotoacústica a una fase ϕ , expresada como una función de las señales de fase 0° y 90°

Es conveniente representar la señal fotoacústica por medio de un vector \vec{S}_F donde S_F es la amplitud y ϕ_F el Angulo de fase de la señal fotoacústica. A determinada fase la señal fotoacústica producida en la celda puede ser escrita en termino de $S_0(\lambda)$ y $S_{90}(\lambda)$

$$S_{\phi}(\lambda) = S_0(\lambda) \cos \phi + S_{90}(\lambda) \text{sen} \phi \quad (2.5.1)$$

Esto es la señal actual es la resultante de S_0 y S_{90} . Así usando datos experimentales para $S_0(\lambda)$ y $S_{90}(\lambda)$ y llevando a cabo la variación de la fase, buscamos aquellos corrimientos donde las características de la muestra puedan ser observadas, ya sea a profundidad o en la superficie. [1,2]

REFERENCIAS.

- [1] A. Rosencwaig and A. Gersho, *J. Appl. Phys. Lett.*, 47, 64 (1976)
- [2] S.Y. Zhang and L. Chen, *Can. J. Phys.*, 64, 1316 (1986)
- [3] M. Mieszkowski and A. Mandelis, *J. Opt. Soc. Am. A* 7, 552 (1990)
- [4] *J. Appl. Phys.*, 57, (1985) "Theory of photopyroelectric spectroscopy of solids", A. Mandelis and Martin M. Zver
- [5]. A. Rosencwaig, "Thermal wave characterization and inspection of semiconductor materials and device", pp.97-135 (1987)
- [6] Mandelis, A., 1987, *Photoacoustic and thermal wave phenomena in semiconductors*, North-Holland, New York.

Capítulo 3

Diseño conceptual del sistema bi-direccional para la obtención de imágenes por técnicas fototérmicas.

En la etapa de diseño conceptual, se hizo una investigación a cerca de todos los componentes de los que consta el control bi-direccional para la obtención de imágenes aplicando técnicas fototérmicas. Así como de cada una de las etapas de construcción y prueba de los resultados.

El sistema que se construyó, lleva por nombre MICROBIDA lo cual significa (**MICRO**posionador **BI**direccional Automatizado). El cual consiste en su sistema mecánico de dos motores; uno de los cuales está en la base del que se mueve en diferentes direcciones de manera autónoma.



FIG 3.1 Sistema mecánico X-Y

La Automatización es algo prácticamente imprescindible en el mundo de la Industria y de la investigación actual, dados los niveles de productividad, fiabilidad y rentabilidad que han de cumplir los productos que sean competitivos.

En esquema general del sistema Microbida es el siguiente:

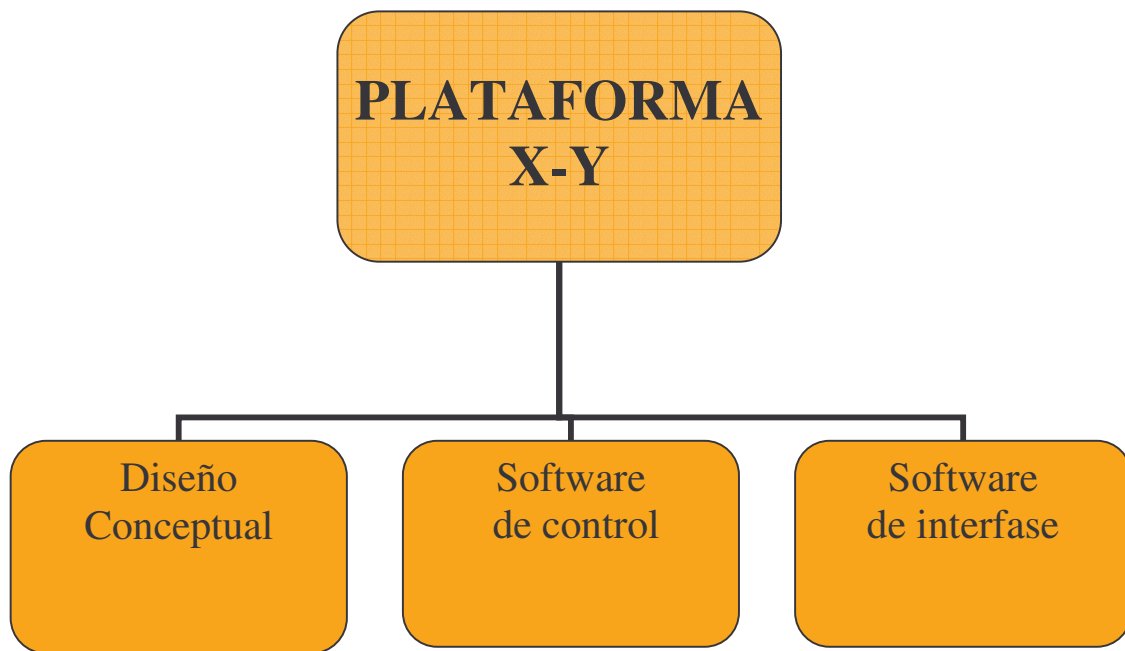


FIG 3.2 Diagrama de Diseño Conceptual

Un diagrama del funcionamiento del sistema así como cada uno de los componentes es:

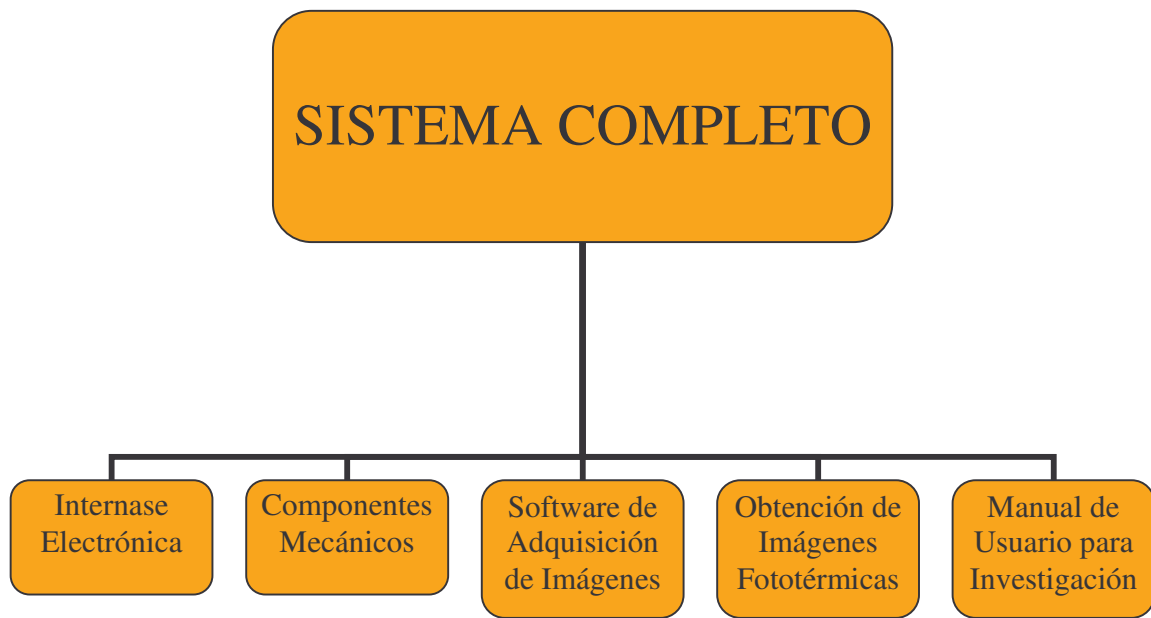


FIG 3.3 Diagrama Conceptual del Sistema Completo.

Involucra una gran cantidad de sistemas de medición, electrónicos y comunicación de alta precisión, dado lo complicado de las mediciones del sistema.

Motores.

El Sistema con el que se cuenta para la transmisión de movimiento mecánico tiene las características siguientes:

- Resolución por cuenta o por vuelta del husillo 496nm
- Dimensiones (Longitud × Ancho × Altura) 71.6×19.1×16.3 (mm.)
- Peso 58g
- Funcionamiento 6-12 VCD servo



Fig. 3.4 Generador de movimiento mecánico

3.2 Software

3.2.1 Software e interfase de funcionamiento

El software de adquisición e interfase para la adquisición de la señal fotoacústica se hace por medio del puerto serie, por medio de controladores de direccionamiento del puerto y de los motores.

Diagrama a bloques de etapa de adquisición de datos.

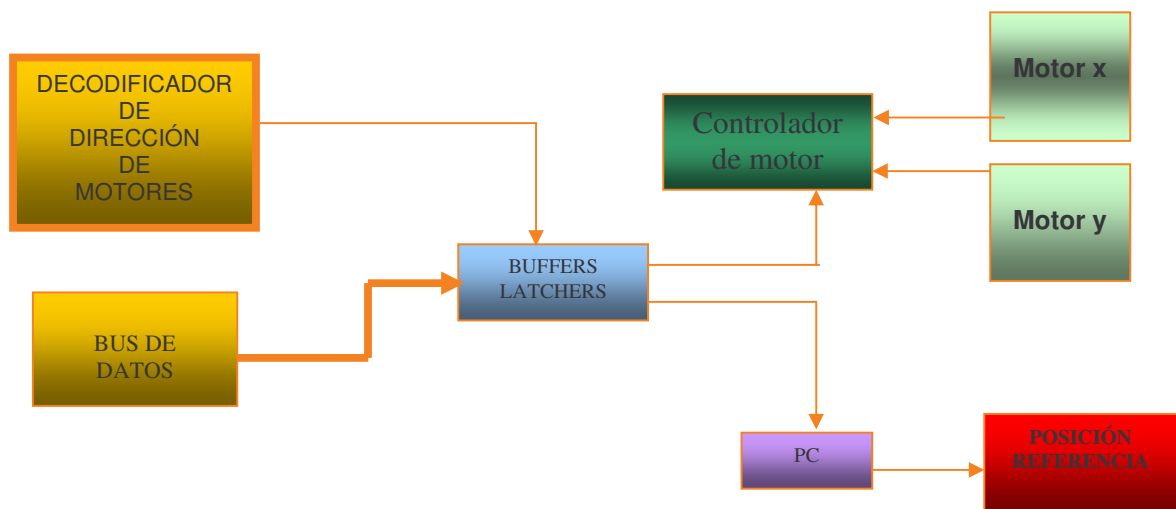


Figura 3.2.1 Diagrama de bloques de etapa de adquisición de datos

La etapa de adquisición de datos va a estar interconectada con la computadora por medio del puerto RS-232 las ventajas son:

Puede estar conectada a una red de cómputo para compartir información de datos generados por el sistema, en esta PC se instala un programa que se comunica con uno ó varios sistemas por medio de un puerto serial RS-232 que es el usado para modems, mouse etc. Únicamente es necesaria la instalación de un convertidor RS-232 a RS-485 con el cual se rompe la limitante del puerto RS-232 de la PC de 5 metros para poder extenderse por un cable blindado de dos hilos calibre #18 hasta una distancia máxima de 1,200 metros.

3.3 Controladores de motores

Resumen de Características

- Limite de Corriente Programable
- Paro de Emergencia
- Dos entradas analógicas de 10 bits (una por cada motor)
- Dos salidas analógicas de 12 bits .Que se pueden usar para programar el limite de corriente
- Rangos de posición programables.
- Operación por RS-232 o RS-485
- Terminal con PC
- Interfase con software

Comunicación entrada/salida

RS-232/RS-485 (Sentencias en comandos ASCII)

Entradas de Control

Encoder: 2 Canales, +5VCD compatible con TTL
Analógica: Entrada Analógico (0-5 VCD, 10 bits)



FIG 3.3 Panel frontal

3.3.1 Panel Frontal de un Controlador del Sistema

Figura de panel vista frontal y trasera

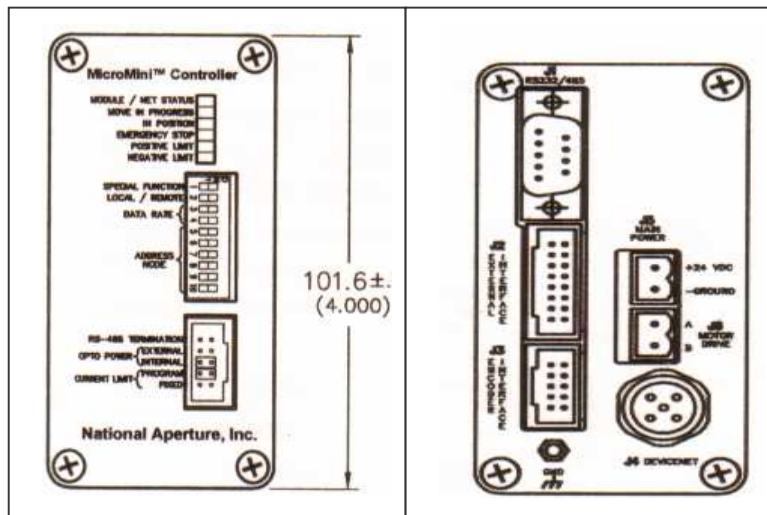


Fig 3.4 Diagrama de panel frontal y trasero.

