



**UNIVERSIDADE DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA**

Departamento de Física Aplicada

Área de Óptica

**Diseño y fabricación de dispositivos
híbridos planares para micro-óptica
mediante irradiación y ablación láser
de sustratos de vidrio**

Antonio Castelo Porta

Santiago, Febreiro de 2008

Dña. María del Carmen Bao Varela y Dña. María Teresa Flores Arias, Profesora Titular de Universidad e Investigadora “Isidro Parga Pondal”, respectivamente, del Área de Óptica del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Santiago de Compostela.

CERTIFICAN

que la presente memoria, titulada “*Diseño y fabricación de dispositivos híbridos planares para micro-óptica mediante irradiación y ablación láser de sustratos de vidrio*” ha sido realizada por **D. Antonio Castelo Porta** bajo su dirección y constituye la Tesis que presenta para optar al Grado de Doctor en Ciencias Físicas.

Santiago de Compostela, 25 de Febrero de 2008.

Vº. Bº. Directora de la tesis

Vº. Bº. Directora de la tesis

María del Carmen Bao Varela

María Teresa Flores Arias

El doctorando

Antonio Castelo Porta

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos TIC2003-03041 y TEC2006-10469 del Ministerio de Educación y Ciencia y los proyectos PGDIT04PXIC20605PN, PGIDIT05TIC20601PR, INCITE07PXI206080ES y 2007/075 Grupos Emergentes de la Dirección Xeral de Promoción Científica e Tecnolóxica do SUG/FEDER de la Xunta de Galicia. Gracias al Ministerio de Educación y Ciencia por la ayuda económica recibida a través de una beca FPI, y a la red de excelencia NEMO (*Network of Excellence on Micro-Optics*) por haberme dado la oportunidad de conocer y trabajar con investigadores europeos de prestigio.

Resumen

Aunque hasta hace algunos años la óptica jugaba un papel secundario en muchos campos tecnológicos, algunas características interesantes como la velocidad de la luz o el gran ancho de banda disponible ha hecho de la de la óptica una rama muy atractiva. El desarrollo del láser y la aplicación a campos como las comunicaciones o la iluminación, inició una tendencia a miniaturizar los elementos empleados hasta entonces (como lentes, espejos o prismas) para integrarlos en dispositivos más compactos y de menor tamaño. Asimismo, la aplicación de técnicas litográficas procedentes de la microelectrónica ha permitido la fabricación de elementos ópticos especiales para implementar las tareas de la óptica clásica pero con dimensiones más pequeñas y diseño más flexible. La década de los 90 ha vivido un brutal crecimiento del número de tecnologías y materiales empleados, con el objetivo de implementar tareas cada vez más complejas y con un menor coste. Hoy en día, multitud de campos han sufrido un gran desarrollo gracias a la aplicación de dispositivos microópticos.

Dentro de las tecnologías de fabricación de elementos microópticos, las basadas en el tratamiento de materiales mediante láser han encontrado una gran aceptación, gracias a la capacidad para transferir patrones muy diferentes a una gran cantidad de materiales. La rapidez y sencillez del proceso convierten a esta

tecnología en una alternativa muy interesante a otras más tradicionales (como la litografía).

En este trabajo nos ocuparemos de la aplicación del láser a la fabricación de elementos microópticos en sustratos de vidrio, prestando especial atención a las redes de difracción y guías de onda. La memoria se divide en cuatro capítulos. En el primero, haremos un repaso de los principales métodos de fabricación y caracterización de elementos microópticos que existen en la actualidad. El objetivo es, en primer lugar, analizar las ventajas de las técnicas basadas en el uso del láser sobre otras ampliamente extendidas, como la litografía, los tratamientos mecánicos o la difusión iónica; y, en segundo lugar, indicar las propiedades que caracterizan a este tipo de elementos y las técnicas utilizadas para la medida de las mismas. Estas técnicas se han dividido en varios grupos, según el tipo de propiedades que permiten medir (propiedades físicas u ópticas de los elementos) y según los principios que utilizan para ello. Finalizamos con algunas de las aplicaciones más importantes de los elementos microópticos en la actualidad, centrándonos en tres ramas que están muy presentes en nuestra vida diaria: comunicaciones y computación, iluminación y pantallas, y detección y sensores.

En el capítulo 2 describiremos las características y propiedades de los dos equipos láser Nd:YAG Q-switch (denominados Nd:YAG I y Nd:YAG II) y los materiales utilizados en este trabajo. En primer lugar mostramos los parámetros de emisión de los láseres (longitudes de onda, potencia media, ancho de pulso,...) que nos permitirá, en los capítulos posteriores, referirnos a éstos a la hora de explicar algunos de los resultados obtenidos. En segundo lugar, indicamos la composición, índices de refracción, espectros de transmisión,... de los sustratos de vidrio empleados. Esta información será útil en el proceso de caracterización de las muestras tratadas, para ver las afinidades y diferencias con respecto a los sustratos originales.

