



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MICROSCOPIO DE REFLECTIVIDAD MODULADA BASADO EN UN CCD

Tesis

Para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería Eléctrica

Presenta:

Ricardo Castro García

Asesor:

Dr. Luis Felipe Lastras Martínez

Agradecimientos

Agradezco a mis padres el haber depositado su confianza en mí y haberme permitido seguir adelante. A mi asesor de tesis quiero agradecerle el apoyo brindado y su valiosa cooperación para la elaboración de este trabajo. A mis compañeros por toda la colaboración recibida y por todo lo que de ellos he aprendido. A mis amigos por haber estado ahí todo este tiempo. Agradezco también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Facultad de Ingeniería y al Instituto de Investigación en Comunicación Óptica por las facilidades otorgadas para la realización de los estudios de posgrado y el desarrollo de este trabajo. Quiero agradecer a todas aquellas personas no mencionadas aquí que, de una u otra forma, han hecho posible este trabajo.

Resumen

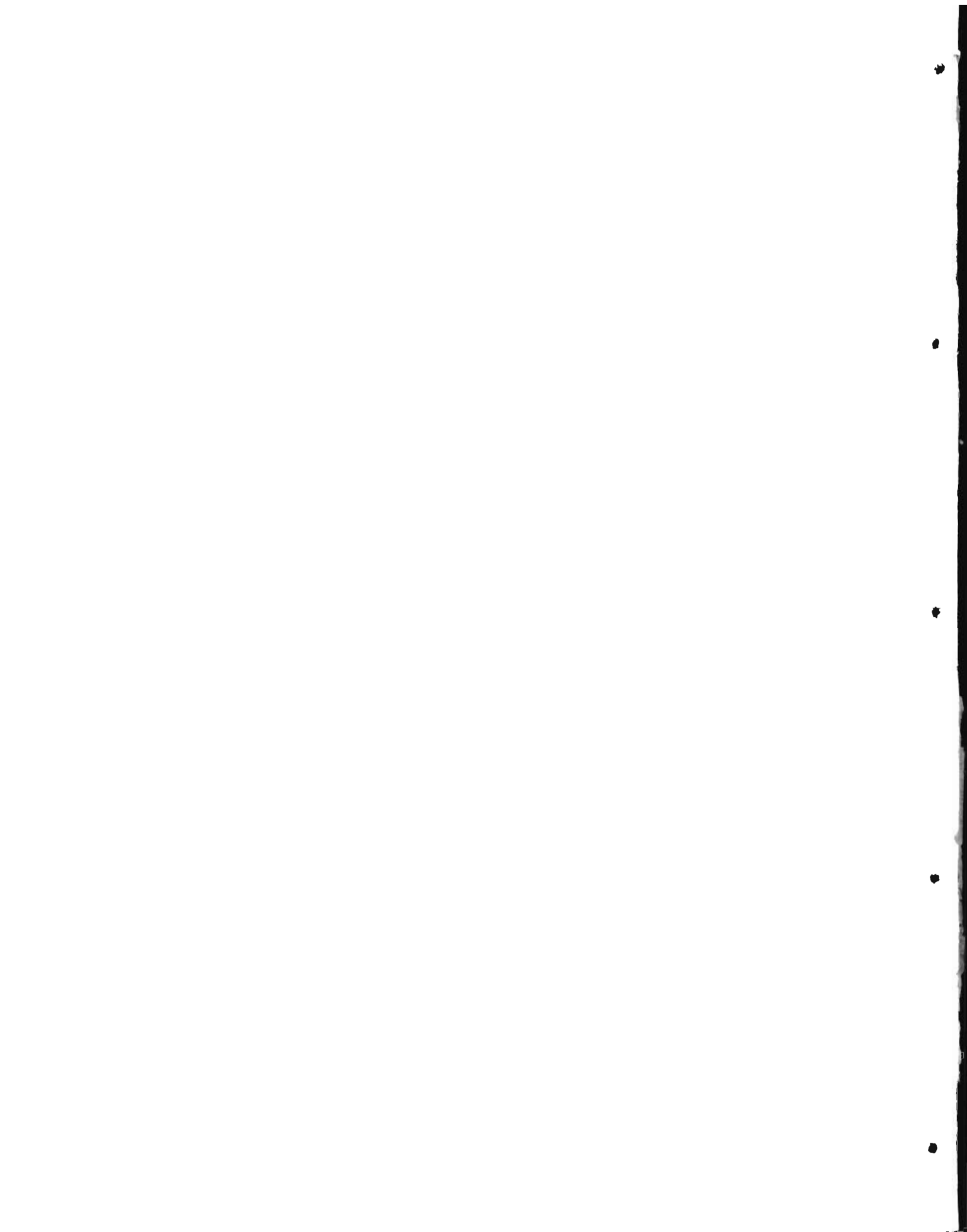
Se plantea la construcción y automatización de un microscopio que utilice la reflexión de luz modulada para la formación de imágenes con un diferente contraste y observar con esto y mediante el uso de un CCD la morfología de la superficie de la muestra bajo estudio. La modulación de la luz incidente en la muestra bajo estudio se hizo por medio de un modulador fotoelástico. La automatización del modulador fotoelástico así como de la adquisición de las imágenes se realizó mediante programación orientada a objetos. Se obtuvieron imágenes de la morfología de una rejilla de difracción. Se observó la morfología de la superficie de muestras con tiras de dieléctrico.

Índice general

Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
1. Introducción	1
2. Dispositivos de Carga Acoplada (CCD)	5
2.1. Fotodetectores	5
2.1.1. Fotodetección	6
2.1.2. Fotocompuerta	7
2.1.3. Fotodiodo	7
2.2. Operación del CCD	7
2.3. Arquitectura del CCD	11
2.3.1. Arreglos Full Frame	11
2.3.2. Arreglos Frame Transfer	12
2.4. Terminología	13
2.4.1. Pixel	13
2.4.2. Frame	13

2.4.3. Readout	13
2.4.4. Binning	13
2.4.5. Dark Current	14
2.4.6. Período de Integración	14
3. Microscopía de reflectividad modulada	15
3.1. Nociones básicas de óptica microscópica	16
3.1.1. Lentes objetivo microscopio y ocular	16
3.1.2. Formación de la imagen de un objeto microscópico	16
3.2. Configuración óptica del microscopio	19
4. Automatización del Microscopio	21
4.1. Componentes del sistema a automatizar	21
4.2. Objetos de Automatización WinX/32	22
4.2.1. Objetos de Experimento	22
4.2.2. Objetos de Procesamiento de Datos	27
4.3. Programación con los Objetos de Automatización	31
4.3.1. Rutina de adquisición de las imágenes	31
4.3.2. Rutina de procesamiento de las imágenes	32
4.4. Programación del Modulador Fotoelástico	36
4.4.1. Rutina de la longitud de onda	36
4.4.2. Rutina de retardo del modulador fotoelástico	38
4.4.3. Inhibición y desinhibición del modulador fotoelástico	39

5. Resultados experimentales y discusión	43
5.1. Rejilla de difracción	43
5.2. Experimento con una rejilla de difracción	45
5.2.1. Obtención de las imágenes de la rejilla	46
5.2.2. Procesamiento aritmético	49
5.3. Muestras con tiras de contacto	54
5.3.1. Construcción de las tiras de contactos	55
5.4. Experimento con tiras de contacto	58
5.4.1. Muestras con tiras de contacto de $50\mu m$	58
5.4.2. Muestras con tiras de contacto de $10\mu m$	60
5.4.3. Muestras con tiras de contacto de $290\mu m$	62
6. Conclusiones	65
Bibliografía	67
A. Listado del programa e interfaz visual	71



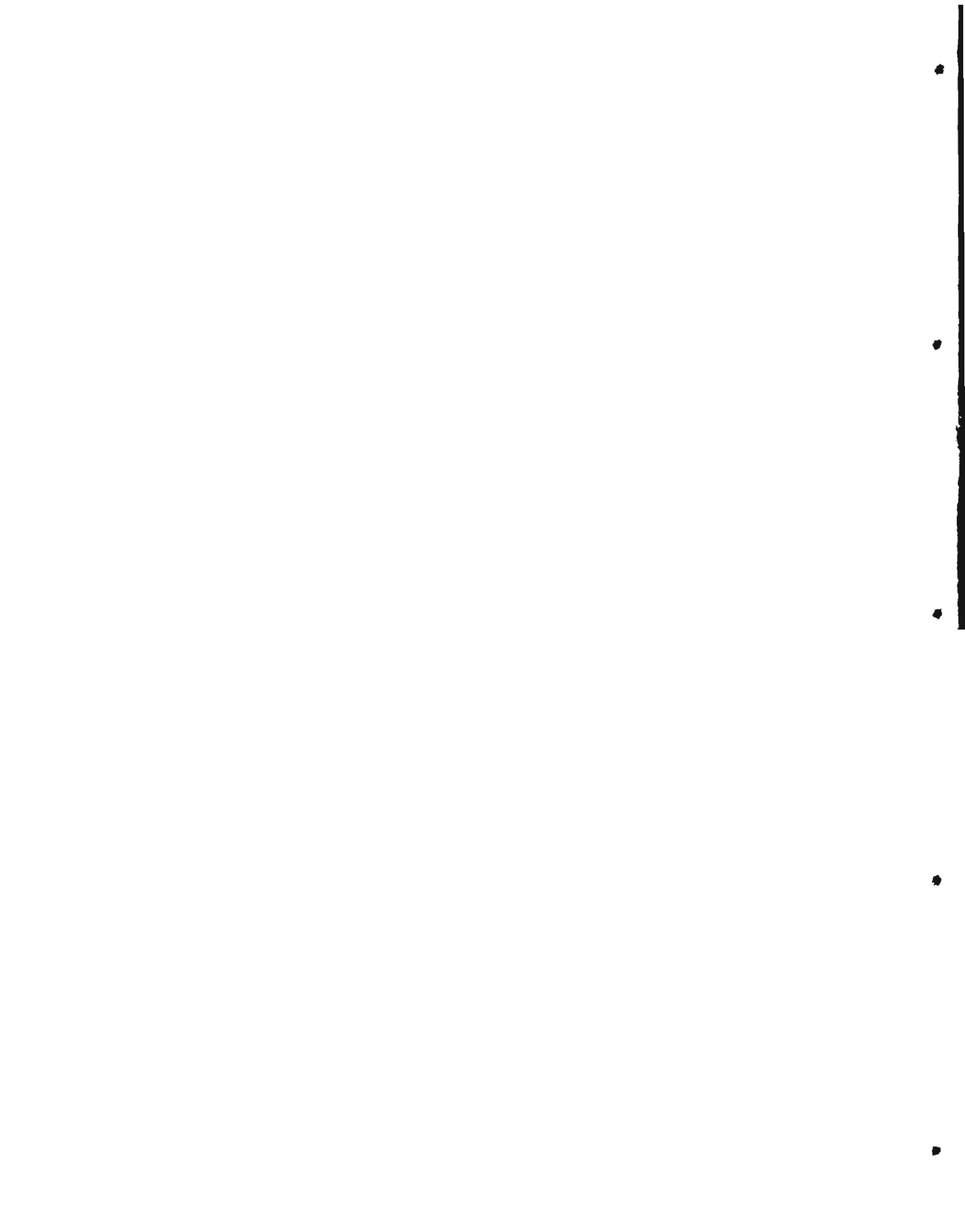
Índice de figuras

2.1. Compuerta MOS tipo p.	8
2.2. CCD de tres fases. Las compuertas deben estar superpuestas para una eficiente transferencia de carga.	8
2.3. Transferencia de carga entre dos pozos.	9
2.4. Representación de la operación de los registros del CCD.	10
2.5. Arquitectura Full Frame.	11
2.6. Arquitectura Frame Transfer.	12
3.1. Formación de la imagen en la lente objetivo.	17
3.2. Formación de la imagen en la lente ocular.	17
3.3. Formación de la imagen con una lente objetivo y una lente ocular	18
3.4. Esquema del sistema construido	19
4.1. Diagrama de conexión	22
5.1. Construcción de una rejilla de difracción.	44
5.2. Rejilla de difracción.	44

5.3. Configuración óptica para la obtención de las imágenes con la rejilla de difracción	45
5.4. Geometría de la rejilla	45
5.5. Rejilla de difracción. PEM desinhibido.	47
5.6. Rejilla de difracción. PEM inhibido.	48
5.7. Rejilla de difracción. Resta de las imágenes.	50
5.8. Rejilla de difracción. Suma de las imágenes.	51
5.9. Rejilla de difracción. División de las imágenes.	53
5.10. Morfología de la muestra.	54
5.11. Perfil de una muestra con tiras de 50 μ m.	58
5.12. Tiras de 50 μ m. Muestra sin deposición de metales	59
5.13. Perfil de una muestra con tiras de 10 μ m.	60
5.14. Tiras de 10 μ m. Muestra con deposición de metales	61
5.15. Perfil de una muestra con tiras de 290 μ m.	62
5.16. Tiras de 290 μ m. Muestra con un motivo negativo y sin deposición de metales	63
A.1. Interfaz de usuario	86

Índice de tablas

4.1. EXP_CMD. Parámetros del objeto ExpSetup.	23
4.2. DM_CMD. Parámetros del objeto DocFile.	26
4.3. PRC_PARAM. Parámetros del objeto ProcMath.	29
4.4. PIDP_IMAGEMATHOPERATION. Operaciones aritméticas.	30



Capítulo 1

Introducción

La espectroscopia de Reflectancia Diferencial (RD) ha mostrado ser una herramienta de gran utilidad en el control y monitoreo de crecimientos por Epitaxia por Haces Moleculares (MBE, por sus siglas en inglés) de materiales y dispositivos semiconductores [1]. Dentro de las principales características que la han hecho una herramienta poderosa en dichos estudios es su relativo bajo costo, su gran sensibilidad a las condiciones superficiales del semiconductor y a que puede ser utilizada tanto en condiciones de ultra alto vacío como a presión atmosférica.

La RD mide la diferencia en reflectividad de la luz incidente sobre el cristal para dos estados con polarizaciones mutuamente perpendiculares [2]. Si el cristal es cúbico (y por tanto isotrópico) la señal de RD deberá de provenir de las regiones en las cuales la simetría del semiconductor se ha perdido. Estas son en general la superficie ó interfaces en el caso de estructuras compuestas de diferentes semiconductores. Debido a lo anterior, la RD se ha convertido en una herramienta de gran utilidad en el estudio de superficies [3] e interfaces [4]. Entre otras aplicaciones podemos contar el estudio de defectos lineales [5], [6], [7], la determinación de propiedades piezo ópticas [8], [9] la medición de campos eléctricos

superficiales[10], y el estudio de tensiones superficiales [11].

La mayoría de las mediciones de espectros RD reportadas hasta ahora, han sido realizadas con luz incidente sobre las caras (110) o (001) tomándose la diferencia en reflectividad para los pares de polarización a lo largo de [001], [-110] y [110], [-110] respectivamente. El tamaño de la mancha de la luz incidente sobre la muestra es en general del orden de 5.0 mm^2 , por lo que la información obtenida del espectro de RD es el promedio de la anisotropía de la muestra en esta área. Por lo general las fuentes físicas que producen las anisotropías tienen un tamaño del orden de las micras o menor. Por ejemplo los defectos lineales o dislocaciones, tienen tamaños medios de algunas micras. Debido a la gran sensibilidad de la técnica de RD a la simetría superficial de un cristal cúbico, existe interés tanto científico como tecnológico, de extenderla a resolución microscópica con el objeto de obtener la respuesta de RD en áreas microscópicas. Es posible obtener resolución microscópica utilizando un dispositivo de carga acoplado (CCD) en lugar de un detector (fototubo o fotodiodo) como en los arreglos experimentales existentes. Iluminando la muestra con una mancha del orden de 2.0 mm^2 de área y utilizando un CCD y un arreglo de microscopio es posible resolver la señal de RD para áreas del orden de micras cuadradas.