3.3.2

Diagrama de Conexión de cable RS-232 con PC

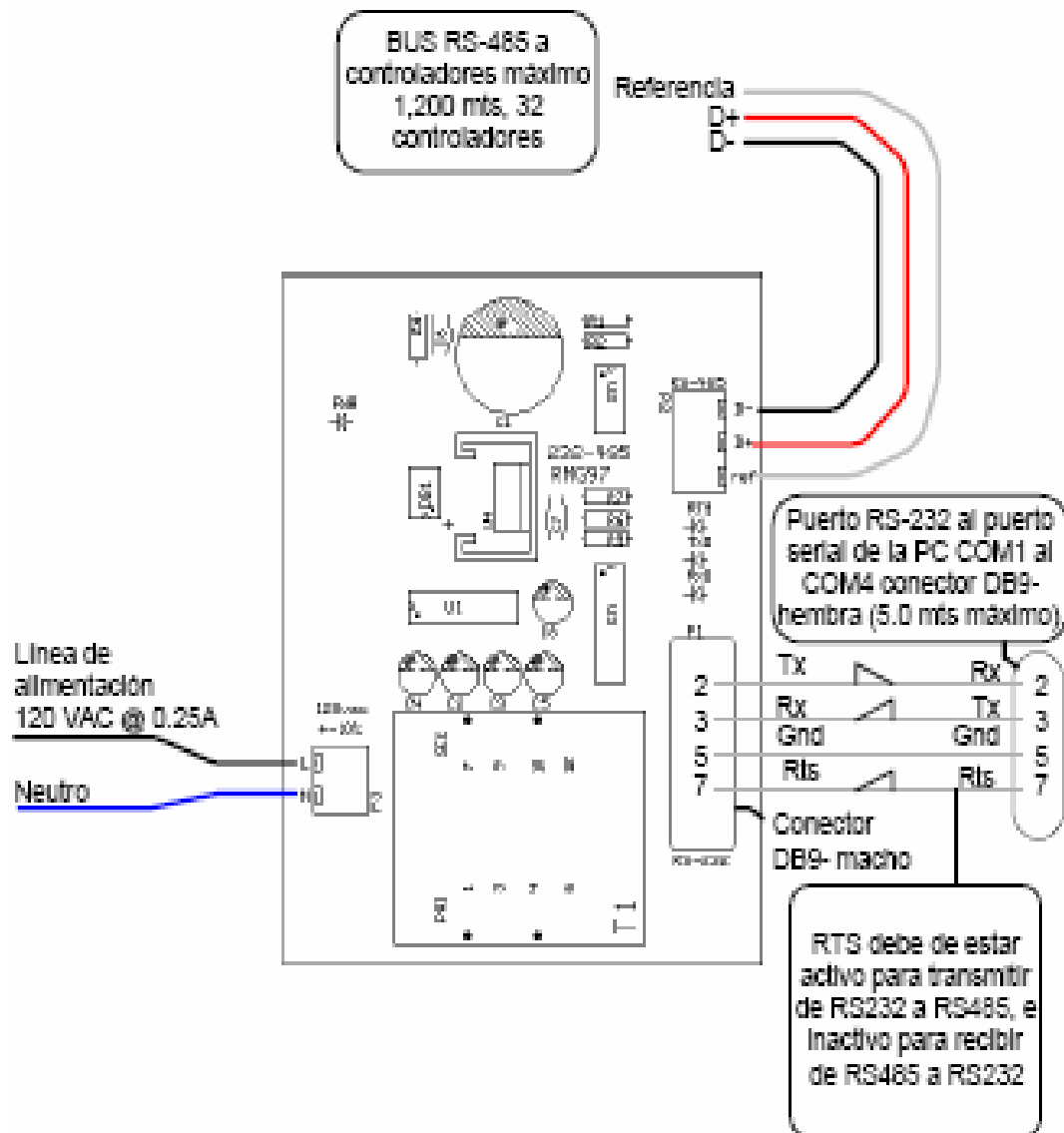


Fig 3.5 Conexión de RS-232

3.4 Software de automatización lab-view

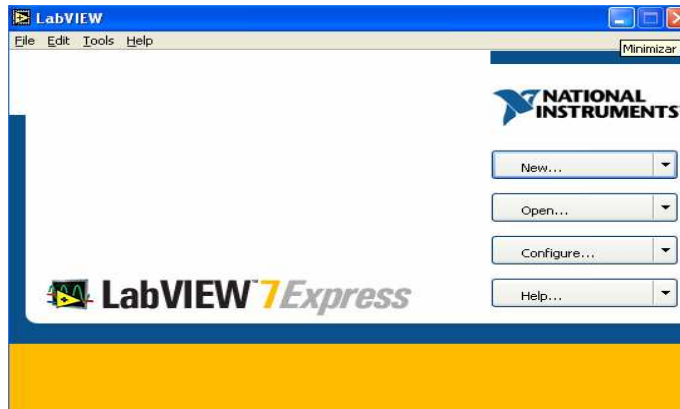


Fig 3.5 Labview

LabVIEW es una herramienta gráfica de test, control y diseño mediante la [programación](#). El lenguaje que usa se llama [lenguaje G](#).

Este programa fue creado por **National Instruments** (1976) para funcionar sobre máquinas **MAC**, salió al mercado por primera vez en 1986

Los programas hechos con **LabVIEW** se llaman VI (*Virtual Instrument*), lo que da una idea de uno de sus principales usos: el control de instrumentos.

3.5.1 Principales usos

Es usado tanto por ingenieros como por científicos para tareas como:

- [Adquisición de datos](#)
- Control de instrumentos
- [Automatización industrial](#) o PAC (Controlador de Automatización Programable)
- Diseño de control: prototipaje rápido y hardware-en-el-bucle (HIL)

Principales características

Su principal característica es la facilidad de uso, personas con pocos conocimientos en programación pueden hacer [programas](#) relativamente complejos, imposibles para ellos de hacer con lenguajes tradicionales. También es muy rápido hacer programas con **LabVIEW** y cualquier programador, por experimentado que sea, puede beneficiarse de él. Para los amantes de lo complejo, con **LabVIEW** pueden crearse programas de miles de VIs (páginas de código) para aplicaciones complejas, programas de automatizaciones de decenas de miles de puntos de entradas/salidas, etc. Presenta facilidades para el manejo de:

- Interfaces de comunicaciones:
 - [Puerto serie](#)
 - [Puerto paralelo](#)
 - GPIB
 - PXI
 - VXI
 - [TCP/IP](#), UDP, DataSocket
 - IrDA
 - [Bluetooth](#)
 - [USB](#)

- Herramientas para el procesado digital de señales.
- Visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos.
- Adquisición y tratamiento de imágenes.
- Control de movimiento.
- Tiempo Real estrictamente hablando.

3.6

Posicionamiento de los ejes del motor

La primer pantalla es la de posicionamiento en el punto Home del motor, el sistema tiene marcadas las coordinas de inicio.

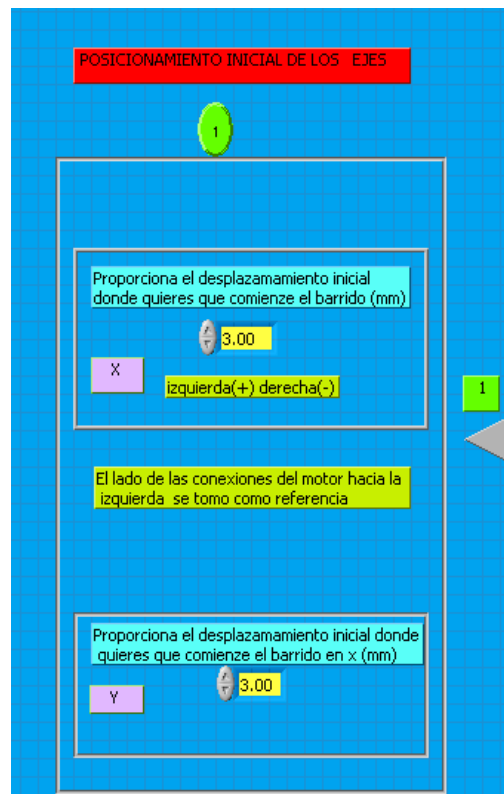


Fig.3.6 Pantalla de Posicionamiento De Ejes

El programa para el funcionamiento de esta ventana se muestra en la figura de abajo.

Un diagrama de flujo y tomando en cuenta diferentes cálculos para la resolución del motor :

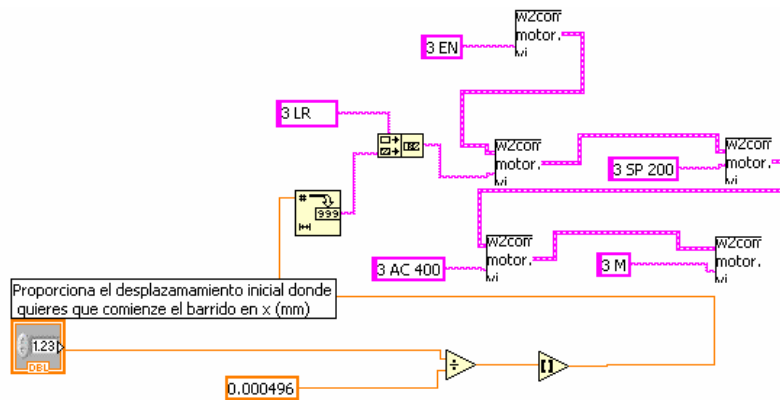


Fig.3.6.1 Diagrama de flujo para Posicionamiento De Ejes

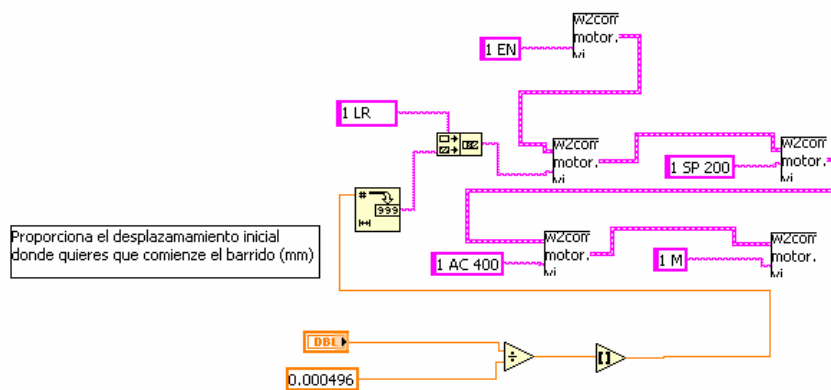


Fig.3.6.2 Diagrama de flujo para Proporcionar el desplazamiento

3.7 Adquisición de datos

En la siguiente pantalla se dan las coordenadas finales a nuestra conveniencia de superficie de barrido así como la resolución de nuestra imagen. Así como la ruta de almacenamiento de datos que es en cualquier archivo extensión *.DAT o *.TXT, para que después estos datos sean procesados en cualquier procesador de imágenes por ejemplo ORIGIN