En los siguientes capítulos se presentan los resultados que conforman el bloque principal de este trabajo. En el capítulo 3 se analiza la fabricación y caracterización de redes de fase. Se han utilizado dos técnicas distintas. En primer lugar, se ha aprovechado la sensibilidad de los vidrios a la radiación ultravioleta para transferir el patrón de una máscara comercial de fase al sustrato de vidrio, utilizando el equipo Nd:YAG I. Se han realizado una serie de pruebas preliminares con las diferentes longitudes de onda disponibles en el equipo láser, para ver que configuración experimental era la más adecuada para el grabado de las redes de difracción. Obtuvimos los mejores resultados para los vidrios de plomo irradiados con una longitud de onda de 266 nm, por lo que se procedió al proceso de fabricación en estas condiciones. Hemos utilizado una configuración estática, en la que el conjunto máscara-sustrato es irradiado directamente con el haz láser, con diferentes tiempos de exposición; y otra configuración dinámica, en

la que el conjunto máscara-muestra se desplaza en una dirección perpendicular a la de incidencia del haz con ayuda de una plataforma motorizada. Las redes grabadas se han caracterizado a través de la medida de la eficiencia del primer orden de difracción con dos longitudes de onda distintas, obteniéndose un valor máximo del 6.5% para la red grabada en configuración dinámica con la máxima potencia del láser y una velocidad de desplazamiento de 200 mm/min. El análisis del período demuestra que coincide con el de la máscara de fase, tanto en la configuración dinámica como en la estática. Asimismo, se ha estudiado el perfil de las muestras mediante microscopía electrónica. Las imágenes obtenidas con esta técnica muestran la presencia de una importante diferencia en la calidad del patrón de la red para muestras distintas, lo que explica su diferente comportamiento como elementos difractivos. Finalmente, el análisis mediante microscopía de fuerzas atómicas revela la presencia de una estructura secundaria en los sustratos, que explica los resultados obtenidos en la medida de la eficiencia del primer orden de difracción.

La segunda técnica utilizada se conoce como transferencia inducida por láser (LIFT) y se basa en la modificación del sustrato de vidrio mediante la adición de partículas provenientes de un blanco metálico. Con este método, conseguimos modificar selectivamente ciertas zonas del sustrato formando un patrón de red de difracción. Unos de los parámetros más importantes en este proceso es el factor de superposición, que indica en qué porcentaje se solapan los barridos que ha de realizar el haz para grabar el patrón en el vidrio. Al igual que en el método anterior, se han realizado previamente una serie de pruebas para escoger el equipo y los parámetros más adecuados para nuestro objetivo. Debido al menor daño provocado en la superficie del vidrio, hemos escogido la configuración con el láser Nd:YAG II, para grabar redes en vidrios sodo-cálcicos y de borosilicato con diferentes blancos metálicos. De nuevo, hemos estudiado la eficiencia de las redes obtenidas por este método. En este caso, se ha obtenido un valor máximo del 18% para las redes fabricadas con un blanco de latón mate en vidrios sodo-cálcicos. El período de las redes depende únicamente del valor del factor de superposición. Por otro lado, hemos estudiado el perfil físico de las muestras tratadas mediante microscopía confocal, cuyas imágenes han permitido comprender los resultados obtenidos de la medida de la eficiencia. Finalmente, el microanálisis EDX realizado mediante microscopía electrónica ha permitido detectar la presencia de elementos provenientes del blanco en el vidrio, que no formaban parte de su composición original.

El capítulo 4 está dedicado a la aplicación de la técnica de transferencia inducida por láser a la fabricación de guías de onda en sustratos de vidrio. Tomando como punto de partida los resultados obtenidos en las pruebas preliminares de esta técnica, y presentadas en el capítulo anterior, se han escogido

sustratos de borosilicato y blancos metálicos de acero para nuestro propósito. Se han utilizado diferentes parámetros de irradiación láser, para obtener muestras de diferentes características. Su caracterización se ha realizado a través de la medida del perfil de índice, que es el parámetro fundamental a la hora de determinar su capacidad para el guiado de la luz. En este caso, se ha utilizado la técnica de campo cercano refractado, por su alta resolución y precisión, mínimos requerimientos en el tratado de la muestra y posibilidad de obtener perfiles de índice bidimensionales. Con esta técnica se ha procedido a la medida de las muestras fabricadas anteriormente, observándose un claro cambio del índice de refracción. Se ha obtenido una diferencia de $1.8 \cdot 10^{-2}$ con respecto al índice del vidrio sin tratar. Además, se ha estudiado la variación del tamaño de esta zona modificada con los diferentes parámetros láser utilizados en el proceso de fabricación. A continuación, se ha realizado también un microanálisis EDX, que ha mostrado la presencia, en el sustrato, de partículas provenientes del blanco metálico que, por lo tanto, son las responsables del cambio del índice de refracción. Hemos finalizado con un breve estudio de la capacidad guiante de uno de estos elementos. Los resultados obtenidos hacen preciso una optimización del proceso de fabricación de guías de onda por este método y ponen de manifiesto la necesidad de mejora en el pulido de las caras de los vidrios empleados como sustratos, trabajo que se realizará en el futuro.

ÍNDICE

Resumen.....	iii
Introducción.....	1
Capítulo 1: Métodos de fabricación y caracterización de elementos microópticos.....	3
1.1. Introducción.....	3
1.2. Técnicas de fabricación.....	5
1.2.1. Litografía.....	6
1.2.2. Tratamiento mediante láser.....	9
1.2.2.1. Escritura directa.....	9
1.2.2.2. Ablación láser.....	10
1.2.3. Tratamientos mecánicos.....	11
1.2.4. Difusión e intercambio iónico.....	12
1.3. Caracterización de elementos microópticos.....	13
1.3.1. Estudio de propiedades físicas: métodos físicos.....	13
1.3.2. Estudio de propiedades físicas: métodos ópticos.....	15
1.3.3. Estudio de propiedades ópticas.....	18
1.4. Técnicas de replicación.....	19
1.4.1. Moldeo por inyección (<i>Injection moulding</i>).....	20
1.4.2. Moldeo por compresión (<i>Hot embossing</i>).....	21
1.4.3. Técnicas de fundido (<i>UV casting</i>).....	22
1.5. Algunas aplicaciones de elementos microópticos.....	22