En este trabajo se desarrolla la construcción y automatización de un microscopio de reflectividad modulada basado en un CCD. Se presenta el principio de operación básico de un dispositivo de carga acoplada (CCD). La modulación de la reflectividad se realiza mediante un modulador fotoelástico. El utilizar luz modulada nos ayuda a obtener mayor contraste al restar dos imágenes obtenidas con una diferente polarización. Esto nos permite ver detalles en los especímenes estudiados que con un microscopio simple compuesto es difícil observar.

Los objetivos de este trabajo son:

- Construir el microscopio de reflectividad.
- Implementar el CCD al microscopio.
- Automatizar la adquisición de las imágenes con el CCD.
- Automatizar el modulador fotoelástico.

El texto se organiza como sigue: En el próximo capítulo se describe el funcionamiento del CCD. En el capítulo 3 se describen los principios básicos de microscopía. En el capítulo 4 se presentan las funciones para la automatización de la adquisición de las imágenes. En el capítulo 5 se muestran los resultados obtenidos. El capítulo 6 está consagrado a las conclusiones.

Capítulo 2

Dispositivos de Carga Acoplada (CCD)

Los dispositivos de carga acoplada (CCDs por sus siglas en inglés) son arreglos de fotodetectores en un circuito integrado de silicio para convertir luz en forma de fotones a una carga eléctrica. Fueron inventados por Boyle y Smith [12] en 1970 en los Bell Laboratories. Este tipo de dispositivos fueron inicialmente diseñados como dispositivos de almacenamiento de información. Después de su invención se propuso utilizarlos como detectores de imágenes debido a su sensibilidad a la luz, es en este campo donde los dispositivos de carga acoplada han tenido un impacto muy significativo.

2.1. Fotodetectores

CCD se refiere a una arquitectura de dispositivos semiconductores de detección y almacenamiento en los que la carga debido a la interacción de los fotones incidentes en el detector

con átomos de silicio es almacenada y subsecuentemente transferida a través de los registros hacia el amplificador de salida. La arquitectura de un CCD tiene tres funciones básicas:

- La recolección de carga que convierte los fotones incidentes en una carga electrónica.
- Transferencia de carga que mueve los paquetes de carga dentro del sustrato del silicio.
- Conversión de la carga en voltaje y amplificación de la salida.

El CCD está construido básicamente de capacitores semiconductores de metal-óxido MOS por sus siglas en inglés de (Metal-Oxide Semiconductor). El capacitor es llamado compuerta o gate. Mediante la manipulación de los voltajes de compuerta la carga puede ser almacenada o transferida.

En los fotodetectores de silicio, cada fotón absorbido crea un par electrón-hueco. Cualquiera de los electrones o huecos puede ser almacenado o transferido. La carga generada en un pixel es proporcional al nivel de luz incidente. El efecto en conjunto de todos los píxeles es producir una representación muestreada espacialmente de la escena continua.

2.1.1. Fotodetección

Cuando un fotón absorbido crea un par electrón-hueco ocurre el proceso de la fotodetección. Para que el arreglo de detectores de estado sólido sea útil, la carga fotogenerada debe ser guardada en una area de almacenamiento, para posteriormente a la fotodetección, la carga almacenada sea leída

El coeficiente de absorción es específico para una longitud de onda y se reduce conforme se aumenta la longitud de onda. Algunos de los fotones incidentes serán reflejados en la

superficie del arreglo, el remanente puede pasar a través de capas de electrodos y aislantes antes de encontrar la área activa. Por lo tanto el recubrimiento de las capas, el grosor del material fotoactivo y la localización del área de almacenamiento determinan la eficiencia cuántica.

2.1.2. Fotocompuerta

La fotocompuerta es un capacitor MOS fotoactivo donde la carga fotogenerada es almacenada en una región de depleción. La capacidad de almacenamiento depende del dopado del sustrato, el voltaje de compuerta y el grosor del óxido.

2.1.3. Fotodiodo

Una región de depleción es generada entre las regiones n y p. La carga fotogenerada es almacenada en la unión hasta su lectura.

2.2. Operación del CCD

Aplicando un voltaje positivo a la compuerta del CCD ocasiona que el hueco móvil en la región p, emigre hacia el electrodo negativo. Esta región, la cual está vacía de carga positiva, es la región de depleción, figura 2.1. Si la energía de un fotón es mayor que la energía de la banda prohibida, está es absorbida en la región de depleción, esto produce un par electrón-hueco. El electrón permanece dentro de la región de depleción mientras que el hueco se mueve hacia el electrodo de tierra. La cantidad de electrones que pueden ser recolectados por el CCD es proporcional al voltaje aplicado, el grosor del óxido, y a la área del electrodo

de la compuerta. A la cantidad total de electrones que pueden ser almacenados se le llama capacidad del pozo [13].

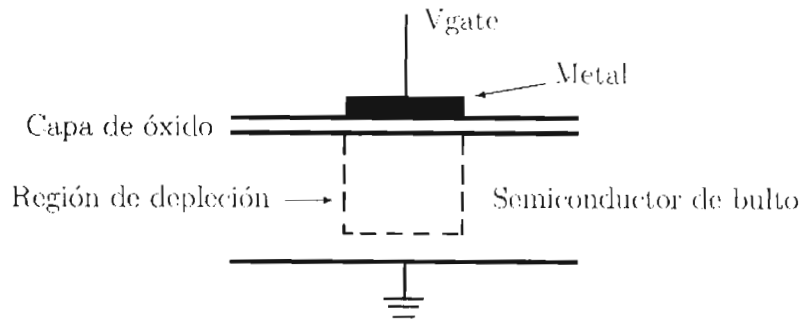


Figura 2.1: Compuerta MOS tipo p.

Los registros del CCD consisten de una serie de compuertas. La manipulación del voltaje de compuerta en una forma secuencial y sistemática transfiere los electrones de una compuerta a la siguiente en modo continuo. Para la transferencia de la carga, las regiones de depleción deben estar superpuestas. Cuando los electrodos de gate están superpuestos se obtiene una eficiente transferencia de carga, figura 2.2.

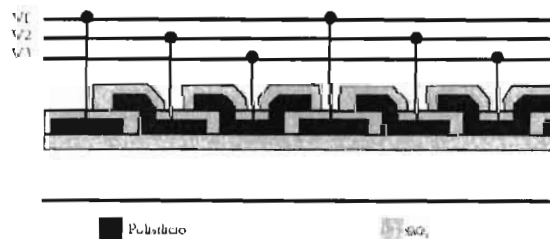


Figura 2.2: CCD de tres fases. Las compuertas deben estar superpuestas para una eficiente transferencia de carga.

Cada compuerta tiene su propio voltaje de control que es una función del tiempo. Este voltaje es llamado señal de reloj. Cuando el voltaje es bajo, actúa como una barrera mientras que cuando el voltaje es alto, la carga puede ser almacenada. Inicialmente se aplica un voltaje a la compuerta 1 y los fotones se recolectan en el pozo 1, figura 2.3b. Cuando se aplica un voltaje a la compuerta 2 los electrones se mueven en cascada al pozo 2, figura 2.3c. Este proceso es muy rápido y la carga se equilibra rápidamente en los dos pozos, figura 2.3d.

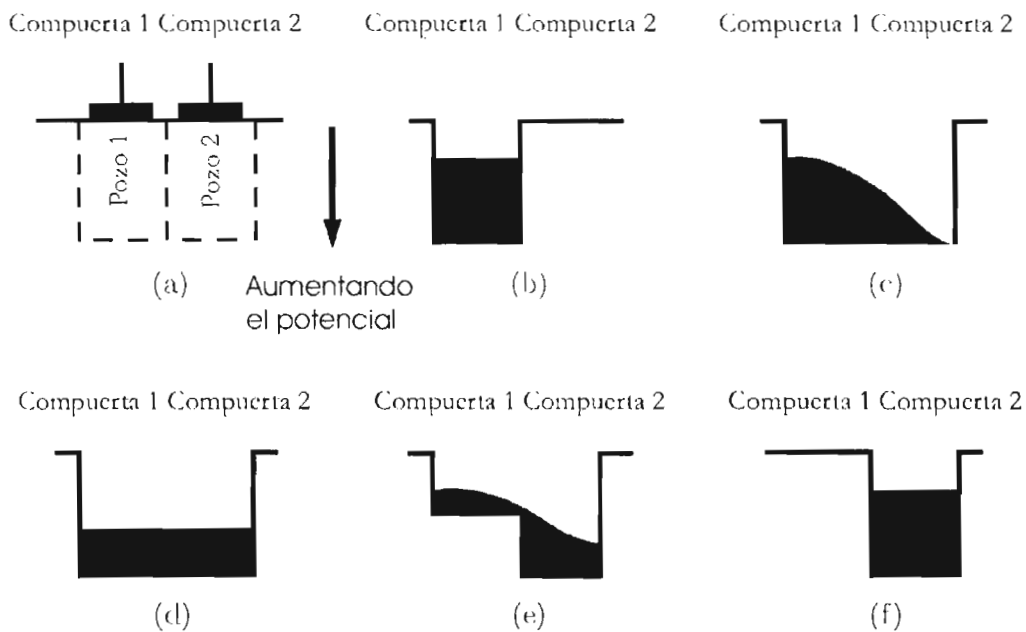


Figura 2.3: *Transferencia de carga entre dos pozos.*

Conforme el voltaje se reduce en la compuerta 1, el potencial del pozo se reduce y los electrones vuelven a fluir en forma de cascada hacia el pozo 2, figura 2.3e. Finalmente cuando el voltaje de la compuerta 1 es cero, todos los electrones se encuentran en el pozo 2, figura 2.3f. Este proceso se repite muchas veces hasta que la carga es transferida a través del registro de corrimiento hacia el amplificador de salida.

EL arreglo de un CCD es una serie registros en columna, figura 2.4. La carga es mantenida dentro de renglones o columnas mediante el bloqueo del canal y las regiones de depleción se superponen únicamente en una dirección. Al final de cada columna hay una registro horizontal de píxeles. Este registro recolecta una línea a la vez y después transporta los paquetes de carga en forma serial a un amplificador de salida. Todo el registro horizontal debe ser serializado en un pulso de reloj antes de que la próxima línea entre al registro serial. Por lo tanto se requiere de dos señales de reloj distintas una para el registro horizontal y otra para el registro vertical. Este Proceso crea un flujo de datos serial que representan una imagen en dos dimensiones.

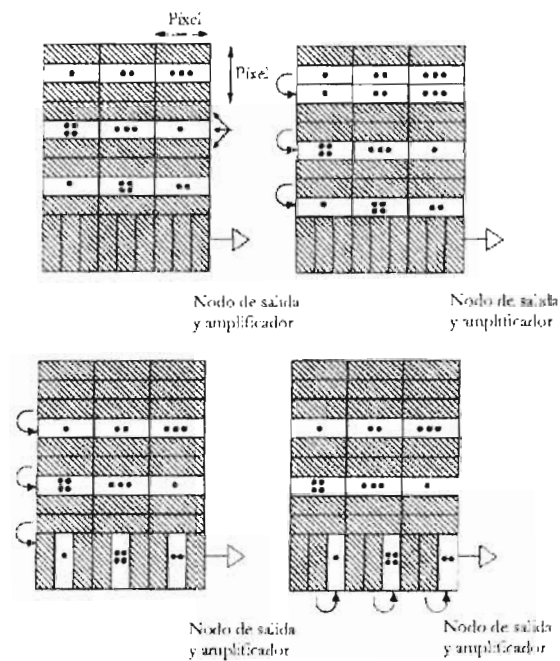


Figura 2.4: Representación de la operación de los registros del CCD.

2.3. Arquitectura del CCD

El tipo de arquitectura de los arreglos CCD se maneja en base a la aplicación para la que van a ser usados. Para aplicaciones científicas se tiende a usar arreglos del tipo full frame y frame transfer.

2.3.1. Arreglos Full Frame

En este tipo de arreglos, después del periodo de integración los píxeles de la imagen son leídos línea por línea a través del registro serial que después envía su contenido a el amplificador de salida, figura 2.5. En arreglos Full frame, el número de píxeles son potencias de 2 (por ejemplo 512x512, 1024x1024), esto para simplificar el mapeo de memoria. Esto simplifica también los algoritmos de procesamiento.

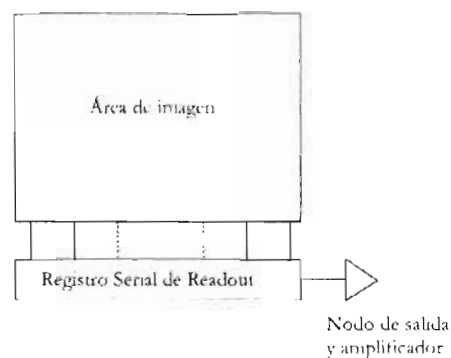


Figura 2.5: *Arquitectura Full Frame.*

2.3.2. Arreglos Frame Transfer

Los arreglos Frame Transfer consisten de 2 arreglos idénticos, un arreglo de píxeles exclusivo para la imagen, y uno para almacenar la imagen, figura 2.6. las celdas de almacenamiento son idénticas a las celdas sensibles a la luz pero son cubiertas con un escudo metálico, esto para prevenir cualquier exposición a la luz. Después del periodo de integración la carga es transferida rápidamente de la área sensible a la luz a la área de almacenamiento.

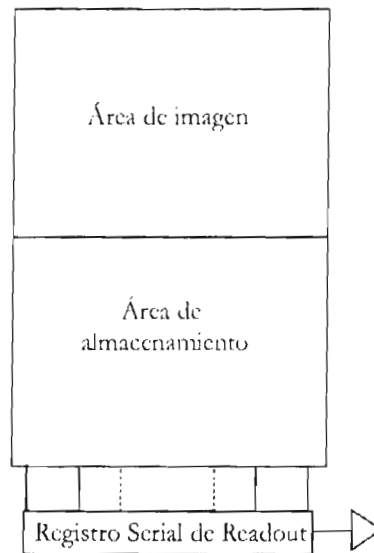


Figura 2.6: *Arquitectura Frame Transfer.*

2.4. Terminología

Cabe señalar que la terminología usada en los dispositivos de carga acoplada se maneja en inglés, es por eso que aquí se maneja de la misma forma.

2.4.1. Pixel

Pixel proviene de la contracción de las palabras en inglés picture element. Tiene la capacidad de recolectar carga fotogenerada. El pixel es el tamaño mínimo de la muestra de una imagen. Los fotodiodos y fotocapacitores son dos tipos de píxeles.

2.4.2. Frame

Se le llama frame una imagen de una escena continua detectada por el CCD expuesta un determinado tiempo.

2.4.3. Readout

Se define como el inverso del tiempo de la conversión serial. Esto es, el tiempo para digitalizar un pixel sencillo.

2.4.4. Binning

Es el proceso de combinar carga de pixeles adyacentes en el CCD durante el readout.

2.4.5. Dark Current

Es una corriente generada por la energía térmica dentro de la red de silicio que conforma al CCD. Estos electrones no son generados por la luz incidente en el detector. El ruido térmico generado es capturado por los pozos y contados como señal. Adicionalmente este incremento en la señal genera también una variación estadística conocida como dark current noise.