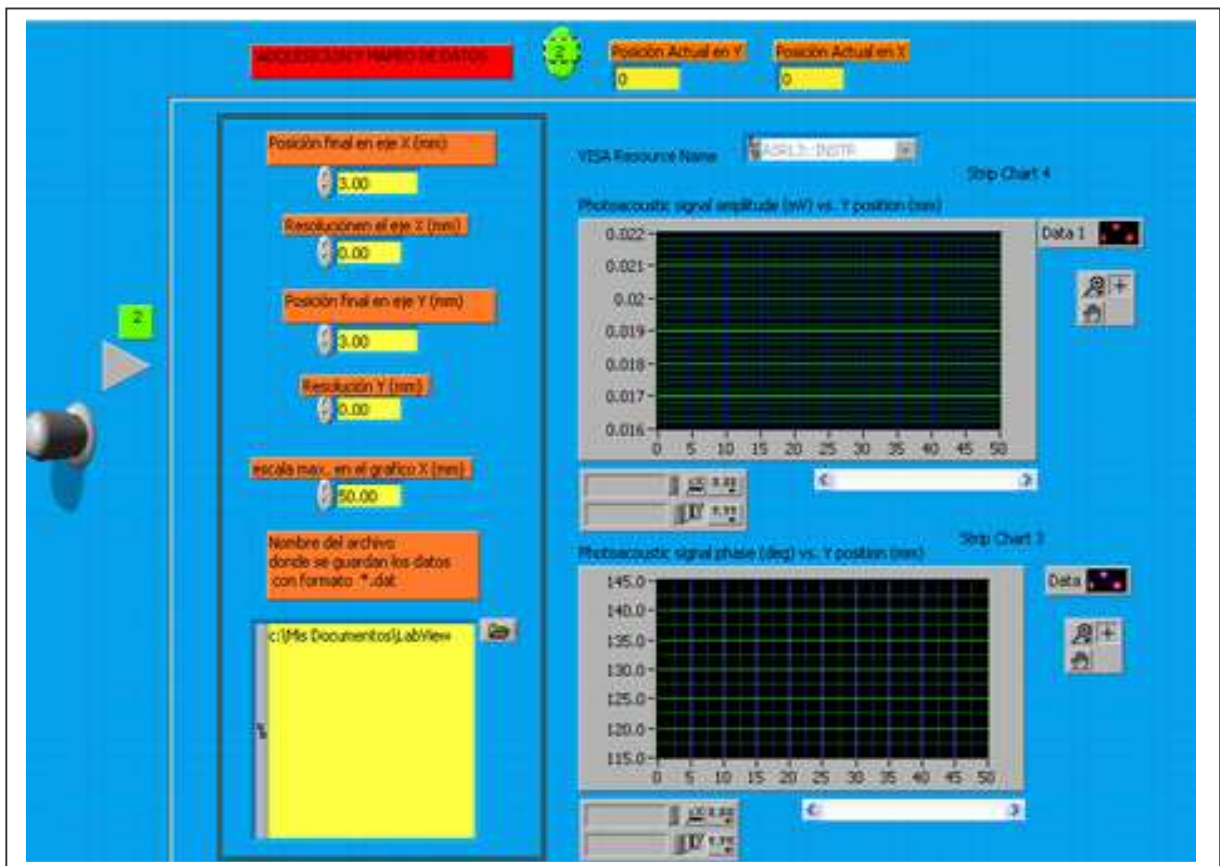


Fig 3.7 Posicionamiento De Ejes

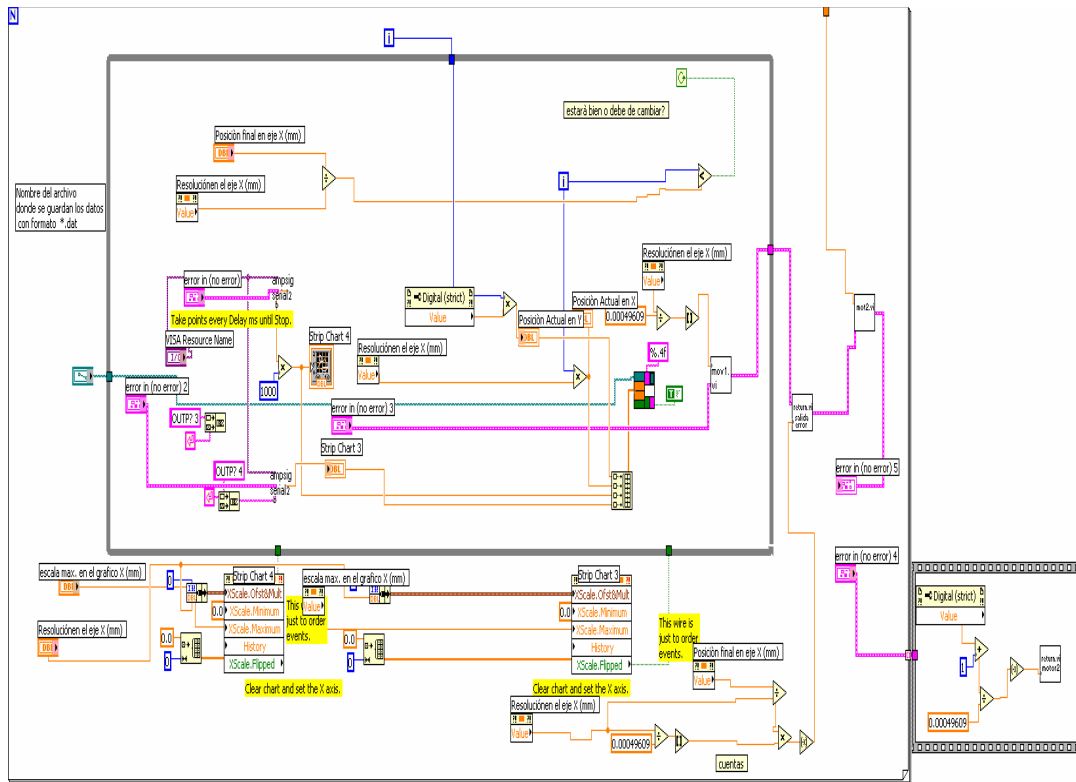


Fig 3.8 Diagrama de Bloques para Adquisición de datos

Estas pantallas son para que durante el escaneo de la muestra obtenga un registro tiempo-real de la fase y amplitud de la señal.

Los datos son obtenidos en forma de tabla para el manejo adecuado en cualquier procesador de imágenes

Posición x	Posición y	Amplitud	Fase
0.0000	0.0000	0.1086	22.6200
0.0000	0.1000	0.1132	27.8412
0.0000	0.2000	0.1169	26.8620
0.0000	0.6000	0.1310	26.5428
0.0000	0.7000	0.1272	26.8140
0.0000	0.8000	0.1195	25.9056
0.0000	0.9000	0.1174	25.1340
0.0000	1.0000	0.1193	19.6020
0.0000	1.1000	0.1288	25.7904
0.0000	1.2000	0.1254	25.6944

Fig 3.9 Tabla de datos *.dat

3.8 Montaje Experimental

3.8.1 Celda Fotoacústica

El montaje experimental utilizado en nuestro estudio es un sistema Fotoacústico gas-micrófono.

El haz de luz se interrumpe periódicamente mediante un modulador mecánico (chopper), este haz modulado se desvía con un espejo y se hace incidir en dirección normal sobre la superficie de la muestra que se ha colocado sobre la celda fotoacústica adherida con grasa de vacío. La señal fotoacústica generada se captura y se filtra con la frecuencia de referencia del chopper, mediante un amplificador lock-in. La señal filtrada es registrada por una PC obteniendo un archivo de datos de amplitud y fase el cual es usado para obtención de imágenes.

Celda fotoacústica: cilíndrica de bronce herméticamente sellada.



Fig. 3.10 Celda Fotoacústica

En tal configuración la muestra se coloca al interior de una celda cilíndrica de bronce herméticamente sellada (celda Fotoacústica) . La muestra es iluminada a través de una ventana por un haz colimado que se enfoca sobre la superficie. El haz es un láser de He-Ne de 20 mW modulado a 25 Hz en intensidad por la rueda de un cortador óptico mecánico (SR540). La señal fotoacústica se detecta por medio de un micrófono comercial de electroreto. La señal de salida del micrófono se analiza con un amplificador lock-in SRS-850 (Stanford Research Systems) que registra la amplitud y fase. Para poder efectuar el barrido lineal del haz sobre la muestra, la celda Fotoacústica se monto sobre una el sistema MICROBIDA con unidades de movimiento de cada eje (Nacional Aperture Inc. MN-3M-F)... Al efectuar un barrido lineal bidimensional sobre la superficie es posible registrar la amplitud y la fase de la señal Fotoacústica en cada paso. Cada barrido lineal es almacenado y posteriormente procesado para crear una imagen normalizada y de falso color. Cada punto del barrido 2D equivale a un píxel. Típicamente el barrido de una imagen 2D toma varios minutos.

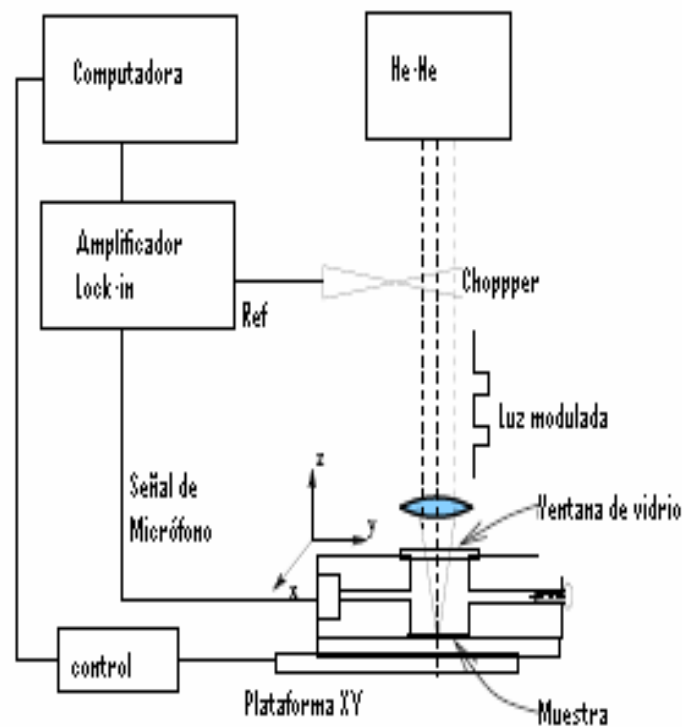


Fig 3.11 Diagrama de montaje experimental de celda fotoacústica

Básicamente el funcionamiento para la obtención de imágenes con esta técnica la podemos resumir como:

- Láser es enfocado y barre la superficie de la muestra produce un calentamiento periódico (fuente de ondas térmicas).
- Detecta diferentes características térmicas sobre/debajo de la muestra.
- Ondas térmicas son amortiguadas a una longitud de difusión térmica, así la obtención de la imagen en profundidad será dentro de este rango.