1.5.1. Comunicaciones y computación.....	23
1.5.2. Iluminación y pantallas.....	23
1.5.3. Detección y sensores.....	24
Referencias.....	24
Capítulo 2: Materiales y elementos del montaje experimental.....	35
2.1. Introducción.....	35
2.2. Características de los equipos láser.....	35
2.2.1. Láser Nd:YAG I.....	36
2.2.2. Láser Nd:YAG II.....	38
2.3. Propiedades de los materiales.....	40
2.3.1. Vidrios sodo-cálcicos.....	41
2.3.2. Vidrios borosilicatados.....	43
2.3.3. Vidrios de plomo.....	44
2.3.4. Máscara de fase.....	46
Referencias.....	48
Capítulo 3: Fabricación y caracterización de redes de fase.....	51
3.1. Introducción.....	51
3.2. Elementos difractivos: redes de difracción.....	52
3.3. Fabricación de redes de fase por irradiación a través de una máscara.....	55
3.3.1. Pruebas iniciales.....	56
3.3.1.1. Vidrios sodo-cálcicos.....	57
3.3.1.2. Vidrios de plomo.....	61
3.3.2. Irradiación de los sustratos.....	64
3.3.2.1. Vidrios sodo-cálcicos.....	64
3.3.2.2. Vidrios de plomo.....	65
3.3.3. Caracterización de las redes: medida de la eficiencia.....	66
3.3.3.1. Eficiencia para una longitud de onda $\lambda=632.8$ nm.....	68
3.3.3.2. Eficiencia para una longitud de onda $\lambda=514.5$ nm.....	71
3.3.4. Caracterización de las redes: análisis del período.....	74
3.3.5. Caracterización de las redes: análisis mediante microscopía	

electrónica.....	76
3.3.6. Caracterización de las redes: análisis mediante microscopía de fuerzas atómicas.....	79
3.4. Fabricación de redes de fase por ablación de muestras metálicas.....	83
3.4.1. Configuración experimental.....	84
3.4.2. Transferencia inducida por láser: resultados previos.....	87
3.4.2.1. Irradiación con el láser Nd:YAG I.....	87
3.4.2.2. Irradiación con el láser Nd:YAG II.....	93
3.4.3. Proceso de fabricación de las redes de difracción.....	99
3.4.4. Caracterización de las redes: medida de la eficiencia.....	100
3.4.5. Caracterización de las redes: análisis mediante microscopía confocal.....	102
3.4.6. Caracterización de las redes: análisis del período.....	107
3.4.7. Caracterización de las redes: análisis mediante microscopía electrónica.....	108
3.5. Conclusiones.....	110
Referencias.....	111
Capítulo 4: Fabricación y caracterización de guías de onda.....	117
4.1. Introducción.....	117
4.2. Guías de onda.....	118
4.3. Fabricación de guías de onda en vidrio por ablación de muestras metálicas.....	119
4.3.1. Fabricación de guías de onda.....	120
4.3.2. Caracterización de las guías de onda: análisis del perfil de índice de refracción.....	121
4.3.2.1. Técnica de campo cercano refractado.....	122
4.3.2.2. Configuración experimental empleada.....	123
4.3.2.3. Análisis de los resultados.....	126
4.3.3. Caracterización de las guías de onda: análisis mediante microscopía electrónica.....	133
4.3.4. Caracterización de las guías de onda: medida de las pérdidas.....	136
4.4. Conclusiones.....	137
Referencias.....	137

Conclusiones.....	141
Agradecimientos.....	145
Relación de publicaciones.....	147

Introducción

Aunque hasta hace algunos años la óptica jugaba un papel secundario en muchos campos tecnológicos, algunas características interesantes como la velocidad de la luz o el gran ancho de banda disponible ha hecho de la de la óptica una rama muy atractiva. El desarrollo del láser y la aplicación a campos como las comunicaciones o la iluminación, inició una tendencia a miniaturizar los elementos empleados hasta entonces (como lentes, espejos o prismas) para integrarlos en dispositivos más compactos y de menor tamaño. Asimismo, la aplicación de técnicas litográficas procedentes de la microelectrónica ha permitido la fabricación de elementos ópticos especiales para implementar las tareas de la óptica clásica pero con dimensiones más pequeñas y diseño más flexible. La década de los 90 ha vivido un brutal crecimiento del número de tecnologías y materiales empleados, con el objetivo de implementar tareas cada vez más complejas y con un menor coste. Hoy en día, multitud de campos han sufrido un gran desarrollo gracias a la aplicación de dispositivos microópticos.

Dentro de las tecnologías de fabricación de elementos microópticos, las basadas en el tratamiento de materiales mediante láser han encontrado una gran aceptación, gracias a la capacidad para transferir patrones muy diferentes a una gran cantidad de materiales. La rapidez y sencillez del proceso convierten a esta

tecnología en una alternativa muy interesante a otras más tradicionales (como la litografía).

En este trabajo nos ocuparemos de la aplicación del láser a la fabricación de elementos microópticos en sustratos de vidrio, prestando especial atención a las redes de difracción y guías de onda. La memoria se divide en cuatro capítulos. En el primero, haremos un repaso de los principales métodos de fabricación y caracterización de elementos microópticos que existen en la actualidad. A continuación, en el capítulo 2, se describirán las características y propiedades de los materiales y los equipos láser utilizados en este trabajo. Esta información nos permitirá, en los capítulos posteriores, referirnos a estos datos a la hora de explicar algunos de los resultados obtenidos.