2.4.5.1. Dark Current Noise

Es la variación estadística de la especificación Dark Current. Este ruido sigue una distribución de Poisson.

2.4.6. Período de Integración

Es el tiempo total que el detector se encuentra expuesto a la luz incidente. Detectores con shutter electrónico tienen tiempos mucho menores a los tiempos de integración sin este dispositivo.

Capítulo 3

Microscopía de reflectividad modulada

El microscopio es un instrumento que permite ver objetos extremadamente pequeños o invisibles a simple vista y estudiar su forma y estructura. Tomando como base la idea fundamental del microscopio se diseña un microscopio de reflectividad modulada. Este microscopio utiliza luz polarizada que se hace pasar por un modulador fotoelástico (PEM por sus siglas en inglés), para obtener así un haz de luz modulada. La reflectividad de la muestra bajo estudio es entonces modulada, esta es detectada por un CCD para obtener con ello una imagen que tenga variación en su contraste debido a la incidencia de un haz de Luz polarizada y modulada o un haz de Luz únicamente polarizada.

3.1. Nociones básicas de óptica microscópica

Los fenómenos de refracción que ocurren en las lentes de un microscopio se pueden analizar de forma sencilla. Tomemos por ejemplo una lente biconvexa y un objeto, la imagen de éste a través de la lente variará según este más o menos lejos de ella.

3.1.1. Lentes objetivo microscopio y ocular

3.1.1.1. Lentes objetivos microscopios

Cuando el objeto se encuentra un poco más allá del foco de la lente la imagen obtenida será real, invertida y tanto mayor cuanto el objeto esté más cerca del foco.

3.1.1.2. Lentes oculares

Cuando el objeto se encuentra colocado entre la lente y el foco de la lente ocular, la imagen será virtual, derecha y tanto más pequeña cuanto el objeto se encuentre más próximo a la lente.

3.1.2. Formación de la imagen de un objeto microscópico

En el caso de la lente objetivo microscopio, la formación de la imagen se explica con la figura 3.1. El objeto AB se encuentra colocado un poco más allá de del foco F de una lente biconvexa. El rayo AE paralelo al eje óptico se refracta pasando por el foco F' y continúa su trayecto hasta el punto A' , en donde se encuentra al rayo AC que, pasando por el centro de la lente no se ha refractado. Todos los rayos que parten del punto A se reúnen en el punto A' , para dar la imagen del punto A . De igual forma el rayo BG paralelo al eje óptico se refracta

pasando por el foco F' y continúa su trayecto hasta el punto B' , en donde se encuentra al rayo BC que, pasando por el centro de la lente no se ha refractado. Todos los rayos que parten del punto B se reúnen en el punto B' , para dar la imagen del punto B .

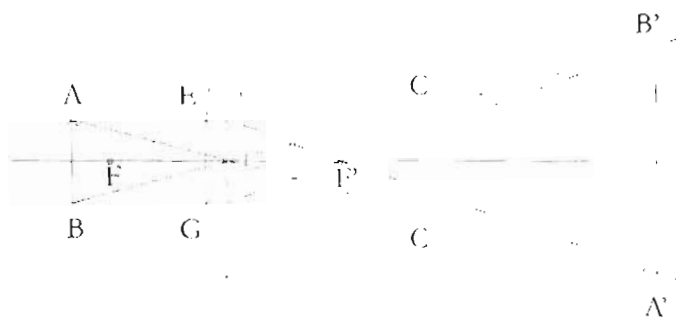


Figura 3.1: *Formación de la imagen en la lente objetivo.*

Tratando ahora la lente ocular, figura 3.2. El objeto AB se encuentra colocado entre el foco F de la lente y ésta. De entre los rayos emitidos por el objeto, el rayo AE se refracta y pasan por el foco F' , asimismo ocurre con el rayo BG en tanto que los otros, AC y BC , no se refractan, sino que continúan su trayectoria rectilínea pasando por el centro de la lente sin converger con los rayos refractados para formar una imagen real. Esta imagen se forma atrás del objeto esto hace parecer que los rayos convergen hacia atrás.

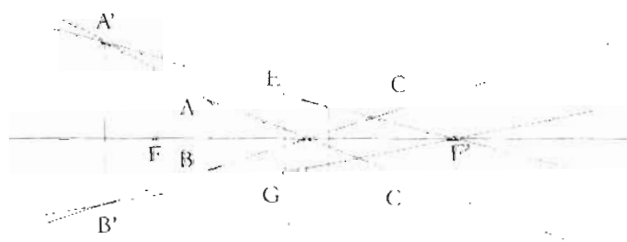


Figura 3.2: *Formación de la imagen en la lente ocular.*

La figura 3.3 nos facilitará comprender la formación de las imágenes en un sistema óptico con lente objetivo y ocular. Sea Ob la lente objetivo y Oc la lente ocular, AB el objeto que vamos a examinar. La lente objetivo dará una imagen real, aumentada e invertida $A'B'$ que se formará exactamente entre el foco F de la lente ocular y está. La lente ocular formara ahora una imagen $A''B''$ virtual, derecha y ampliada.

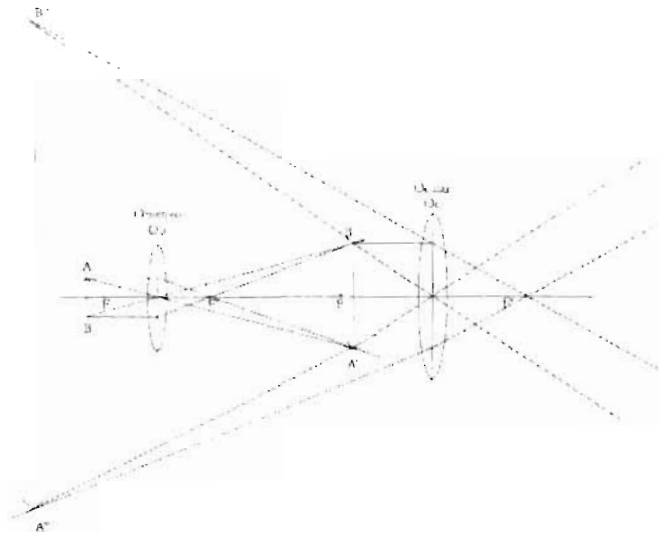


Figura 3.3: Formación de la imagen con una lente objetivo y una lente ocular

3.2. Configuración óptica del microscopio

El arreglo experimental del microscopio de reflectividad modulada construido emplea una fuente de luz monocromática proveniente de un láser He-Ne. El haz de luz monocromático se hace pasar a través de un prisma polarizador lineal tipo Rochon puesto a 45° respecto al plano de incidencia y un modulador fotoelástico (Hinds Instruments, modelo PEM-90), incidiendo después en la superficie de la muestra con un ángulo de aproximadamente 35° . La Luz reflejada modulada es enfocada en el CCD (Roper Scientific, modelo Versarray) con una lente objetivo que puede tener un poder de magnificación de 10x, 20x ó 40x y una lente ocular de una longitud focal de 10 cm. Un esquema del sistema se muestra en la figura 3.4.

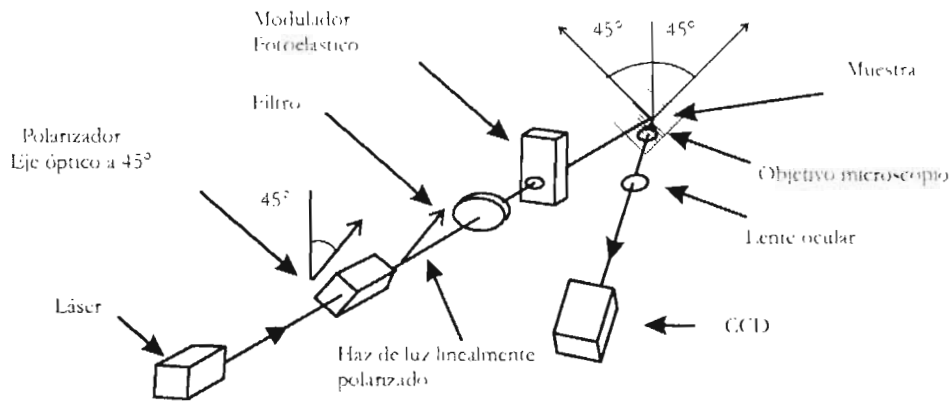


Figura 3.4: Esquema del sistema construido

Capítulo 4

Automatización del Microscopio

La automatización del microscopio de reflectividad requiere controlar la adquisición de las imágenes con el CCD en dos estados diferentes del modulador fotoelástico (PEM), cuando el PEM se encuentra activo y con un retardo determinado y cuando el PEM se inhibe, para posteriormente obtener la razón $\frac{I_{off} - I_{on}}{I_{off} + I_{on}}$.

4.1. Componentes del sistema a automatizar

El sistema a automatizar se compone del siguiente equipo:

- Controlador ST-133A
- PEM-90 Photoelastic Modulator System

El controlador ST-133A establece la comunicación con el CCD, y la tarjeta **TAXI**: Princeton instruments (RSPI) High Speed PCI Interface Board, se encarga de comunicar a la PC y el controlador. Se muestra un diagrama de conexión del sistema [14] en la figura 4.1

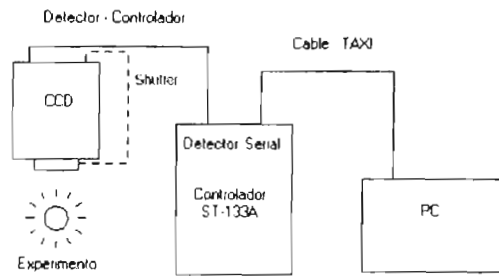


Figura 4.1: *Diagrama de conexión*

4.2. Objetos de Automatización WinX/32

La programación para controlar la adquisición de imágenes se realiza mediante WinX/32 Automation 3.1 [15]. Este sistema provee un camino sencillo para controlar Winview/32 mediante el uso de objetos de automatización, los programas para controlar la aplicación Winview/32 se escriben en Visual Basic.

4.2.1. Objetos de Experimento

Objetos que controlan los parámetros de un experimento, así como la adquisición de datos.

4.2.1.1. Objeto ExpSetup

Función GetParam

Obtiene un parámetro del controlador, la lista de parámetros que se pueden leer se encuentran listados en la tabla 4.1 (EXP_CMD).

Sintaxis:

```
Function GetParam(Param As enum EXP_CMD, result As Integer) As Any
```

Función SetParam

Pone un parámetro con el que se desea se realice el experimento. Los parámetros que se pueden programar se encuentran listados en la tabla 4.1 (EXP_CMD).

Sintaxis:

```
Function SetParam(Param As enum EXP_CMD, Value As Any) As Integer
```

Tabla 4.1: EXP_CMD. Parámetros del objeto ExpSetup.

Nombre del parámetro	Set	Get	Descripción
EXP_ACCUMS	✓	✓	Número de acumulaciones de frames
EXP_EXPOSURE	✓	✓	Tiempo de exposición
EXP_NUM_OF_STRIPS_PER_CLN	✓	✓	Número de strips a limpiar
EXP_FORCE_PP_INIT	✓	✓	Inicializa el controlador
EXP_FORCE_PP_INIT	✓	✓	Inicializa el controlador

Función GetDocument

Regresa un puntero a un objeto de tipo DocFile. Sí el valor regresado no esta vacío el archivo de datos es asociado con la actual o la última colección de datos.

Sintaxis:

```
Function GetDocument() AsDocFile
```

Función Start

Comienzo de la adquisición de todas las frames del experimento. Al finalizar la adquisición se detiene.

Sintaxis:

```
Function Start(File As DocFile) As Boolean
```

Función Stop

Detiene la adquisición de datos. Un valor de regreso indica que la adquisición estaba en progreso antes de que la función fuera llamada.

Sintaxis:

```
Function Stop() As Boolean
```

Función GetROI

Lee el valor de la Región de Interés ROI del Detector.

Sintaxis:

```
Function GetROI(index As Integer) As ROIrect
```

Función SetROI

Pone una región de interés del Detector.

Sintaxis:

```
Function SetROI(Rect As ROIrect) As Boolean
```

Función WaitForExperiment

Espera por cualquier colección de datos pendiente.

Sintaxis:

```
Function WaitForExperiment As Boolean
```

4.2.1.2. Objeto DocFile

Este objeto representa un archivo de datos de WinX/32. Además de crear uno puede ser recuperado a través de los siguientes objetos: ExpSetup, DocWindows.

Función Open

Obtiene un puntero para abrir un documento. Si se aplica un nombre al primer parámetro entonces se regresa un puntero al documento abierto o un documento es abierto del disco.

Sintaxis:

```
Function Open(Name As String [, xLen As Integer, yLen As Integer,  
zLen As Integer, datatype As Long, newName As String]) As Boolean
```

Función GetParam

Permite obtener parámetros del documento (strips, frames etc.). Los parámetros que se pueden leer vienen listados en la tabla 4.2 (DM_CMD).

Sintaxis:

```
Function GetParam(Param As enum DM_CMD, result As Integer) As Any
```

Función SetParam

Permite poner parámetros del documento (strips, frames etc.). Los parámetros que se pueden programar vienen listados en la tabla 4.2 (DM_CMD).

Sintaxis:

```
Function SetParam(Param As enum DM_CMD, Value As Any) As Integer
```

Tabla 4.2: DM_CMD. Parámetros del objeto DocFile.

Nombre del parámetro	Descripción
DM_CLEANS	Limpia el documento al inicio de la adquisición
DM_NUMEXPREPEATS	Numero de veces a repetir un experimento
DM_XDIM	Dimensión en X del dato actual
DM_YDIM	Dimensión en Y del dato actual
DM_XDIMDET	Dimensión en X del detector
DM_YDIMDET	Dimensión en Y del detector

Función Save

Guarda los datos en el documento con el nombre de archivo actual.

Sintaxis:

```
Function Save() As Boolean
```

Función SaveAs

Guarda los datos en el documento con un nuevo nombre de archivo y un nuevo tipo de archivo. Los valores válidos vienen enumerados por nType que esta localizado en el DocType enum.

Sintaxis:

```
Function SaveAs(Name As String, nType As Long) As Boolean
```

Función Close

Cierra todas las ventanas asociadas con este documento y cierra el archivo. Si el documento está sin guardar se le pedirá al usuario que lo guarde antes de cerrar.

Sintaxis:

```
Function Close() As Boolean
```

4.2.2. Objetos de Procesamiento de Datos

Estos objetos permiten el procesamiento de los datos obtenidos por el CCD. Básicamente existen dos tipos de procesos, los aritméticos/lógicos y los no aritméticos/lógicos. Todas las funciones de procesamiento de datos requieren que se configuren los archivos de datos a los que se les va a aplicar un procesamiento como archivos de entrada, y se configure también la salida ya procesada.

4.2.2.1. Configuración de los datos de entrada (Input)

Todos los objetos de procesamiento requieren al menos un archivo de entrada para operar sobre él. Los datos de entrada pueden definirse como archivos de datos o como constantes.

4.2.2.2. Objeto ProcInput

Este Objeto nos permite configurar los datos como entrada.

Método Sub GetFromDoc

Inicializa como entrada usando un objeto DocFile. Este método es implementado por el objeto ProcInput.

Sintaxis:

```
Sub GetFromDoc(pDocFile As DocFile)
```

4.2.2.3. Configuración de la salida (Output)

Todos los objetos de procesamiento de datos producen una salida como resultado del proceso. Se requiere configurar la salida para definir cómo se van a presentar los resultados del proceso.