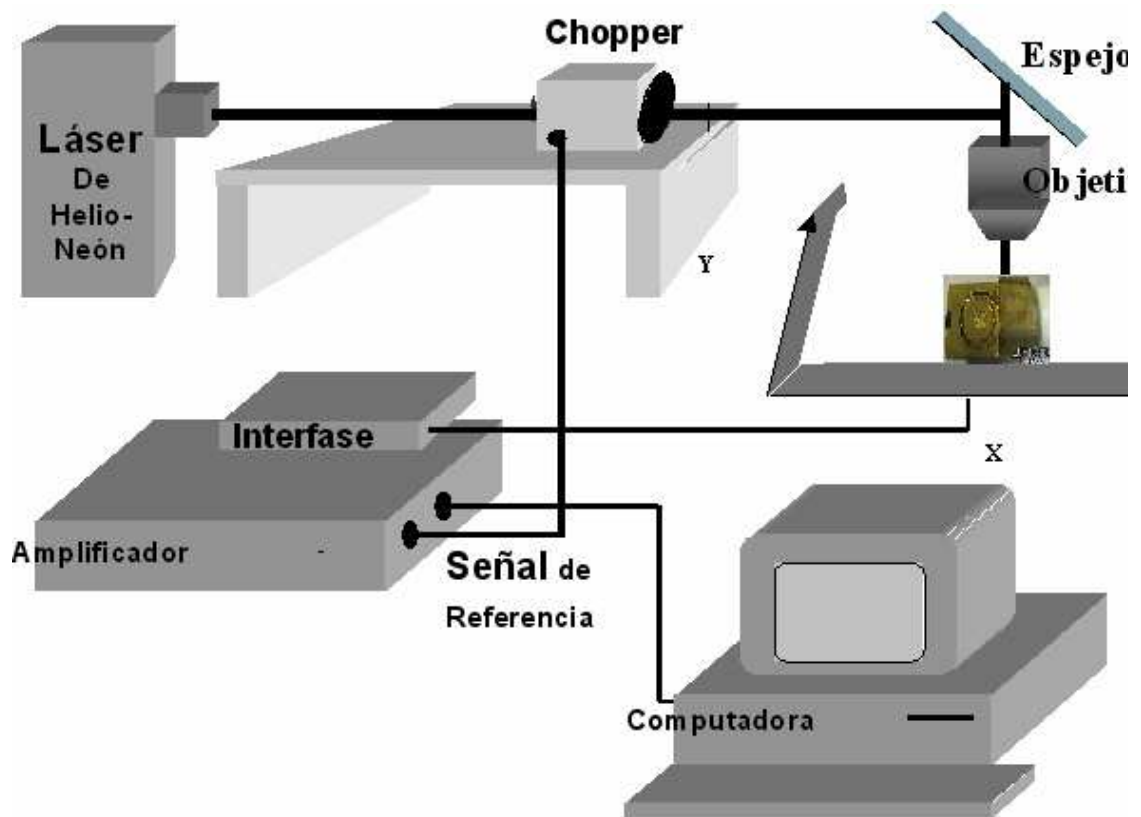


Fig 3.12. Montaje experimental de celda fotoacústica



Fig 3.13. Fotografía de montaje experimental con celda fotoacústica

3.9 Montaje Experimental. Piroeléctrico

Un diagrama esquemático de la disposición experimental de la detección usada para la obtención de la imagen por señal piroeléctrica se demuestra en fig. 3.6.1. En este arreglo la fuente de excitación es un diodo del láser, con energía variable en 650 nm, modulado en intensidad a una frecuencia dada por el oscilador de la referencia de un amplificador lock-in. Usando un objetivo de microscopio el rayo láser fue enfocado (el mínimo tamaño del spot del láser era aproximadamente de 0.05mm.). El sensor piroeléctrico cuenta con un espesor de 25 micras, fue cubierto uniformemente con una capa fina y homogénea de pasta de silicón para asegurar un buen contacto térmico entre el sensor y la muestra. La célula de detección piroeléctrica se monta en la plataforma x-y completamente automatizada. Una PC fue utilizada para controlar el barrido en x-y así como el almacenamiento de la señal Piroeléctrica para el posterior graficado de la amplitud y de la fase.

Piroeléctrico

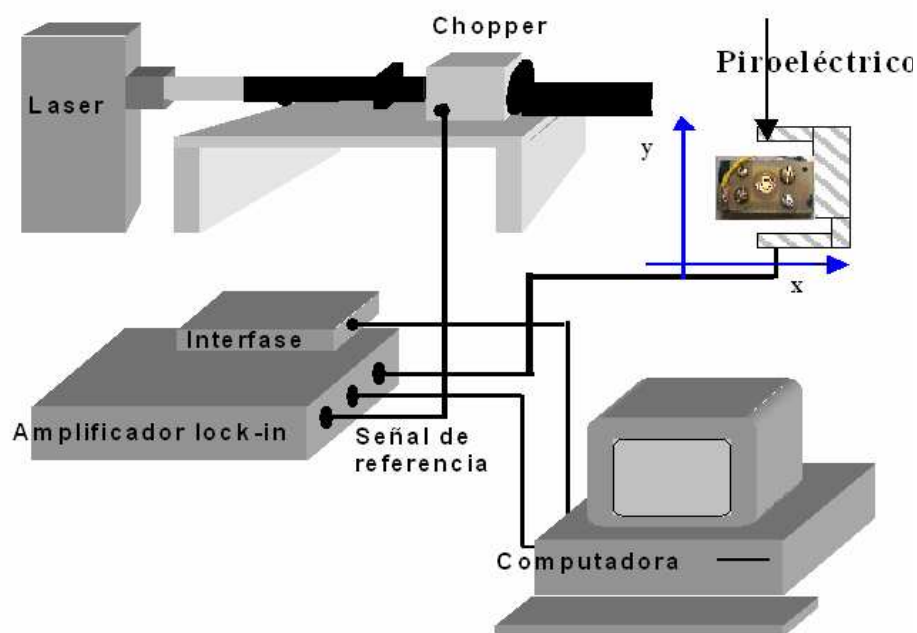


Fig 3.14. Montaje experimental con piroeléctrico

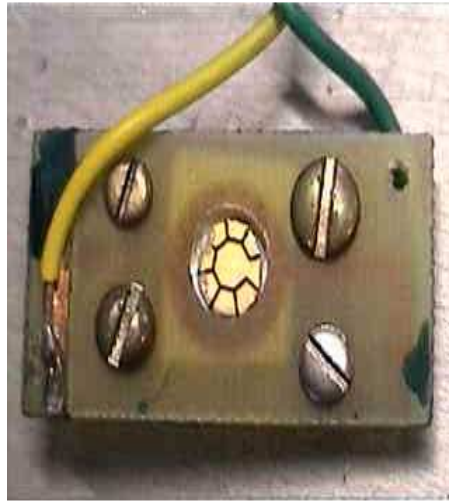


Fig 3.15 fotografía de celda con piroeléctrico

En el siguiente capítulo mostramos los resultados experimentales que se obtuvieron de ambos montajes, fotoacústico y Piroeléctrico, así como la discusión de estos.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1 Imágenes de circuitos integrados obtenidas por microscopía fotoacústica.

Como muestra de estudio seleccionamos un chip impreso de tarjeta de prepago telefónica por su conveniente tamaño y estructura de capas (Fig. 4.1). Así podemos detectar características del chip de manera no destructiva debajo de la superficie.

Un circuito integrado es una combinación de elementos electrónicos interconectados, tales como transistores y diodos, que están inseparablemente asociados con una base continua de material (sustrato). Generalmente los elementos de un circuito son de tamaño microscópico, por lo que también se usa el término de microcircuitos. Los beneficios de los circuitos eléctricos incluyen: menor tamaño, bajo consumo de energía, mayor velocidad de operación y reducción de costo.

Los tres tipos básicos de circuitos integrados que existen son: el circuito integrado monolítico, el circuito integrado multichip y los circuitos integrados en película, cuyos elementos son películas formadas sobre sustratos aislados. De aquí la importancia de conocer por ejemplo, posibles defectos en el proceso de fabricación.

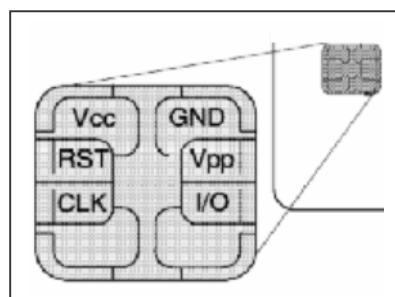


Fig. 4.1 chip

En los primeros experimentos que se realizaron no se tenía un sistema automatizado y los barridos se hacían en forma manual para después obtener las imágenes.

4.2. Sistema No-Automatizado.

Las imágenes que se muestran a continuación son el resultado de una secuencia de barridos lineales, a través del área señalada (2.0 -4.0 mm) en la figura 4.2, donde el píxel corresponde a $50 \times 50 \mu\text{m}$. Notamos que ya sea la magnitud o la fase de la señal Fotoacústica pueden ser usados para formar la imagen. De esta forma, es posible asociar la variación de la señal en posición del haz con las propiedades ópticas y térmicas del área estudiada.

En la imagen de amplitud 4.2(b) es posible observar gran parte de la estructura geométrica de la superficie de la muestra. Destacan aquellas características de las regiones metalizadas que muestran variaciones de brillo y de contraste óptico. Dado que la señal Fotoacústica se inicia con la absorción de energía incidente, modulada en intensidad, la amplitud de la señal Fotoacústica tiene una significativa contribución de las propiedades locales de absorción óptica en la superficie de la muestra. También **la resolución esta limitada por el tamaño del foco del haz de prueba, el paso de barrido lineal, la longitud de onda y la penetración óptica en la muestra.**

Por otra parte la imagen construida a partir de la fase de la señal PA 4.2(c) permite visualizar aspectos que no son detectados desde la superficie. En particular, la imagen muestra la presencia de un rasgo ubicado por debajo el electrodo de contacto y por sobre la matriz de soporte (Chip electrónico). Esta propiedad es única de la Fotoacústica y es producto de la generación y propagación de ondas térmicas que resultan del proceso de absorción de energía.

Después de este resultado alentador nos dedicamos de lleno a la parte central de esta tesis que es el diseño y construcción del sistema bi-direccional, ahora totalmente automatizado, para la obtención de imágenes a través de técnicas fototérmicas.

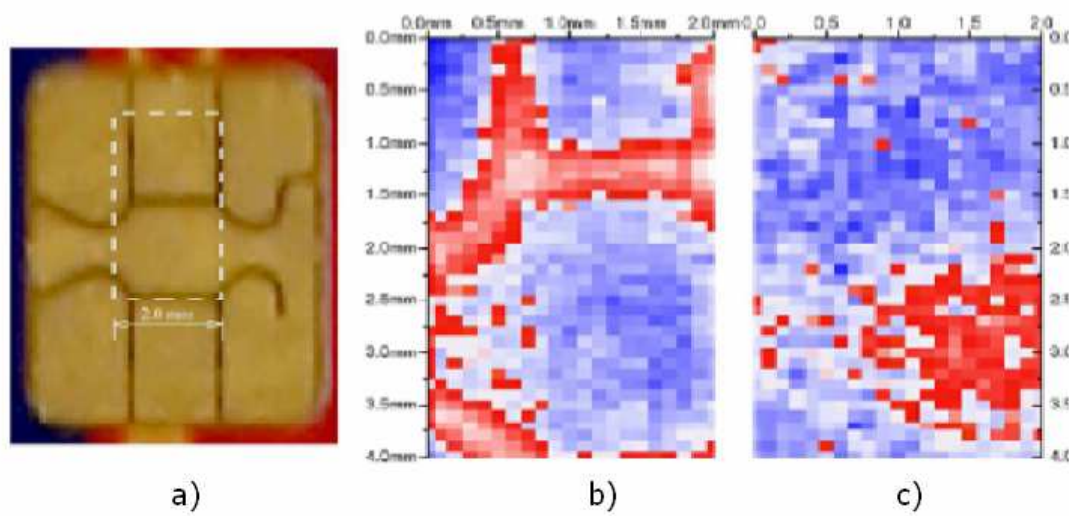


Fig. 4.2 a) Muestra con área acotada que indica el área de barrido en 2D de la señal fotoacústica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución del sistema x-y de $50 \mu m$. Frecuencia constante de 25 Hz.

4.3 Sistema Automatizado.

Las imágenes que se muestran en la fig 4.3 son el resultado de una secuencia de barridos lineales, automatizados a través del área señalada (2.5 -2 mm) en esta figura , donde el píxel corresponde a $100\mu\text{m}$. Notamos que ya sea la magnitud o la fase de la señal Fotoacústica pueden ser usados para formar la imagen. De esta forma, es posible asociar la variación de la señal con la posición del haz con las propiedades ópticas y térmicas del área estudiada. En la imagen de amplitud 4.3 (b) es posible observar gran parte de la estructura geométrica de la superficie de la muestra. Destacan aquellas características de las regiones metalizadas que muestran variaciones de brillo y de contraste óptico.

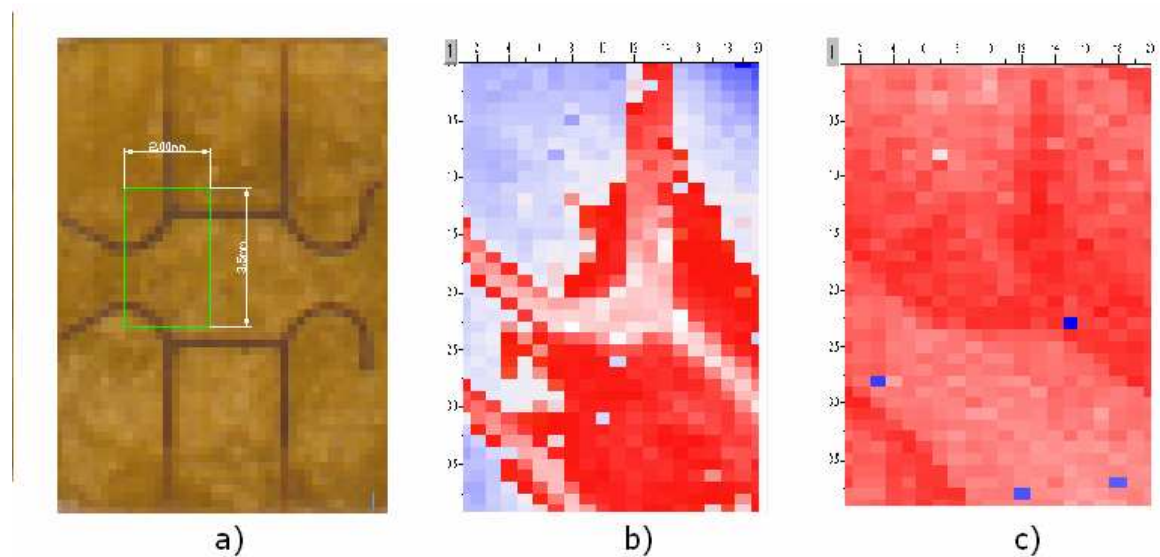


Fig. 4.3 a) Muestra con área acotada que indica el área de barrido en 2D de la señal fotoacústica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución del sistema x-y de $100\mu\text{m}$. Frecuencia constante de 125 Hz.

