



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

Arreglos Interferométricos Heterodinios de Haces Gaussianos

Presenta:

M. en C. Jorge Mauricio Flores Moreno

Como requisito para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias (Óptica)

Asesores:

Dr. Moisés Cywiak Garbarcewicz.

Dr. Manuel Servín Guirado.

León, Guanajuato, México, Noviembre 2008

RESUMEN.

En el presente trabajo, se describe el principio físico del funcionamiento y las aplicaciones de un par de arreglos ópticos interferométricos basados en la heterodinización de haces Gaussianos, así como su utilidad para medir la rugosidad de superficies ópticas en áreas microscópicas. En estos arreglos, uno de los haces es utilizado como haz de prueba, el cual es enfocado y reflejado por la superficie que se desea medir mientras que un segundo haz interfiere con el primero e introduce una señal variante en el tiempo. La modulación del haz de luz se obtiene al ser transmitido a través de una celda de Bragg, la cual consiste de un medio acusto-óptico de dióxido de telurio (TeO_2) excitado a 80 MHz , donde los órdenes de difracción cero y uno son utilizados. En uno de los instrumentos descritos, un tercer haz es obtenido a partir del orden cero de la celda de Bragg y se utiliza como haz de referencia, para que la información de la intensidad de los haces involucrados detectada, sea proporcional a las variaciones verticales locales de la superficie bajo medición. Los haces son coherentemente superpuestos en el plano sensible de un fotodiodo que integra la intensidad total incidente y que convierte la señal óptica incidente en una señal eléctrica. La resolución vertical obtenida en ambos arreglos es similar, o inclusive mejor que en un interferómetro convencional de dos haces ($\approx \lambda/100$) y la resolución lateral es cercana a λ , la longitud de onda de la fuente de iluminación obtenida a partir de un láser de He-Ne. Esto es gracias a que la señal bajo medición es separada de fuentes indeseables de ruido utilizando un detector de banda angosta. Puesto que los haces se heterodinizan, los interferómetros son capaces de perfilar superficies con una alta sensibilidad vertical y bajo ruido. Mediciones de diferentes superficies de calidad óptica, que presentan reflectividad constante y se comportan como rejillas de difracción, son incluidas.

OBJETIVO.

Describir el principio físico de funcionamiento de un instrumento de medición basado en la heterodinización de dos haces Gaussianos y sus características principales, así como el proceso de calibración. Medir la rugosidad de superficies de calidad óptica utilizadas en el almacenamiento digital de datos, empleando un arreglo óptico basado en la heterodinización de tres haces Gaussianos. En ambos casos los instrumentos miden porque las superficies que se caracterizan presentan reflectividad constante en áreas microscópicas.

PREFACIO Y MOTIVACIÓN

Las mediciones son ubicuas. Están presentes intrínsecamente en nuestra mente, en todo lo que nos rodea, puesto que el contacto más importante que tenemos con el mundo exterior es mediante el sentido de la vista, de donde se despierta la necesidad humana por sentir, experimentar y medir su entorno. A lo largo de su historia la raza humana ha transformado el medio que le rodea para satisfacer sus requerimientos y necesidades (físicas y mentales), su inquietud por experimentar, para llenar el vacío, para saciar el hambre de la razón; y después descubrió que esta retribución a sus ansias de ser, de crear, de conocer y dominar el universo que desconoce le ha recompensado (al menos esta convencido de ello) al hacer su vida mas cómoda. Y es en está búsqueda displicente por el placer de vivir, que le ha llevado a construir y diseñar mecanismos, sistemas y tecnologías de avanzada que le permiten indagar y visualizar sus propias entrañas, las más diminutas e inimaginables partículas que lo conforman, así como sus procesos de interacción y que finalmente desembocan en la ansiedad de resolver quién es y porque está aquí.

Así pues y en base a descubrirse él mismo confrontando sus miedos y dominando su entorno, fue cimentando el desarrollo de la religión, las artes, las humanidades, la ciencia y la tecnología. Y son estas últimas las que le han permitido transformar su entorno físico a saber: con la producción de sus alimentos de una forma sistematizada; la adquisición de sustancias fundamentales a partir de la materia presente en el planeta para, por ejemplo, curar enfermedades y prolongar el tiempo de vida; mediante la edificación de vivienda y

otras grandes obras monumentales; el diseño de máquinas de guerra utilizadas para la conquista y dominio de civilizaciones; desarrollando instrumentos de comunicación; inventando sistemas para observar el espacio y el universo, macro y microscópico, que el sentido de la vista no percibe. Todas estas transformaciones han requerido del desarrollo de herramientas e instrumentos especializados, que le permiten al hombre caracterizar su medio ambiente, medirlo y dimensionarlo.

Es por esto que las mediciones son ubicuas; son indispensables para mantener en funcionamiento la tecnología moderna (base de la sociedad) presente en todo el mundo. Las mediciones, como ente abstracto, están presentes en un amplio rango de aplicaciones, desde complicados experimentos para comprobar las más recientes teorías científicas hasta usos industriales, comerciales y en el hogar. Y a pesar de proporcionar información valiosa acerca de variables físicas y de objetos presentes en la naturaleza o bien producidos por el hombre, rara vez puede considerarse esta información como completa. De hecho, cualquier resultado de una medición es considerado sólo como una estimación de la cantidad medida ya que el valor “real o verdadero” permanece desconocido. Cuando se mide algo, se debe considerar la dispersión de los valores sobre la estimación, que bien podría atribuirse a la medición o al error humano. La metrología es la ciencia que se encarga de las mediciones, tanto desde un aspecto físico así como experimental.

En las ciencias físicas, en el control de calidad de productos y en ingeniería, realizar una medición es la actividad de obtener y comparar cantidades físicas de objetos y eventos presentes en el mundo real. Estableciendo a ciertos objetos y eventos como referencia, se pueden usar como unidades, y entonces los resultados de las mediciones estarán dados en un número determinado entre la relación del objeto de estudio y la unidad de referencia de la medición. Los instrumentos de medición y los métodos de estudio formales que definen su uso, son los medios por los que está referencia es calculada. Todos los instrumentos de medición están sujetos a diferentes grados de error del instrumento y a la incertidumbre en la medición.

En este mundo de mediciones físicas, existe un vasto rango de instrumentos para realizarlas. Todo depende de la cantidad física que se requiera valorar o caracterizar. Es por esto que se continuarán perfeccionando instrumentos y se propondrán nuevas técnicas y metodologías para obtener la información más fidedigna del mundo que nos rodea.

Motivación.

Hasta la fecha, se han desarrollado muchos instrumentos de medición que utilizan principios físicos descritos por la ciencia óptica, y que son utilizados particularmente dentro del campo de la metrología óptica para la caracterización de superficies. Puesto que la metrología óptica es una ciencia y una tecnología concerniente a obtener mediciones utilizando luz, estas mediciones pueden adquirirse al analizar las propiedades de la misma o bien al medir distancias a partir de la propagación de la luz. El campo y el desarrollo que la metrología óptica ha tenido, es muy vasto y espectacular. En la actualidad es una herramienta que permite perfeccionar la concepción dimensional acerca de un objeto en particular, desde el nivel macro a nivel microscópico.

En la metrología de superficies se miden características a pequeña escala de las superficies tales como su forma primaria, su perfil y la rugosidad. El equipo utilizado para medir superficies incluye técnicas de contacto y microscopios ópticos (conocidas también como técnicas de no contacto). Dentro de las primeras se pueden considerar a los perfilómetros de punto (similar a las cabezas de los fonógrafos) y al microscopio de fuerza atómica principalmente, mientras que las técnicas de no contacto incluyen principalmente a la interferometría, a la microscopia confocal (genéricamente definidas como técnicas de barrido vertical) y al microscopio de rastreo láser, conocido como SLM por sus siglas en inglés (definidos como técnicas de barrido horizontal). Combinaciones entre todas estas técnicas han derivado en una amplia gama de instrumentación desarrollada en la actualidad para la caracterización de superficies.

El estudio que se presenta, es un intento innovador en este campo de la medición de superficies, el cual combina principios de barrido superficial basados en la utilización de una fuente de iluminación tipo láser, aprovechando las ventajas que está presenta, y de técnicas interferométricas que convergen en un par de instrumentos de tipo perfilómetros de punto. Aplicando principios de heterodinización de señales a los instrumentos propuestos, obtenemos lo que se ha definido como “Interferómetro Heterodino de tres haces Gaussianos” y el “Microscopio Interferométrico Heterodino de dos haces Gaussianos”, para obtener información acerca de los perfiles de diferentes superficies de calidad óptica. En este trabajo en particular, se reportan mediciones de la rugosidad, utilizando los novedosos arreglos ópticos mencionados, capaces de obtener características sub-superficiales de una manera simple y precisa. Estos instrumentos ópticos se basan en la heterodinización de haces de iluminación provenientes de una fuente tipo láser de naturaleza Gaussiana. Las superficies medidas presentan reflectividad constante y consisten o se comportan básicamente como rejillas de difracción.

Específicamente, se presenta a detalle el principio físico del funcionamiento del “Microscopio Interferométrico Heterodino de dos haces Gaussianos”, mostrando sus principales características que lo hacen un instrumento versátil para medir superficies reflectoras de calidad óptica. Como primera etapa en el desarrollo de este instrumento, se describe la manera en como se calibró el instrumento a partir de la medición de una rejilla de difracción comparando los resultados con los obtenidos utilizando un microscopio de fuerza atómica.

Por otro lado, se muestra la capacidad para medir del “Interferómetro Heterodino de tres haces Gaussianos” al utilizarlo en la medición de dispositivos ópticos ampliamente utilizados para almacenamiento digital de datos, como lo son el CD y el DVD, sin la necesidad de realizar alguna preparación especial a las muestras como sucede al usar otros instrumentos o técnicas para el control de calidad en la producción de dichos dispositivos.

Finalmente, a lo largo de este trabajo, se realiza una descripción de las virtudes y limitaciones de los instrumentos aquí descritos, con lo que se pretende dejar asentado las posibilidades de desarrollo y aplicaciones potenciales que pueden tener estos instrumentos para la caracterización de superficies de calidad óptica y otro tipo de materiales, inclusive la posibilidad de medir cambios en el índice de refracción. También, se explican las razones por las cuales no se utiliza el arreglo óptico de dos haces para la medición de los dispositivos ópticos de almacenamiento de datos, las cuales se describen a lo largo del texto. Uno de los motivos es que se introduce por vez primera el principio de funcionamiento del instrumento, aunado a cuestiones de la resolución lateral (la resolución lateral del arreglo de tres haces es mayor y por tanto, más adecuado para obtener la información del perfil de la superficie de dispositivos ópticos que pueden almacenar mayor cantidad de datos, como es el caso del DVD).

La estructura general de la tesis por capítulos es como sigue. El capítulo 1 presenta algunas nociones breves acerca de los antecedentes en la curiosidad intrínseca del hombre por dimensionar y mensurar el mundo que le rodea, además de definir brevemente las cantidades físicas que se desean obtener al utilizar los arreglos ópticos propuestos y presentar el estado del arte de las técnicas e instrumentos utilizados para la caracterización de superficies. En el capítulo 2 se describe a detalle el funcionamiento teórico del interferómetro de dos haces, presentando mediciones experimentales utilizando este dispositivo en el capítulo 3, donde también se explican algunas consideraciones de funcionamiento del arreglo óptico. El capítulo 4 muestra una breve descripción del funcionamiento del interferómetro basado en tres haces Gaussianos y se presentan las mediciones experimentales de dispositivos de almacenamiento óptico comerciales correspondientes a un CD-R y a un DVD-R. Finalmente en el capítulo 5 se escriben las conclusiones del trabajo realizado.

AGRADECIMIENTOS.

A Dios, el posible; a la vida, la presente.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente han contribuido a mi formación académica y personal. A mis padres y mis hermanos, porque se que están ahí cerca y que son como los seguros de vida y daños materiales: más vale tenerlos y no necesitarlos que necesitarlos y no tenerlos. Al amor valeroso por estar en las buenas y en las no tanto, a ti pequeña. Por escucharme y conversar gracias a todos. A mis profesores que me han formado desde pequeño, porque las buenas enseñanzas permanecen y las malas experiencias fortalecen.

A todos los que por alguna razón han participado y convivido de alguna manera conmigo en el CIO durante estos últimos seis años (entre maestría y doctorado) y que me ha tocado la fortuna de conocer y convivir. Gracias por los servicios prestados y los favores concedidos. Gracias a todos los investigadores pues de alguna manera, han contribuido a mi conocimiento sobre metodologías de trabajo diversas con sus pláticas, experiencias y actitudes. Por aquellos que me han favorecido con su consejo y ayuda. A todo el equipo que ha colaborado en la DFA todos estos años. A mis compañeros de desvelo y estudios, por las coincidencias y por el respeto a las diferencias de opinión y de carácter.

Muy en especial al gran equipo de trabajo conformado en la última etapa de mi doctorado: Dr. Moisés Cywiak (no se como agradecerle tanto desvelo y paciencia para mi persona), Dr. Lorenzo Juárez Palafox (gracias por incentivar la disciplina, por escuchar y apoyar) y al Dr. Manuel Servín (por no arredrarse ante la crítica), todos un grupo de amigos.

Gracias inmensas al CONACYT, institución que vela y apoya a la formación de recursos humanos de alto nivel, para que contribuyan al crecimiento del país; a su personal pues sin su soporte logístico no hubiera sido posible llegar a este puerto; el compromiso es enorme, el reto motivador, el de contribuir a que esta nación logre el equilibrio entre sus habitantes día a día, realizando mi trabajo con responsabilidad y dedicación.

ÍNDICE GENERAL.

	<u>Página</u>
RESUMEN.....	1
OBJETIVO.....	2
PREFACIO Y MOTIVACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	8
CAPÍTULO 1: Introducción	
1.1 Introducción.....	11
1.2 Antecedentes.....	12
1.3 Perfiles y rugosidad.....	15
1.4 Estado del arte en la medición de perfiles y planteamiento del problema.....	19
Referencias del capítulo.....	22
CAPÍTULO 2: El Microscopio Interferométrico Heterodino de dos haces Gaussianos	
2.1 Introducción.....	26
2.2 Descripción analítica y diagrama experimental.....	27
2.3 Cálculo de la potencia detectada por el fotodiodo.....	37
2.4 Selección del punto de operación.....	38
Referencias del capítulo.....	42

CAPÍTULO 3: Medición de una superficie de calidad óptica con el interferómetro	
Heterodino de dos haces Gaussianos y algunas consideraciones experimentales	
3.1 Introducción.....	43
3.2 Medición de una rejilla de difracción.....	43
3.3 Consideraciones experimentales.....	45
Referencias del capítulo.....	48
CAPÍTULO 4: Medición de dispositivos de almacenamiento óptico con el Interferómetro	
Heterodino de tres haces Gaussianos	
4.1 Introducción.....	49
4.2 El Interferómetro de tres haces Gaussianos.....	52
4.3 Mediciones experimentales del perfil de dispositivos de almacenamiento óptico.....	56
Referencias del capítulo.....	62
CAPÍTULO 5: Conclusiones.....	65

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción.

El conocimiento acerca de las características superficiales de materiales en la industria manufacturera es de gran importancia para la fabricación de los más diversos instrumentos y herramientas que le permiten al hombre transformar y medir su entorno. Es posible conocer las peculiaridades propias de los materiales desde una visión macroscópica hasta límites microscópicos o inclusive nanoscópicos en donde se involucran la interacción de los más diversos fenómenos tanto físicos. La información obtenida a partir del estudio detallado de las superficies y del comportamiento de materiales ante la presencia de diferentes variables físicas (fuerzas, temperatura, esfuerzos, etc), permite reconocer las capacidades macroscópicas que estos tienen para utilizarse en diversos sistemas de producción y herramientas diseñadas y construidas por el hombre.

Mas aún, cuando se llegan a explorar las redes moleculares y atómicas que conforman cualquier material, se comprende como es que las fuerzas de las diferentes partículas elementales que conforman a la materia, se relacionan entre sí determinando sus características a nivel microscópico. Para realizar estos estudios es necesario contar con técnicas y metodologías de medición, así como con el equipo adecuado que permita analizar las propiedades de los materiales bajo condiciones de trabajo determinadas. Muchos campos de la ciencia y la tecnología se han interesado en el diseño de estos dispositivos, principalmente basados en sistemas mecánicos simples o mediante la implementación de variados circuitos electrónicos o bien la combinación de ambos. La óptica, desde su nacimiento, no ha sido ajena al diseño de equipos de medición. En esta vertiente, se han desarrollado muchas técnicas y construido los más diversos instrumentos para la caracterización y observación de materiales, desde el microscopio simple hasta equipos sofisticados que combinan principios de mecánica y electrónica. En el presente

capítulo, desde la visión de la ciencia óptica, se plasma brevemente el estado del arte que guardan las técnicas utilizadas para la caracterización superficial de materiales.