4.2.2.4. Objeto ProcMath

Este objeto nos permite indicar que el procedimiento que se va a realizar sobre el archivo de entrada es un procedimiento matemático.

Función GetProcParam

Esta función obtiene los parámetros generales del archivo de salida. Los parámetros que se pueden obtener encuentran listados en la tabla 4.3 (PRC_PARAM).

Sintaxis:

```
Function GetProcParam(Param As PRC_PARAM, optional pRes As  
PROCERR) As Any
```

Función SetProcParam

Esta función configura los parámetros generales del archivo de salida. Los parámetros que se pueden configurar se encuentran listados en la tabla 4.3 (PRC_PARAM).

Sintaxis:

```
Function SetProcParam(Param As PRC_PARAM, vSetVal As Any) As  
PROCERR
```

Tabla 4.3: PRC_PARAM. Parámetros del objeto ProcMath.

Nombre del parámetro	Descripción
PRC_AUTOSAVE	Opciones de guardado del archivo
PRC_DISPLAYOUTPUT	Desplegar el resultado
PRC_RUNNING	Proceso ejecutandose

4.2.2.5. Ejecución de un procedimiento Aritmético

Después de configurar la entrada y salida debemos ejecutar el procedimiento matemático deseado, que actuará sobre la entrada o entradas configuradas.

Función Run

Esta función ejecuta un proceso aritmético como la adición la resta la multiplicación y la división.

Sintaxis:

```
Function Run(pInputA As ProcInput, pInputB As ProcInput, eOp As  
PIDP_IMAGEMATHOPERATION, szOutput As String, eOutType As dataType,  
optional pResult As PROCERR) As DocFile
```

Las entradas son configuradas con pInputA y pInputB. El parámetro eOp determina si es una operación aritmética o lógica. El nombre del archivo de salida y el tipo esta determinado por szOutput y eOutType. Las operaciones aritméticas disponibles vienen listadas en la tabla 4.4 (PIDP_IMAGEMATHOPERATION).

Tabla 4.4: PIDP_IMAGEMATHOPERATION. Operaciones aritméticas.

Operación aritmética	Descripción
IMAGEMATH_ADDITION	Suma dos entradas
IMAGEMATH_SUBTRACTION	Resta dos entradas
IMAGEMATH_DIVISION	Divide dos entradas

4.3. Programación con los Objetos de Automatización

Para llevar a cabo las tareas de adquisición y procesamiento en forma automática de las imágenes con el CCD, se hace uso de los objetos de automatización descritos en la sección anterior.

4.3.1. Rutina de adquisición de las imágenes

Esta rutina adquiere automáticamente una imagen. Permite establecer el nombre del experimento, tiempo de exposición, así como el número de acumulaciones. El listado 4.1 muestra la rutina de programación para la adquisición de la imagen.

Listado 4.1: Adquisición de la imagen

```
Private Sub Ipemon()  
  
Dim udtExp As New ExpSetup  
  
Dim udtDoc As New DocFile  
  
mdbExp = Val(udtExp.Text)  
  
udtAccum = Val(udtAccum.Text)  
  
Call udtExp.SetParam(EXP_FORCE_PP_INIT, 1)  
  
Call udtExp.SetParam(EXP_EXPOSURE, mdbExp)  
  
Call udtExp.SetParam(EXP_ACCUMS, udtAccum)  
  
Call udtExp.SetParam(EXP_NUMBER_OF_CLEANS, 1)  
  
Call udtExp.SetParam(EXP_NUM_OF_STRIP_PER_CLN, 512)  
  
Call udtDoc.SetParam(DM_CLEANS, 2)  
  
Call udtExp.Start(udtDoc)
```

```

Call udtExp.WaitForExperiment
strNombre = NombreExp.Text
Call udtDoc.SaveAs(strNombre + "on", dt_SPE)
End Sub

```

La rutina anterior se usa en dos ocasiones, la primera vez adquiere una imagen con el modulador fotoelástico desinhibido, es decir I_{pemon} . El nombre genérico I_{pemon} se cambia de acuerdo al nombre del experimento, se le añade por software la terminación *on*. La segunda vez que se utiliza la rutina de adquisición, se obtiene una imagen con el modulador fotoelástico inhibido, es decir $I_{pemooff}$. El nombre genérico $I_{pemooff}$ se cambia de acuerdo al nombre del experimento, se le añade por software la terminación *off*.

4.3.2. Rutina de procesamiento de las imágenes

Una vez adquiridas las imágenes se realizan operaciones aritméticas con ellas, para obtener la razón con la que se define el contraste, $\frac{I_{off}-I_{on}}{I_{off}+I_{on}}$.

4.3.2.1. Obtención de la resta

La resta de las imágenes se realiza pixel a pixel con las obtenidas nombradas $I_{pemooff}$ e I_{pemon} . Se implementa una subrutina de programación para obtener esta resta automáticamente. El listado 4.2 muestra la rutina programada.

Listado 4.2: Subrutina para la obtención de la resta

```
Sub resta ()  
  
Dim udtDoc As New DocFile  
  
Dim udt2Doc As New DocFile  
  
udtDoc.Open strNombre + ".spe"  
  
Dim udtInputA As New ProcInput  
Call udtInputA.GetFromDoc(udtDoc)  
  
udt2Doc.Open strNombre + ".on.spe"  
  
Dim udtInputB As New ProcInput  
Call udtInputB.GetFromDoc(udt2Doc)  
  
Dim udtArith As New ProcMath  
  
udtArith.SetProcParam PRC_DISPLAYOUTPUT, True  
  
Dim udtOutput As DocFile  
  
Set udtOutput = udtArith.Run(udtInputA, udtInputB,  
                             IMAGEMATHSUBTRACTION, strNombre + ".res", XFLOAT)  
  
Call udtOutput.Save  
  
End Sub
```

4.3.2.2. Obtención de la suma

La suma de las imágenes se realiza pixel a pixel con las obtenidas nombradas $I_{pemo\text{ff}}$ e I_{pemon} . Se implementa una subrutina de programación para obtener esta suma automáticamente. El listado 4.3 muestra la rutina programada.

Listado 4.3: Subrutina para la obtención de la suma

```
Sub suma()  
  
Dim udtDoc As New DocFile  
  
Dim udt2Doc As New DocFile  
  
udtDoc.Open strNombre + ".spe"  
  
Dim udtInputA As New ProcInput  
  
Call udtInputA.GetFromDoc(udtDoc)  
  
udt2Doc.Open strNombre + ".on.spe"  
  
Dim udtInputB As New ProcInput  
  
Call udtInputB.GetFromDoc(udt2Doc)  
  
Dim udtArith As New ProcMath  
  
udtArith.SetProcParam PRC_DISPLAYOUTPUT, True  
  
Dim udtOutput As DocFile  
  
Set udtOutput = udtArith.Run(udtInputA, udtInputB,  
                             IMAGE_MATH_ADDITION, strNombre + ".sum", X_FLOAT)  
  
Call udtOutput.Save  
  
End Sub
```

4.3.2.3. Obtención de la división

La división se realiza pixel a pixel con el resultado obtenido de la resta y la suma. Se implementa una subrutina de programación para obtener esta división automáticamente. El listado 4.4 muestra la subrutina programada.

Listado 4.4: Subrutina para la obtención de la división

```
Sub division()  
Dim udtDoc As New DocFile  
Dim udt2Doc As New DocFile  
udtDoc.Open strNombre + ".res.spe"  
Dim udtInputA As New ProcInput  
Call udtInputA.GetFromDoc(udtDoc)  
udt2Doc.Open strNombre + ".sum.spe"  
Dim udtInputB As New ProcInput  
Call udtInputB.GetFromDoc(udt2Doc)  
Dim udtArith As New ProcMath  
udtArith.SetProcParam PRC_DISPLAYOUTPUT, True  
Dim udtOutput As DocFile  
Set udtOutput = udtArith.Run(udtInputA, udtInputB,  
    IMAGE_MATH_DIVISION, strNombre + ".div", X_FLOAT)  
Call udtOutput.Save  
End Sub
```

4.4. Programación del Modulador Fotoelástico

Este dispositivo se programa via el puerto RS-232. Los parámetros que se pueden programar de este dispositivo son: el retardo que puede variar de 0 a 360 grados y la longitud de onda a la cual se va a trabajar. Se puede también inhibir y desinhibir su funcionamiento mediante software [16].

4.4.1. Rutina de la longitud de onda

Para programar la longitud de onda a la que se desea trabajar es necesario enviarle al controlador del modulador fotoelástico un comando con el siguiente formato:

W:nnnnnn

En donde n indica que es necesario un valor numérico. Al terminar el comando es necesario enviar un carácter de retorno de carro. El listado 4.5 muestra la subrutina de programación para la longitud de onda deseada.

Listado 4.5: Rutina para programar la longitud de onda

```
Private Sub longitud_onda(strLongOnd)
On Error Resume Next
MSComm1.Output = Chr$(87) & "W"
Call retardo
MSComm1.Output = Chr$(58) & " ":
Call retardo
MSComm1.Output = Mid$(strLongOnd, 1, 1)
```

```
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strLongOnd, 2, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strLongOnd, 3, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strLongOnd, 4, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strLongOnd, 5, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strLongOnd, 6, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Chr$(13) 'CR
Call retardo
If Err Then
    MsgBox "Error al enviar el dato"
    Exit Sub
End If
End Sub
```


4.4.2. Rutina de retardo del modulador fotoelástico

Para programar el retardo al que se desea trabajar es necesario enviarle al controlador del modulador fotoelástico un comando con el siguiente formato:

R:nnnn

En donde n indica que es necesario un valor numérico. Al terminar el comando es necesario enviar un carácter de retorno de carro. El listado 4.6 muestra la rutina de programación para el retardo del modulador.

Listado 4.6: Rutina para programar el retardo del modulador fotoelástico

```
Private Sub retardo_onda(strRetar)
On Error Resume Next
MSComml.Output = Chr$(82) 'R
Call retardo
MSComml.Output = Chr$(58) ':'
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strRetar, 1, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strRetar, 2, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strRetar, 3, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strRetar, 4, 1)
Call retardo
```

```

MSComm1.Output = Chr$(13) 'CR
Call retardo
If Err Then
    MsgBox "Error al enviar el dato"
    Exit Sub
End If
End Sub

```

4.4.3. Inhibición y desinhibición del modulador fotoelástico

La inhibición y desinhibición del modulador fotoelástico puede realizarse mediante software. Para realizar esto es necesario enviarle al controlador del modulador fotoelástico un comando con el siguiente formato:

I:1

Para inhibir y

I:0

Para desinhibir.

Al terminar el comando es necesario enviar un carácter de retorno de carro.

El listado 4.7 muestra la rutina de programación para inhibir el modulador fotoelástico.

Listado 4.7: Rutina de Inhibición del modulador fotoelástico

```
Private Sub Inhibir_pem()  
On Error Resume Next  
MSComm1.Output = Chr$(73) 'I  
Call retardo  
MSComm1.Output = Chr$(58) ':  
Call retardo  
MSComm1.Output = Chr$(49) 'I  
Call retardo  
MSComm1.Output = Chr$(13) 'CR  
If Err Then  
    MsgBox "Error al enviar el dato"  
    Exit Sub  
End If  
End Sub
```

El listado 4.8 muestra la rutina de programación para desinhibir el modulador fotoelástico.

Listado 4.8: Rutina de desinhibición del modulador fotoelástico

```
Private Sub Desinhibir_pem()  
On Error Resume Next  
MSComml.Output = Chr$(73) 'I  
Call retardo  
MSComml.Output = Chr$(58) ':  
Call retardo  
MSComml.Output = Chr$(48) '0  
Call retardo  
MSComml.Output = Chr$(13) 'CR  
If Err Then  
    MsgBox "Error al enviar el dato"  
    Exit Sub  
End If  
End Sub
```


Capítulo 5

Resultados experimentales y discusión

Se presentan los resultados obtenidos con el microscopio de reflectividad modulada basado en un CCD. Se muestran imágenes obtenidas de una rejilla de difracción así como de una muestra con tiras de contacto fabricada en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica [17].

5.1. Rejilla de difracción

Una rejilla de difracción es un dispositivo óptico utilizado para la separación de líneas espectrales, este actúa como un super prisma separando mucho mejor las líneas espectrales o colores que un prisma. Las rejillas de difracción son utilizadas en los monocromadores, Estos dispositivo tiene la función de que, al entrar luz blanca y valiéndose de las rejillas de difracción se tendrá en la salida una línea espectral o color seleccionado.

Las rejillas de difracción se construyen sobre una capa de sustrato (generalmente vidrio), una capa de epóxica, y un revestimiento metálico (generalmente aluminio), cada capa con un propósito diferente:

- El revestimiento metálico provee alta reflectividad,
- La capa de epóxica mantiene el patrón y el perfil de las líneas
- el sustrato mantiene la rigidez de la superficie óptica.

Un vista de perfil de una rejilla de difracción se muestra en la figura 5.1, en la figura 5.2 se muestra una rejilla de difracción típica [18].

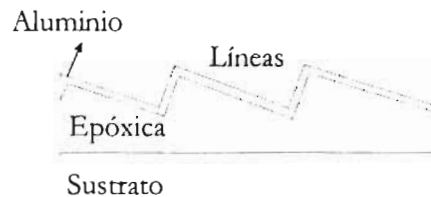


Figura 5.1: *Construcción de una rejilla de difracción.*

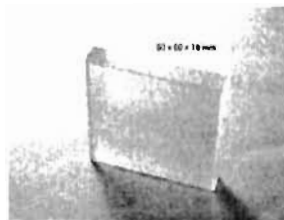


Figura 5.2: *Rejilla de difracción.*

5.2. Experimento con una rejilla de difracción

Para probar la resolución del microscopio de reflectividad se hizo uso de una rejilla de difracción (Milton Roy) con aproximadamente 295 líneas/ mm , lo cual da una separación entre cada una de las líneas de $3.3898\mu m$. Las imágenes se obtuvieron con la lente objetivo de 20x además de la lente ocular.

La configuración óptica utilizada para realizar este experimento es la mostrada en la Figura 5.3, en esta configuración la muestra fue reemplazada por la rejilla de difracción colocada con sus líneas a 45° , figura 5.4.

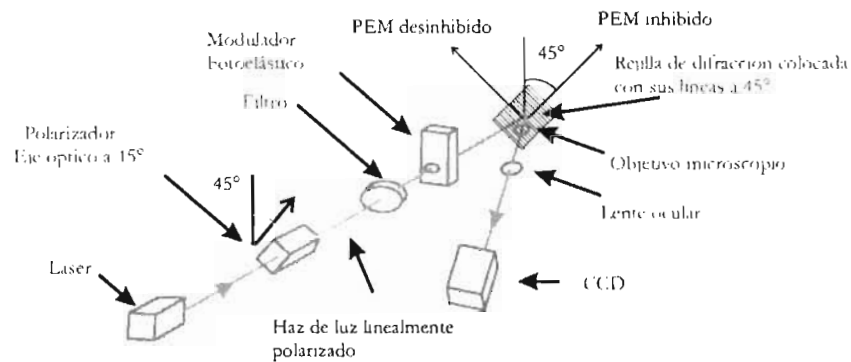


Figura 5.3: Configuración óptica para la obtención de las imágenes con la rejilla de difracción.