En la siguiente imagen (Fig. 4.4) variamos la frecuencia de modulación de la luz incidente ahora a 25 Hz, lo cual disminuye la resolución, aumentando μ_s , de la imagen fototérmica.

Las imágenes que se muestran a continuación son el resultado de una secuencia de barridos lineales a través del área señalada (2 -2 mm) en la figura 4.4, donde el píxel corresponde a $100\ \mu\text{m}$. Notamos que ya sea la magnitud o la fase de la señal Fotoacústica pueden ser usados para formar la imagen. De esta forma, es posible asociar la variación de la señal con la posición del haz con las propiedades ópticas y térmicas del área estudiada.

En esta prueba además vemos un notable avance en efecto de profundidad, sin embargo la resolución es menor, con respecto a la anterior imagen debido al aumento en la longitud de difusión térmica.

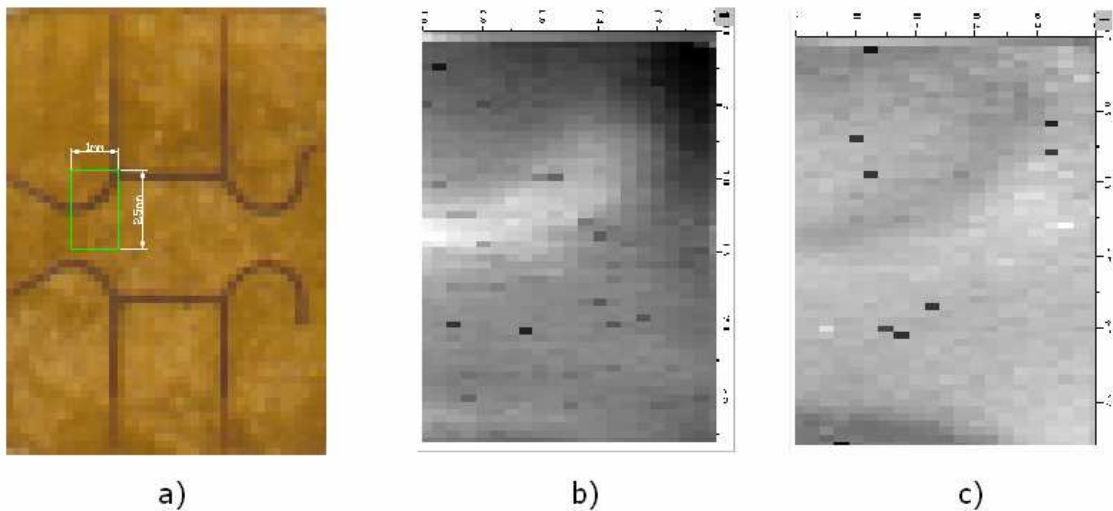


Fig. 4.4 a) Muestra con área acotada que indica el área de barrido en 2D de la señal fotoacústica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución del sistema x-y de $100\ \mu\text{m}$. Frecuencia constante de 25 Hz.

A continuación disminuimos el paso en la plataforma x-y, ahora a $50\mu m$, para ver el efecto sobre la imagen fototérmica obtenida.

Las imágenes mostradas a continuación son el resultado de una secuencia de barridos lineales: a través del área señalada (2.0 -4.0 mm) en la figura 4.5, donde el píxel corresponde a $50 \times 50 \mu m$. Notamos que ya sea la magnitud o la fase de la señal Fotoacústica pueden ser usados para formar la imagen.

Podemos observar ahora una mejor definición de las imágenes fototérmicas con respecto a las imágenes anteriores al disminuir el paso de la plataforma x-y a $50\mu m$. Ya que el haz del láser focalizado tiene aproximadamente este diámetro, entonces se consigue mejorar la definición disminuyendo el paso de la plataforma de barrido.

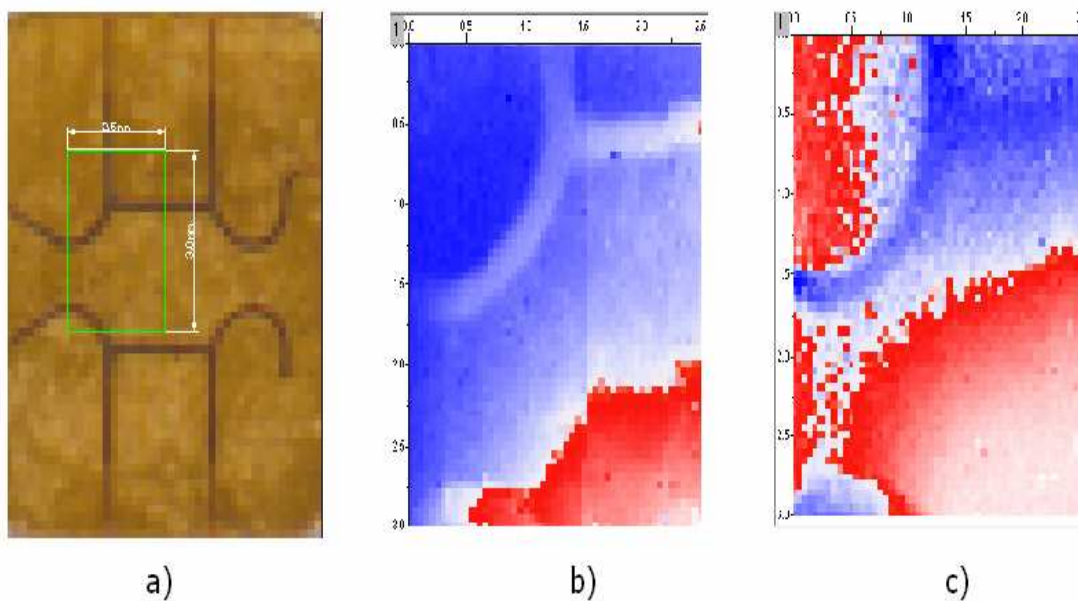


Fig. 4.5 a) Muestra con área acotada que indica el área de barrido en 2D de la señal fotoacústica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución del sistema x-y de $50 \mu m$. Frecuencia constante de 25 Hz.

4.4 Análisis de la señal fotoacústica a diferentes ángulos de fase

La separación de fase mostrada nos da imágenes en diferentes ángulos de fase y representa una proyección de la señal fotoacústica con lo cual podemos observar la separación de esta señal en componentes donde se observe mejor la superficie de la imagen o los rasgos en profundidad como en la figura 4.7 y 4.8 y en cuales podemos observar mejor sus características superficiales y en profundidad. En la Fig. 4.6 observamos una imagen obtenida con un haz modulado a 25 Hz con un paso de $150\ \mu\text{m}$. Cuando la señal fotoacústica es proyectada a diferentes ángulos podemos ver mejor su imagen superficial Fig. 4.8 y su imagen a profundidad 4.7.

De esta manera tenemos un método de contraste de la señal fototérmica para poder visualizar mejor características superficiales o a profundidad en una muestra



Fig 4.6 Imagen sin corrimiento en la fase



Fig 4.7 Imagen obtenida a frecuencia de 25 Hz en un área de 2x2mm . Con un corrimiento de fase de 2°



Fig 4.8 Imagen obtenida a frecuencia de 25 Hz en un area de 2x2mm . con un corrimiento de fase de 20°

A continuación mostramos los resultados obtenidos en la técnica fotopiroeléctrica, en la obtención de imágenes de un chip impreso de tarjeta de prepago y también de material biológico.

4.5 Resultados con sensor Piroeléctrico

En la figura 4.6 es posible ver una fotografía tomada de un microcircuito así como su imagen fototérmica en amplitud y fase. En este caso fue utilizada la configuración donde la luz modulada incide sobre la muestra y el sensor Piroeléctrico esta adherido por la cara inferior de la muestra). Las imágenes que se muestran en la son el resultado de una secuencia de barridos a través del área señalada (2.0 -4.0 mm) en la figura 4.6, donde el píxel corresponde a $50 \times 50 \mu\text{m}$. Notamos que ya sea la magnitud o la fase de la señal Fotopiroelectrica pueden ser usados para formar la imagen. En la imagen de amplitud 4.6(b) es posible observar gran parte de la estructura geométrica de la superficie de la muestra. Destacan aquellas características de las regiones metalizadas que muestran variaciones de brillo y de contraste óptico. En la imagen 4.6 c) se muestra la imagen fototérmica mas a profundidad de esta muestra.

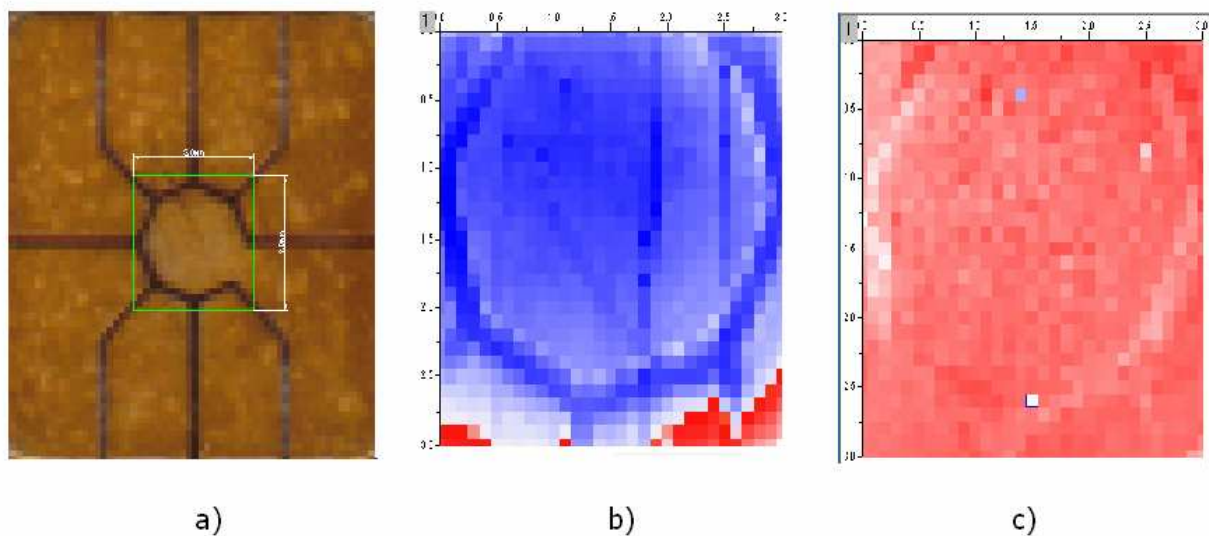


Fig. 4.9 a) Muestra con área acotada que indica el área de barrido en 2D de la señal piroeléctrica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución del sistema x-y de $50 \mu\text{m}$. Frecuencia constante de 25 Hz.

A continuación mostramos los resultados obtenidos con la técnica fotopiroeléctrica para el caso de muestras biológicas

4.6 Piroeléctrico con material biológico

En la figura es posible ver una fotografía tomada desde un microscópico óptico de la hoja del *japonicum de Ligustrum* así como su imagen fotopiroeléctrica en amplitud y fase. En este caso fue utilizada la configuración donde la luz modulada incide sobre la muestra y con el sensor Piroeléctrico adherido por la cara inferior de la muestra con 15.5 mW de energía del laser. Para esta energía la muestra biológica bajo estudio no sufrió daño. En este caso es posible observar las venas de la hoja en imágenes de la amplitud y de la fase. La difusividad térmica para las hojas vegetal es considerada alrededor de $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ (1) y la hoja del *japonicum de Ligustrum* tiene un espesor en micras de 195 hasta 635 en cuerpo y venas respectivamente.