1.2 Antecedentes.

Desde que el hombre tomó conciencia del mundo que le rodea, ha procurado entenderlo para de esta forma transformarlo y saciar su apetito creativo. Para materializar estas transformaciones, ha requerido comprender como y porque suceden los fenómenos naturales y por supuesto mensurar el mundo que le rodea, es decir, clasificarlo. Registros históricos indican que diversos materiales con propiedades ópticas, han sido utilizados por el hombre desde tiempos remotos, para iluminar u observar su entorno. Se tiene registro de que los espejos y lentes para mejorar la visión, fueron utilizados por los egipcios (1900 a.C.) y otras civilizaciones distantes en espacio pero coincidentes en tiempo. Por ejemplo, en la cultura Olmeca (1500 a. C.), los aldeanos utilizaban en su vestimenta diversos ornamentos incluidos espejos de hematita. También, se ha comprobado que utilizaban piedras pulidas finamente como espejos para reflejar la luz de la luna e iluminar sus viviendas [1,2]. Referencias a la utilización de las lentes se encuentran en los escritos de Confucio (500 a. C). Breves pero aleccionadores textos sobre la historia de la óptica pueden encontrarse en la introducción de varios textos sobre óptica [3,4]. Uno de los primeros instrumentos de medición ópticos creados por el hombre es quizá el telescopio, fabricado gracias a Zacharias Jensen en Holanda. Pero es Galileo Galilei, en 1609, quién construyó por vez primera un telescopio con una calidad razonablemente buena. El telescopio le sirvió en aquellas épocas a Galileo para realizar observaciones astronómicas y corroborar los postulados de Copernico. Posteriormente, en 1665 Robert Hooke había construido el primer microscopio compuesto mientras que Anthony van Leeuwenhoek en 1674 construyó el primer microscopio simple o lupa, instrumentos ópticos utilizados para mirar objetos imperceptibles al ojo humano. A partir de este momento, el desarrollo de la instrumentación óptica y la óptica en general aplicada a la medición y caracterización de materia invisible para la resolución del ojo humano ha sido constante, y a partir del nacimiento del láser en el siglo pasado, vertiginoso.

De la reseña anterior se deduce que el hombre siempre ha requerido medir y clasificar objetos. El acto de medir dimensionalmente un objeto o determinar la cantidad de una variable física, ya sean espaciales o temporales, se realiza al comparar el tamaño de un intervalo desconocido con respecto a una referencia estándar, por lo que se requiere contar con una serie de procedimientos y metodologías específicas que desembocan en toda una disciplina de estudio. La metrología es precisamente la que se encarga de esta tarea, la cual es considerada como la ciencia de los pesos y medidas. Un estudio interesante acerca del significado actual de la palabra metrología y sus implicaciones, pueden encontrarse en las Refs. [5-7]. El interés en conocer esta asignatura radica en que, una vez combinada con la óptica, conforman toda una disciplina conocida como metrología óptica.

Si se analiza separadamente cada uno de los dos términos que forman el nombre genérico de Metrología Óptica, encontramos una conexión de dos de los más distintivos aspectos de los humanos: un desarrollado sentido de la visión y la necesidad de clasificar objetos utilizando números y normas bien establecidas. De nuestros cinco sentidos la visión es sin duda el más desarrollado y el sentido más cercano a la parte racional de nuestro cerebro. Puede argumentarse que nuestra memoria depende en gran medida de las imágenes y el cerebro es particularmente hábil procesando los estímulos recibidos a través de la vista para extraer información. Las sociedades modernas se fundamentan en el hecho de relacionar el mundo que las rodea a mediciones, a tamaños y a valores contables. La utilización de cantidades abstractas tales como el tamaño, el valor o la intensidad ha simplificado la descripción de investigaciones complejas y es la base de la ciencia moderna y la economía. Por tanto, parecería natural que la combinación de estos aspectos convergieran en el nacimiento de un nuevo campo de la ciencia. Pero para la metrología óptica, este no es el caso. Muchos autores la consideran como un grupo especial de técnicas usadas en determinados nichos de la tecnología. La metrología óptica podría ser descrita correctamente como un ensamble de técnicas en las cuales diversas disciplinas tales como física, ingeniería electrónica, mecánica y ciencias de la computación se mezclan y fusionan de diferentes maneras.

La metrología óptica tiene como propósito efectuar mediciones de muy alta precisión usando las ondas de luz como escala, lo cual conlleva a realizar pruebas no destructivas (métodos de no invasión o de no contacto). En la metrología óptica se combinan una serie de disciplinas relativas a la ciencia óptica, tales como sistemas e instrumentación óptica, polarización, interferencia, emisión de la luz, detectores de luz, procesamiento digital de imágenes y señales eléctricas, etc. Esta disciplina ha tenido un gran impacto en la solución de problemas industriales y de ingeniería, así como en la aplicación de técnicas enfocadas al monitoreo médico.

La evolución de la metrología óptica ha sido beneficiada fuertemente por el desarrollo que se ha tenido en otros campos de la óptica y electrónica, tales como el desarrollo del láser, la fibra óptica y la computación entre otros. Las pruebas ópticas no destructivas estudiadas por la metrología óptica, han gozado de gran estima en la caracterización de materiales y, en años recientes, en el monitoreo médico.

Por todo lo anterior, no dejan de presentarse esfuerzos por diseñar sistemas más sofisticados para la realización de pruebas ópticas que permitan caracterizar y clasificar materiales de una manera precisa y real. Es por esto, que el estudio aquí presentado, consiste en utilizar un par de instrumentos que combinan principios de rastreo de superficie basados en la utilización de una fuente de iluminación tipo láser y de técnicas interferométricas que convergen en un par de dispositivos tipo perfilómetros de punta; aplicando principios de heterodinización de señales, obtenemos lo que se ha definido como “Interferómetro Heterodino de tres haces Gaussianos” y el “Microscopio Interferométrico Heterodino de dos haces Gaussianos”, para obtener información acerca del perfil o rugosidad de superficies de calidad óptica.

Específicamente, uno de los objetivos de esta tesis es presentar a detalle el principio físico del funcionamiento del “Microscopio Interferométrico Heterodino de dos haces Gaussianos”, así como de mostrar sus principales características que lo hacen un instrumento versátil para medir superficies reflectoras de calidad óptica. Como primera etapa en el desarrollo de este instrumento, se describe la manera en como se calibró el

instrumento a partir de la medición de una rejilla de difracción y al comparar los resultados con los obtenidos utilizando un microscopio de fuerza atómica.

Otro de los objetivos que se persiguen es el de mostrar la capacidad para medir del “Interferómetro Heterodino de tres haces Gaussianos” al utilizarlo en la medición de dispositivos ópticos ampliamente utilizados para almacenamiento de datos, como lo son el CD y el DVD, sin la necesidad de realizar alguna preparación especial a las muestras como sucede al usar otros instrumentos o técnicas para el control de calidad en la producción de dichos dispositivos.

Finalmente, a lo largo de este trabajo, se realiza una descripción de las virtudes y limitaciones de los instrumentos aquí descritos, con lo que se pretende dejar asentado las posibilidades de desarrollo y aplicaciones potenciales que pueden tener estos instrumentos para la caracterización de superficies de calidad óptica.

1.3 Perfiles y rugosidad

Puesto que en la caracterización de superficies y el análisis físico de materia realizadas por técnicas e instrumentos desarrollados bajo el amparo de la metrología óptica se tiene un amplio margen de observación, es necesario definir ciertos parámetros de medición útiles para una adecuada interpretación de los resultados obtenidos, entre ellos el concepto de rugosidad.

Por otro lado, la utilización de técnicas de no contacto para la medición de la topografía de superficies, han sido ampliamente difundidas durante el transcurso de las últimas décadas. El auge es debido principalmente, a que muchos de los objetos que requieren caracterizarse no pueden someterse a pruebas físicas que provoquen desgaste en los mismos, además de razones de costo y eficiencia. Dentro de toda la gama de técnicas existentes para dicho fin se encuentran los métodos ópticos, los cuales han sido ampliamente utilizados por su versatilidad, amén de ser de no contacto, de campo completo y con la ventaja de que son

sistemas de medición que proporcionan una alta resolución, lo que permite visualizar detalles en los objetos bajo observación imperceptibles para otras técnicas.

En cuanto a la noción que se tiene en metrología de la definición de perfil, este puede considerarse como una característica intrínseca a la rugosidad, presente en cualquier tipo de superficie maquinada por el hombre o presente en la naturaleza. Puesto que la calidad en el terminado de una superficie está directamente relacionada a las desviaciones que presenta con respecto al diseño original debido a fallas en los procesos de manufactura, el medir y por tanto conocer el acabado en una superficie, influye directamente en que la pieza cumpla o no con las especificaciones requeridas. Bajo este punto de vista, la falla se define por la incapacidad del proceso de producción de la superficie de funcionar de una manera esperada y, en la mayoría de los casos, se manifiesta en términos de calidad.

En los procesos de maquinado, las características superficiales del producto influyen en su funcionalidad. La figura dominante en una superficie está influenciada por el método de maquinado, ya que cada tipo de herramienta de corte o pulido deja marcas distintivas en la superficie. El acabado superficial de los cuerpos puede presentar errores de forma macro-geométricos y micro-geométricos. La rugosidad superficial es el conjunto de irregularidades de la superficie real, definidas convencionalmente en una sección donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados. Proporciona información acerca de la textura de la superficie y se puede cuantificar por las desviaciones verticales que tiene la superficie real con respecto a su forma ideal. Si estas desviaciones son grandes la superficie se considera rugosa, de lo contrario se define como suave o lisa.

La geometría real de una superficie es complicada de definir, por lo que inclusive un número finito de parámetros no proporcionan una descripción completa. Si el número de parámetros se incrementa, una descripción más exacta de la superficie puede obtenerse. Los parámetros utilizados para cuantificar la rugosidad pueden interpretarse como parámetros propios de la distribución estadística de alturas del perfil o superficie bajo análisis, y pueden definirse como parámetros de amplitud, de espaciamiento y parámetros híbridos [8].

Dependiendo del valor medio o aritmético de la rugosidad medida en una superficie, puede definirse como sigue. El término “micro-rugosidad” se refiere a superficies cuyas longitudes de onda espaciales están en el rango de 1 μm a 1 mm; las superficies cuyas longitudes de onda espaciales están en el rango de 1 μm a 100 μm esparcirán la luz visible. La rugosidad de superficies con longitudes de onda espaciales en el rango de 1 mm a 1 cm se llaman “waviness” o “cáscara naranja”; produce esparcimiento del orden de algunos arcos de segundo o fracciones de arco de segundo desde el haz especular. La rugosidad espacial con una longitud de onda más grande se hace indistinguible de la forma de la superficie y es habitualmente medida en fracciones de la longitud de onda de luz visible.

Las superficies rugosas pueden tomar muchas formas. Frecuentemente consisten de rayados diminutos en direcciones al azar que permanecen después del pulido, pero esto puede ser también la estructura reticulada sobre un espejo metálico producida por una punta de diamante, el relieve granular sobre un metal pulido tal como molibdeno, las marcas aleatorias de distintos maquinado sobresaliendo sobre un metal pulido para darle un brillo difuso o las ranuras paralelas diminutas en una superficie de vidrio que han sido hechas con precisión, o incluso rayados grandes causados por un manejo inapropiado de la superficie.

Las superficies rugosas tienen dos atributos principales: la altura de la rugosidad (o profundidad) y la dimensión lateral. Un rayado, por ejemplo, tiene una profundidad de unas décimas de un micrómetro y una anchura de unos cuantos micrómetros. Los pequeños cristalitos que constituyen las películas ópticas tienen alturas de unas décimas de nanómetro y dimensiones laterales de un fragmento de un micrómetro. La ASM (American Society for Metals) [9], da la siguiente clasificación de la rugosidad para el acabado de superficies.

Acabado	Rugosidad Ra (μm)
Limpio	50
Rugoso	25
Semirugoso	12.5
Medio	6.3
Semifino	3.2
Fino	1.60
Terso	0.80
Lustre	0.40
Pulido	0.20
Espejo	0.10

Tabla 1.1 Clasificación de los acabados de una superficie en base al valor rms de su rugosidad (Ra).

En la metrología óptica se miden características a pequeña escala de diversas superficies, tales como su forma primaria, su perfil y la rugosidad. Los equipos utilizados para medir estas superficies incluyen técnicas de contacto y microscopios ópticos (o técnicas no destructivas). Dentro de los primeros dispositivos, se pueden considerar a los perfilómetros de punto (similar a las cabezas de los fonógrafos que pueden ser de tipo inductivo, capacitivo o tipo piezoeléctrico) y al microscopio de fuerza atómica principalmente. Instrumentos y técnicas de no contacto incluyen primordialmente a la interferometría, la microscopía confocal (genéricamente definidas como técnicas de barrido vertical) y al microscopio de barrido láser, conocido como SLM (Scanning Laser Microscopy) por sus siglas en inglés, definida está última como técnica de barrido horizontal. Combinaciones entre todos estos métodos han derivado en una amplia gama de instrumentación utilizada en la caracterización de superficies.

Al medir una superficie con cualquiera de los dispositivos mencionados, implícitamente proporcionarán información del perfil de dicha superficie cuando se mide en una sola dimensión, e información de la topografía superficial cuando se obtiene una imagen de la

superficie o bien se rastrea en más de una dirección. En cualquier caso lo que se está midiendo es rugosidad.

1.4 Estado del arte en la medición de perfiles y planteamiento del problema.

La medición de la rugosidad en superficies es un parámetro importante a considerar en varias aplicaciones ópticas, como por ejemplo, en el pulido de espejos o en la industria electrónica. Debido a esta importancia, en la actualidad están disponibles una serie de equipos e instrumentos para caracterizar superficies. La mayoría son dispositivos formadores de imagen o bien que entran en contacto con la superficie que se desea caracterizar, como es el caso del microscopio de fuerza atómica. Una revisión de las diferentes técnicas actualmente en uso pueden encontrarse en las referencias [10-18]. Técnicas interferométricas son preferidas para inspeccionar superficies de alta calidad óptica, debido a su alta sensibilidad vertical [19-25]. Sistemas de rastreo o tipo escáner se eligen para obtener una mejor resolución lateral en la inspección de áreas microscópicas [26-28]. Las técnicas interferométricas de barrido se combinan con técnicas de heterodinización u homodinización de señales en un esfuerzo por mejorar la resolución lateral y/o vertical [29-34].

Desarrollos recientes de instrumentos que miden más allá del límite de difracción (microscopía de alta resolución) y que se utilizan en el campo de la biología molecular [35-43], han sido utilizados para caracterización de superficies y materiales. Este tipo de microscopios pertenecen al campo de la óptica de campo cercano [42, 43], y se basan en las propiedades que tienen algunos materiales fluorescentes. Muchos de estos sistemas utilizan arreglos y dispositivos ópticos complejos y a su vez de complicados algoritmos de procesamiento de señales o bien dan su lectura de la medición a través de la fase.

Es por esto que se reporta la utilización de un par de instrumentos (perfilómetros ópticos) fáciles de manipular y simples de implementar, debido al principio físico que gobierna su funcionamiento, para caracterizar superficies de calidad óptica mediante la combinación de

instrumentación óptica (microscopio) con principios de interferometría, resultando en una técnica de medición no destructiva con alta resolución vertical y moderada resolución lateral [44] (del orden de la longitud de onda de la fuente de iluminación), y que pertenece al campo de la metrología óptica. Estos instrumentos obtienen directamente la información de la superficie (perfil) al detectar cambios en la intensidad de la luz reflejada, debido a las diferencias en altura que muestra dicha superficie. Las superficies de calidad óptica seleccionadas y medidas consistieron en una rejilla de difracción reflectora esmerilada y de dispositivos de almacenamiento óptico comerciales, tales como el disco compacto y el disco versátil digital. Los acrónimos de CD y DVD son debidos a su significado en lengua inglesa, respectivamente.

Es muy importante recalcar y aclarar el porque se utilizan estos instrumentos para caracterizar superficies de calidad óptica como las mencionadas. En primer lugar, el “Microscopio Interferométrico Heterodino de dos haces Gaussianos” es un instrumento que presenta una muy buena estabilidad e inmunidad hacia ruidos externos de trabajo tales como ruido eléctrico, vibraciones leves y pequeñas corrientes de aire entre otros factores, por lo que puede ser utilizado en ambientes de trabajo ajenos a las condiciones que se presentan en un laboratorio, si bien no deja de requerir algunas condiciones propias de estabilidad necesarias para el funcionamiento óptimo de una técnica interferométrica. Por tanto, si se consideran las condiciones que están presentes en un espacio donde se producen sustratos para ensamblar CD’s o bien en la manufactura de obleas semiconductoras donde la resolución lateral requerida es aproximadamente la longitud de onda de iluminación del haz de iluminación y donde la resolución vertical es de centésimas de esta longitud, este instrumento encaja adecuadamente para realizar inspecciones superficiales de calidad de dichas superficies, sin la necesidad de duplicar las condiciones presentes en un laboratorio. En segundo lugar, las condiciones para elegir el punto de operación óptimo del instrumento (como se discutirá en el capítulo 2), son relativamente sencillas de conseguir puesto que esto se logra al medir una señal de DC en un osciloscopio. Por está razón, si bien no se está utilizando este instrumento para medir la superficie donde yacen las pistas de un CD y un DVD (puesto que la resolución requerida para obtener el perfil de las pistas de la capa de grabación en un DVD, es muy cercana a la longitud de onda de iluminación), se presenta

por vez primera el principio físico por el cual dicho interferómetro mide a partir de la elección del punto de operación del instrumento. Es por esto que en el presente documento, se muestra extensivamente y con detalle el proceso de calibración y la explicación física del funcionamiento del “Microscopio Interferométrico Heterodino de dos haces Gaussianos” y se comparan las mediciones realizadas de una rejilla de difracción contra las obtenidas con un microscopio de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés). Este microscopio presenta una resolución vertical alta y una moderada resolución lateral, que si bien no es mayor a la mostrada por el de tres haces, si muestra un mejor comportamiento bajo condiciones de trabajo mas ruidosas (vibraciones, ruido eléctrico, etc).