En el capítulo 3 analizaremos la fabricación y caracterización de redes de fase. Utilizaremos dos técnicas: en primer lugar, se ha aprovechado la sensibilidad de los vidrios a la radiación ultravioleta para transferir el patrón de una máscara comercial de fase al sustrato de vidrio. Las redes grabadas se han caracterizado a través de la medida de la eficiencia del primer orden de difracción, el análisis del período y el análisis del perfil físico. Para ello se utilizarán las imágenes de las muestras obtenidas mediante microscopía electrónica y microscopía de fuerzas atómicas.

La segunda técnica utilizada se conoce como transferencia inducida por láser (LIFT) y se basa en la modificación del sustrato de vidrio mediante la adición de partículas provenientes de un blanco metálico. Con este método, conseguimos modificar selectivamente ciertas zonas del sustrato formando un patrón de red de difracción. Al igual que en el caso anterior, se ha estudiado la eficiencia, el período y el perfil físico de las redes. También hemos realizado un microanálisis EDX mediante microscopía electrónica, que nos permite analizar los elementos químicos presentes en la zona tratada del sustrato.

Finalmente, en el capítulo 4 abordaremos la fabricación de guías de onda en sustratos de vidrio mediante la técnica de transferencia inducida por láser. Analizaremos el perfil de índice de refracción de las muestras fabricadas, que es el parámetro fundamental a la hora de determinar su capacidad para el guiado de la luz, mediante la técnica de campo cercano refractado. Estudiaremos el espectro químico de las muestras mediante un microanálisis EDX, finalizando con un breve estudio de la capacidad guiante de los elementos obtenidos.

Capítulo 1

MÉTODOS DE FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS MICROÓPTICOS

1.1. Introducción.

La microóptica es una rama especial de la óptica, fuertemente relacionada con la microelectrónica, que permite la fabricación de elementos de pequeño tamaño (del orden de micras) que conforman dispositivos optoelectrónicos compactos¹⁻³. Los elementos ópticos pasivos clásicos, como espejos, prismas o lentes, se han utilizado desde hace siglos con el objetivo de coleccionar, distribuir o modular la luz. La microóptica permite la implementación de estas mismas tareas con elementos de dimensiones más pequeñas y diseño más flexible (figura 1.1)^{3,4}.

Una cuestión importante a la hora de miniaturizar un sistema óptico es la respuesta de cada elemento a la reducción de su tamaño. Los diferentes parámetros que lo caracterizan (tamaño físico, distancias focales, aperturas numéricas, ...) se verán afectados de forma diferente y, además, variarán de un tipo de elemento a otro. Por otro lado, existen limitaciones técnicas y físicas que

impedirán que un determinado elemento se reduzca tanto como se desee. La transición de la óptica macroscópica a la microóptica no es siempre lineal¹.

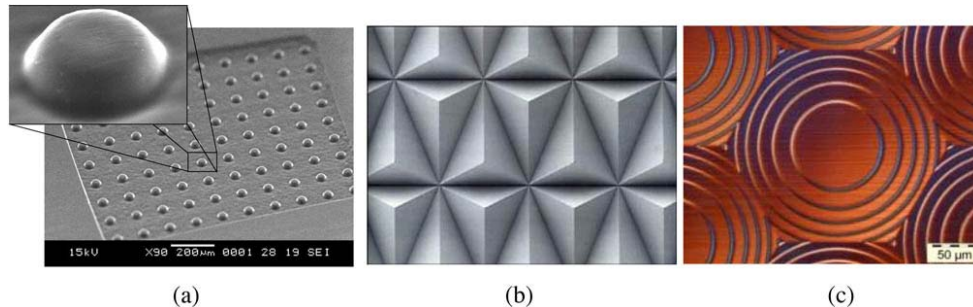


Figura 1.1. Algunos ejemplos de elementos microópticos: a) microlentes; b) microprismas; y c) elementos difractivos⁴.

Para llegar a integrar un elemento microóptico en un dispositivo que se pueda utilizar en una aplicación determinada, se ha de seguir el proceso en cadena que se muestra en figura 1.2. Una vez identificado el problema que se necesita resolver, se comienza con el modelado y diseño de un elemento con los parámetros y características necesarias para resolverlo. Las simulaciones y demás herramientas de diseño permiten probar diferentes configuraciones hasta encontrar la más adecuada. El siguiente paso es la fabricación de los primeros prototipos y, a continuación, se procede a su caracterización. En esta etapa se verifica que el prototipo cumple las características indicadas en el proceso de diseño. En caso de detectar algún error, dicha información se empleará para mejorar el método de fabricación o, si es necesario, utilizar una técnica distinta. Una vez que el prototipo cumple todas las exigencias, se produce la replicación en masa. Existen diferentes métodos dependiendo del elemento que se necesite replicar y del material que se emplee. El último paso es la integración de nuestro elemento en el dispositivo completo para proceder a su empaquetamiento. Se pueden realizar algunas pruebas que aseguren la fiabilidad del dispositivo, así como su durabilidad y resistencia a las condiciones ambientales con las que se va a encontrar.

En este capítulo nos centraremos en las etapas que son el objetivo final de este trabajo. Comenzaremos con una revisión de los principales métodos de fabricación. A continuación, dedicaremos un apartado al repaso de los parámetros más interesantes a la hora de caracterizar un elemento microóptico y las técnicas de medida que se emplean en cada caso. Finalizaremos con un breve recordatorio de las principales técnicas de replicación que existen y veremos algunas de las aplicaciones más interesantes de los elementos microópticos en la actualidad.