Conocemos que el espesor del cuerpo de la hoja *Ligustrum japonicum* es aproximadamente de $150 \mu\text{m}$. Además nuestra muestra cuenta con clorofila para captar luz y producir los nutrientes que son necesarios en todas las hojas de plantas. En la longitud de onda de 650nm que es la longitud de onda del laser incidente la Clorofila B tiene un máximo en absorción óptica y su [1] coeficiente de absorción óptica β es de $190 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ [2] para esa longitud de onda y con estas características y debido al análisis en [3] se sabe que la muestra es ópticamente opaca ya que nuestros espesores varían de $150 \mu\text{m}$ a $450 \mu\text{m}$. Conociendo la difusividad de la muestra de $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ [2] y un espesor de $150 \mu\text{m}$, a frecuencias ω de 2Hz entonces tenemos una muestra predominantemente térmicamente gruesa [3]. Por lo cual las variaciones de fase en la señal fotopiroeléctrica serán de la forma $\Delta\phi = a_s l_s$ donde a_s es el coeficiente de difusión térmico de la muestra y l_s es el espesor de nuestra muestra por lo que estas imágenes debido principalmente a las variaciones de espesor de la muestra haciendo evidente las diferencias en la fase de la señal PPE por las variaciones de l_s en la muestra.

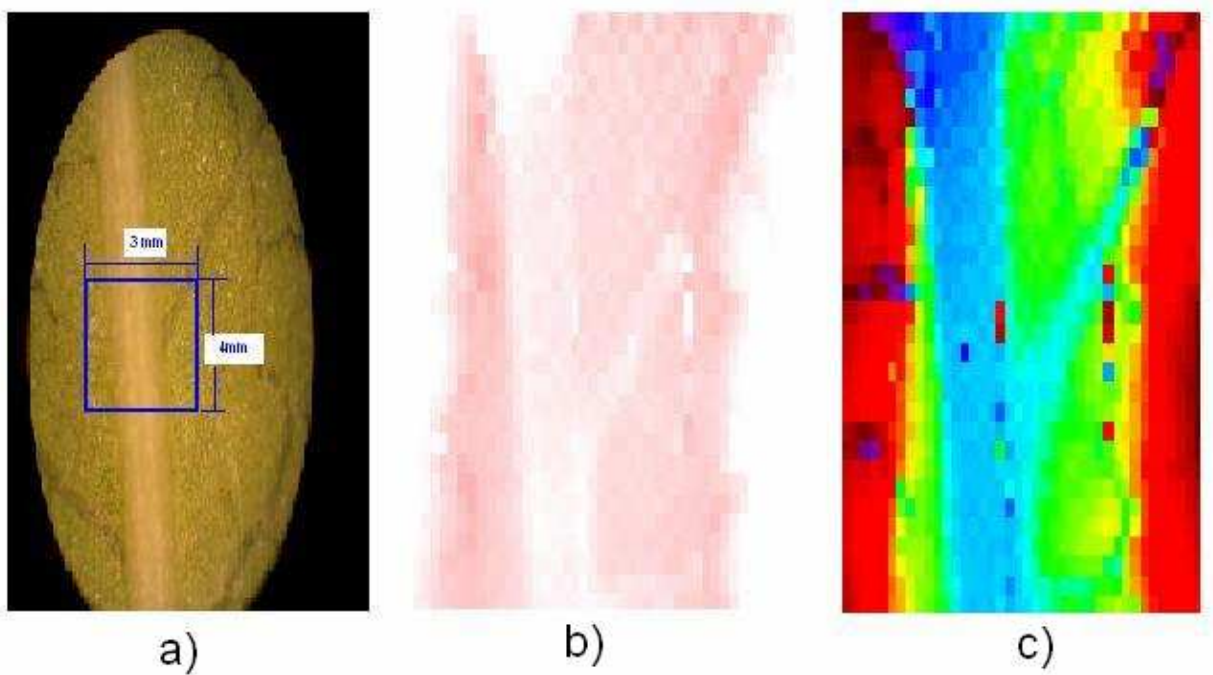


Fig 4.10 a) Muestra. Área acotada indica área de barrido en 2D de la señal fotopiroeléctrica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución de sistema x-y $150 \mu m$. Frecuencia constante de 2 Hz.

Con la idea de poder aumentar la potencia del láser utilizado sin dañar ala muestra biológica, cambiamos la configuración Fotopiroeléctrica para que ahora sobre el sensor incida el haz láser focalizado y por debajo de este se encuentre adherido la muestra.

4.7 Luz incidiendo en sensor Piroeléctrico con material biológico

En la figura es posible ver una fotografía tomada desde un microscópico óptico de la hoja del *japonicum de Ligustrum* así como su imagen fotopiroeléctrica en amplitud y fase. En este caso fue utilizada la configuración donde la luz modulada incide en el sensor del PE y la muestra es unida por la cara superior de la muestra con 25 mW de energía del láser. Para esta energía la muestra biológica bajo estudio no sufrió daño. En este caso es posible observar las venas de la hoja en imágenes de la fase y en la amplitud solo podemos observar el sensor piroeléctrico. Así mediante esta configuración la muestra biológica esta mas protegida del posible daño que pudiera ocasionar el láser focalizado y además podemos obtener su imagen térmica mediante la fase de la señal fotopiroeléctrica.

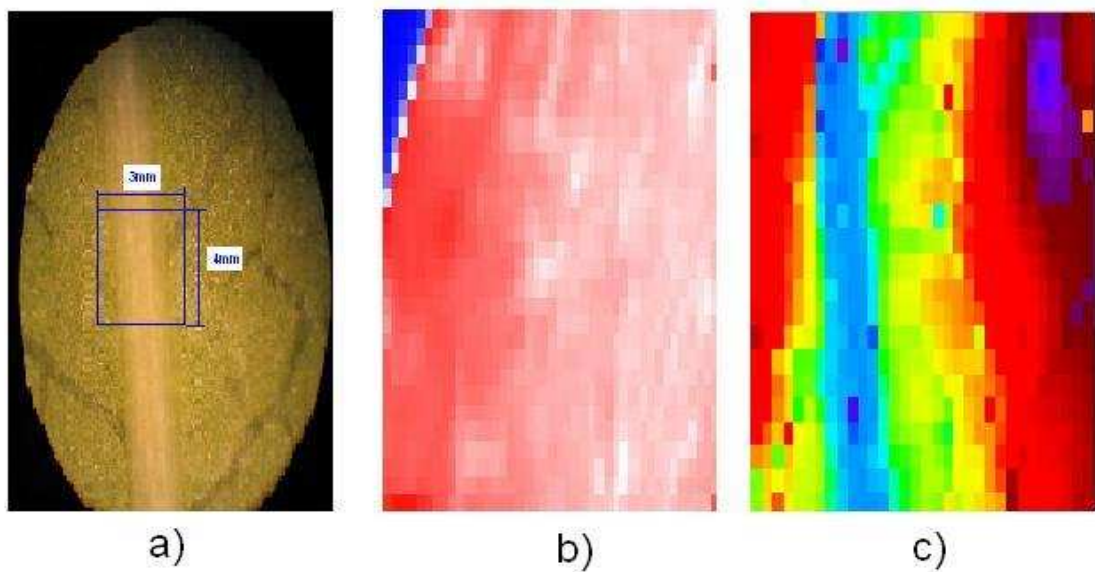


Fig 4.11 a) Muestra. Área acotada indica área de barrido en 2D de la señal piroeléctrica b) Amplitud de la señal c) Fase de la señal. Resolución de sistema x-y 150 micrómetros. Frecuencia constante de 2 Hz

Referencias

- [1] J.Phys IV France **125** (2005) 853-855."Photoacoustic spectroscopy applied to the study of the influence of laser irradiation on cornseeds"C.H.Aguilar,A.Carballo,A,Cruz-Orea,R.Ivanov,E.San Martin, A. Michtchenko.
- [2]Meas, Sci,Technol, **2**(1991) 393-401 "Open Photoacoustic Cell Spectroscopy"M.V Marquezini, N Cella, A.M Mansanares, H. Vargas and L.C.M Miranda
- [3]J.Appl.Phys.57 (1985)4421-4430."Theory of photopyroelectric spectroscopy of solids"Andreas Mandelis and Martin M. Zver

Capítulo 5

Conclusiones y perspectivas.

En esta tesis se obtuvo el diseño, construcción y control de un sistema bi-direccional para generación de imágenes aplicando técnicas de microscopia fototérmicas y también se realizó el desarrollo de un manual de usuario para investigación usando el sistema construido.

Se han aplicado las técnicas fototérmicas de fotoacústica y piroeléctrico para mostrar la utilidad de estas técnicas para obtener imágenes a profundidad y superficiales de diferentes materiales tanto metales como material biológico.

Se realizó un diseño conceptual de las partes que comprendían nuestro sistema al cual se le dio por nombre “MICROBIDA” Microposicionador Bidireccional Automatizada, se hizo el diseño tanto de sistemas mecánicos, y software con el cual cuenta el sistema así también como el planteamiento de el seguimiento del software.

Se diseñó e implementó el Software tanto de automatización como de adquisición de datos para después llevar a cabo un procesamiento digital de señales y obtener las imágenes con los datos adquiridos. Para la elaboración de este software se contó con la herramienta en lenguaje G “Lab-view Versión 7 Express y se realizó la comunicación con la computadora por medio de Puerto RS-232 y convertidores USB al mismo.

También se muestran los diferentes montajes experimentales que se hicieron para las diferentes técnicas fototérmicas que se mencionan donde la celda Fotoacústica se montó sobre el sistema MICROBIDA con unidades de movimiento de cada eje (Nacional Aperture Inc. MN-3M-F)... Al efectuar un barrido lineal bidimensional sobre la superficie es posible registrar la amplitud y la fase de la señal Fotoacústica en cada paso. Cada barrido lineal es almacenado y posteriormente procesado para crear una imagen normalizada y de falso color. Cada punto del barrido 2D equivale a un píxel. Y lo mismo se hizo en el caso de la celda piroeléctrica.

Se muestran los resultados obtenidos cuando solo se contaba con un sistema semi-automatizado y automatizado completamente. Las imágenes que se muestran en la son el resultado de una secuencia de barridos lineales. Notamos que ya sea la magnitud o la fase de la señal Fotoacústica pueden ser usados para formar la imagen. De esta forma, es posible asociar la variación de la señal con la posición del haz con las propiedades ópticas y térmicas del área estudiada.

La imagen construida a partir de la fase de la señal PA permite visualizar aspectos que no son detectados desde la superficie. En particular, la imagen del microcircuito muestra la presencia de un rasgo ubicado por debajo el electrodo de contacto y por sobre la matriz de soporte (Chip electrónico). Esta propiedad es única de la Fotoacústica y es producto de la generación y propagación de ondas térmicas que resultan del proceso de absorción de energía.

En cuanto el sistema de automatización se mejoraba se pudieron obtener imágenes con una mejor resolución óptica y de una manera más rápida.

Se obtuvieron imágenes térmicas de material biológico en específico de hojas mediante la detección de ondas térmicas que pueden ser usada para la análisis de estructuras biológicas, esto hace posible investigar rasgos de materiales biológicos que están mas allá de la longitud de difusión óptica por lo tanto no observables con métodos ópticos convencionales y sin el riesgo de causar algún daño a las muestras.

Se obtuvieron diferentes imágenes con el método de separación en la fase, mostrando que, la imagen nos arroja mayor información acerca de las características superficiales o a profundidad de la muestra lo cual nos permite hacer un mapeo mas preciso en cuanto a las características que queramos observar en nuestras imágenes.

La capacidad de obtener imágenes mediante la detección indirecta de ondas térmicas puede ser usada para el análisis de heterogeneidades tales como defectos, fracturas, inclusiones y delaminaciones. Son de especial interés las aplicaciones en la caracterización de dispositivos semiconductores y mapeo de circuitos integrados. En particular la imagen construida con la información de la fase de la señal fototérmica proporciona nueva y valiosa información que los microscopios ópticos no cuentan.

Perspectivas para trabajos futuros:

Obtener imágenes de diferentes materiales tanto biológicos como de cualquier naturaleza como semiconductores, etc.

Obtener imágenes en 3D de los materiales

Hacer mejoras con respecto al tiempo de adquisición de datos pudiendo dotar al sistema de diferentes herramientas para el escaneo.

Continuar con las investigaciones para determinar delaminaciones o fracturas en diferentes materiales.