Se utiliza una rejilla de difracción para calibrar el sistema, debido a que es una superficie conocida y totalmente caracterizada por el fabricante, lo que sirve para obtener la calibración del sistemas y para corroborar su funcionamiento al comparar el perfil medido con respecto al obtenido el AFM.

Por otro lado, para la medición superficial del CD y del DVD, se utilizó el “Interferómetro Heterodino de tres haces Gaussianos” debido a que cuenta con una mayor resolución lateral, lo que permite obtener de una manera más precisa el perfil de las pistas en un DVD (y por tanto con mayor facilidad en el CD). El principio de funcionamiento y aplicaciones del “Interferómetro Heterodino de tres haces Gaussianos” ya ha sido ampliamente discutida en las Refs. [45-47] por lo que no será necesario explicar a detalle el principio físico de su funcionamiento. Uno de los objetivos perseguidos en este trabajo, es demostrar que el sistema puede fácilmente caracterizar esté tipo de superficies ópticas para el control de calidad, sin que sea necesario utilizar otro tipo de instrumentos que requieren que sean removidas las diferentes capas que forman tanto el CD como el DVD, para obtener el perfil de las pistas del mismo o bien de la utilización de software que indirectamente proporcionan un “perfil digital” de la superficie.

Referencias.

1. Ávila A. Rosa, “Los pueblos mesoamericanos,” p. 53-66, IPN (1992).
2. Soustelle, Jacques, “Los Olmecas, tr. Juan José Utrilla, México”, FCE.
3. E. Hecht, “Óptica,” pp. 1-10, 3era. Ed., Addison Wesley Iberoamericana, Madrid (2000).
4. D. Malacara, “Óptica Básica,” pp. 23-27, 2da. Ed., Fondo de Cultura Económica, México (2004).
5. D. Kind and H. Lübbig, “Metrology-the present meaning of a historical term,” IOP, *Metrología* **40**, pp. 255-257 (2003).
6. D. A. Swyt, “Length and dimensional measurements at NIST,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **106**, pp. 1-23 (2001).
7. I. C. Gardner, “The early history of Optics at the National Bureau of Standards,” *Appl. Opt.* **6**, pp. 1-8 (1967).
8. Gadelmawla E.S., Koura M.M., Maksoud T.M.A., Elewa I.M. and Soliman H.H., “Roughness parameters,” *Journal of Materials Processing Technology* **123** (1), pp. 133-145 (2002).
9. ASM International Metals Handbook, “Machining,” 9th edition, **16** (1989).
10. J. M. Bennett, “Comparison of techniques for measuring the roughness of optical surfaces,” *Opt. Eng.* **24**, 380-387 (1985).
11. J. M. Bennett and J. H. Dancy, “Stylus profiling instrument for measuring statistical properties of smooth optical surfaces,” *Appl. Opt.* **20**, 1785 (1981).
12. D. Walker, H. Yang and S. Kim, “Novel hybrid stylus for nanometric profilometry for large optical surfaces,” *Opt. Express* **11**, 1793-1798 (2003).
13. H. J. Tiziani, “Optical methods for precision measurements,” *Opt. Quantum Electron.* **21**, 253-282 (1989).
14. S. R. Clark, and J. E. Greivenkap, “Optical reference profilometry,” *Opt. Eng.* **40**, 2845 (2001).
15. G. S. Kino and S. S. C. Chim, “Mirau correlation microscope,” *Appl. Opt.* **29**, 3775-3783 (1990).

16. W. Zhou, Z. Zhou and G. Chi, "Investigation of common-path interference profilometry," *Opt. Eng.* **36**, 3172-3175 (1997).
17. M. B. Suddendorf, C. W. See, M. G. Somekh, "Combined differential amplitude and phase interferometer with a single probe beam," *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 28-30 (1995).
18. Z. F. Zhou, T. Zhang, W. Zhou and W. Li "Profilometer for measuring superfine surfaces," *Opt. Eng.* **40**, 1646-1652 (2001).
19. G. E. Sommargren, "Optical heterodyne profilometry," *Appl. Opt.* **20**, 335-343 (1981).
20. C-C. Huang, "Optical heterodyne profilometer," *Opt. Eng.* **23**, 365-370 (1984).
21. J. C. Wyant, "Optical profilers for surface roughness," *Proc. SPIE* **525**, 174-180 (1985).
22. M. Davidson, K. Kaufman, I. Mazor, F. Cohen, "An application of interference microscopy to integrated circuit inspection and metrology," in *Integrated Circuit Metrology, Inspection and Process Control*, K. M. Monahan, ed., *Proc. SPIE* **775**, 233-247 (1987).
23. P. J. Caber, "Interferometric profiler for rough surfaces," *Appl. Opt.* **32**, 3438-3441 (1993).
24. G. W. Johnson, D. C. Leiner and D. T. Moore, "Phase-locked Interferometry," *Proc. SPIE* **126**, 152-160 (1977).
25. K. Creath and J. C. Wyant, "Absolute measurement of surface roughness," *Appl. Opt.* **29**, 3823-3827 (1990).
26. B. S. Lee and T. C. Strand, "Profilometry with a coherence scanning microscope," *Appl. Opt.* **29**, 3784-3788 (1990).
27. B. Barrientos, M. Cywiak and M. Servín, "Profilometry of optically smooth surfaces by a Gaussian probe beam," *Opt. Eng.* **42**, 3004-3012 (2003).
28. M. Cywiak, J. F. Aguilar and B. Barrientos, "Low-numerical-aperture Gaussian beam confocal system for profiling optically smooth," *Opt. Eng.* **44**, 1-7 (2005).
29. J. Murakowski, M. Cywiak, B. Rosner and D. van der Weide, "Far field optical imaging with subwavelength resolution," *Opt. Commun.* **185**, 295-303 (2000).

30. M. Cywiak, J. Murakowski and G. Wade., "Beam blocking method for optical characterization of surfaces," *IJIST* **11**, 164-169 (2000).
31. T. Sawatari, "Optical Heterodyne Scanning Microscope," *Appl. Opt.* **12**, 2768-2772 (1973).
32. M. Kempe and W. Rudolph, "Scanning microscopy through thick layers based on linear correlation," *Opt. Lett.* **19**, 1919-1921 (1994).
33. M. Kempe, W. Rudolph and E. Welsch, "Comparative study of confocal and heterodyne microscopy for imaging through scattering media," *J. Opt. Soc. Am. A.* **13**, 46-52 (1996).
34. M. Kempe and W. Rudolph, "Analysis of heterodyne and confocal microscopy for illumination with broad-bandwidth light," *J. Mod. Opt.* **43**, 2189-2204 (1996).
35. W. Lucosz, "Optical Systems with Resolving Powers Exceeding the Classical Limit," *J. Opt. Soc. Am.* **56**, 1463-1472 (1966).
36. I. J. Cox and J. R. Sheppard, "Information capacity and resolution in an optical system," *J. Opt. Soc. Am. A.* **3**, 1152-1158 (1986).
37. S. W. Hell and J. Wichmann, "Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy," *Opt. Lett.* **19**, 780-782 (1994).
38. M. A. Neil, R. Juskaitis and T. Wilson, "Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope," *Opt. Lett.* **22**, 1905-1907 (1997).
39. M. G. Gustafsson, "Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy," *J. Microsc.* **198**, 82-87 (2000).
40. L. H. Schaefer, D. Schuster and J. Schaffer, "Structured illumination microscopy: artefact analysis and reduction utilizing a parameter optimization approach," *J. Microsc.* **216**, 165-174 (2004).
41. S. W. Hell, "Toward fluorescence nanoscopy," *Nat. Biotech.* **21**, 1347-1355 (2003).
42. A. Lewis, H. Taha, A. Strinkovski, A. Manevitch, A. Khatchaturiants, R. Dekhter and E. Ammann, "Near-field optics: from subwavelength illumination to nonometric shadowing," *Nat. Biotech.* **21**, 1378-1386 (2003).

43. L. Novotny, "The History of Near-field Optics," *Progress in Optics* **50**, E. Wolf (ed.), Chap. 5, p. 137-184, Elsevier (2007).
44. J. M. Flores, M. Cywiak, M. Servín and L. Juárez, "Heterodyne two beam Gaussian microscope interferometer," *Opt. Express*. **15**, 8346-8359 (2007).
45. L. Juárez, M. Cywiak, M. Servín and J. M. Flores, "Three Gaussian beam heterodyne interferometer for surface profiling," *Opt. Commun.* **268**, 209-214 (2006).
46. L. Juárez, M. Cywiak, M. Servín and J. M. Flores, "Three Gaussian beam interferometric profilometer applied to the characterization of an optical flat," *Opt. Express*. **15**, 5277-5287 (2007).
47. L. Juárez Palafox, "Perfilometría de superficies de calidad óptica (Interferómetro Heterodino de tres haces Gaussianos)", Tesis doctoral, Noviembre 2007.

CAPÍTULO 2

El Microscopio Interferométrico Heterodino de dos haces Gaussianos

2.1 Introducción.

En el presente capítulo, se explica en fundamento físico del sistema interferométrico basado en la heterodinización de dos haces Gaussianos, desarrollando el modelo matemático a partir de la teoría escalar de la difracción utilizando la aproximación de Fresnel. A partir de esta integral, se muestra que el sistema propuesto puede trabajar de tal forma que presenta una respuesta lineal y, por tanto, que el tamaño del haz de prueba en el plano de detección es proporcional a las variaciones en la altura vertical local de la superficie bajo prueba. La amplitud de esta señal variante en el tiempo, a su vez, resulta ser proporcional a las variaciones de altura locales, y es detectada por un fotodiodo.

Este arreglo tipo microscopio interferométrico heterodino, inspecciona áreas microscópicas proporcionando alta resolución vertical (del orden de $\lambda/100$) y con una resolución lateral moderada ($\approx \lambda$), y alta razón de señal a ruido. Utiliza luz coherente como fuente de iluminación, proporcionada por un láser tipo He-Ne, y su fundamento consiste en la heterodinización de dos haces en forma de un interferómetro de rastreo. Uno de los haces, después de ser reflejado por la superficie bajo estudio, se dirige hacia un fotodiodo donde es coherentemente superimpuesto con el primer orden de difracción de una celda acusto-óptica. Para obtener el perfil, el objeto bajo prueba es entonces rastreado.

La heterodinización de los dos haces Gaussianos consiste en que uno de los haces es utilizado como haz de prueba, enfocado y reflejado por la superficie a caracterizar. El segundo haz interfiere con el primero e introduce un señal modulante variante en el tiempo. Este haz de luz modulante se obtiene a partir del primer orden de difracción de una celda acusto-óptica ó celda de Bragg. Ambos haces son interpuestos y sumados coherentemente

en el plano de detección de un fotodiodo, el cual integra completamente la intensidad de los haces. La amplitud de la señal variante en el tiempo resultante a la salida del fotodetector, es proporcional a las alturas verticales locales del objeto bajo prueba. Puesto que se utiliza un amplificador de ancho de banda angosta para detectar la señal variante en el tiempo del fotodetector, el sistema exhibe una razón señal a ruido grande.

2.2 Descripción analítica y diagrama experimental.

La figura 2.1 muestra el diagrama experimental del arreglo experimental. Un láser He-Ne con un perfil de intensidad Gaussiano es utilizado como fuente iluminación coherente. El haz de iluminación es transmitido a través de una celda de Bragg la cual consiste en un medio acusto-óptico de dióxido de telurio (TeO_2) excitado a 80 MHz. Solo los órdenes de difracción cero y uno son utilizados.

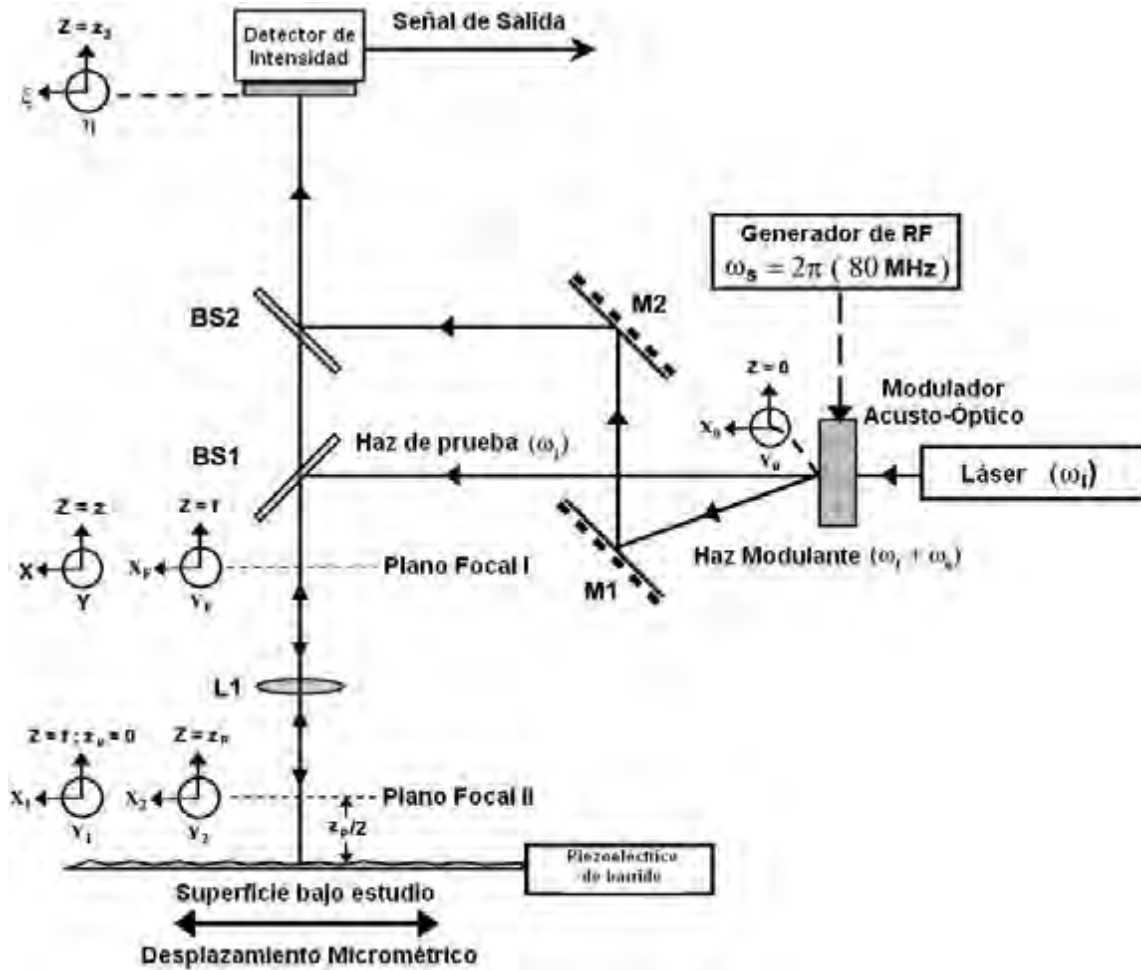


Fig. 2.1. Diagrama experimental. (x_0, y_0) son las coordenadas del plano a la salida de la celda de Bragg. (x, y) son las coordenadas del plano focal I de la lente L1. (x_1, y_1) representan las coordenadas del plano focal II. (x_2, y_2) son las coordenadas del plano focal II cuando el haz alcanza nuevamente este plano, después de haber sido reflejado por la superficie bajo estudio. (x_F, y_F) representan las coordenadas de el plano focal I cuando el haz alcanza este plano nuevamente en su camino hacia el fotodetector. Finalmente, (ξ, η) son las coordenadas en el plano de detección. M1 y M2 son espejos, BS1 y BS2 son divisores de haz 50-50, y L1 es la lente de enfoque.

Por facilidad asumiremos que la cintura Gaussiana del haz láser esta localizada en la posición de la celda de Bragg, la cual se encuentra en el plano coordenado (x_0, y_0) . El fotodiodo está localizado en el plano coordenado (ξ, η) . El orden cero de la celda se

propaga hacia el plano focal de la lente L1 localizado en el plano coordenado (x, y) . La lente L1 es un objetivo de microscopio de $100\times$ comercialmente disponible con una distancia focal f de aproximadamente 2 mm . Esta lente es adecuada para coleccionar tanta luz reflejada como sea posible proveniente de la superficie bajo estudio. Para este análisis, por simplicidad y sin perder generalidad, la distancia focal anterior y posterior se consideraran iguales al valor f .