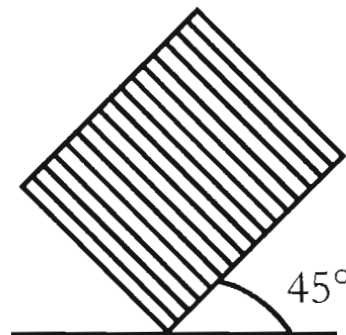


Figura 5.4: Geometría de la rejilla

5.2.1. Obtención de las imágenes de la rejilla

La secuencia del experimento para obtener las imágenes de la rejilla de difracción es como sigue:

1. Desinhibir el modulador fotoelástico.
2. Obtener una imagen con el modulador fotoelástico en este estado. Figura 5.5.
3. Inhibir el modulador fotoelástico
4. Obtener una imagen con el modulador fotoelástico en este estado. Figura 5.6.

El software desarrollado realiza toda la secuencia anterior automáticamente, lo únicos parámetros que hay que introducir como usuarios para la ejecución del experimento son:

- Nombre del experimento
- Longitud de onda y retardo del modulador fotoelástico
- Tiempo de exposición y número de acumulaciones

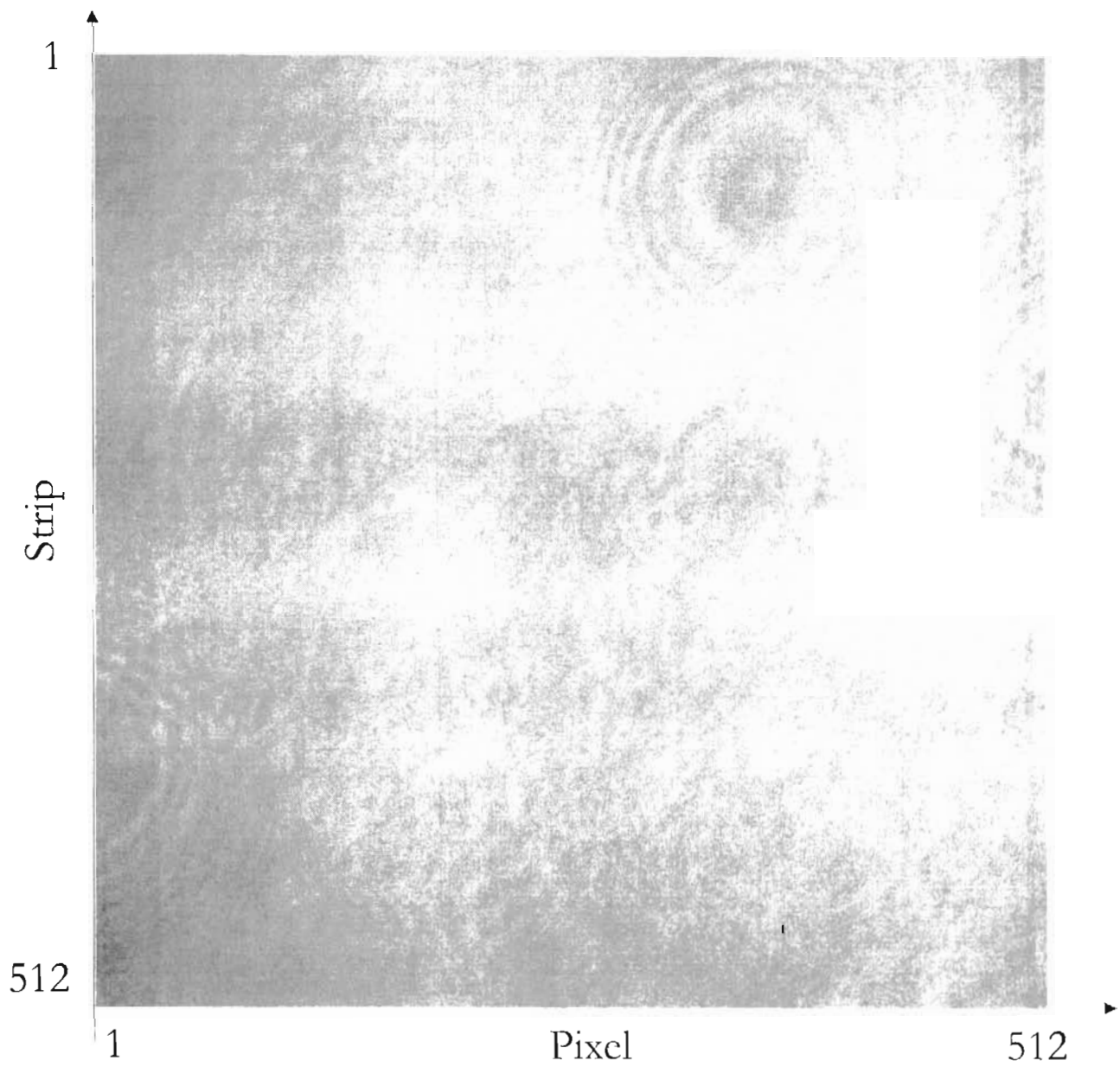


Figura 5.5: *Rejilla de difracción. PEM desinhibido.*

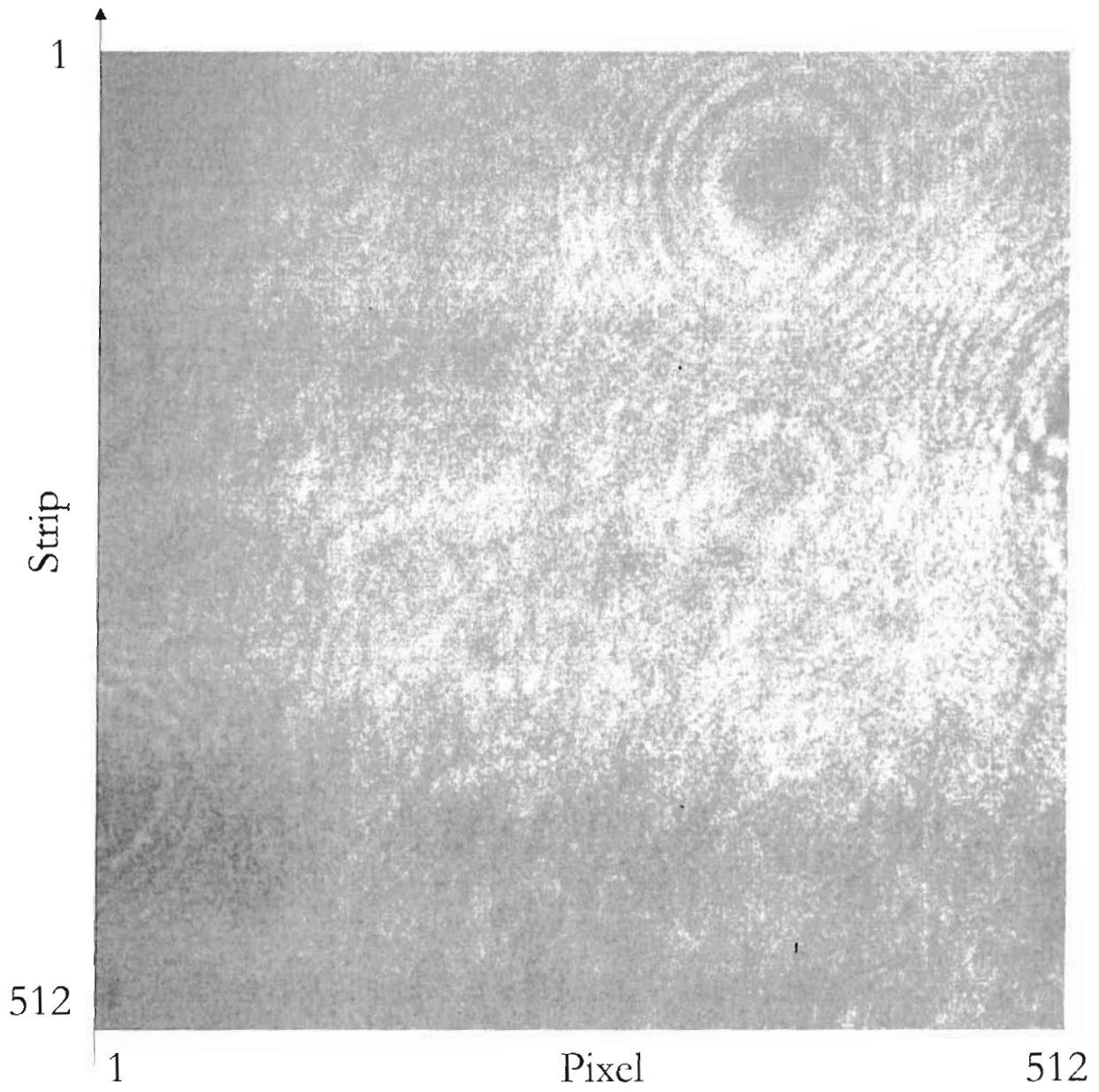


Figura 5.6: *Rejilla de difracción. PEM inhibido.*

5.2.2. Procesamiento aritmético

Resta de las imágenes

Una vez obtenidas las imágenes se realiza un proceso aritmético con ellas. La figura 5.7 muestra la resta de las dos imágenes obtenidas $I_{pemojf} - I_{pemon}$. En esta imagen se observan ya los patrones de líneas de la rejilla de difracción, pero aún no se observan detalles de la morfología de la rejilla de difracción.

Suma de las imágenes

La figura 5.8 muestra la suma de las dos imágenes obtenidas $I_{pemojf} + I_{pemon}$.

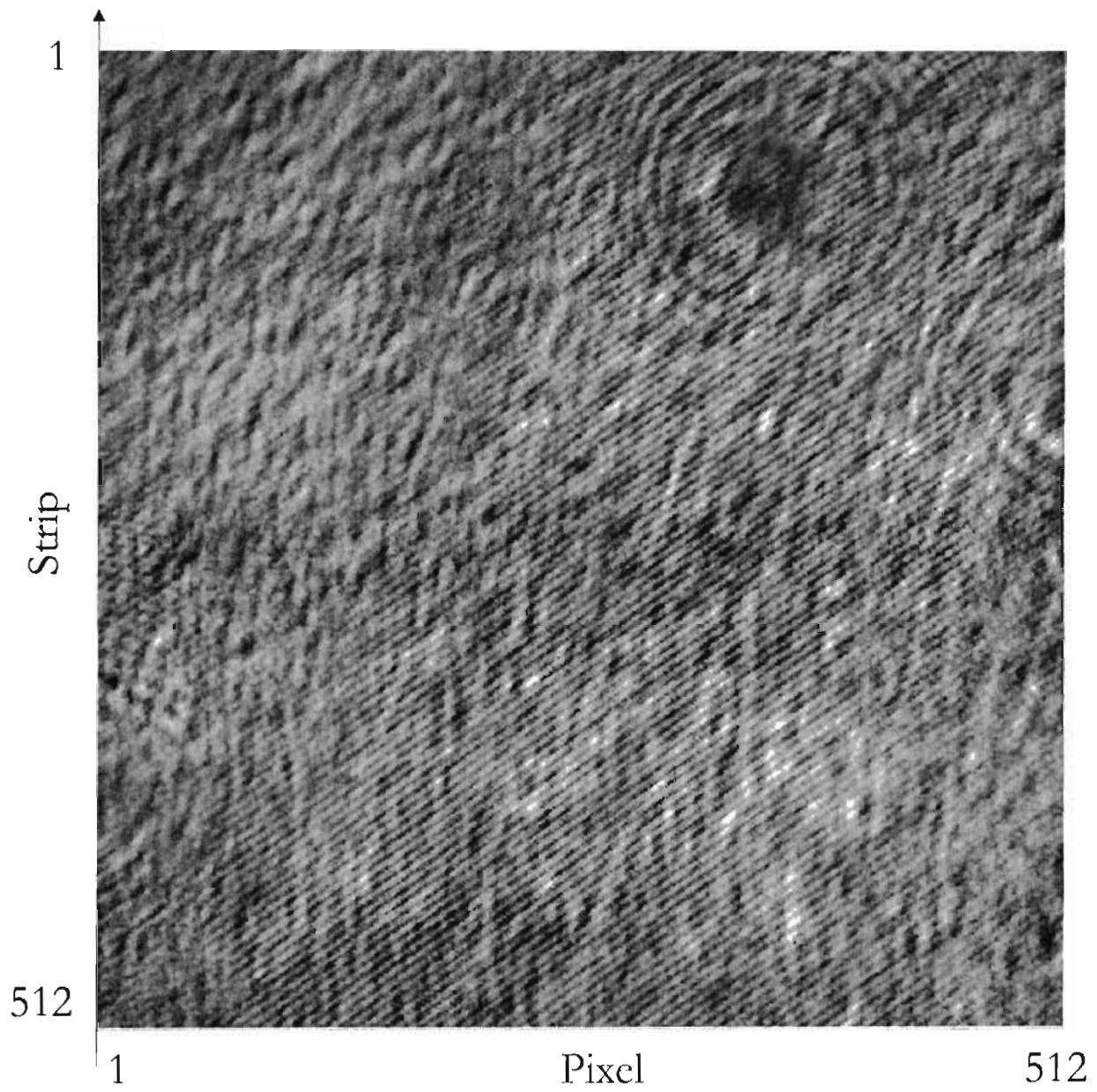


Figura 5.7: *Rejilla de difracción. Resto de las imágenes.*

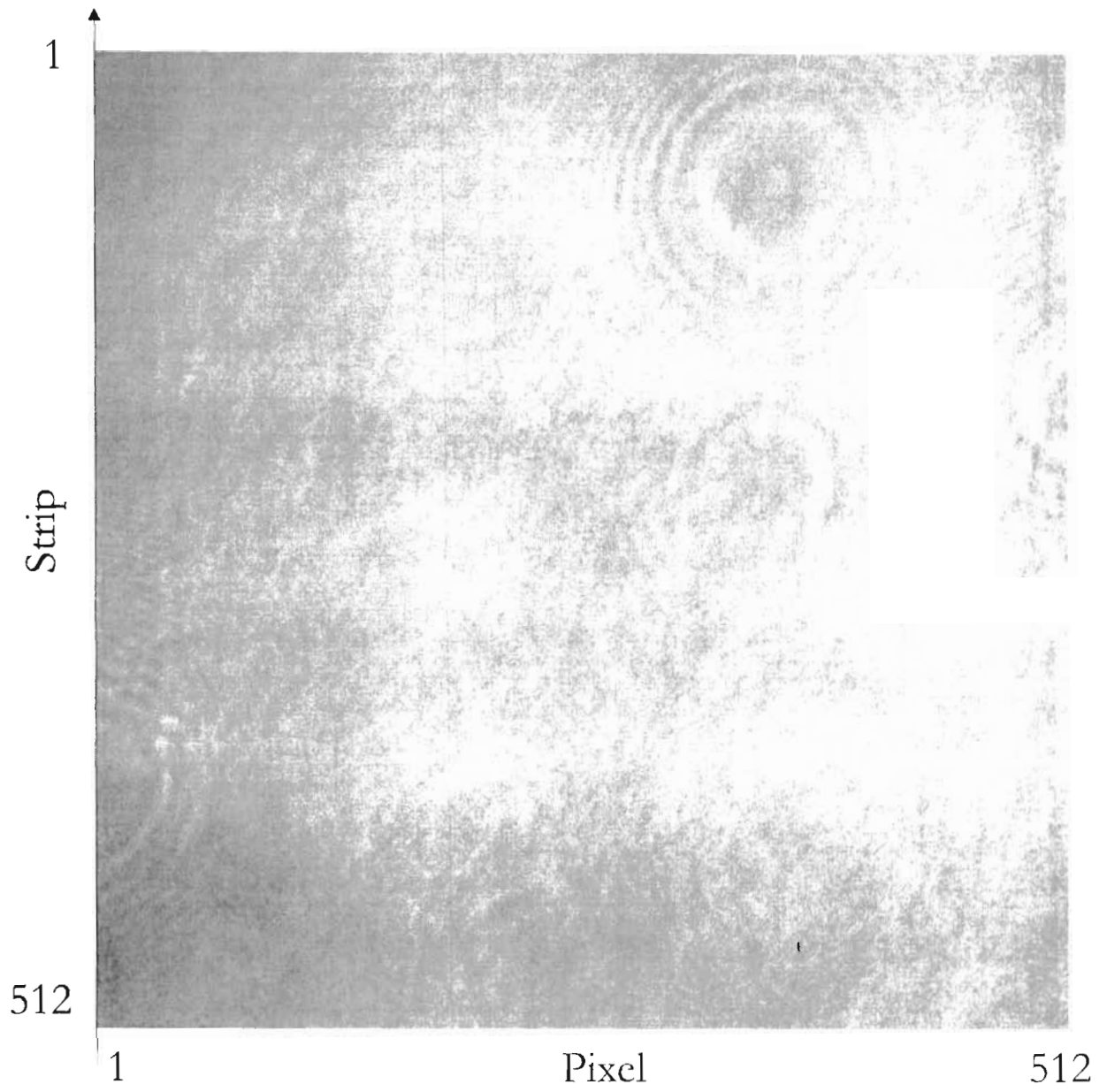


Figura 5.8: *Rejilla de difracción. Suma de las imágenes.*

División de las imágenes

Después de obtener la resta $I_{p, \text{moff}} - I_{p, \text{mon}}$ y la suma $I_{p, \text{moff}} + I_{p, \text{mon}}$ de las imágenes, se obtiene ahora el cociente $\frac{I_{p, \text{moff}} - I_{p, \text{mon}}}{I_{p, \text{moff}} + I_{p, \text{mon}}}$. La figura 5.9 muestra el resultado de esta operación.