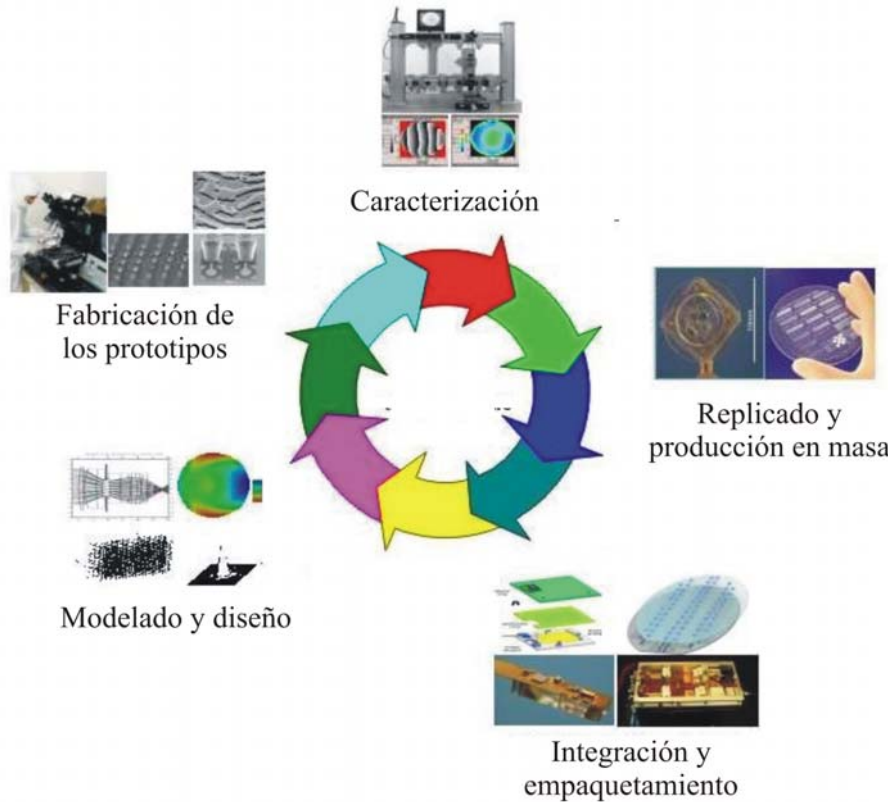


Figura 1.2. Cadena de etapas para la obtención de un dispositivo microóptico.

1.2. Técnicas de fabricación.

El objetivo principal de este trabajo es la descripción de diferentes métodos que hemos utilizado para la fabricación de diferentes dispositivos microópticos. Por ello, es necesario mostrar previamente una visión general de las técnicas de fabricación usadas típicamente para la obtención de este tipo de elementos: litografía, tratamiento mediante láser, tratamiento mecánico y difusión iónica. Existen otra serie de técnicas basadas en tratamientos térmicos de diferentes tipos de materiales, pero que no vamos a comentar en este apartado. En los próximos capítulos profundizaremos un poco más en los métodos empleados, así como en las ventajas que presenta cada técnica con respecto a otras metodologías.

Tradicionalmente, la litografía ha sido el método más utilizado debido a la buena calidad de los resultados obtenidos. Sin embargo, en los últimos años han cobrado importancia las técnicas basadas en la irradiación láser, por su sencillez (se reduce el número de procesos a realizar), la variedad de materiales desarrollados (principalmente polímeros) y la reducción del tiempo de procesado.

1.2.1. Litografía.

La litografía es una de las técnicas más utilizadas en la fabricación de elementos microópticos, debido principalmente al desarrollo experimentado para su aplicación en circuitos y dispositivos electrónicos. Se basa en la impresión del patrón deseado sobre una fina capa de fotorresina mediante irradiación con la longitud de onda adecuada, para posteriormente realizar su transferencia al sustrato. En general, podemos hablar de las siguientes etapas dentro del proceso litográfico (ver figura 1.3)¹:

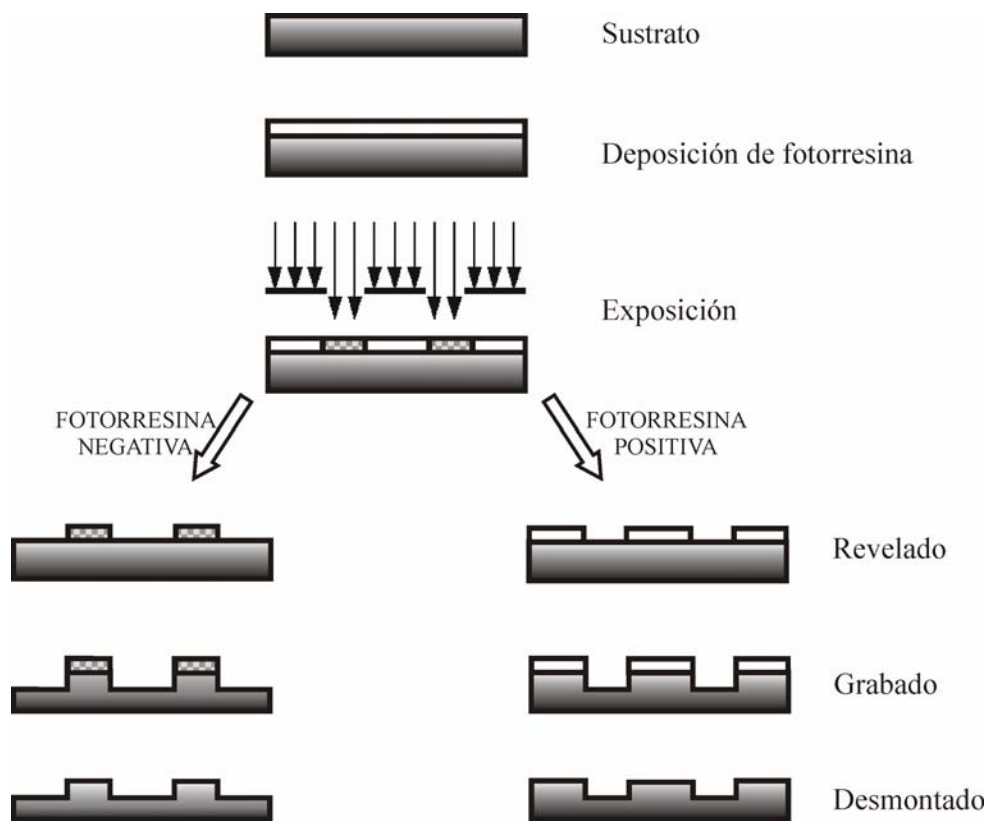


Figura 1.3. Etapas típicas en el proceso de fabricación de elementos microópticos mediante litografía. Se presentan las diferencias entre los pasos a seguir para fotorresinas positivas o negativas.

a) Deposición: El objetivo es conseguir una capa fina y uniforme de resina sobre el sustrato. Para ello se pueden utilizar diferentes métodos. En primer lugar podemos citar el *spin coating*: el sustrato, sobre el que se ha depositado una gota de resina, se hace rotar a gran velocidad hasta cubrir toda su superficie. Otras

técnicas se basan en la utilización de diferentes materiales en estado gaseoso para formar una capa sobre el sustrato. Este proceso puede realizarse mediante métodos físicos (*Physical Vapour Deposition* o PVD) o químicos (*Chemical Vapour Deposition* o CVD). El espesor típico para circuitos integrados está en el rango entre 0.5 y 2 μm , aunque para aplicaciones ópticas se suelen emplear mayores espesores.

b) Enmascaramiento: Consiste en la fabricación de una máscara con el patrón que se desea transferir a la resina. Es un proceso opcional, ya que el dibujo también puede realizarse mediante escritura directa con un haz láser sobre la fotorresina³. La transferencia del patrón puede realizarse con la máscara en contacto con la resina o con una cierta separación entre ambas; en el primer caso, la principal desventaja es el daño que se induce en la máscara después de una serie de procesos de irradiación, que se puede solucionar con la segunda opción; sin embargo, con la configuración en contacto se evitan problemas derivados de la difracción de la luz, que reduce la calidad del elemento que se desea obtener.

c) Exposición: La capa de fotorresina se irradia con la longitud de onda o con el haz de partículas adecuados, de forma que las propiedades físicas o químicas de la misma varían en las zonas expuestas. Dependiendo de la naturaleza de la fotorresina, las regiones expuestas pueden volverse solubles si el polímero es degradado (tendremos una resina positiva) o insolubles cuando se crean nuevos enlaces en el polímero (en este caso se habla de fotorresina negativa). Aunque tradicionalmente se han usado lámparas ultravioletas como fuente de irradiación, la necesidad de obtener estructuras con mayor resolución y menor tamaño ha llevado a desarrollar nuevos métodos de exposición con mayor profundidad de penetración. De esta forma se ha extendido el uso de rayos X (en este caso el proceso se conoce como *Lithographic Electroforming Molding* o LIGA)^{5,6} y UV con longitudes de onda muy bajas (hablamos de *deep UV lithography*)⁷.

d) Revelado: Como hemos indicado en el apartado anterior, después de la irradiación algunas zonas de la fotorresina presenta propiedades diferentes a las que no han sido expuestas a la radiación. El proceso de revelado consiste en el tratamiento del material con algún tipo de solvente para retirar las regiones no deseadas, que serán las zonas irradiadas en el caso de resina positiva o las no irradiadas en las negativas. Es un proceso delicado, en el que hay controlar muy bien el tiempo de procesado para eliminar adecuadamente la resina. Esto exige la determinación de la tasa de solubilidad en función de la concentración del solvente para cada material, que permitirá fijar para cada elemento las condiciones de trabajo.

e) Grabado (*etching*): En este proceso se transfiere el patrón ya grabado en la resina al sustrato. Se pueden utilizar procesos en seco o en mojado. El proceso en mojado es muy simple y barato, y consiste en la utilización de ácidos o soluciones salinas para corroer las zonas del sustrato expuestas. El mayor problema es su difícil control, ya que el ácido corroe material en todas las direcciones y se pueden eliminar algunas zonas del sustrato que se encuentran por debajo de la resina, obteniendo en el sustrato un patrón distinto al deseado. Para superar los problemas del *etching* en mojado se pueden usar técnicas en seco, que consisten en la emisión de algún tipo de ión para que impacte en la superficie del sustrato (conocida como *reactive ion etching* o RIE). En este caso se utilizan campos eléctricos que aceleran y dirigen las partículas hacia el blanco, controlando más eficientemente el proceso. Durante el proceso de *etching*, la resina debe permanecer inalterable para evitar que las zonas cubiertas sean dañadas. Para ello, puede que sea necesario recubrirla con una capa protectora antes del proceso.

f) Desmontado (*strip*): Una vez que el patrón deseado se ha transferido al sustrato se procede a la eliminación de la capa de resina sobrante.