Después de ser transmitido el haz de orden cero por la lente L1, es enfocado sobre el objeto bajo prueba, el cual se asume que presente reflectividad constante en el área bajo inspección. El objeto se encuentra localizado a una distancia $\frac{z_p}{2}$ del plano focal II de la lente L1. Esta distancia se toma de esta forma para simplificar el análisis matemático.

Una vez que ha sido reflejado el haz de prueba por la superficie bajo análisis, el haz de prueba es modulado en su fase por las irregularidades superficiales locales y propagado en la dirección de la lente L1, la cual transmite el haz hacia el plano focal I de la lente L1. A partir de este plano, el haz se propaga hacia el plano del fotodetector, localizado a una distancia z_2 medido desde el plano focal I.

El orden uno de difracción a la salida de la celda de Bragg, es dirigido hacia el fotodetector a través de la trayectoria trazada por los espejos M1, M2 y por el divisor de haz BS2. La longitud total recorrida por este haz se identifica como z_3 . La frecuencia temporal de este haz corresponde a la suma de la frecuencia temporal de la fuente de iluminación y la frecuencia de excitación de la celda acusto-óptica; este haz será referido como el haz modulante. Como se muestra en la Fig. 2.1, los dos haces son interpuestos y coherentemente adicionados en el plano del fotodiodo, cuya área sensible es suficiente para integrar la intensidad total de los haces. La señal a la salida del fotodetector es amplificada y enviada a un amplificador tipo filtro de señales (lock-in) para almacenamiento y detección de A. C.

Una imagen cualitativa del sistema puede ser obtenida notando que, en el plano del fotodiodo, dos haces Gaussianos con diferentes semi-anchos y diferentes radios de curvatura son coherentemente interpuestos. En este plano, el fotodetector integra la intensidad total de los haces. Uno de los haces (el haz modulante), tiene un semi-ancho y un radio de curvatura fijos y una frecuencia temporal angular $(\omega_l + \omega_s)$. El segundo haz (el haz de prueba), exhibe a semi-ancho y un radio de curvatura variables; estas variaciones son debidas a las variaciones verticales en la altura de la muestra bajo estudio. Este haz tiene una frecuencia temporal angular ω_l . La figura 2.2 muestra la distribución de amplitud absoluta de ambas Gaussianas en el plano de detección, con potencia unitaria.

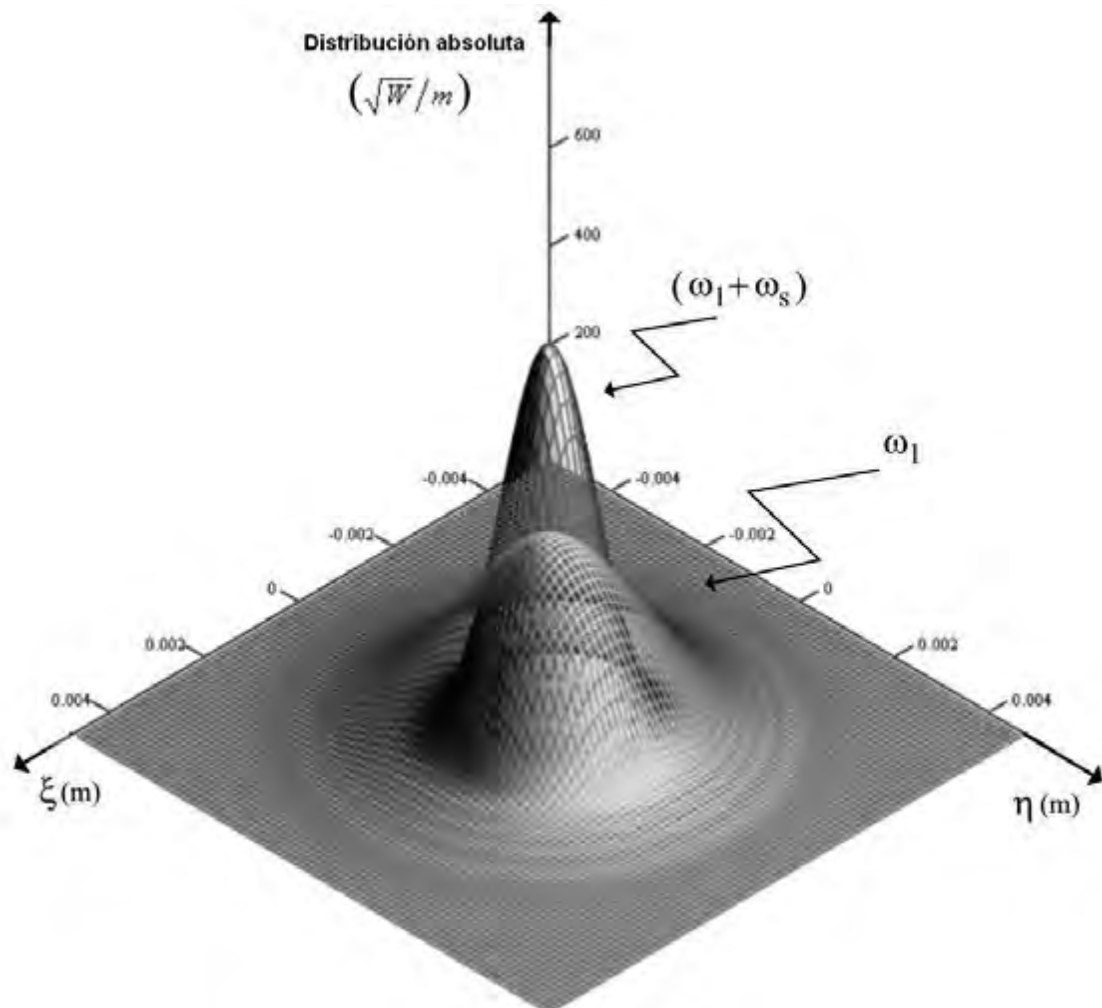


Fig. 2.2. Distribución de amplitudes absolutas de haces Gaussianos en el plano de detección.

Por facilidad, se dividirán los cálculos realizados de toda la propagación del haz de orden cero (haz de prueba) en las siguientes sub-secciones:

2.2.1 Propagación del haz a partir de la salida de la celda de Bragg hacia el plano focal I de la lente L1.

2.2.2 Transformada de Fourier realizada por la lente L1. (Esto corresponde a la propagación a partir del plano focal I hacia el plano focal II).

2.2.3 Propagación a partir del plano focal II de la lente L1 hacia el plano objeto (ida y vuelta).

2.2.4 Transformada de Fourier realizada por la lente L1 al haz reflejado. (Esto corresponde a la propagación del plano focal II hacia el plano focal I de la lente L1).

2.2.5 Propagación del haz a partir del plano focal I de la lente L1 hacia el plano de detección.

La propagación del haz modulante desde la salida de la celda de Bragg hasta el plano del fotodetector es fácilmente realizada en un solo paso y se describe al final de esta sección. A continuación, se presenta el análisis matemático.

2.2.1 Propagación del haz desde la salida de la celda de Bragg con coordenadas (x_0, y_0) , al plano focal I de la lente L1 con coordenadas (x, y) .

La distribución de amplitud del haz Gaussiano a la salida de la celda de Bragg, es representado por la función,

$$\Psi(x_0, y_0) = \left(\frac{2P_0}{\pi r_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{x_0^2 + y_0^2}{r_0^2} \right], \quad (2.1)$$

donde P_0 representa la potencia del haz y r_0 es el radio del haz Gaussiano.

Para calcular la distribución de amplitud en el plano focal I de la lente L1, localizada en el plano $(x, y, z = z)$, utilizamos la integral de difracción de Fresnel [1] como

$$\Psi(x, y) = \exp(-i\omega_l t) \frac{1}{i\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x_0, y_0) \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda z} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (2.2)$$

donde ω_l es la frecuencia temporal angular de la luz láser, λ es la longitud de onda del haz e $i = \sqrt{-1}$.

Sustituyendo la distribución de amplitud expresada por la Ec. (2.1) en la Ec. (2.2) y evaluando las integrales, la Ec. (2.2) puede expresarse como,

$$\Psi(x, y) = \frac{-i\pi r_0^2}{\lambda z - i\pi r_0^2} \sqrt{\frac{2P_0}{\pi r_0^2}} \exp(-i\omega_l t) \exp\left[\left(-\frac{\pi^2 r_0^2 - i\pi\lambda z}{\lambda^2 z^2 + \pi^2 r_0^4}\right)(x^2 + y^2)\right], \quad (2.3)$$

donde Z es la distancia entre los planos (x_0, y_0) y (x, y) . La Ec. (2.3) representa la distribución en amplitud del haz en el plano focal I de la lente L1.

2.2.2 Transformada de Fourier debido a la lente L1. (Corresponde a la propagación desde el plano focal I con coordenadas (x, y) , hacia el plano focal II de coordenadas (x_1, y_1)).

La transformada de Fourier realizada por la lente L1 está definida por [1],

$$\Psi(x_1, y_1) = \frac{1}{\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x, y) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x x_1 + y y_1)\right] dx dy. \quad (2.4)$$

Aplicando la transformada de Fourier expresada por la Ec. (2.4) a la distribución de amplitud descrita por la Ec. (2.3), obtenemos la distribución de amplitud transmitida al plano focal II de la lente L1 localizada en $(x_1, y_1, z = f)$ como

$$\Psi(x_1, y_1) = \frac{-i\pi r_0^2}{\lambda f} \sqrt{\frac{2P_0}{\pi r_0^2}} \exp(-i\omega_1 t) \exp\left[\left(-\pi \frac{\pi r_0^2 + i\lambda z}{\lambda^2 f^2}\right)(x_1^2 + y_1^2)\right]. \quad (2.5)$$

2.2.3 Propagación desde el plano focal II, (x_1, y_1) , de la lente L1 hacia el plano objeto y de regreso a este plano, (x_2, y_2) .

La distribución de amplitud dada por la Ec. (2.5) es nuevamente propagada hacia el plano objeto, utilizando la integral de difracción de Fresnel. Para hacer esto, se debe tomar en cuenta que el haz de prueba se propaga a una distancia definida por la superficie reflectante, y que este haz viaja nuevamente la misma distancia hacia el plano focal II de la lente L1. Definiendo como z_p la longitud total del camino óptico recorrido por el haz de iluminación en esta etapa, la distribución de amplitud reflejada precisamente en el plano focal II de L1 localizado en el plano coordenado $(x_2, y_2, z = z_p)$, puede expresarse como

$$\Psi(x_2, y_2) = \frac{1}{i\lambda z_p} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x_1, y_1) \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda z_p} [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1. \quad (2.6)$$

Sustituyendo la distribución de amplitud dada por la Ec. (2.5) en la Ec. (2.6) y evaluando las integrales, la Ec. (2.6) puede expresarse como

$$\Psi(x_2, y_2) = \frac{-\pi r_0^2 f}{\pi r_0^2 z_p + i\lambda(z z_p - f^2)} \sqrt{\frac{2P_0}{\pi r_0^2}} \exp(-i\omega_1 t) \times \exp\left\{-\pi \frac{\pi \lambda f^2 r_0^2 - i[\pi^2 r_0^4 z_p + \lambda^2 z(z z_p - f^2)]}{\lambda[\pi^2 r_0^4 z_p^2 + \lambda^2(z z_p - f^2)^2]} (x_2^2 + y_2^2)\right\}. \quad (2.7)$$

La Ec. (2.7) se utilizará para encontrar la distribución de amplitud del haz en el plano focal II de la lente L1.

2.2.4 Transformada de Fourier realizada por la lente L1. (Corresponde a la propagación desde el plano focal II, (x_2, y_2) , hacia el plano focal I de la lente L1, (x_F, y_F)).

Calculando la transformada de Fourier dada por la Ec. (2.4) cuando el haz reflejado es transmitido por la lente L1 en su camino hacia el BS1, obtendremos la distribución de amplitud en el plano $(x_F, y_F, z = f)$ como

$$\Psi(x_F, y_F) = A \sqrt{\frac{2P_0}{\pi r_0^2}} \exp(-i\omega_l t) \exp\left[-\left(\frac{1}{r^2} + i \frac{\pi}{\lambda R}\right)(x_F^2 + y_F^2)\right], \quad (2.8)$$

donde A representa una amplitud compleja, r el semi-ancho y R el radio de curvatura del haz de prueba en este plano. Sus respectivos valores están dados por,

$$A = \frac{i\pi r_0^2}{\pi r_0^2 z_p + i\lambda(z z_p - f^2)} \times \frac{\pi^2 r_0^4 z_p^2 + \lambda^2(z z_p - f^2)^2}{\pi \lambda f^2 r_0^2 - i[\pi^2 r_0^4 z_p + \lambda^2 z(z z_p - f^2)]}, \quad (2.8.1)$$

$$r = \sqrt{\frac{\pi^2 \lambda^2 f^4 r_0^4 + [\pi^2 r_0^4 z_p + \lambda^2 z(z z_p - f^2)]^2}{[\pi^2 r_0^4 z_p^2 + \lambda^2(z z_p - f^2)^2] \pi^2 r_0^2}}, \quad (2.8.2)$$

y,

$$R = f^2 \times \frac{\pi^2 \lambda^2 f^4 r_0^4 + [\pi^2 r_0^4 z_p + \lambda^2 z(z z_p - f^2)]^2}{[\pi^2 r_0^4 z_p^2 + \lambda^2(z z_p - f^2)^2][\pi^2 r_0^4 z_p + \lambda^2 z(z z_p - f^2)]}. \quad (2.8.3)$$

Es importante observar que el semi-ancho y el radio de curvatura del haz de prueba en el plano focal, de acuerdo con las Ecs. (2.8.2) y (2.8.3) son, respectivamente, funciones de los parámetros z, z_p, f .

2.2.5 Propagación del haz desde el plano focal I de L1, (x_F, y_F) , hasta el plano del fotodetector (ξ, η) .

La distribución de amplitud dada por la Ec. (2.8) es finalmente propagada hacia el plano del fotodetector usando, nuevamente, la integral de difracción de Fresnel. Como se muestra en la Fig. 2.2, z_2 es la distancia de propagación. Usando la integral de difracción de Fresnel, la distribución de amplitud en el plano del fotodetector localizado en el plano coordenado $(\xi, \eta, z = z_2)$ puede escribirse como

$$\Psi_p(\xi, \eta) = B \sqrt{\frac{2P_0}{\pi r_0^2}} \exp(-i\omega_1 t) \exp\left[-\left(\frac{1}{r_p^2} - i \frac{\pi}{\lambda R_p}\right)(\xi^2 + \eta^2)\right], \quad (2.9)$$

donde la amplitud B , en semi-ancho r_p y en radio de curvatura R_p del haz de prueba en este plano están dadas por,

$$B = A \times \frac{-i\pi r^2 R}{R\lambda z_2 + i\pi r^2 (z_2 - R)} \quad (2.9.1)$$

$$r_p = \sqrt{\frac{(R\lambda z_2)^2 + \pi^2 r^4 (z_2 - R)^2}{\pi^2 r^2 R^2}} \quad (2.9.2)$$

y

$$R_p = \frac{(R\lambda z_2)^2 + \pi^2 r^4 (z_2 - R)^2}{(R\lambda)^2 z_2 + \pi^2 r^4 (z_2 - R)^2}. \quad (2.9.3)$$

El conjunto de ecuaciones descrito anteriormente, proporcionan la expresión final de la distribución de amplitud en el plano de fotodetector después de completar la propagación del haz de prueba hasta el plano de detección. Puesto que r, R son funciones de z_p dada por el conjunto de ecuaciones (2.8), r_p, R_p definidas por el conjunto de ecuaciones (2.9) son también funciones de z_p .

Finalmente, la distribución de amplitud de haz modulante en el plano de detección ha sido calculado para ser adicionado al haz de prueba. El cálculo resulta de propagar este haz a partir del plano de la celda de Bragg, (x_0, y_0) , al plano del fotodetector, (ξ, η) , una distancia z_3 , de acuerdo con la Fig. 2.1, dando como resultado,

$$\Psi_m(\xi, \eta) = C \sqrt{\frac{2P_0}{\pi r_0^2}} \exp[-i(\omega_l + \omega_s)t] \exp\left[-\left(\frac{1}{r_m^2} - i \frac{\pi}{\lambda R_m}\right)(\xi^2 + \eta^2)\right]. \quad (2.10)$$

donde ω_s es la frecuencia de excitación aplicada a la celda acusto-óptica, C es una amplitud compleja, r_m el semi-ancho y R_m el radio de curvatura, expresados como,

$$C = \frac{-i \pi r_0^2}{\lambda z_3 - i \pi r_0^2} \quad (2.10.1)$$

$$r_m = \sqrt{\frac{\lambda^2 z_3^2 + \pi^2 r_0^4}{\pi^2 r_0^2}} \quad (2.10.2)$$

y

$$R_m = \frac{(\lambda^2 z_3^2 + \pi^2 r_0^4)}{\lambda^2 z_3}. \quad (2.10.3)$$

El conjunto de ecuaciones (2.10) proporcionan la distribución de amplitud del haz modulante en el plano de detección. El radio de curvatura de este haz y su semi-ancho son constantes, así como la distancia de propagación z_3 .