En la figura 5.9 se puede observar la morfología de la rejilla de difracción. La rejilla se colocó a 45° para alinearla con la luz que emerge del polarizador lineal cuyo eje óptico está colocado a 45° con respecto al plano de incidencia.

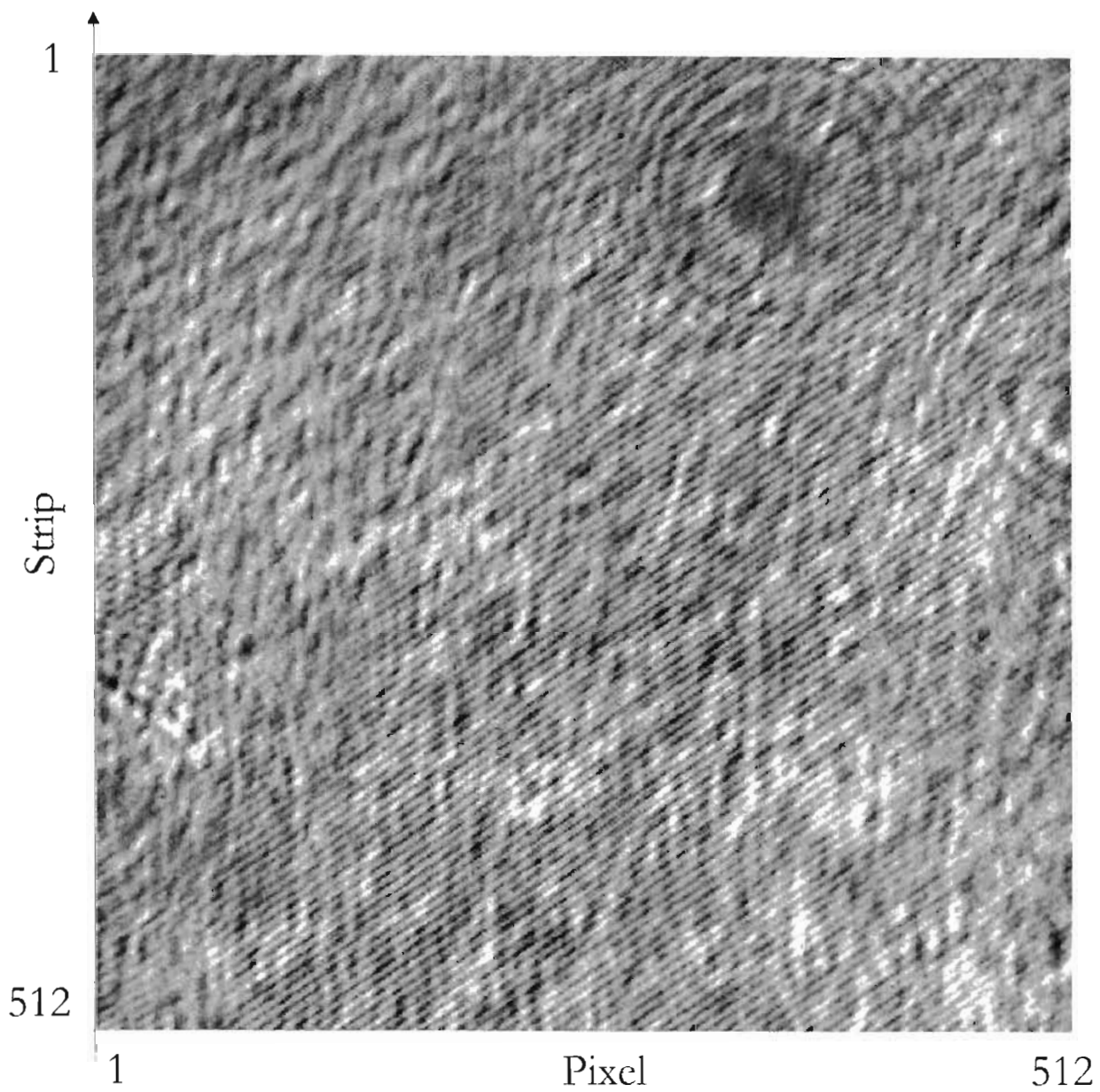


Figura 5.9: *Rejilla de difracción. Dimensión de las imágenes.*

5.3. Muestras con tiras de contacto

Para limitar el flujo de corriente a través de cierta área de la superficie del semiconductor es necesaria la reducción de la sección de la área transversal en la cual se recombinan portadores (región activa), esto ayuda entre otras cosas a disminuir la corriente de operación. Para conseguir la reducción de la área transversal se utilizó un proceso fotolitográfico, en el cual fueron transferidos patrones de franjas periódicas de un motivo o mascarilla a la superficie de un semiconductor. Al final de este proceso se obtiene un patrón de tiras de dieléctrico, esto limita el contacto metal-semiconductor a franjas periódicas de anchos de $10\mu m$ y $50\mu m$ dependiendo del motivo o mascarilla utilizado. Estas muestras fueron construidas en el Instituto de Investigación en Comunicación. Un esquema de la forma deseada de las tiras se muestra en la figura 5.10.

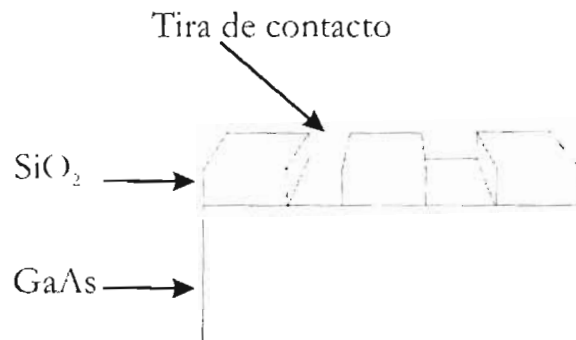


Figura 5.10: *Morfología de la muestra.*

5.3.1. Construcción de las tiras de contactos

Fotolitografía

Como se menciona anteriormente las tiras de contacto se construyen mediante un proceso fotolitográfico el cual envuelve los siguientes procesos que a continuación se detallan:

- **Limpieza de la muestra:** Se realiza con la finalidad de eliminar impurezas y obtener un buen contacto con la superficie de la muestra, éste consiste en un desengrasado con tricloretileno y metanol seguido de un enjuague con H_2O deionizada.
- **Aplicación y horneado del dieléctrico:** Inicialmente el dieléctrico SiO_2 se encuentra en estado líquido, éste se aplica sobre el semiconductor por medio de un gotero, la muestra se hace rotar en un spinner (base giratoria de centrifugado de alta velocidad) a una frecuencia aproximada de 4500 rpm por un lapso de 20 segundos formando una película uniforme de espesor entre $0.16\mu m$ y $0.26\mu m$. El dieléctrico al ser curado se endurece y pasa a estado sólido.
- **Aplicación y horneado del fotoresist:** De la misma forma se aplica una gota de resina fotosensible (Resina positiva 1818 SP 16 Shipley, sobre la capa de dieléctrico que se formó en la muestra, al hacerla girar a una frecuencia aproximada de 4500 rpm por 20 segundos se forma una película uniforme ($2\mu m$ de espesor). Posteriormente se efectúa un horneado (90°) con la finalidad de que ésta sea endurecida ligeramente y se adhiera a la superficie.
- **Alineación de la mascarilla y exposición:** Se coloca la muestra con fotoresist en contacto de un motivo, el cual consta de un patrón de franjas con huecos de distintos

anchos ($10\mu m$, $50\mu m$) y se expone a luz ultravioleta. La región expuesta a la luz UV le ocurre una reacción química dependiendo del tipo de fotoresist, para resinas positivas la región expuesta se vuelve más soluble de esta manera es más fácil de ser removida en el proceso de revelado, para resinas negativas esta se vuelve menos soluble (se polimeriza). Es importante alinear las franjas del motivo con la orientación cristalográfica de la oblea semiconductora para que las caras del resonador de nuestro diodo queden perpendiculares a los canales o franjas de la superficie. Se utilizó un sistema de alineado y exposición UV OAI serie 200.

- **Revelado:** Se sumerge la muestra en el líquido revelador (Microposit 319) por 60 segundos, la resina es positiva por lo que al efectuar el revelado se desprenden las regiones que fueron expuestas a la radiación ultravioleta, pues estas son solubles al revelador.
- **Ataque Químico:** Las tiras de dieléctrico quedan protegidas por la resina y al realizar un ataque de $H_2O : HF(10 : 1)$, la región que no está cubierta es atacada hasta llegar a la superficie de la oblea, esta solución no ataca al semiconductor.
- **Removimiento de la resina foto sensible:** Es removida con acetona, el patrón de franjas de dieléctrico queda grabado sobre la capa de contacto del semiconductor.

Deposición de Metales por evaporación

Películas de metal pueden ser depositadas sobre un semiconductor por varios métodos, los más importantes son deposición por evaporación física (técnica de evaporación por filamento caliente o por sputtering) y deposición por evaporación química.

Con la finalidad de depositar películas de metal en el proceso de obtención de contactos óhmicos metal-semiconductor utilizamos una técnica de deposición de evaporación física, deposición de metales por evaporación usando un filamento (resistencia) calentada en alto vacío. El vacío en la cámara se efectúa con la ayuda de una bomba mecánica, de la presión atmosférica a una presión del orden de mili-Torr, seguida por una bomba de alto vacío que reduce la presión al orden de 5×10^{-6} Torr o menor.

En la creación de filamentos son usados metales como el tungsteno por su alta temperatura de fusión como filamento en espiral y pequeños pedazos de metal son suspendidos de cada filamento. Conforme un flujo de corriente (aproximadamente 20A) pasa a través del filamento, éste se calienta hasta evaporar los metales que se encuentran en contacto y al expandirse en forma de gas estos se depositan sobre el semiconductor. Posteriormente se efectúa un recocido para crear una aleación entre metal y semiconductor en la unión.

5.4. Experimento con tiras de contacto

5.4.1. Muestras con tiras de contacto de $50\mu m$

Es importante conocer la morfología así como las dimensiones reales de la muestra bajo estudio, por lo que se obtuvo el perfil de una muestra, figura 5.11, esta muestra tiene huecos de aproximadamente $50\mu m$ y de $250\mu m$ en la superficie protegida con el dieléctrico (SiO_2). En esta muestra aún no se ha realizado el proceso de deposición de metales, únicamente ha pasado por el proceso fotolitográfico.

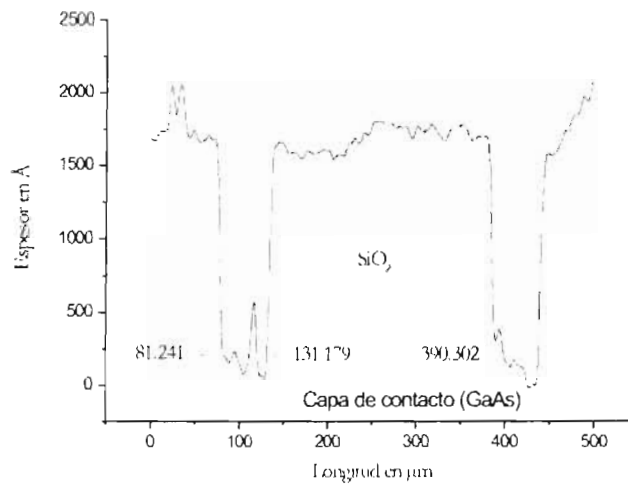


Figura 5.11: Perfil de una muestra con tiras de $50\mu m$.

La figura 5.12 muestra la imagen obtenida con el microscopio construido, se puede ver en la imagen los patrones de las tiras que fueron grabados mediante el proceso fotolitográfico.

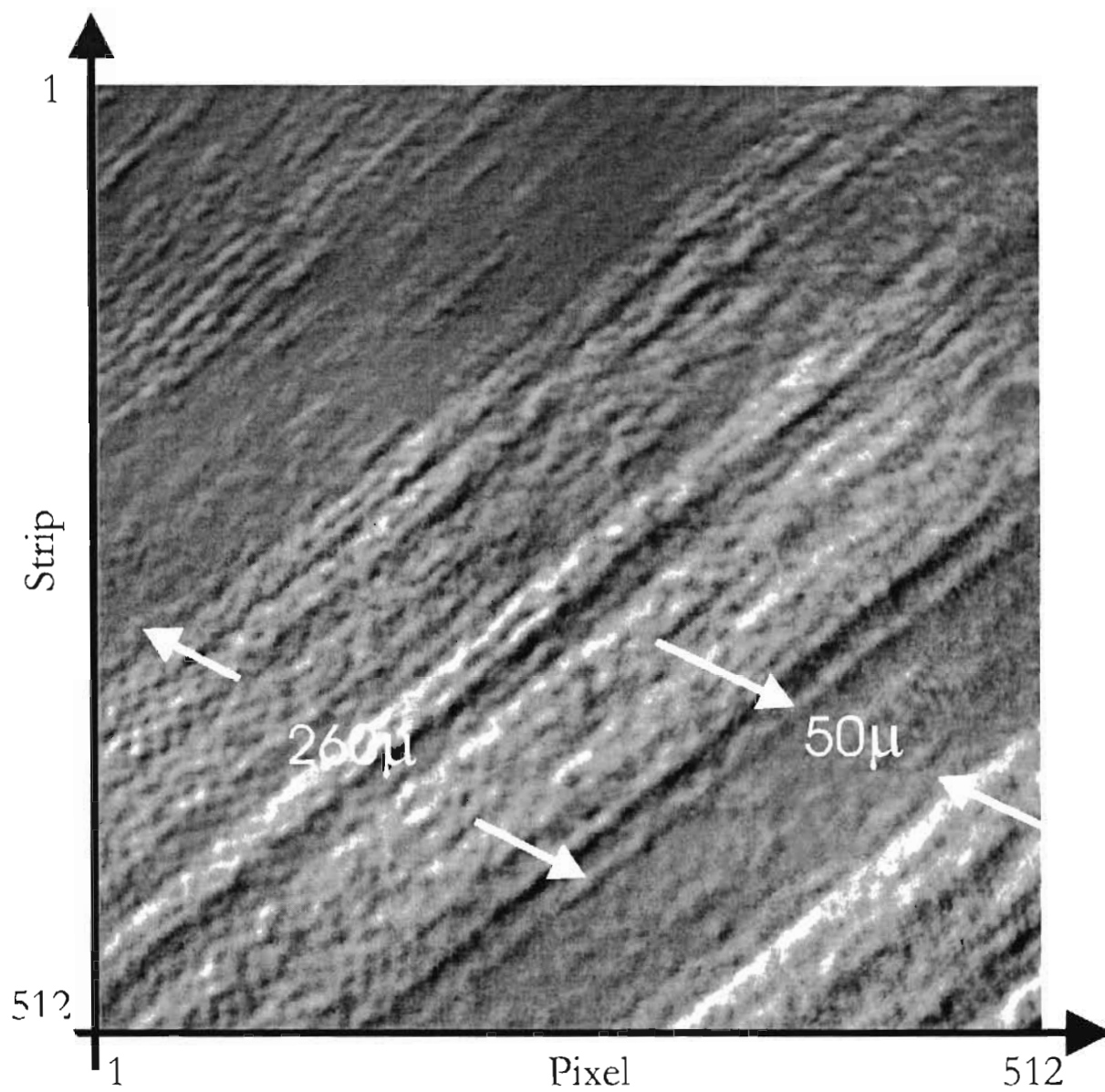


Figura 5.12: *Tiras de 50µm. Muestra sin deposición de metales*

5.4.2. Muestras con tiras de contacto de $10\mu m$

Se estudio una muestra en la cual ya se había realizado la deposición de metales, en esta muestra los anchos de las tiras son de $10\mu m$ y $290\mu m$ en la superficie protegida con el dieléctrico, la figura 5.13 muestra el perfil de dicha muestra.