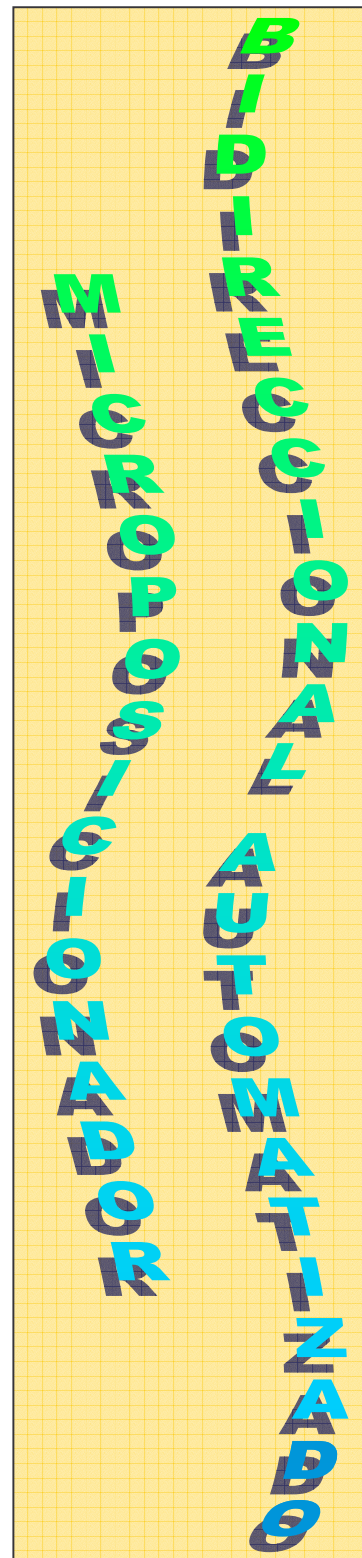
Mejorar la focalización del haz para poder tener mayor resolución en las imágenes.

Apéndices A

Manual de usuario.

MICROBIDA

MICROposicionador **BI**direccional **Aut**omatizado



Por: Ing. Blanca Rosa Briseño Tepepa

Tabla De Contenidos

Microposicionador Bidireccional Automatizado	2
Resumen de características	4
Panel frontal	5
Indicador en Panel Frontal	8
Software de Configuración	9
Comandos Básicos del Motor	11
Software Visual de Funcionamiento	12
Pantallas de Configuración	13
Pantallas Principales	14
Pantallas de Graficación	15

MICROposicionador **BID**ireccional **Aut**omatizado

MICROposicionador **BID**ireccional **Aut**omatizado, contiene controladores que puede modificar la velocidad y la posición y pueden ser catalogados como motores de VCD.

Este sistema se puede manejar diseccionándolo usando el puerto RS-485, también se pueden opere desde el puerto RS-232(puerto serial). Su direccionamiento es simplemente por medio de un DIP switch.

Aunque su direccionamiento y funcionamiento es relativamente simple, no se debe confundir con un motor común de pasos ya que desde el momento de contar con un encoder para su control de posición es considerado un servo-motor.

Módulos de Control

RS-485 o RS-232

Control de Velocidad

Control de Posición (Absoluta o Relativa)

Resumen de Características

- Limite de Corriente Programable
- Paro de Emergencia
- Dos entradas analógicas de 10 bits (una por cada motor)
- Dos salidas analógicas de 12 bits .Que se pueden usar para programar el limite de corriente
- Rangos de posición programables.
- Operación por RS-232 o RS-485
- Terminal con PC
- Interfase con software

Comunicación entrada/salida

RS-232/RS-485 (Sentencias en comandos ASCII)

Entradas de Control

Encoder: 2 Canales, +5VCD compatible con TTL
Analógica: Entrada Analógico (0-5 VCD, 10 bits)

Salidas de Control

Analógica: Salida Analógica (+10VCD, 12 bits DAC)
Comandos del Motor:12 bits DAC

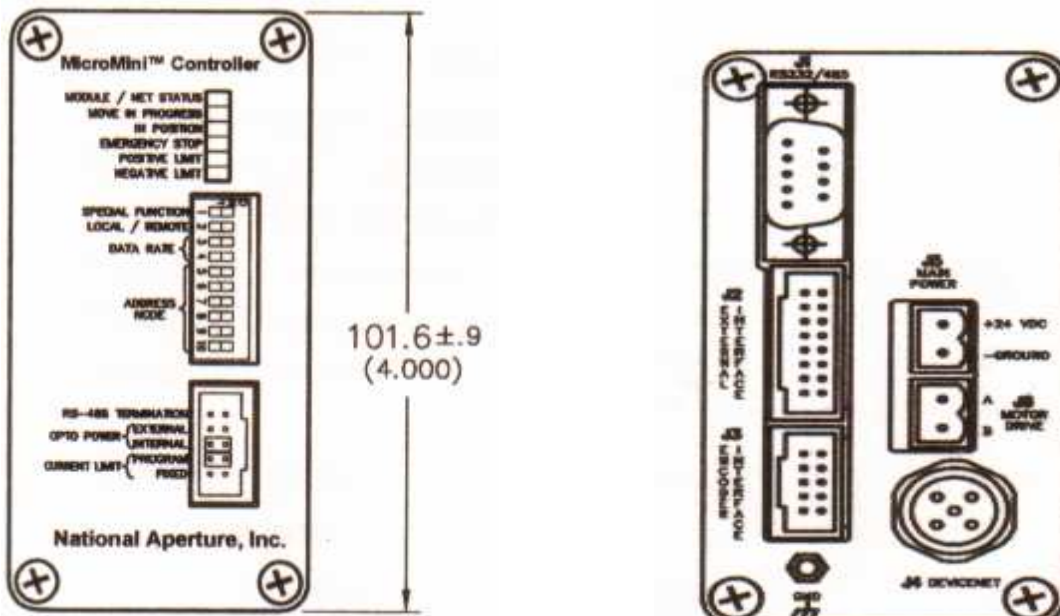
Medio Ambiente

Temperatura en operación 0 a +70°C
Almacenamiento -25°C a +85°C
Tolerancia de Humedad 80% RH, no condensada

Panel Frontal de un Controlador del Sistema

Inspeccione al 100% el panel de control de su controlador

Figura de panel vista frontal y trasera



1. Por la parte frontal contiene DIP-switch, como se muestra, con la posición superior se activan cada número (↑ON)

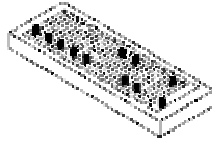
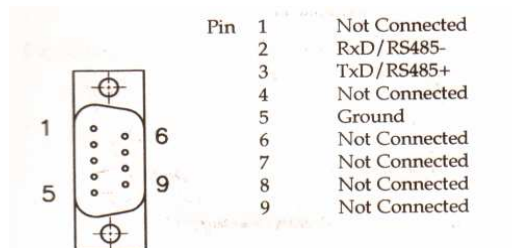


Figura de DIP

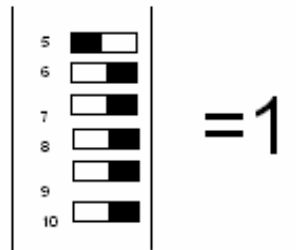
2. Checa los conectores de la parte trasera

Figura de DIP trasero

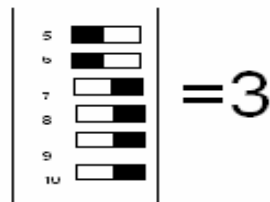


3. Crear una dirección binaria diferente de "0" usando los switches 5-10

Estas direcciones binarias se usan para direccional cada uno de los ejes , como por ejemplo para llamar al eje X-se usa "1", para llamar al eje Y-"2", etc. Con la dirección "0", se mueven los dos ejes simultáneamente



Para la dirección 1 se puede usar un eje X,2-Y,3-Z.



4. Conexión

Cable macho RS-232

INDICADOR DE PANEL FRONTAL

Estado en los indicadores LED

MODULE/NET STATUS

Verde parpadeando=no inicializado

Verde permanente=Inicializado

Rojo Parpadeando=Error en la comunicación

Rojo permanente=Error sin conexión

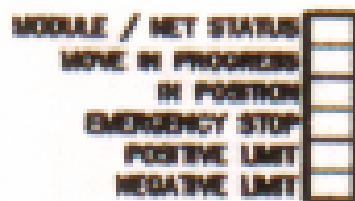
MOVE IN PROGRESS=Posición activa o velocidad

IN POSITION=Motor en la posición programada

POSITIVE LIMIT=Límite en la posición de salida activada positiva

NEGATIVE LIMIT=Límite en la posición de entrada activada negativa.

Figura de MODULE



VELOCIDAD DE COMUNICACIÓN

SWITCH



3	4	Rs-232
IZQUIERDA	DERECHA	38400

La fuente de poder externa es de 5VCD .

SOFTWARE DE CONFIGURACIÓN

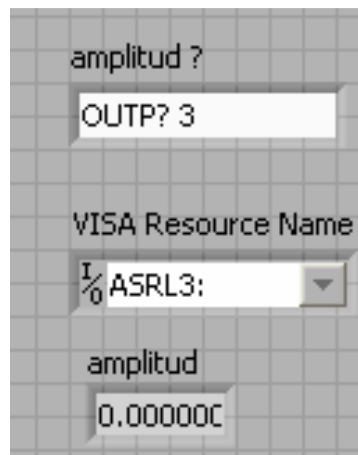
La operación por el puerto RS-232 es por medio de cualquier versión de Windows donde sea ejecutable el Lab-VIEW versión 7.0 utilizando una maquina de 386/16 MHZ o mejor.

The image shows a configuration window for VISA settings. The fields are arranged in a grid-like fashion. The 'VISA resource name' is set to 'COM1'. The 'timeout (10sec)' is set to '10000'. The 'termination char (0xA = '\n' = LF)' is set to '\A'. The 'baud rate (9600)' is set to '9600'. The 'stop bits (10: 1 bit)' is set to '1'. The 'flow control (0:None)' is set to 'None'. The 'data bits (8)' is set to '8'. The 'duplicate VISA resource name' is set to 'COM1'. The 'parity (0:none)' is set to 'None'.

Configuración

1. Dar nombre a el puerto de comunicación en este caso el nombre del puerto serial es COM1

2. Establecer la velocidad de transmisión de datos en este caso por conveniencia para que coincida con la de comunicación dada por el fabricante del motor es de 9600.
3. Para poder tener un mejor funcionamiento en la comunicación a cada dispositivo se asigna un "termination char" dada por el fabricante en cada dispositivo
4. Por último tenemos que asignar un "timeout" en este caso se calculo para una buena comunicación el valor de 10000sec

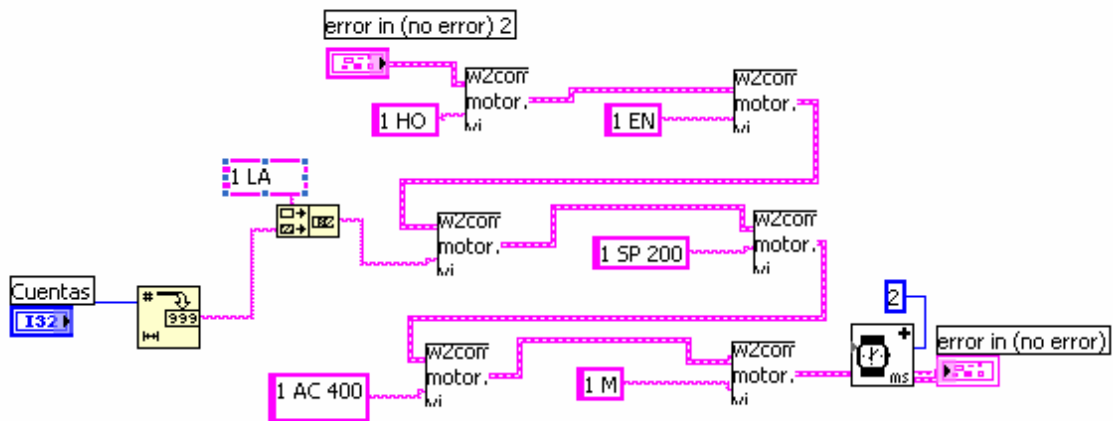


Configuración de Amplitud y Fase

Para poder conocer el valor de la amplitud de la fase en cada coordenada del sistema se dio un nombre aleatorio en este caso "OUTP?3", se da una dirección conocida para el puerto y se hace la adquisición del dato. Esto ocurre tanto para la amplitud como para la fase.