Hasta este punto, los parámetros de ambos haces detectados por el fotodiodo, son conocidos. Estos parámetros se refieren a los radios de curvatura de los semi-anchos. Estos valores se utilizarán más adelante (sección 2.4) para calcular la potencia total colectada por el fotodetector.

2.3 Cálculo de la potencia detectada por el fotodiodo.

Para obtener este valor de potencia, se utilizarán las distribuciones de amplitud proporcionadas por el conjunto de Ecs. (2.9) y (2.10), que corresponden al haz de prueba y el haz modulante respectivamente. Puesto que ambos haces son coherentemente impuestos en el plano del fotodiodo, la distribución de amplitud en este plano está dada por,

$$\Psi_T(\xi, \eta) = \Psi_p(\xi, \eta) + \Psi_m(\xi, \eta), \quad (2.11)$$

y la distribución correspondiente en intensidad estará dada por,

$$I(\xi, \eta) = \Psi_T(\xi, \eta) \Psi_T^*(\xi, \eta), \quad (2.12)$$

donde (*) representa al complejo conjugado. Sustituyendo las Ecs. (2.9) y (2.10) en la Ec. (2.11), y utilizando la Ec. (2.12), se obtiene la siguiente expresión para la distribución de amplitud en este plano,

$$\begin{aligned} I(\xi, \eta) = & D |B|^2 \exp\left[-\frac{2}{r_p^2}(\xi^2 + \eta^2)\right] + D |C|^2 \exp\left[-\frac{2}{r_m^2}(\xi^2 + \eta^2)\right] + \\ & B C^* D \exp[i(\omega_s t)] \exp[-(\alpha + i\beta)] [\xi^2 + \eta^2] + \\ & B^* C D \exp[-i(\omega_s t)] \exp[-(\alpha - i\beta)] [\xi^2 + \eta^2] \end{aligned} \quad (2.13)$$

donde $| |$ es la magnitud de las Ecs. (2.9.1) y (2.10.1) respectivamente, y

$$D = \frac{2P_0}{\pi r_0^2}, \quad (2.13.1)$$

$$\alpha = \frac{r_m^2 + r_p^2}{r_m^2 r_p^2}, \quad (2.13.2)$$

$$\beta = \frac{\pi}{\lambda R_m R_p} (R_p - R_m), \quad (2.13.3)$$

La Eq. (2.13) proporciona la intensidad total colectada por el fotodetector. Hay que resaltar que la intensidad en el plano de detección es una función del radio de curvatura y del semi-ancho de los dos haces, y es modulado por la frecuencia ω_s .

Por último, la potencia total colectada en el plano de detección (ξ, η) es obtenida como,

$$P(z_p) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(\xi, \eta) d\xi d\eta. \quad (2.14)$$

Por tanto,

$$P = D|B|^2 \frac{\pi r_p^2}{2} + D|C|^2 \frac{\pi r_m^2}{2} + BC^* D \frac{\pi(\alpha - i\beta)}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \exp(i\omega_s t) + B^* CD \frac{\pi(\alpha + i\beta)}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \exp(-i\omega_s t). \quad (2.15)$$

La potencia total recibida por el fotodiodo está dada por la Ec. (2.15), donde los dos primeros términos representan un nivel de DC y los últimos dos sumandos representan una componente de AC. El amplificador tipo lock-in es sintonizado a la frecuencia ω_s para que adquiera solamente la componente de AC.

En la siguiente sección, se explica el porque de la sintonización del sistema para obtener un mejor funcionamiento.

2.4 Selección del punto de operación.

La distancia de desenfoque z_p , se define como el punto de operación en el cual el objeto bajo estudio es colocado. En el punto de operación, la amplitud de la componente de A. C.

de la potencia colectada es relativamente alta y sensible a pequeñas fluctuaciones de z_p , tal como muestra el diagrama experimental mostrado en la Fig. 2.1, donde los restantes parámetros del arreglo se consideran fijos.

El primer paso para seleccionar adecuadamente el punto de operación, es calcular los semi-anchos de los dos haces en el plano de detección. La figura 2.3 muestra una gráfica de las variaciones del semi-ancho en el plano (ξ, η) tanto para el haz modulante y el haz de prueba, en función de z_p tal como lo muestran las Ecs. (2.9) y (2.10). La línea recta punteada representa el semi-ancho del haz modulante. El semi-ancho del haz de prueba cambia a medida de que z_p varía. Cuando $z_p = 0$, el objeto reflejante se encuentra colocado precisamente en el plano focal de la lente L1 (Fig. 2.1). Valores negativos de z_p indicarán que el objeto está más cerca de la lente, mientras que valores positivos de z_p indicarán que el objeto se está alejando. El semi-ancho menor del haz de prueba no coincide con el valor $z_p = 0$ debido a la geometría del arreglo experimental.

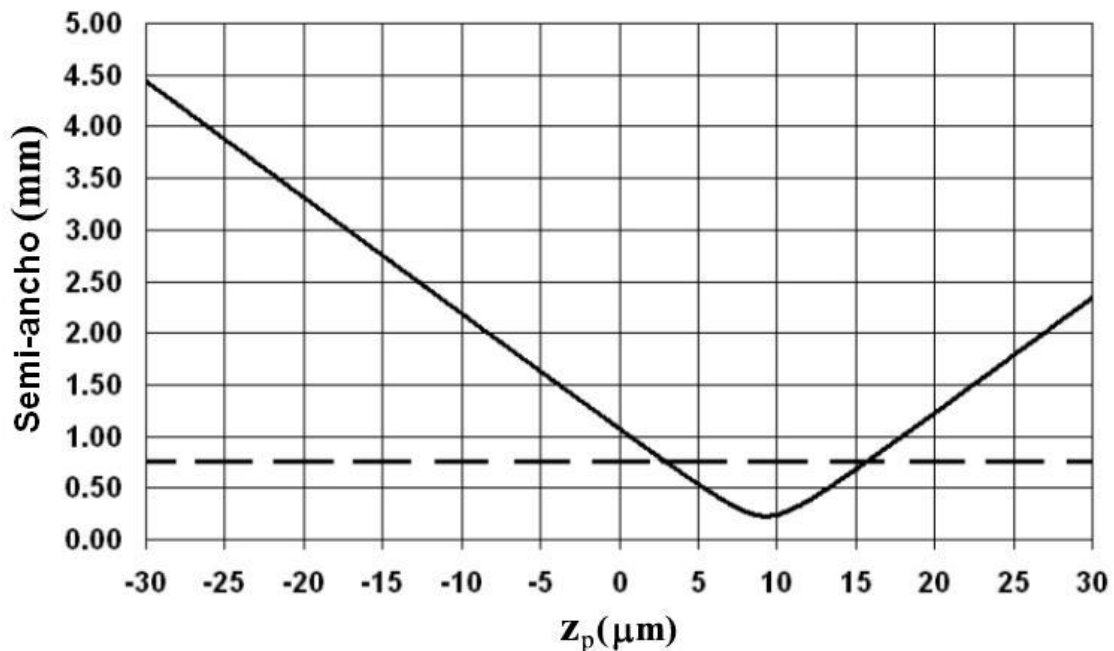


Fig. 2.3. Semi-anchos de los haces de prueba (línea continua) y del modulante (línea punteada) en el plano de detección, (ξ, η) , como función de la distancia z_p .

El segundo paso en la selección del punto de operación consiste en notar que la potencia colectada expresada en la Ec. (2.15) puede escribirse como,

$$P = P_{DC} + P_{AC} \cos(\omega_s t + \varphi). \quad (2.16)$$

De acuerdo con la Ec. (2.16), la potencia colectada está representada por un término de DC más una portadora sinusoidal modulada en amplitud.

Puesto que la potencia temporal colectada por el fotodetector cambia cuando el objeto bajo estudio hacia delante y hacia atrás con respecto al plano I de la lente L1, entonces la potencia colectada por el fotodiodo cambiara a diferentes distancias z_p . Este comportamiento de la potencia colectada P_{AC} como función de la distancia z_p , puede calcularse utilizando la Ec. (2.15) y es mostrada en la Fig. 2.4.

Conforme a la Ec. (2.16), valores pequeños absolutos de P_{AC} , representan señales temporales con amplitud baja, lo que resulta en una razón de señal a ruido baja. Para obtener señales temporales de mayor amplitud, se deben elegir valores numéricos absolutos grandes de P_{AC} . Adicionalmente, para tener alta sensibilidad, es necesario elegir un punto de operación con una pendiente grande. En nuestro experimento, estas condiciones son alcanzadas en una región cercana a $z_p = 3 \mu m$, como se muestra en la Fig. 2.4.

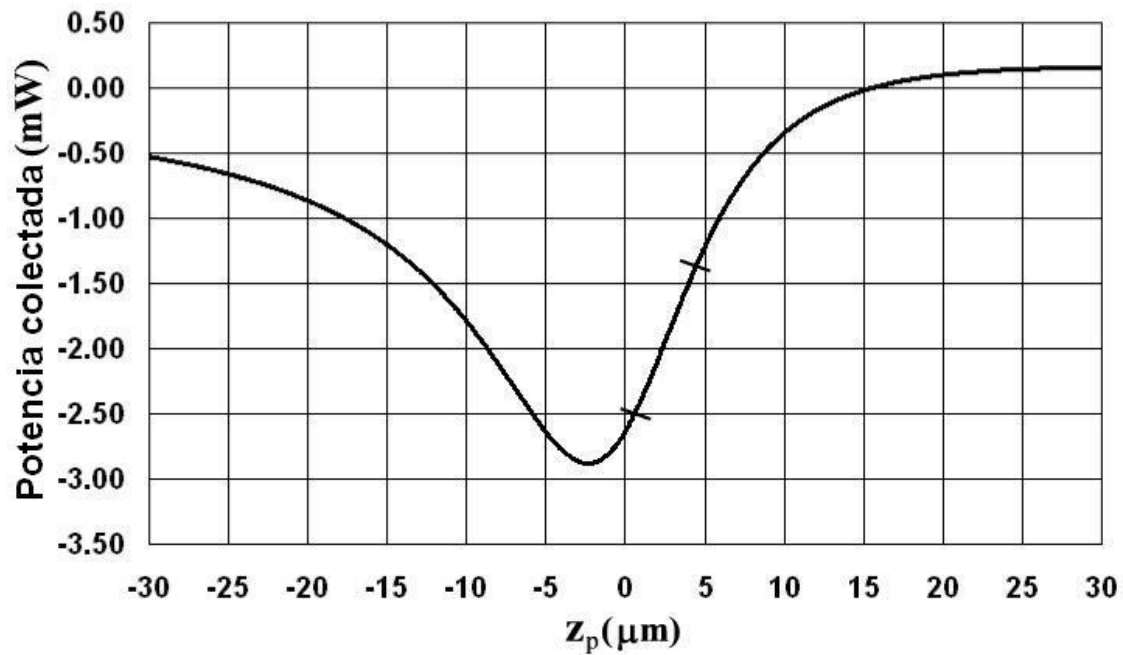


Fig. 2.4. Potencia total colectada como función de la distancia de desenfoque z_p . El punto de operación es seleccionado alrededor del valor $z_p = 3 \mu m$, con un rango determinado por los pequeños segmentos en la gráfica, en la cual no se considera el término de DC de la Ec. 2.16.

Los comportamientos mostrados en las Figs. 2.3 y 2.4 fueron verificados experimentalmente. Puesto que una pequeña región alrededor del punto de operación es seleccionada (menos de 200 nm) en las mediciones, la potencia colectada se considera una función lineal del perfil bajo medición.

Referencias.

1. W. J. Goodman, Introduction to Fourier Optics, Second ed., Mc Graw-Hill, New York, 2000. Chap. 4, 5.

CAPÍTULO 3

Medición de una superficie de calidad óptica con el Interferómetro Heterodino de dos haces Gaussianos y algunas consideraciones experimentales

3.1 Introducción.

En el presente capítulo, se utiliza el arreglo experimental llamado “Microscopio Interferométrico Heterodino de dos haces Gaussianos” para medir un perfil de una rejilla de difracción. El perfil obtenido con este instrumento se compara con las mediciones realizadas por un microscopio de fuerza atómica. Se muestran resultados experimentales de dichas mediciones. Además se discuten algunos parámetros que pueden afectar a los resultados experimentales.

3.2 Medición de una rejilla de difracción.

En el arreglo experimental (Fig. 2.1), el haz de iluminación consiste de un láser de He-Ne con una potencia de 15 mW , una longitud de onda de 632.8 nm y un radio de haz ($1/e^2$) de 0.325 mm . La señal de excitación aplicada a la celda de Bragg fue una señal sinusoidal a 80 MHz . Un canal GPIB permitió la comunicación entre el amplificador lock-in y una computadora personal para la captura de la información y la generación de las señales electrónicas necesarias, así como para la sincronización entre los instrumentos de medición y el arreglo experimental. Los barridos lineales para la obtención de la información de la rugosidad de la superficie son realizados mediante piezoeléctrico flexurizado (FPZT). Se eligió un FPZT para obtener desplazamientos de $100\text{ }\mu\text{m}$ con una desviación de $9\text{ }\mu\text{rad}$. El haz de prueba cerca del punto de operación, en el plano objeto, tuvo un semi-ancho de aproximadamente $0.65\text{ }\mu\text{m}$; este valor puede estimarse a partir de la Ec. (2.7).

La muestra bajo estudio consistió en una rejilla de difracción con un periodo de 300 lines/mm . Antes de realizar las mediciones, se corroboró que la rejilla presentará reflectividad constante en la zona de interés.

La potencia detectada fue convertida a señal eléctrica (voltaje) utilizando un amplificador de transimpedancia con una ganancia de aproximadamente $24 \times 10^3 \text{ V/W}$.

Las mediciones experimentales fueron obtenidas al realizar un barrido lineal de aproximadamente $10 \mu\text{m}$. En la Fig. 3.1 se muestra una de las mediciones hechas. Para comparar esta información, valores similares fueron medidas por un microscopio de fuerza atómica. La figura 3.2 muestra uno de estos resultados.

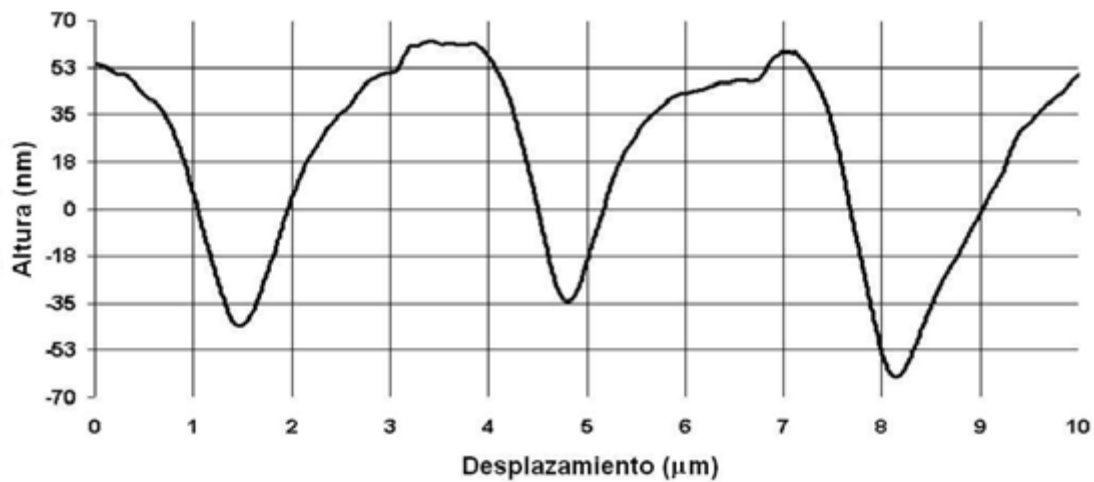


Fig. 3.1. Perfil de la rejilla obtenido con el microscopio interferométrico descrito. El periodo es de 300 lines/mm .



Fig. 3.2. Perfil de la rejilla medido con el microscopio de fuerza atómica en un área circundante a la mostrada en la Fig. 3.1 analizando distancias similares.

Algunas diferencias entre las mediciones puede observarse y son atribuidas principalmente al hecho de que no es posible medir precisamente en la misma zona con ambas técnicas y debido a que cada sistema responde a diferentes principios físicos de funcionamiento. Adicionalmente, la resolución lateral en el microscopio de fuerza atómica es mayor puesto que utiliza una punta de prueba muy estrecha comparada con el sistema óptico. Una amplia discusión sobre este punto ha sido realizada por Kühle [1]. Se realizaron varias mediciones con la técnica propuesta para garantizar repetibilidad. Este punto se discute a continuación.

3.3 Consideraciones experimentales.

En esta sección, se consideran algunos parámetros que influyen en las mediciones experimentales.

Con la finalidad de representar con razonable precisión las mediciones de la rejilla bajo medición, 2000 pixeles fueron grabados para cada medición realizada en un barrido de aproximadamente $10\mu m$.