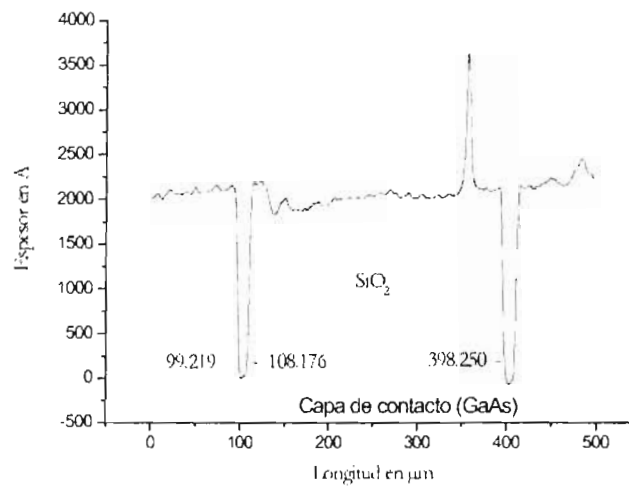


Figura 5.13: Perfil de una muestra con tiras de $10\mu m$.

La figura 5.14 muestra la imagen de una muestra con tiras de $10\mu m$, esta se obtuvo con el microscopio construido.

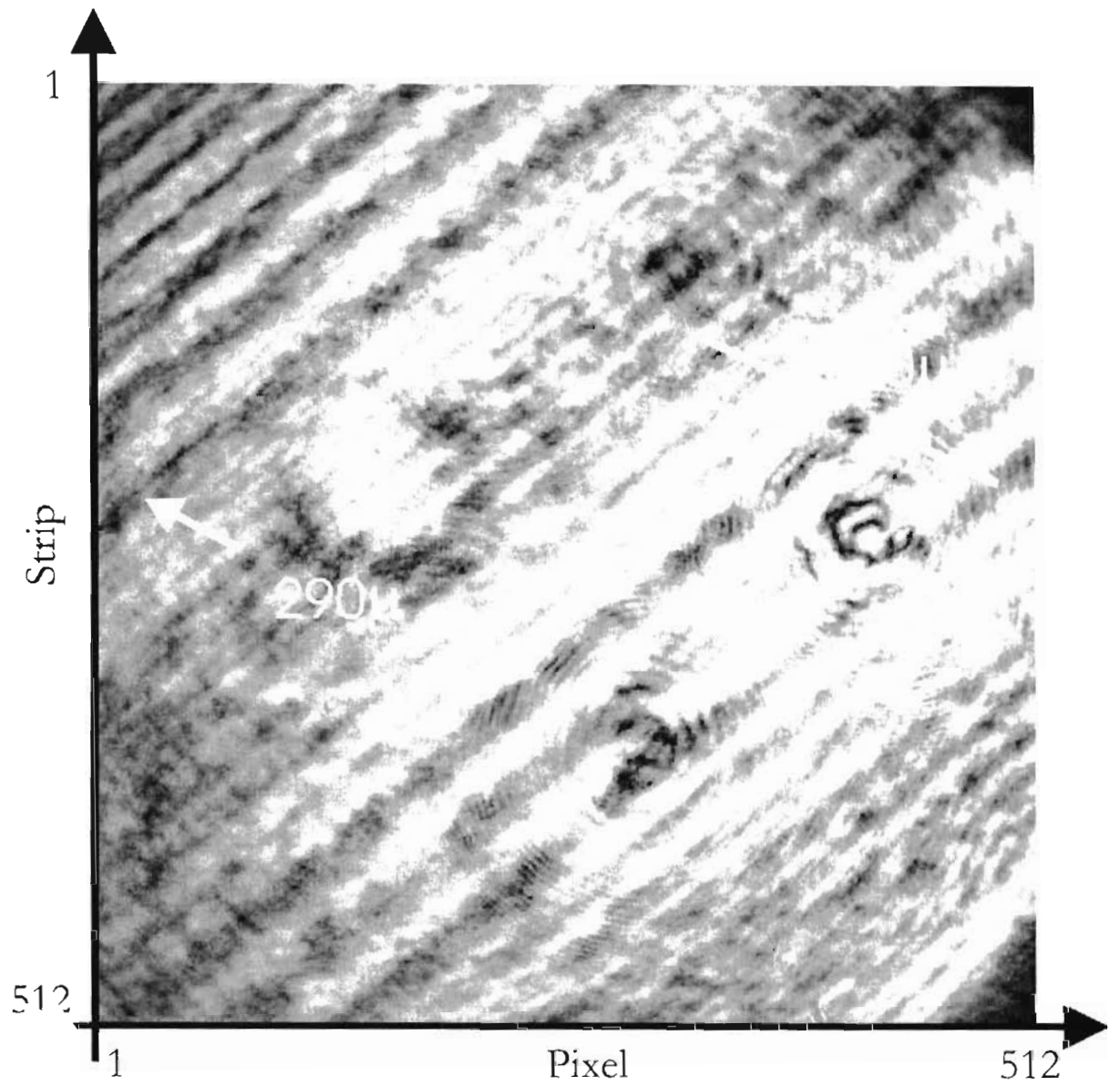


Figura 5.14: *Tiras de 10µm. Muestra con deposición de metales*

5.4.3. Muestras con tiras de contacto de $290\mu m$

Estas muestras estas construidas con un motivo negativo, es decir que tienen ahora anchos de dieléctrico inverso. Los anchos del sustrato (GaAs) son en esta muestra de $290\mu m$, y del dieléctrico de $100\mu m$, figura 5.15.

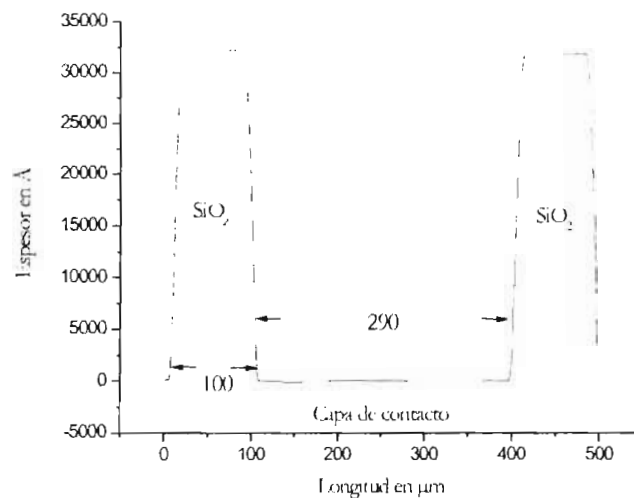


Figura 5.15: Perfil de una muestra con tiras de $290\mu m$.

La figura 5.16 muestra la imagen de una muestra con tiras de $290\mu m$, esta se obtuvo con el microscopio construido.

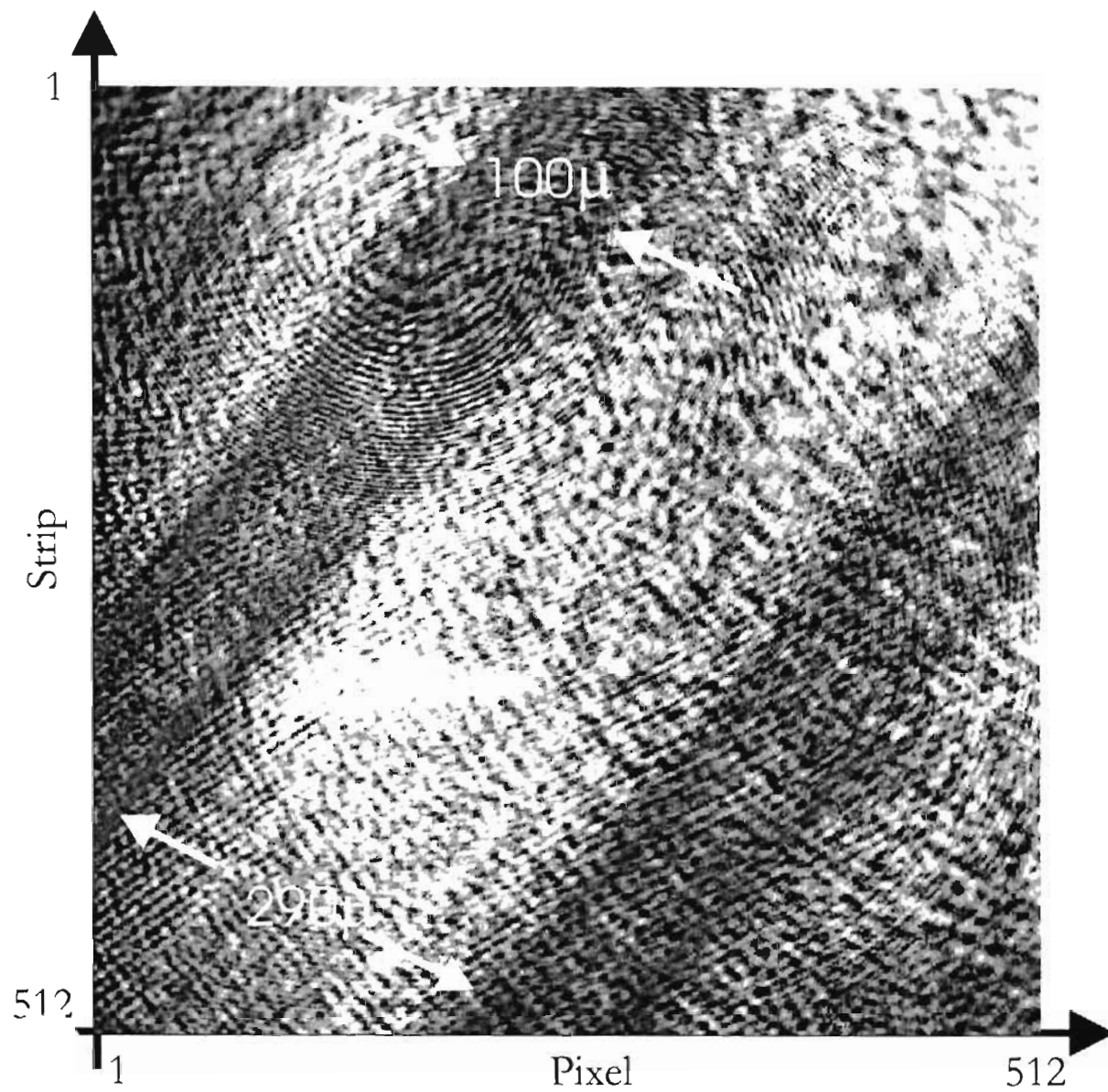


Figura 5.16: *Tiras de 290µm. Muestra con un motivo negativo y sin deposición de metales*

Capítulo 6

Conclusiones

Se desarrolló un microscopio que nos permite obtener imágenes contrastadas en las que se puede observar detalles de la morfología de la superficie del espécimen bajo estudio. Se consiguió observar las líneas de una rejilla de difracción con separación entre líneas de $3.3898\mu m$. Se pudo observar los defectos en la construcción de tiras de contactos para láseres. Este último aspecto es el más importante porque en la construcción de contactos se desea obtener la mayor uniformidad en las tiras construidas y cuando estas son observadas bajo el microscopio simple aparentan tener una construcción uniforme, sin embargo al observar las imágenes con el microscopio de reflectividad se observa que no hay uniformidad en las tiras construidas.

Se logró automatizar el CCD mediante objetos de automatización y funciones construidas a partir de ellos. Asimismo se automatizó el modulador fotoelástico y su programación se realizó mediante el puerto serial. La programación de todo el sistema se hizo en Visual Basic 6.0.

Existen configuraciones ópticas para medir reflectancia diferencial, sin embargo la originalidad del trabajo radica en el uso de un CCD en lugar de un fotodetector, aunado a esto, el uso de un arreglo de lentes objetivo y ocular permite extender la técnica de reflectancia diferencial, ya que la RD arroja un promedio de la respuesta óptica en la superficie de un material bajo estudio y con el uso del arreglo de lentes objetivo y ocular nos permite la respuesta óptica a nivel espacial en la superficie del material bajo estudio.

Bibliografía

- [1] D.E. Aspnes, J.P. Harbison, A.A. Studna, L.T. Florez, and M.K. Kelly. Optical studies of molecular-beam epitaxy growth of GaAs and Al As. *J. Vac. Sci. Technol., B*, 6(4):1127, 1988.

- [2] D.E. Aspnes and A.A. Studna. Anisotropies in the Above—Band-Gap Optical Spectra of Cubic Semiconductors. *Phys. Rev. Lett.*, 54(17):1956, 1985.

- [3] I. Kamiya, D.E. Aspnes, L.T. Florez and J.P. Harbison. Reflectance-difference spectroscopy of (001) GaAs surfaces in ultrahigh vacuum. *Phys. Rev. B.*, 46(24):15894, 1992.

- [4] M. Wassermeier, I. Kamiya, D.E. Aspnes, L.T. Florez, J.P. Harbison, and P.M. Petroff. Optical spectroscopy of (001) GaAs and AlAs under molecular-beam epitaxy growth conditions. *J. Vac. Sci. Technol.*, 9(4):2263, 1991.

- [5] L.F. Lastras-Martínez and A. Lastras-Martínez. Dislocation-induced effects in the reflectance-difference spectrum of semi-insulating GaAs (100). *Solid State Communications*, 98(5):479, 1996.