Además del proceso litográfico convencional que hemos comentado, la necesidad de fabricar estructuras más complejas y con mayor resolución, ha llevado a desarrollar nuevas técnicas que incluyen procesos físicos diferentes a los indicados en las etapas anteriores. Por un lado, se han utilizado partículas cargadas en el proceso de exposición, en vez de fotones ultravioletas. El método más conocido es la litografía por haz de electrones (o *electron beam lithography*)⁸, con el que se pueden conseguir estructuras con una resolución por debajo de los 100 nm. También se ha desarrollado la litografía por haz de iones focalizados (o *focused ion-beam lithography*)^{9,10}, una técnica muy versátil que puede minimizar algunos de los problemas de la litografía basada en haz de electrones, como la baja sensibilidad de la resina, la retrodispersión y los efectos de proximidad^{11,12}.

Otra tecnología que permite la fabricación de estructuras de alta resolución, es la escritura profunda con protones (*deep proton writing*). Se basa en la escritura directa del elemento sobre el sustrato mediante un haz de protones. La característica principal de esta tecnología es que permite la fabricación de dispositivos que combinen elementos micromecánicos (como pueden ser microagujeros) con estructuras microópticas tales como lentes o prismas¹². La respuesta del sustrato es muy diferente dependiendo de la dosis de radiación, con

lo que se consigue integrar en el mismo dispositivo estructuras tan diferentes. En la figura 1.4 se muestra un acoplador fuera de plano fabricado mediante *deep proton writing*. En la figura 1.4 se muestra un acoplador fuera de plano fabricado con esta técnica.

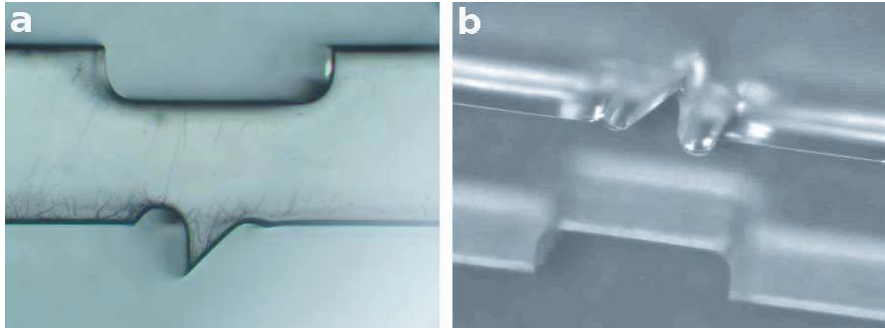


Figura 1.4. Acoplador fuera de plano fabricado mediante *deep proton writing*: a) vista lateral; y b) vista detallada del microespejo¹².

1.2.2. Tratamiento mediante láser.

El tratamiento de materiales mediante láser es una técnica que ha encontrado gran aceptación debido, principalmente, a la rapidez del proceso, direccionalidad (se trata la zona de interés sin afectar al resto de la muestra) y sencillez (se evitan las técnicas que incluyen múltiples etapas, como en el caso de la litografía).

Aunque existen diferentes posibilidades de tratamiento láser, en este apartado comentaremos la escritura directa y la ablación láser, dos procesos ampliamente extendidos. En los capítulos posteriores analizaremos más en profundidad las configuraciones experimentales empleadas en este trabajo para la fabricación de las estructuras propuestas.

1.2.2.1. Escritura directa.

La escritura directa mediante láser es un proceso en el cual se provoca un cambio en el material deseado mediante irradiación con un haz láser focalizado. Es una técnica interesante ya que evita la utilización de máscaras, moldes, pantallas o resinas que aumentan la complejidad del mismo. Además, permite la fabricación en poco tiempo de una gran cantidad de elementos (guías de onda, cavidades, elementos difractivos, ...) ¹³⁻¹⁸, como muestra la figura 1.5, y se puede aplicar a la fabricación de estructuras complejas en materiales tanto activos como pasivos ¹⁹.

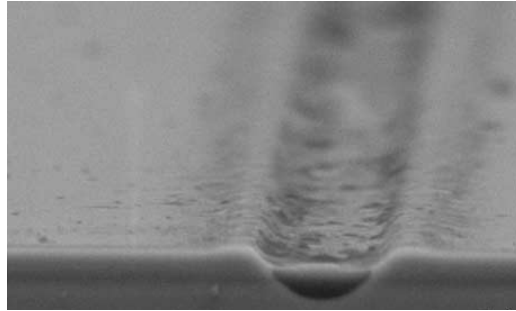


Figura 1.5. Guía de onda fabricada por escritura directa mediante láser en un vidrio de Bi_2O_3 ¹⁴.

Dependiendo del tipo de láser y de la longitud de onda empleados, la modificación que se induce en el material se puede deber a diferentes procesos físicos. Por un lado, se puede utilizar la sensibilidad del material bajo radiación con ciertas longitudes de onda (normalmente ultravioleta) para provocar el cambio deseado^{13-14,20}. Por otro lado, se pueden emplear pulsos ultracortos para provocar la densificación del material que varíe las propiedades de la zona irradiada con respecto al resto del sustrato¹⁵⁻¹⁷.

1.2.2.2. Ablación láser.

La ablación láser es un proceso por el cual la irradiación láser de un sustrato con pulsos de alta potencia provoca la extracción de material del mismo.