Del arreglo experimental mostrado en la Fig. 2.1, como se puede observar, es necesario contar con suficiente separación espacial entre el orden cero y el haz modulante para permitir la colocación de las componentes ópticas. Por tanto, la frecuencia de la señal aplicada a la celda de Bragg debería ser grande. Sin embargo, al utilizar frecuencias temporales altas se incrementa la complejidad de las componentes electrónicas utilizadas; por tanto, una frecuencia moderada de 80 MHz fue seleccionada. Ahora bien, para cumplir adecuadamente con el criterio de muestreo de Nyquist, el amplificador lock-in es capaz de registrar la amplitud de la portadora temporal cada $2 \mu s$, lo que representa una razón de rastreo de aproximadamente $2.5 \mu m / ms$.

Aunque la frecuencia de modulación puede fijarse para la máxima razón de barrido, inestabilidades mecánicas en el mecanismo de exploración representan en factor principal que limitan esta velocidad de sondeo. Lo anterior se debe principalmente al ensamble mecánico requerido para montar la superficie bajo prueba, soportada por el FPZT, ya que introduce oscilaciones indeseables para velocidades de rastreo rápidas. Es por esto que se requiere una razón de exploración moderada. Experimentalmente, encontramos que para nuestro ensamble mecánico una razón de barrido de $1 \mu m / s$ fue la adecuada, la cual es baja y no afecta a la resolución lateral. Como se ha mencionado, la resolución lateral está limitada por el ancho del haz óptico de prueba.

Como trabajo futuro se tiene contemplado mejorar la velocidad de escaneo utilizando dispositivos alternativos como lo es el galvanómetro. Mejorando esta velocidad nos permitirá obtener mediciones en tiempo real.

La resolución lateral del sistema está limitada por el tamaño del haz enfocado en la superficie bajo estudio. Un tratamiento teórico de este efecto está fuera del alcance del presente trabajo. Sin embargo, más o menos puede considerarse que el límite de la resolución lateral es aproximadamente del orden del semi-ancho del haz de prueba enfocado en el plano objeto. Como se describió en la sección previa, este valor corresponde a una resolución de aproximadamente $0.65 \mu m$, siendo del orden de λ . Como se puede observar en la Fig. 3.1., el límite de la resolución lateral suaviza el perfil medido de la

superficie bajo prueba con respecto a las mediciones obtenidas con el AFM mostradas en la Fig. 3.2.

Un parámetro adicional que debe considerarse es la inclinación intrínseca presentada por la muestra debido al sistema de barrido. Este efecto puede estimarse como sigue. El FZPT introduce un ligero desvío con respecto a la vertical de aproximadamente $9 \mu rad$ en un barrido lineal de $100 \mu m$. Cuando medimos un plano, esta inclinación se manifiesta como una pendiente cuya máxima altura vertical será de aproximadamente $0.9 nm$. En los resultados experimentales reportados anteriormente, el efecto de esta desviación es muy baja comparada con la altura vertical máxima de la muestra que es de aproximadamente de $110 nm$.

Finalmente se describe la metodología aplicada para calibrar el sistema. En principio cada uno de los parámetros involucrados en la formulación matemática dada por la Ec. (2.15) fueron medidos de manera independiente por lo que el sistema pudo ser absolutamente calibrado. Sin embargo, este método puede presentar algunas dificultades. Alternativamente, las mediciones obtenidas a partir del AFM fueron utilizadas con referencia para calibración. Aunque las comparaciones de las mediciones obtenidas contra las del AFM no pueden calificarse como un método absoluto de calibración, no obstante ofrecen un procedimiento de calibración relativamente adecuado. Para que esto funcione, varias mediciones fueron hechas con el AFM y similares medidas fueron realizadas con el microscopio interferométrico aproximadamente en la misma zona de la superficie bajo prueba. Puesto que la resolución lateral de las técnicas utilizadas son diferentes, los valores promedio rms de las diferentes mediciones fueron calculadas. Una vez que el sistema ha sido calibrado, se procede a corroborar la repetibilidad en las mediciones. La desviación estándar calculada después de realizar varios eventos fue de $2 nm$. Con este resultado y considerando el efecto que tiene la ligera desviación de la muestra con respecto a la vertical cuando es rastreada y que fue discutido en párrafos anteriores, la sensibilidad vertical del sistema puede estimarse en un valor del orden de $\lambda/100$.

Referencias.

1. A. Kühle, B. Rosén and J. Garnaes, "Comparison of roughness measurement with atomic force microscopy and interference microscopy," Proc. SPIE 5188, 154-161 (2003)

CAPÍTULO 4

Medición de dispositivos de almacenamiento óptico con el Interferómetro Heterodino de tres haces Gaussianos

4.1 Introducción.

El “Interferómetro heterodino de tres haces Gaussianos” [1], consiste en la heterodinización de tres haces con un perfil de intensidad Gaussiano. Los haces son coherentemente superpuestos en el plano de un fotodetector que integra la intensidad total incidente. El interferómetro es capaz de medir superficies de alta calidad óptica que muestran una reflectividad prácticamente constante. La resolución vertical obtenida es similar, o inclusive mejor que en un interferómetro convencional de dos haces y la resolución lateral es cercana a λ , la longitud de onda de la fuente de iluminación obtenida a partir de un láser de He-Ne. Como se describirá en una sección posterior, esto es gracias a que la señal bajo medición es separada de fuentes indeseables de ruido utilizando un detector de banda angosta. Puesto que los tres haces se heterodinizan, el interferómetro es capaz de perfilar superficies con una alta sensibilidad vertical y bajo ruido, puesto que la señal obtenida es básicamente proporcional a las variaciones locales de altura vertical. Esto proporciona al interferómetro características especiales de bajo ruido con una alta relación señal a ruido. Estas propiedades le brindan al instrumento la posibilidad de obtener información subsuperficial de objetos bajo estudio, como se muestra experimentalmente en la Ref. [1], en donde la resolución del interferómetro fue examinada midiendo tres rejillas reflectivas holográficas con periodos de 300, 600 y 1200 líneas/mm. Para una mejor descripción del instrumento, dichas mediciones se incluyen en el presente capítulo.

El sistema tiene la estructura de un microscopio interferométrico de barrido. Uno de los haces, el haz de prueba, es enfocado sobre la superficie bajo estudio mediante un objetivo de microscopio de $100\times$ y gran apertura numérica. Después de que el haz es reflejado por

la superficie, se modula en fase debido a las irregularidades superficiales locales del objeto que se mide, regresando hacia la lente de enfoque y dirigiéndose hacia un fotodiodo donde es coherentemente superpuesta a dos haces adicionales. Uno de estos haces, el haz modulante, es obtenido a partir del primer orden de difracción de una celda de Bragg. El tercer haz, denominado haz de referencia, se obtiene por división de amplitud del haz de orden cero, y reflejándolo en una superficie de referencia de alta calidad, de manera similar que un interferómetro tipo Michelson.

Para obtener el perfil, la superficie bajo prueba es rastreada mediante un transductor piezo-eléctrico flexurizado (FPZT), al igual que en el microscopio interferométrico de dos haces descrito en la sección previa. A la salida del fotodiodo se obtiene una señal de voltaje que es básicamente proporcional a la altura vertical del objeto bajo estudio.

Puesto que el sistema es capaz de medir la topografía de superficies con reflectividad constante aparente, hace a este instrumento apropiado para medir el perfil de superficies ópticas para el almacenamiento de datos disponibles comercialmente como es el caso de los discos compactos (CD) y los discos versátiles digitales (DVD).

El “interferómetro de tres haces Gaussianos” tiene varias características que lo hacen único al compararlo con otras técnicas ópticas que obtienen información de la rugosidad de superficies reflectoras. Primero, el principio físico del sistema se fundamenta en la propagación de haces Gaussianos no recortados, por lo que es fácil de implementarlo además de que no son requeridas componentes especiales (filtros espaciales, colimadores, etc). Segundo, puesto que la información del perfil está decodificada como la amplitud de una señal portadora temporal, las variaciones de las alturas verticales pueden ser analizadas y observadas utilizando un osciloscopio. Adicionalmente, si se utiliza un lock-in, la capacidad de detección en banda estrecha, incrementa la sensibilidad del sistema. Tercero, si la altura vertical es pequeña, la salida de la señal será básicamente proporcional al perfil medido. Cuarto, una formulación analítica exacta es posible calcularla mostrando que la respuesta al impulso del sistema es una función Gaussiana por lo que si se requiere precisión adicional, es fácil calcular la operación de deconvolución con la respuesta al

impulso tipo Gaussiana. Como consecuencia, el interferómetro es adecuado para perfilar la superficie reflectora interna de los dispositivos de almacenamiento ópticos iluminando a través de la capa del Policarbonato que cubre al disco, sin la necesidad de aplicar al disco algún tratamiento especial para obtener las mediciones, tal como sucede al utilizar otras técnicas de medición [2-13].

Como se menciona con anterioridad, el microscopio de fuerza atómica (AFM) es un instrumento de uso común [14-18] para realizar la inspección y el control de calidad de discos maestros, estampadores y réplicas en el proceso de producción de las superficies de almacenamiento de datos en general. Sin embargo, puesto que el control de calidad es un factor fundamental en el proceso de manufactura de estos dispositivos, un control aún más estricto es necesario por lo que es deseable contar con nuevos instrumentos nanométricos de inspección. Cuando el disco óptico (de sólo lectura) ha sido completamente ensamblado, el AFM no puede ser utilizado para inspeccionar la superficie de grabación, debido a que la capa de Policarbonato que cubre la superficie reflectora interna. En este caso, otras técnicas de inspección de tipo óptico o acústico, deben utilizarse. Como se explicará posteriormente, el interferómetro de tres haces Gaussianos aprovecha el hecho de que la reflectividad en los dispositivos de almacenamiento óptico permanece prácticamente constante y que la capa de policarbonato que cubre al dispositivo, presenta una fase constante. Bajo estas condiciones, la información interna debida a las pistas forjadas en el sustrato del disco, pueden ser medidas con razonable precisión con las ventajas que proporciona una técnica de campo lejano.

En la siguiente sección se presenta una breve descripción de interferómetro de tres haces Gaussianos.

4.2 El Interferómetro de tres haces Gaussianos.

En la Fig. 4.1 se muestra el arreglo experimental correspondiente al interferómetro de tres haces [1]. Un láser de He-Ne con un perfil de intensidad Gaussiano es utilizado como fuente de iluminación coherente. El haz iluminante es transmitido a través de una celda de Bragg la cual consiste de una medio acusto-óptico de dióxido de telurio (TeO_2) excitado a 80MHz . Solo el orden difractado cero y uno son usados. Los órdenes restantes son bloqueados. El orden cero es dirigido hacia un divisor de haz BS1, donde es dividido en dos haces. Uno de ellos, el haz de prueba, es enfocado sobre la superficie bajo estudio por la lente L1. Después de que ha sido reflejado por la muestra, el haz de prueba es modulado en fase por las irregularidades superficiales locales, transmitido nuevamente a la lente L1 y dirigido a un fotodetector mediante el BS1. El segundo haz, el haz de referencia, después de ser reflejado por una superficie de alta calidad óptica, M3, es enviado al fotodetector también mediante el BS1. Finalmente, el orden uno de difracción a la salida de la celda de Bragg, es guiado hacia el fotodetector con la ayuda de los espejos M1, M2 y el divisor de haz BS2. La frecuencia temporal de este haz corresponde a la suma de la frecuencia temporal de la fuente de iluminación y la frecuencia de excitación de la celda acusto-óptica; esté haz será referido como haz modulante. Como se muestra en el arreglo experimental, los tres haces son superpuestos y coherentemente adicionados en el plano sensitivo de un fotodiodo.

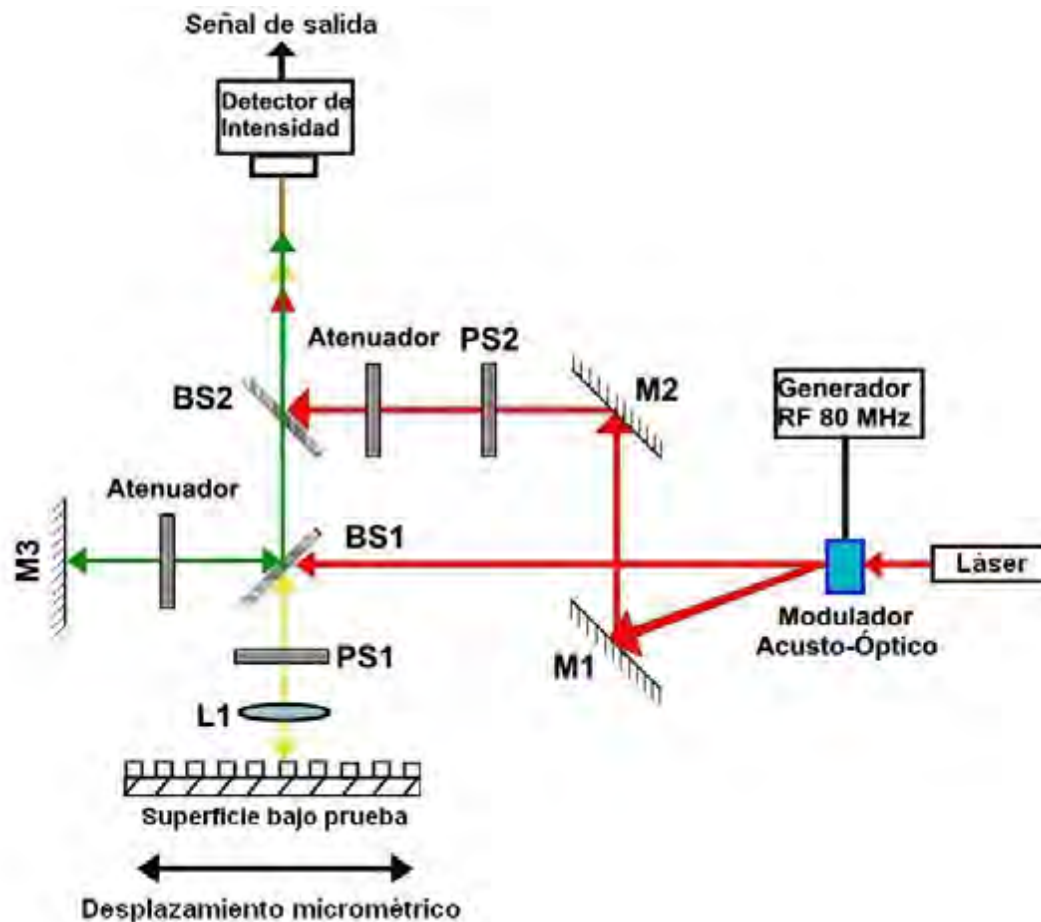


Fig. 4.1. Arreglo experimental. Las iniciales M y BS identifican a espejos y divisores de haz, respectivamente. El deslizador de fase 1 (PS1) introduce un corrimiento de fase de valor $\pi/2$ en el haz de prueba con respecto al haz de referencia. El phase-shifter 2 introduce un corrimiento de faso de πrad en el haz modulante con respecto al haz de referencia. Los atenuadores se introducen en el arreglo para igualar las tres intensidades en el plano de detección.

El fotodetector se elige con un área sensible suficientemente grande para integrar la intensidad total de los haces. La señal eléctrica a la salida de este dispositivo, es amplificada y enviada a un amplificador tipo lock-in para detección de A. C. y grabación de la información.

Los dos retardadores de fase PS1 y PS2 son utilizados para introducir un corrimiento de fase de $\pi/2$ y de πrad , respectivamente. Cuando los corredores de fase son ajustados apropiadamente, la señal de salida del fotodiodo es una función tipo seno cuyo argumento

es proporcional a las alturas verticales locales bajo medición, como se muestra analíticamente en la Ref. [1], proporcionando al sistema una alta sensibilidad vertical. El uso de ambos atenuadores es opcional y su utilidad radica en que simplifican la formulación analítica, ecualizando las intensidades en el plano del fotodiodo.

Sea $\Psi_0(x, y)$ la distribución de amplitud del haz Gaussiano enfocado en la superficie bajo análisis,

$$\Psi_0(x, y) = \left(\frac{2P_0}{\pi r_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r_0^2} \right], \quad (4.1)$$

donde P_0 representa la potencia del haz, r_0 el semi-ancho y (x_0, y_0) son las coordenadas del centro del haz.

Como se muestra en la Ref. [1], a la salida del detector de intensidad, un amplificador de transimpedancia proporciona una señal de DC mas una de AC. Puesto que el amplificador lock-in es utilizado para detección de banda estrecha, solamente la señal de voltaje variante en el tiempo, sintonizada a 80 Mhz es detectada, filtrando el ruido indeseable. La amplitud de la señal de salida esta dada como,

$$V(x_0, y_0) = \frac{4P_0}{\pi r_0^2} A \rho \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-\frac{2[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}{r_0^2} \right] \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} h(x, y) \right] dx dy \quad (4.2)$$

La función $h(x, y)$ representa la distribución de amplitud de las alturas de la superficie bajo prueba, A es la ganancia del amplificador y ρ la responsividad del fotodetector.

La Ec. (4.2) puede describirse como sigue. Supongamos $\sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} h(x, y) \right] \cong \frac{2\pi}{\lambda} h(x, y)$ para pequeñas $h(x, y)$, entonces la Ec. (4.2) indicará una convolución de una función Gaussiana

con la distribución de amplitud de la superficie bajo estudio. Por tanto, esta función Gaussiana representa la respuesta al impulso del sistema. En un caso general, una función sinusoidal de la distribución de amplitud de las alturas del objeto, es obtenida.