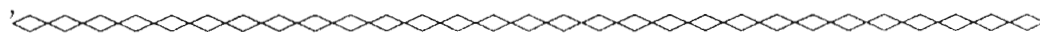
- [6] L.F. Lastras-Martínez and A. Lastras-Martínez. Reflectance anisotropy of GaAs (100): Dislocation-induced piezo-optic effects. *Phys. Rev. B*, 54(15):10726, 1996.
- [7] L.F. Lastras- Martínez, and A. Lastras-Martínez. Reflectance-difference spectroscopy of semi-insulating GaAs (110) around the fundamental gap. *Phys. Rev. B.*, 64(8):085309, 2001.
- [8] D. Rönnow, L.F. Lastras-Martínez, M. Cardona and P.V. Santos. Determination of the piezo-optical properties of semiconductors above the fundamental gap by means of reflectance difference spectroscopy. *J. Opt. Soc. Am. A*, 16(3):568, 1999.
- [9] D. Rönnow, L.F. Lastras-Martínez, M. Cardona and P.V. Santos. 24th Int. Conf. on Physics of Semiconductors. *24ICPS-World Scientific*, 1998.
- [10] A. Lastras-Martínez, R.E. Balderas-Navarro, L.F. Lastras- Martínez. Model for the linear electro-optic reflectance-difference spectrum of GaAs (001) around E1 and E1+ Delta 1. *Phys. Rev. B*, 59(15):10234, 1991.
- [11] L.F. Lastras- Martínez, D. Rönnow, P.V. Santos, M. Cardona and K. Eberl. Optical anisotropy of (001) GaAs surface quantum wells. *Phys. Rev. B*, 64(24):245303, 2001.
- [12] Boyle W. S. Smith G. E. Charge Coupled Semiconductor Devices. *Bell Systems. Tech. J.*, 49:587–593, 1970.
- [13] Holst, Gerald C. *CCD arrays, cameras, and displays*. Washington : SPIE - Optical Engineering Press, Reading, Massachusetts, 2 edition, 1998.

- [14] *VersArray System User Manual*, volume 4411-0093. Princeton Instruments, a division of Roper Scientific, Inc., 3660 Quakerbridge Rd Trenton, NJ 08619, 1d edition, July 2003.
- [15] *WinX/32 Automation 3.x User Programming Description for Visual Basic*. Princeton Instruments, a division of Roper Scientific, Inc., 3660 Quakerbridge Rd Trenton, NJ 08619, 2.5e edition, February 2004.
- [16] *PEM-90 Photoelastic Modulator User Manual*. HINDS Instruments, 3175 NW Alcock Drive, Hillsboro, 1 edition, March 1995.
- [17] Mario Echenique. *Tecnología de Láseres*. Master's thesis, UASLP, 2005.
- [18] Milton Roy. *Certified Precision Grating*. USA, December 1989.

Apéndice A

Listado del programa e interfaz visual

Listado A.1: Programa CCD.

'

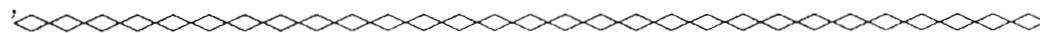
' *Autor: Ricardo Castro Garcia*

' *Programa: CCD*

' *Lenguaje: Visual Basic 6.0*

' *20 de Septiembre 2005*

' *Rutina Principal para la adquisición de imágenes*

'

Private udtDoc As New DocFile

Private udtExp As New ExpSetup

Private strLongOnd As String

Private mdblExposure As Double

Private strNombre As String

Private Sub cmdTest_Click_Click()

Call Desinhibir_pem

Call retardo2

Call Ipemon

Call Inhibir_pem

Call retardo2

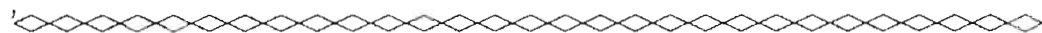
Call Ipemoff

Call resta

Call suma

Call division

End Sub

'

' *Rutina de configuración del puerto RS-232*

Sub Form_load()

MSComm1.Settings = "9600,n,8,1" '*velocidad, paridad, bits, bit de parada*

MSComm1.CommPort = 1 '*elegir el número del puerto*

On Error Resume Next

 MSComm1.PortOpen = True '*Abrir puerto de comunicaciones*

 MSComm1.OutBufferCount = 0 '*Limpiar puerto de comunicaciones*

 MSComm1.Handshaking = 0 '*Sin Handshaking*

If Err Then

MsgBox "COM1: No disponible cambie la propiedad del puerto"

```

Exit Sub

End If

End Sub

' ~~~~~
' Rutina para detener la adquisición

Private Sub detener_Click()

Call udtExp.Stop(udtDoc)

End Sub

' ~~~~~
' Rutina de programación para adquisición de imágenes
' con el modulador fotoelastico desinhibido

Private Sub Ipemon()

Dim udtExp As New ExpSetup

Dim udtDoc As New DocFile

mdblExposure = Val(udttexti.Text)

udtAccum = Val(texacum.Text)

Call udtExp.SetParam(EXP_FORCE_PP_INIT, 1)

Call udtExp.SetParam(EXP_EXPOSURE, mdblExposure)

Call udtExp.SetParam(EXP_ACCUMS, udtAccum)

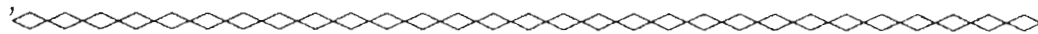
Call udtExp.SetParam(EXP_NUMBER_OF_CLEANS, 1)

Call udtExp.SetParam(EXP_NUM_OF_STRIPS_PER_CLN, 512)

Call udtDoc.SetParam(DM_CLEANS, 2)

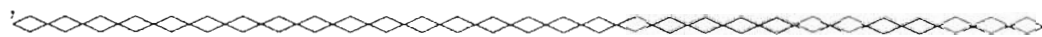
```

```
Call udtExp.Start(udtDoc)
Call udtExp.WaitForExperiment
strNombre = NombreExp.Text
Call udtDoc.SaveAs(strNombre + "on", dt_SPE)
End Sub
```

'

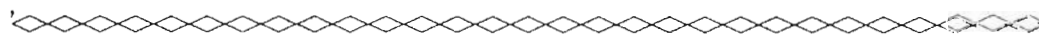
```
' Rutina de programación para adquisición de imágenes
' con el modulador fotoelastico inhibido
```

```
Private Sub Ipemoff()
Dim udtExp As New ExpSetup
Dim udtDoc As New DocFile
mdblExposure = Val(udttexti.Text)
Call udtExp.SetParam(EXP_NUMBER_OF_CLEANS, 7)
Call udtExp.SetParam(EXP_NUM_OF_STRIPSPER_CLN, 512)
Call udtExp.SetParam(EXP_EXPOSURE, mdblExposure)
Call udtDoc.SetParam(DM_CLEANS, 2)
Call udtExp.Start(udtDoc)
Call udtExp.WaitForExperiment
strNombre = NombreExp.Text
Call udtDoc.SaveAs(strNombre + "off", dt_SPE)
End Sub
```



' Rutina de programación para la resta de dos imágenes

```
Sub resta()  
  
Dim udtDoc As New DocFile  
  
Dim udt2Doc As New DocFile  
  
udtDoc.Open strNombre + ".off.spe"  
  
Dim udtInputA As New ProcInput  
Call udtInputA.GetFromDoc(udtDoc)  
  
udt2Doc.Open strNombre + ".on.spe"  
  
Dim udtInputB As New ProcInput  
Call udtInputB.GetFromDoc(udt2Doc)  
  
Dim udtArith As New ProcMath  
  
udtArith.SetProcParam PRC.DISPLAYOUTPUT, True  
  
Dim udtOutput As DocFile  
  
Set udtOutput = udtArith.Run(udtInputA, udtInputB,  
                    IMAGE.MATHSUBTRACTION, strNombre + ".res", X.FLOAT)  
  
Call udtOutput.Save  
  
End Sub
```



' Rutina de programación para la suma de dos imágenes

```
Sub suma()  
  
Dim udtDoc As New DocFile
```

```

Dim udt2Doc As New DocFile
udtDoc.Open strNombre + ".spe"
Dim udtInputA As New ProcInput
Call udtInputA.GetFromDoc(udtDoc)
udt2Doc.Open strNombre + ".on.spe"
Dim udtInputB As New ProcInput
Call udtInputB.GetFromDoc(udt2Doc)
Dim udtArith As New ProcMath
udtArith.SetProcParam PRC_DISPLAYOUTPUT, True
Dim udtOutput As DocFile
Set udtOutput = udtArith.Run(udtInputA, udtInputB,
    IMAGE_MATH_ADDITION, strNombre + ".sum", X_FLOAT)
Call udtOutput.Save
End Sub

```

' 

' *Rutina de programación para la división de dos imágenes*

```

Sub division()
Dim udtDoc As New DocFile
Dim udt2Doc As New DocFile
udtDoc.Open strNombre + ".res.spe"
Dim udtInputA As New ProcInput
Call udtInputA.GetFromDoc(udtDoc)

```

```

udt2Doc.Open strNombre + "sum.spe"

Dim udtInputB As New ProcInput

Call udtInputB.GetFromDoc(udt2Doc)

Dim udtArith As New ProcMath

udtArith.SetProcParam PRC_DISPLAYOUTPUT, True

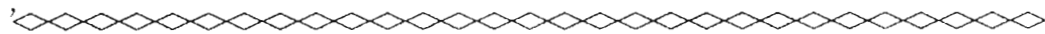
Dim udtOutput As DocFile

Set udtOutput = udtArith.Run(udtInputA, udtInputB,
    IMAGEMATH_DIVISION, strNombre + "div", X_FLOAT)

Call udtOutput.Save

End Sub

```

'

*' Rutina de programación de la longitud de onda
' del modulador fotoelástico introducida por el usuario*

```

Private Sub longitud_onda(strLongOnd)

On Error Resume Next

MSComm1.Output = Chr$(87) 'W

Call retardo

MSComm1.Output = Chr$(58) ':'

Call retardo

MSComm1.Output = Mid$(strLongOnd, 1, 1)

Call retardo

MSComm1.Output = Mid$(strLongOnd, 2, 1)

```



```

Call retardo
MSComm1.Output = Mid$(strLongOnd, 3, 1)
Call retardo
MSComm1.Output = Mid$(strLongOnd, 4, 1)
Call retardo
MSComm1.Output = Mid$(strLongOnd, 5, 1)
Call retardo
MSComm1.Output = Mid$(strLongOnd, 6, 1)
Call retardo
MSComm1.Output = Chr$(13) 'CR
Call retardo
If Err Then
    MsgBox "Error al enviar el dato"
    Exit Sub
End If
End Sub

' ~~~~~
' Rutina de programación del retardo del
' modulador fotoelástico introducido por el usuario
Private Sub retardo_onda(strRetar)
On Error Resume Next
MSComm1.Output = Chr$(82) 'R

```

```

Call retardo
MSComml.Output = Chr$(58) ' :
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strRetar , 1, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strRetar , 2, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strRetar , 3, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Mid$(strRetar , 4, 1)
Call retardo
MSComml.Output = Chr$(13) 'CR
Call retardo
If Err Then
    MsgBox "Error al enviar el dato"
    Exit Sub
End If
End Sub

' ~~~~~
' Rutina de programación para la inhibición
' del modulador fotoelástico
Private Sub Inhibir_pem()

```

On Error Resume Next

MSComml.Output = Chr\$(73) 'I

Call retardo

MSComml.Output = Chr\$(58) ':'

Call retardo

MSComml.Output = Chr\$(49) '1

Call retardo

MSComml.Output = Chr\$(13) 'CR

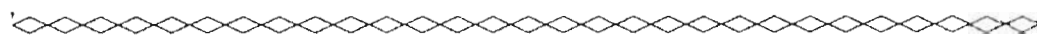
If Err Then

MsgBox "Error al enviar el dato"

Exit Sub

End If

End Sub

'

' *Rutina de programación para la desinhibición*

' *del modulador fotoelástico*

Private Sub Desinhibir_pem()

On Error Resume Next

MSComml.Output = Chr\$(73) 'I

Call retardo

MSComml.Output = Chr\$(58) ':'

Call retardo

```
MSComm1.Output = Chr$(48) '0
```

```
Call retardo
```

```
MSComm1.Output = Chr$(13) 'CR
```

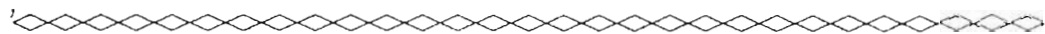
```
If Err Then
```

```
    MsgBox "Error al enviar el dato"
```

```
    Exit Sub
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
'
```

```
' Rutina de programación para validar caracteres
```

```
' en el cuadro de texto de la longitud de onda
```

```
Private Sub ProgLong_Click()
```

```
chrLongOnd = udtLoText.Text
```

```
strLongOnd = CStr(chrLongOnd)
```

```
strlong = Len(strLongOnd)
```

```
If strlong > 6 Then
```


```
    MsgBox "Longitud de onda inválida. Máxima longitud de onda 19999 nm."
```

```
Else
```

```
    Call longitud_onda(strLongOnd)
```

```
End If
```

```
End Sub
```

'


' *Rutina de programación para validar caracteres*

' *en el cuadro de texto del retardo*

Private Sub ProgRetar_Click()

chrRetar = udtRetarText.Text

strRetar = **CStr**(chrRetar)

strlong = **Len**(strRetar)

If strlong > 4 **Then**


MsgBox "Retardo_inválido._Máximo_retardo_1000_WAV"

Else

Call retardo_onda(strRetar)

End If

End Sub

'



' *Rutina de programación para la inicialización*

' *del modulador fotoelástico*

Private Sub Iniciali_pem_Click()

Call Desinhibir_pem

End Sub

'

' *Rutina de programación para la*

' *validación de caracteres Ascii*

Private Sub udtRetarText_KeyPress(KeyAscii As **Integer**)

Dim car As **String** * 1, tem

car = **Chr**(KeyAscii)

If car < "0" Or car > "9" **Then**

KeyAscii = 0

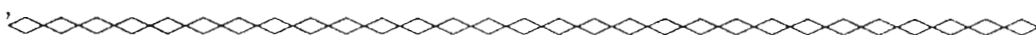
Beep

Else

tem = **Asc**(car) - &H30

End If

End Sub

'

' *Rutina de programación para la*

' *validación de caracteres Ascii*

Private Sub udtLoText_KeyPress(KeyAscii As **Integer**)

Dim car As **String** * 1, tem

car = **Chr**(KeyAscii)

If car < "0" Or car > "9" **Then**

KeyAscii = 0

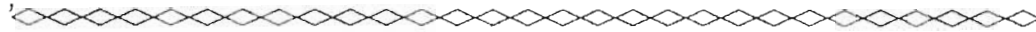
Beep

Else

tem = Asc(car) - &H30

End If

End Sub

'

' Rutina de programación para cerrar

' el puerto de comunicaciones RS-232

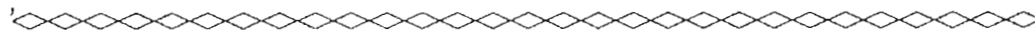
Private Sub cerrar_puert()

If MSComml.PortOpen = True Then

MSComml.PortOpen = False 'cerrar el puerto

End If

End Sub

'

' Rutina de retardo

Private Sub retardo()

For i = 1 To 700

 For j = 1 To 300

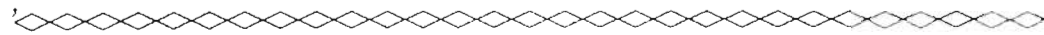
 For k = 1 To 100

 Next k

 Next j

Next i

End Sub



' *Rutina de retardo*

Private Sub retardo2()

For i = 1 To 700

For j = 1 To 500

For k = 1 To 500

Next k

Next j

Next i

End Sub