COMANDOS BASICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES CON SU RESPECTIVO EJE

DI	Deshabilita los motores
EN	Habilita los Motores
HO	Define la presente posición como posición de inicio "HOME"
LA	Comando de posición Absoluta
LR	Carga la posición relativa en la tarjeta
M	Inicializa el movimiento
N	Define la posición de inicio poco un rango
V	Define la velocidad



Configuración de comandos

En Lab-VIEW se elaboro la subrutina mostrada en el diagrama de bloques anterior para poder dar las instrucciones del moviendo a los ejes.

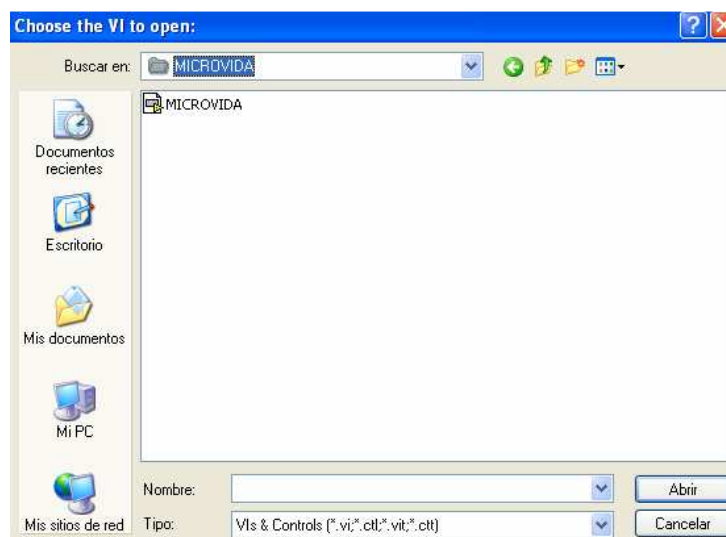
SOFTWARE VISUAL DE FUNCIONAMIENTO

El nombre de programa del posicionador automatizado llamado

MICROBIDA.VI



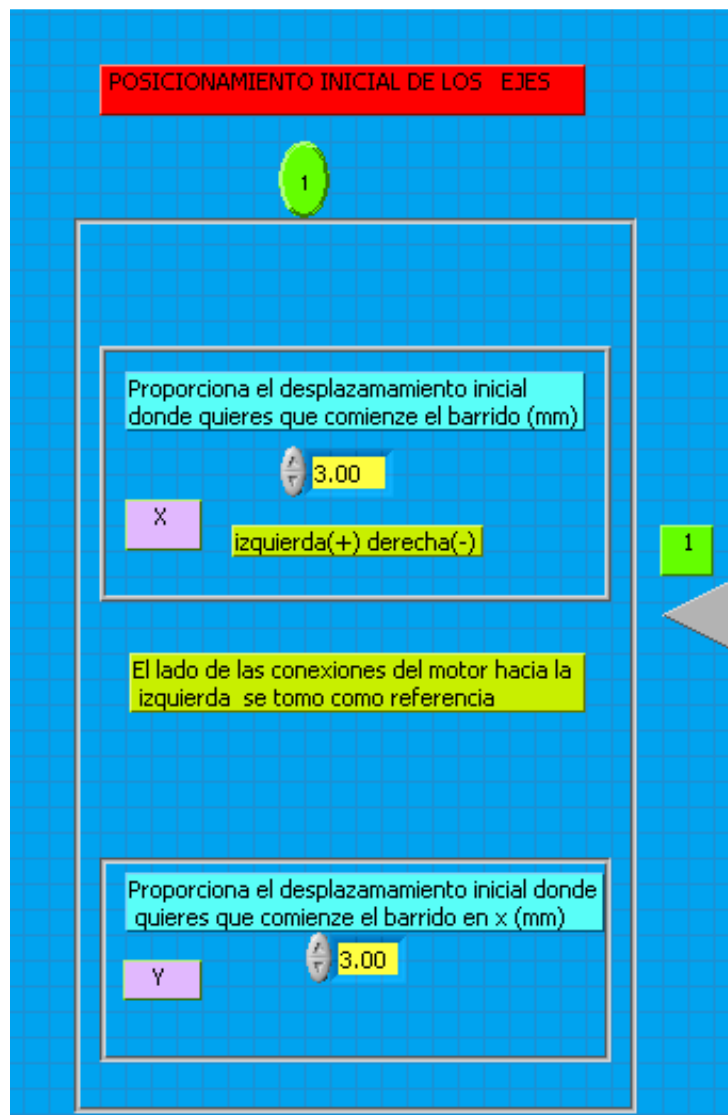
Pantalla principal de Lab-view



Pantalla de abrir

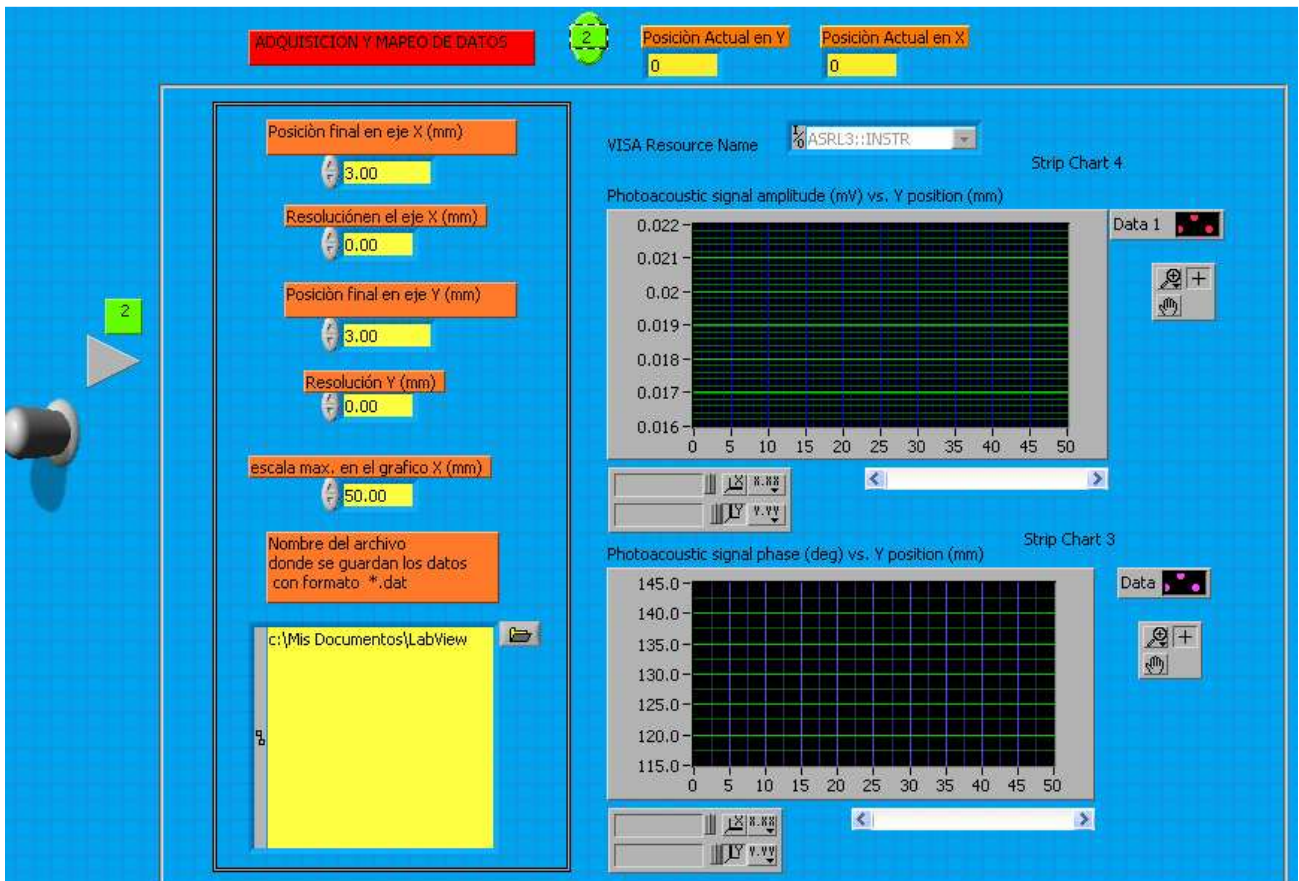
Al momento de abrir con doble click MICROBIDA.VI

La primer pantalla es la de posicionamiento en el punto Home del motor, el sistema tiene marcadas las coordinas de inicio.



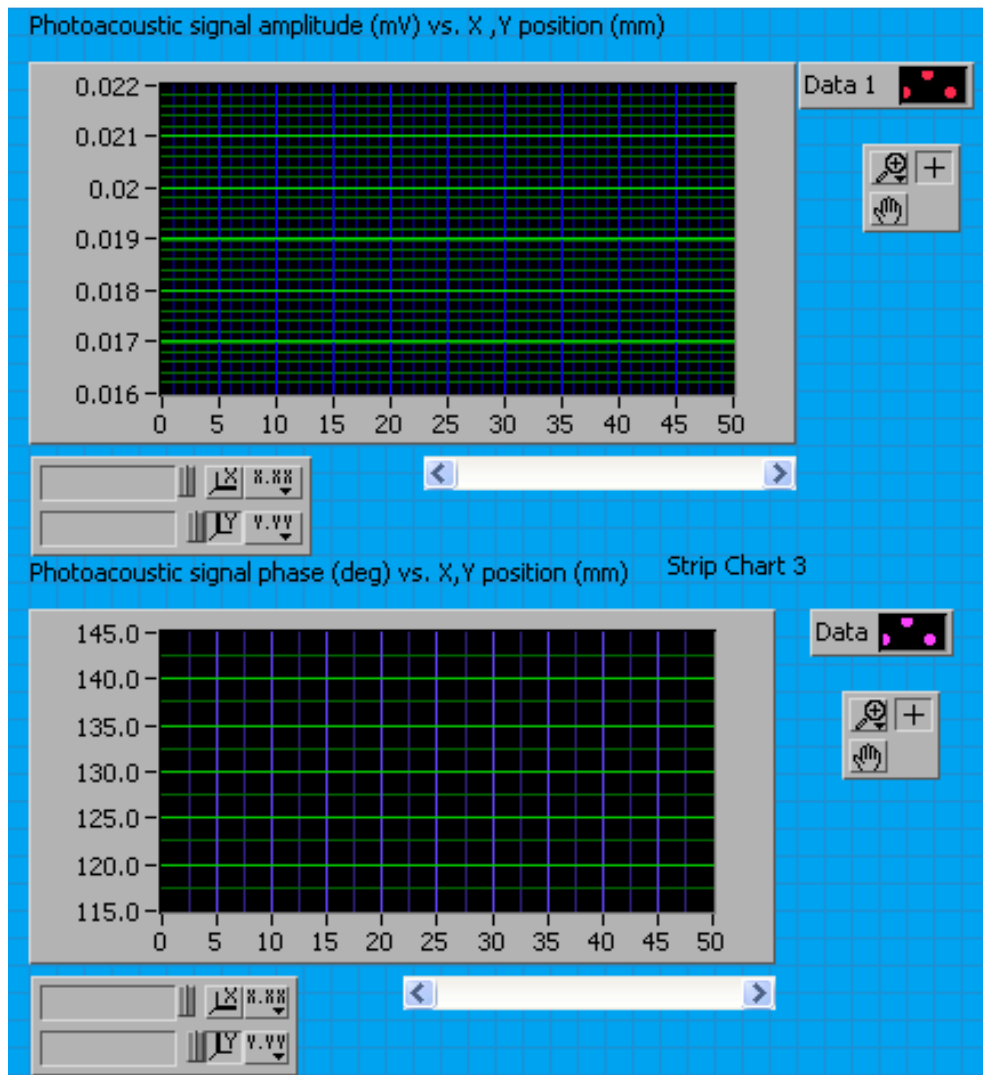
Posicionamiento De Ejes

En la siguiente pantalla se dan las coordenadas finales a nuestra conveniencia de superficie de barrido así como la resolución de nuestra imagen. Así como la ruta de almacenamiento de datos que es en cualquier archivo extensión *.DAT o *.TXT, para que después estos datos sean procesados en cualquier procesador de imágenes por ejemplo ORIGIN



Pantalla principal

PANTALLAS DE GRAFICACIÓN



Estas pantallas son para que durante el escaneo de la muestra se pueda llevar un registro de cómo se comporta en tiempo-real la fase y amplitud de la señal.