Debe remarcarse que el interferómetro trabajó con haces Gaussianos. La lente enfocadora tiene una apertura suficientemente grande para permitir que los haces se transmitan completamente (de ida y vuelta), sin ningún bloqueo. Por tanto, la integral de difracción de Fresnel puede utilizarse para calcular la completa propagación de los haces, en particular el semi-ancho del haz enfocado. Sea R_0 el semi-ancho a la salida del láser de He-Ne (en nuestro caso $\cong 0.72mm$). Debido a la colocación de las componentes en el arreglo experimental, la distancia desde la salida del láser a la lente de enfoque es de aproximadamente $2m$. Entonces, para una distancia focal de $2mm$ se obtiene un haz Gaussiano enfocado sobre la superficie bajo estudio con un semi-ancho de $r_0 = 0.44\mu m$. La distancia de enfoque correspondiente se encuentra a $2.001mm$. Por tanto, la distancia donde la haz de prueba se encuentra mejor enfocado está localizado ligeramente desplazado de la distancia focal de la lente. Experimentalmente, la colocación de la muestra en esta posición es fácilmente conseguida registrando la luz reflejada.

Para mostrar la capacidad de resolución del sistema, tres rejillas holográficas reflectoras con espaciamentos de 300, 600 y 1200 líneas/mm, fueron medidas y comparadas con las mediciones realizadas por un AFM. Además de estar reportadas en la Ref. [19], por conveniencia, los resultados se muestran en la figura 4.2.

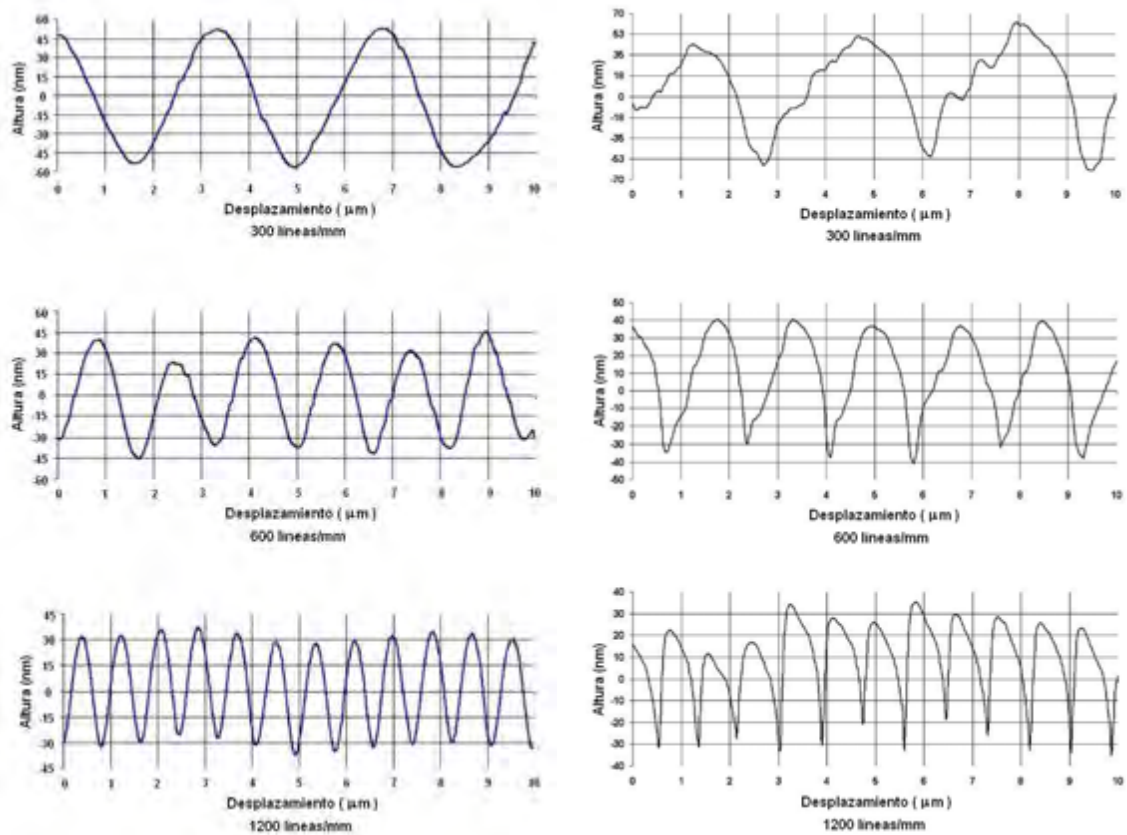


Fig. 4.2. (Izquierda) Perfiles obtenidos con la técnica interferométrica. (Derecha) Perfiles medidos con el microscopio de fuerza atómica. Se pueden distinguir algunas diferencias entre las mediciones hechas con el sistema óptico y el de aguja, lo que es comprensible puesto que los principios físicos de los instrumentos son diferentes. Sin embargo, los perfiles adquiridos por ambas técnicas muestran claramente los detalles en las rejillas. En el caso de la rejilla de 1200 líneas/mm, el periodo es cercano a λ y el sistema óptico aún puede medirla con precisión. Su alta resolución lateral está justificada puesto que el sistema responde a una convolución con la respuesta al impulso Gaussiana descrita por la Ec. (2) y por su razón alta de señal a ruido del interferómetro.

4.3 Mediciones experimentales del perfil de dispositivos de almacenamiento óptico.

Las superficies que se midieron fueron un Sony[®] CD-R y un Verbatim[®] DVD-R. El haz de prueba penetra con incidencia normal, propagándose a través de la capa del Policarbonato y viaja de regreso después de ser reflejado por la superficie reflectora del dispositivo.

Puesto que las dimensiones laterales de las pistas son diferentes entre el CD y el DVD, para obtener una visualización similar se escogieron determinado número de pistas para el CD-R rastreando una distancia de aproximadamente $10\mu m$, mientras que para el DVD-R una distancia de $5\mu m$ fue elegida. En cada prueba se obtuvieron 2000 puntos de muestra. La figura 4.3 muestra los resultados de los perfiles medidos.

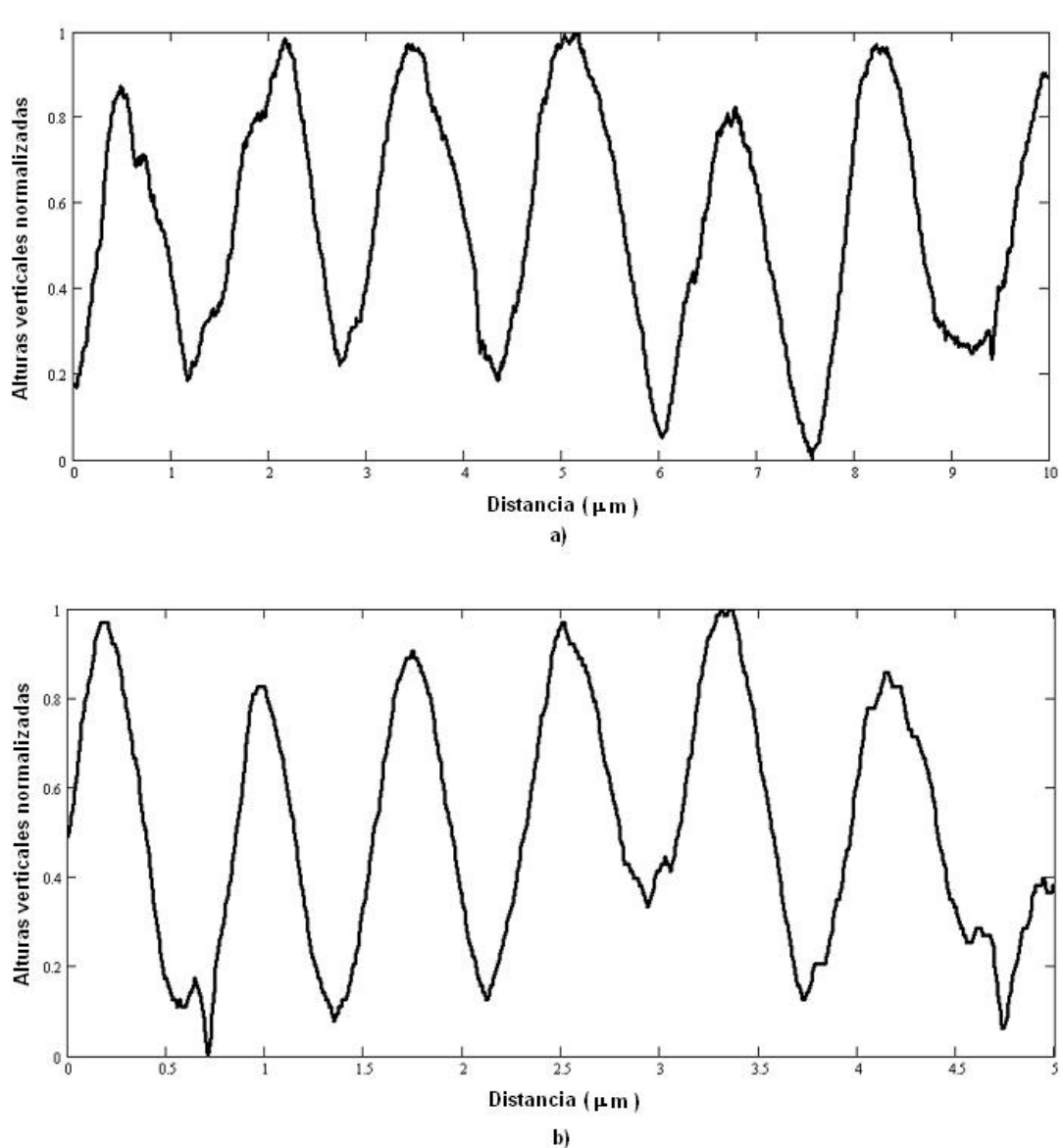


Fig. 4.3. Barridos lineales medidos para a) CD-R y b) DVD-R.

Es importante resaltar que las mediciones mostradas están en concordancia con el ancho lateral de las pistas que han sido reportadas y medidas por otras técnicas que se mencionan en las Ref. [2-18]. Estas técnicas incluyen el microscopio de fuerza atómica (AFM), el microscopio de sonda de barrido (SPM), el microscopio de barrido de modo-reflectivo tipo-dispersivo de campo-cercano (RS-SNOM), el microscopio de fuerza conductiva-atómica (C-AFM), el microscopio de transmisión electrónica (TEM) y el microscopio de barrido electrónico (SEM). Todos los acrónimos corresponden a su nombre en inglés. Como se ha mencionado, la ventaja del interferómetro de tres haces, además de ser una técnica de campo lejano, es su capacidad para medir las pistas a través de la capa del Policarbonato con simplicidad.

Como se indicó con anterioridad, la técnica interferométrica presentada en esta sección (al igual que el microscopio interferométrico de dos haces), requiere de que el objeto a medir presente reflectividad constante. Para comprobar que es el caso de la superficie medida, cubrimos los haces de referencia y el modulante del interferómetro permitiendo el paso del haz de prueba solamente. Entonces, el mismo barrido fue realizado bajo, exactamente, las mismas condiciones, pero midiendo solamente los cambios en intensidad de DC registrados por el fotodiodo. Los resultados normalizados en las variaciones de la intensidad son graficadas en las Figs. 4.4a y 4.4b. Puede observarse que la reflectividad de la superficie de estos dispositivos de almacenamiento óptico es básicamente constante. Es importante notar que el ruido electrónico no se observa en las mediciones realizadas por el interferómetro de tres haces, debido a la detección de banda angosta. Aparentemente se percibe algo de información de las pistas para el caso del CD, pero nada de información para el DVD. Estos ligeros cambios detectados en la reflectividad del CD, apreciados en la Fig. 4.4a, son básicamente atribuidos a efectos de difracción entre las pistas.

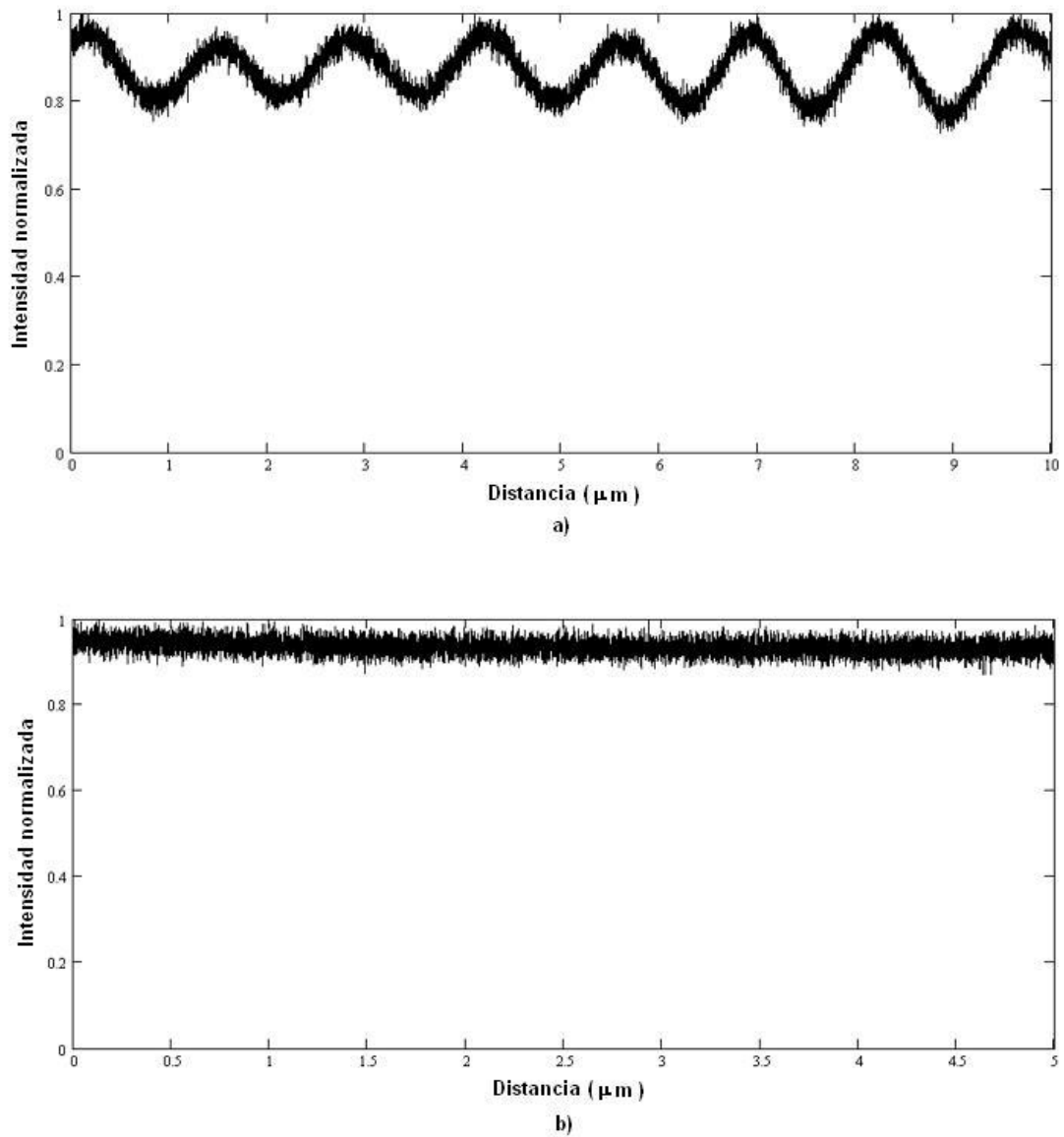


Fig 4.4. Variaciones normalizadas de DC: a) para el CD-R y b) para el DVD-R.

Otro punto que es importante mencionar, es que la capa de Policarbonato no introduce cambios importantes en la fase del haz de prueba en comparación con la fase que es introducida por la superficie reflectora bajo medición. Para corroborar esto, se realizó la siguiente prueba: colocamos una capa de policarbonato adicional frente al dispositivo de almacenamiento óptico bajo medición. Los resultados obtenidos fueron básicamente los mismos con la capa adicional y sin ella.

En el caso de una cabeza lectora comercial de dispositivos ópticos, una lente con una distancia focal de 1mm es utilizada para enfocar el haz de iluminación y para generar la información digital, se utiliza un arreglo de fotodiodos de cuatro-cuadrantes. Cuando una comparación entre la intensidad de los cuadrantes es realizada [20], la resolución lateral de la cabeza lectora es determinada principalmente por la sensibilidad del amplificador y el ruido del ambiente. Esto es porque el sistema de lectura óptico comercial ha sido diseñado con el propósito de detectar cambios en la altura, pero no para obtener información del perfil. Sin embargo, sistemas basados en estos lectores ópticos han sido reportados [21], en donde un sistema lector óptico comercial es utilizado para perfilar objetos grandes. Como trabajo futuro, para mejorar la resolución en la técnica interferométrica, una distancia focal de 1mm será utilizada. Sin embargo, será complicado implementar esta condición pues la apertura debe mantenerse alta para evitar que el haz Gaussiano sea bloqueado.

Finalmente, realizamos un barrido de la superficie de Policarbonato mediante un AFM para asegurarnos que la rugosidad que presenta es básicamente constante. El perfil obtenido se muestra en la Fig. 4.5. Este perfil indica que (considerando transparencia homogénea) la fase de la capa de Policarbonato permanece también prácticamente constante. Por esto, los perfiles mostrados en las Figs. 4.3a y 4.3b, medidas con el sistema de tres haces, son consecuencia de las pistas reflejadas en la superficie tipo espejo contenida dentro de los dispositivos bajo inspección y los cambios en la base son atribuidos a las pistas. En la Fig. 4.5, adicionalmente, se ha incluido la simulación del perfil de una pista (no se encuentra a escala), solo para visualizar la situación física donde dos fases arbitrarias se han medido.

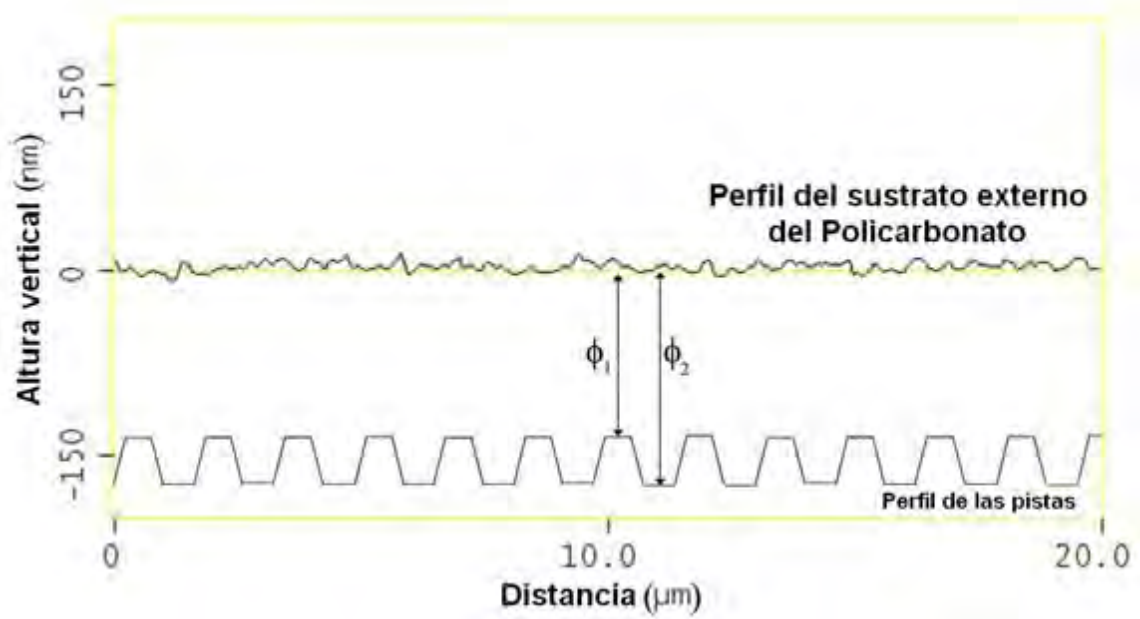


Fig. 4.5. Resultado del perfil del sustrato de Policarbonato medido con el AFM. Un perfil de una pista (no a escala) es simulado para mostrar las dos fases (ϕ_1, ϕ_2) bajo medición.

Referencias.

1. L. Juarez, M. Cywiak, B. Barrientos and J. M. Flores, "Three Gaussian beam heterodyne interferometer for surface profiling," *Opt. Commun.* **268**, 209-214 (2006).
2. T. Kikukawa and H. Utsunomiya, "Scanning probe microscope observation of recorded marks in phase change disks," *Microsc. Microanal.* **7**, 363-367 (2001).
3. S. Kai L., I. Chun L., and D. Ping T., "Characterization of nano recorded marks at different writing strategies on phase-change recording layer of optical disks," *Opt. Express* **14**, 4452-4458 (2006).
4. M Yamaguchi, Y. Sasaki, H. Sasaki, T. Konada, Y. Horikawa, A. Ebina, T. Umezawa and T. Horiguchi, "Imaging of optical disc using reflection-mode scattering-type scanning near-field optical microscopy," *Jour. Microsc.* **194**, 552-557 (1998).
5. T. Choi and T. D. Milster, "Change in data marks and groove structures of compact recordable disks in response to a high power laser beam," *Opt. Eng.* **45**, 64302-1, 64302-5 (2006).
6. J. H. Coombs and A. H. M. Holtslag, "Scanning optical microscopy: a powerful tool in optical recording," in *Optical Data Storage '91*, J. J. Burke, T. A. Shull and N. Imamura, eds., Proc. SPIE **1499**, 6-20 (1991).
7. T. E. Karis, M. E. Best, J. A. Logan, J. R. Lyerla, R. T. Lynch and R. P. McCormack, "Verification of tracking servo signal simulation from scanning tunneling microscope surface profiles," in *Optical Data Storage '91*, J. J. Burke, T. A. Shull and N. Imamura, eds., Proc. SPIE **1499**, 366-376 (1991).
8. B. A. Sexton and G. F. Cotterill, "Scanning tunneling microscopy of compact disk surfaces," *J. Vac. Sci. Technol. A* **7**, 2734-2740 (1989).
9. M. Mansuripur, Ch. Peng, J. K. Erwin, W. Bletscher, S. G. Kim, S. K. Lee, R. E. Gerber, Ch. Bartlett, T. D. Goodman, L- Cheng, Ch. S. Chung, T. Kim and K. Bates, "A versatile polychromatic dynamic testbed for optical disks," *App. Opt.* **35**, 9296-9303 (1997).

10. B. Wolfring, T. Weber, T. Mueller-Wirts and M. Mansuripur, "Versatest-I, a versatile polychromatic dynamic testbed for optical disks," in *Recent Advances in Metrology, Characterization, and Standards for Optical Digital Data Disks*, F. L. Podio, eds., Proc. SPIE **3806**, 2-10 (1999).
11. J. Butty, D. Kraehenbuehl and B. J. Bartholomeusz, "Methods for characterization of phase change optical discs," in *Recent Advances in Metrology, Characterization, and Standards for Optical Digital Data Disks*, F. L. Podio, eds., Proc. SPIE **3806**, 76-83 (1999).
12. Y. Kashihara, N. Morishita, K. Watabe, Ch. Noda, K. Iwata, M. Tanaka, K. Nagai, and H. Sato, "Simulation study for high density optical disk systems," in *Optical Data Storage 2001*, T. Hurst and S. Kobayashi, eds., Proc. SPIE **4342**, 524-531 (2001).
13. W. Ulf, "Local track pitch measuring apparatus and method," US 2004/0081048 A1, 1-6 (2004).
14. R. Köning, R. G. Dixon, J. fu, B. T. Renegar, T. V. Vorburger, V. W. Tsai and M. T. Postek, "Step height metrology for data storage applications," in *Recent Advances in Metrology, Characterization, and Standards for Optical Digital Data Disks*, F. L. Podio, eds., Proc. SPIE **3806**, 21-29 (1999).
15. D. A. Chernoff, J. D. Lohr, D. Hansen and M. Lines, "High precision calibration of a scanning probe microscope (SPM) for pitch and overlay measurements," in *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XI*, S. K. Jones, eds., Proc. SPIE **3050**, 243-249 (1997).
16. R. L. Wilkinson and J. H. Rilum, "DVD Mastering using dye polymer media," in *Optical Data Storage '97*, H. Birecki and J. Z. Kwiecien, eds., Proc. SPIE **3109**, 160-166 (1997).
17. C. S. Cook, D. A. Chernoff and D. L. burkhead, "Automated analysis of data mark microstructure of various media in the optical disc industry," in *Optical Data Storage 2000*, D. G. Stinson and R. Katayama, eds., Proc. SPIE **4090**, 16-25 (2000).
18. D. L. Burkhead and D. A. Chernoff, "AFM analysis of wobble amplitude," in *International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage Topical*

- Meeting* (Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2002), pp. 359-361.
19. L. Juarez, M. Cywiak, M. Servín and J. M. Flores, “Three Gaussian beam interferometric profilometer applied to the characterization of an optical flat,” *Opt. Express* **15**, 5277-5287 (2007).
 20. J. Carriere, R. Narayan, W-H. Yeh, C. Peng, P. Khulbe, L. Li, R. Anderson, J. Choi and M. Mansuripur, “Principles of optical disk data storage,” *Progress in Optics* ed. E. Wolf 41, 2000. Chap. 2.
 21. A. Bartoli, P. Poggi, F. Quercioli and B. Tiribilli, “Fast one-dimensional profilometer with a compact disc pickup,” *App. Opt.* **40**, 1044-1048 (2001).

CAPÍTULO 5

Conclusiones

En este trabajo, se ha explicado el funcionamiento de un par de sistemas heterodinos sustentados en la propagación de haces Gaussianos. Ambos arreglos interferométricos, utilizan un haz de prueba que es reflejado por una superficie la cual se desea caracterizar. El haz reflejado, que es colectado por una lente de enfoque, es dirigida hacia un plano de detección de un fotodiodo donde, en el caso del arreglo óptico de dos haces, es coherentemente superpuesta con el haz de primer orden difractado por una celda de Bragg modulado en frecuencia, mientras que en el caso del arreglo de tres haces se superpone, adicionalmente a los dos haces descritos, un haz de referencia. El área sensible del fotodiodo, integra en su totalidad la intensidad de los haces que muestran un perfil Gaussiano. Se demostró analíticamente, que con la ayuda de la integral de difracción de Fresnel y eligiendo adecuadamente los parámetros involucrados en la operación de ambos sistemas, se obtiene a la salida del fotodetector una señal variante en el tiempo cuya amplitud es una función lineal de las alturas verticales del objeto bajo estudio. El objeto es rastreado para obtener información acerca del perfil.

Uno de los aspectos importantes que es necesario aclarar es con respecto a las diferencias que existen y las aplicaciones posibles de ambos interferómetros. Es decir, al momento de tomar las mediciones de una superficie reflectora, ¿Cuál interferómetro utilizar, el de dos haces o el de tres haces Gaussianos?. Básicamente, dependerá de las características intrínsecas de la superficie que se desea medir. En ambos casos dicha superficie debe mostrar reflectividad constante y posteriormente elegir que interferómetro es conveniente utilizar. Para contestar lo anterior, se aclaran los siguientes puntos en cuanto al principio físico de funcionamiento de los interferómetros.

Además de las razones expuestas en la introducción (con respecto a que el arreglo de dos haces tiene mayor inmunidad al ruido externo de trabajo), en primer lugar, hay que resaltar

que en el interferómetro de tres haces la señal entregada por el fotodiodo, descrita por la Ec. 4.2, al considerando valores pequeños de $h(x, y)$ será proporcional a las variaciones en altura de la superficie bajo estudio, es decir $\sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}h(x, y)\right] \cong \frac{2\pi}{\lambda}h(x, y)$. Esto es gracias a que la Ec. 4.2, que describe el funcionamiento de este interferómetro, indica la convolución de la distribución de amplitud de la superficie bajo estudio $h(x, y)$ con una función Gaussiana, la cual representa la respuesta al impulso del sistema, como se ha referenciado en la sección 4.

Para el caso del interferómetro de dos haces, la respuesta analítica que se obtiene no es una función que pueda aproximarse a una respuesta Gaussiana (como en el caso del de tres haces, conforme a la Ec. 4.2), como puede mirarse en la Ec. 2.15. Sin embargo, se demuestra que, a partir de la Ec. 2.15 y realizando el cálculo de la potencia colectada por el fotodiodo, la curva de respuesta del interferómetro depende de la distancia de enfoque del haz de prueba sobre la superficie bajo estudio, tal como se muestra en la Fig. 2.4 obtenida a partir de la Ec. 2.16, por lo que su funcionamiento es en cierta forma similar a un microscopio de tipo confocal, como puede concluirse al analizar la Ref. [1]. Es posible realizar una comparación entre un microscopio de barrido confocal con filtro espacial y el microscopio heterodino de dos haces, cuyo principio de funcionamiento puede considerarse de tipo confocal [2]. Sin embargo, dicho estudio está por el momento fuera de los objetivos planteados en el presente trabajo. Esta característica de funcionamiento confocal del interferómetro de dos haces, lo convierte en un instrumento bastante estable para realizar mediciones inclusive en ambientes de trabajo ajenos a los presentes en el laboratorio. Gracias a la aproximación proporcionada por la Ec. 2.16 y eligiendo ciertas condiciones de trabajo del interferómetro de dos haces (para una respuesta lineal y explicadas en la sección 3.3), es posible obtener una respuesta lineal de la señal de salida del fotodiodo con respecto a las variaciones de altura locales de la superficie bajo medición, obteniendo de esta manera la información del perfil del objeto en cuestión.

Otro punto importante a considerar entre los dos instrumentos es la resolución vertical y lateral. En ambos casos, la resolución vertical está en el orden de cualquier técnica

interferométrica convencional ($\approx \lambda/100$), mientras que la resolución lateral calculada es proporcional a los semi-anchos del haz de prueba, es decir, de $r_0 = 0.65 \mu m$ para el de dos haces y de $r_0 = 0.44 \mu m$ para el de tres haces. En el de dos haces, por tanto, la resolución lateral es menor que en el de tres haces por lo que con el de dos haces no fue posible recuperar fielmente el perfil de las pistas del DVD (se pierden características sub-superficiales), pues la periodicidad entre ellas [3] es de $0.74 \mu m$, por lo que es menor a la resolución calculada para el caso del de dos haces pero suficiente para ser resuelta por el de tres haces.

El hecho de utilizar dos o tres haces en este tipo de arreglos ópticos, como se ha explicado con anterioridad, toma una importante relevancia al discernir el tipo de información que se desea obtener al analizar una superficie reflectora, pues mientras la información de la superficie bajo estudio se obtiene aproximando la respuesta en potencia del interferómetro de dos haces Gaussianos a una región de pendiente pronunciada para así obtener una respuesta lineal proporcional a las variaciones verticales locales de la superficie, en el caso del de tres haces, precisamente la presencia del tercer haz, produce que la información medida por este instrumento sea directamente proporcional a las variaciones de altura locales de la superficie que se está midiendo.

En el caso del arreglo interferométrico de dos haces, se muestran resultados experimentales de una muestra que consistió de una rejilla reflectora con una periodicidad de 300 líneas/mm . Los perfiles obtenidos con este sistema, se compararon con los medidos con una microscopio de fuerza atómica. Aunque la resolución de los sistemas es diferente, los resultados experimentales indican que el arreglo óptico presenta una muy buena aproximación del perfil de la superficie bajo estudio al compararla con las mediciones obtenidas utilizando el AFM.

Por otro lado, se utilizó el arreglo interferométrico de tres haces para medir el perfil de dos dispositivos ópticos de almacenamiento de datos comerciales correspondientes a un CD-R y a un DVD-R. Como ya se mencionó, la resolución lateral mostrada por este instrumento es la adecuada para obtener un perfil detallado inclusive del DVD-R. Mediciones

normalizadas de las pistas de la superficie reflectora en un barrido radial micrométrico, fueron presentadas. Estos resultados fueron medidos a través de la capa de Policarbonato que cubre al disco óptico. Los perfiles obtenidos muestran una alta resolución tanto lateral como vertical con bajo ruido, puesto que el sistema utiliza detección de banda angosta (lo que elimina señales indeseables) con una razón señal a ruido alta, además de que la señal de salida resulta ser proporcional a las alturas verticales locales de la superficie bajo medición. A partir de los resultados obtenidos, es claro que el interferómetro de tres haces es un instrumento adecuado para realizar inspecciones de calidad en la producción de estos dispositivos, siempre y cuando se tengan cuidado en los parámetros de trabajo requeridos para una técnica interferométrica.

En el caso que se quisiera caracterizar alguna superficie reflectora de calidad óptica de la cual se desconocen sus características superficiales, a primera vista sería conveniente utilizar el interferómetro de dos haces puesto que, como se menciono con anterioridad, presenta mayor estabilidad al momento de realizar las mediciones siendo menos susceptible a vibraciones del piezoeléctrico al momento de barrer la superficie bajo prueba. Si la información que se obtiene no es del todo satisfactoria o bien no se distinguen irregularidades notables en la superficie que se mide, entonces será conveniente utilizar el arreglo de tres haces para obtener una información más próxima a la superficie real que se encuentra bajo análisis.

Referencias.

1. M. Cywiak, J. F. Aguilar, B. Barrientos, "Low-numerical-aperture Gaussian beam confocal system for profiling optically smooth surfaces," *Opt. Eng.* 44 (1), 13604 1-13604 7 (2005).
2. M. Kempe, W. Rudolph and E. Welsch, "Comparative study of confocal and heterodyne microscopy for imaging through scattering media," *J. Opt. Soc. Am. A.* **13**, 46-52 (1996).
3. T. Kikukawa and H. Utsunomiya, "Scanning probe microscope observation of recorded marks in phase change disks," *Microsc. Microanal.* **7**, 363-367 (2001).