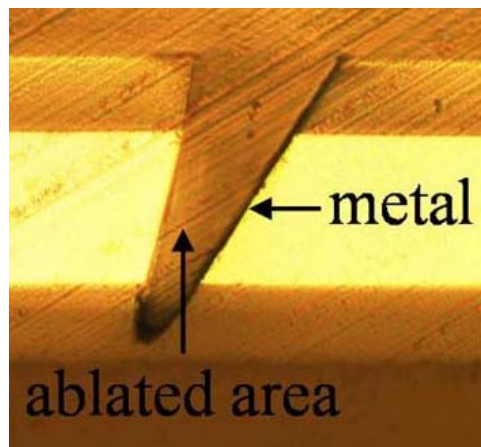


Figura 1.6. Microespejo fabricado por ablación láser y una posterior deposición metálica para favorecer las propiedades reflectivas²².

En general, la energía del haz láser es absorbida en un pequeño volumen del sustrato provocando una rápida fragmentación del material que inicia el proceso. Comparado con los procesos litográficos tradicionales tiene la ventaja de ser autosuficiente, esto es, no necesita ningún tratamiento químico posterior²¹. Es un proceso que se puede aplicar a todo tipo de materiales: metales, vidrios, polímeros, semiconductores, ...

La ablación láser es una técnica ampliamente utilizada para la fabricación de elementos difractivos²³⁻²⁵, microespejos (figura 1.6)²², guías de onda²⁶ o microlentes²⁷. Por otro lado, la flexibilidad, alta resolución y precisión que se consigue con esta tecnología, permite la fabricación de estructuras adecuadas para el acoplamiento de elementos microópticos (fibras ópticas y guías de onda, por ejemplo)²⁸. Se puede ver un ejemplo en la figura 1.7.

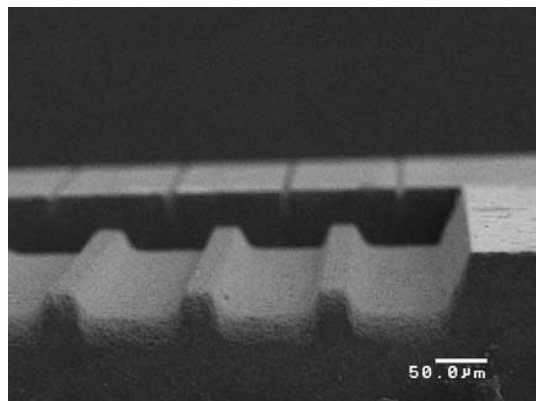


Figura 1.7. Estructura para acoplamiento óptico²⁸.

La ablación láser es un proceso complejo y ha sido objeto de multitud de análisis. La energía de irradiación puede convertirse en la superficie del material en energía electrónica, térmica o química. El material extraído puede incluir átomos, moléculas, iones positivos o negativos, electrones, ... Debido a esta naturaleza multidisciplinar, el mecanismo de ablación todavía es objeto de estudio y debate²⁹.

1.2.3. Tratamientos mecánicos.

Este conjunto de métodos se basa en la adaptación y refinamiento de las técnicas de procesamiento mecánico de materiales más habituales (como el pulido, el desbastado, el corte, ...) para su uso en la fabricación de elementos microópticos. La principal ventaja es su sencillez y bajo coste, aunque las resoluciones que se alcanzan son normalmente menores que las obtenidas con otras técnicas.

El objetivo puede ser el grabado de la estructura deseada directamente sobre el sustrato³⁰, o bien la fabricación de un molde con el negativo de la misma para proceder a su replicado^{30,31} (como ya se comentará en el apartado 1.5). Una técnica bastante utilizada es el corte con punta de diamante, técnica interesante para la obtención de muestras con profundo relieve y no mucha resolución^{31,32}.

Los tratamientos mecánicos son interesantes no sólo como un método de fabricación, sino que se pueden combinar con alguna otra técnica para refinar el elemento obtenido y mejorar sus características de integración en un dispositivo más complejo. Un ejemplo de uso común es el pulido de superficies de elementos microópticos con el objetivo de mejorar sus propiedades ópticas.

1.2.4. Difusión e intercambio iónico.

El último método que vamos a comentar es la difusión iónica. Las técnicas vistas en los apartados anteriores se basaban principalmente en la modificación de la estructura superficial del sustrato. Sin embargo, la difusión iónica consiste en la modificación selectiva del índice de refracción del sustrato mediante un intercambio de iones. Es un método ampliamente usado para la fabricación de lentes con gradiente de índice³³, lentes refractivas planas^{34,35}, guías de ondas^{36,37} y elementos difractivos³⁸⁻⁴¹.

Existen diferentes procesos de difusión. En el caso de intercambio iónico térmico (*thermal ion exchange*), el sustrato es introducido en un baño de una sal cuyos iones, al intercambiarse con los del sustrato, aumentan el índice de refracción de éste último. El baño está a una temperatura próxima a la temperatura de transición del sustrato, para favorecer el paso de iones de uno a otro³⁹. En ocasiones se recubren algunas zonas del sustrato con una máscara que limita el intercambio iónico a esas regiones (ver figura 1.8). Esto es muy interesante para la fabricación de guías de onda de canal, ya que permite confinar lateralmente la zona de cambio de índice³⁸.

La principal desventaja del intercambio iónico térmico es que, debido a la naturaleza isotrópica del intercambio, es muy difícil fabricar estructuras puramente binarias (existe una importante difusión lateral de los iones). Este efecto puede ser reducido utilizando intercambio iónico asistido por un campo eléctrico^{38,40-41}. En este caso se genera una diferencia de potencial entre dos cátodos, uno de los cuales es la sal, de forma que se produce un tránsito de iones. El sustrato se coloca en contacto con el baño, de forma que pueda producirse un intercambio entre sus iones con los que se están desplazando debido a la presencia del campo⁴². Además de disminuir la difusión lateral, la utilización de un campo eléctrico acelera el proceso⁴³.

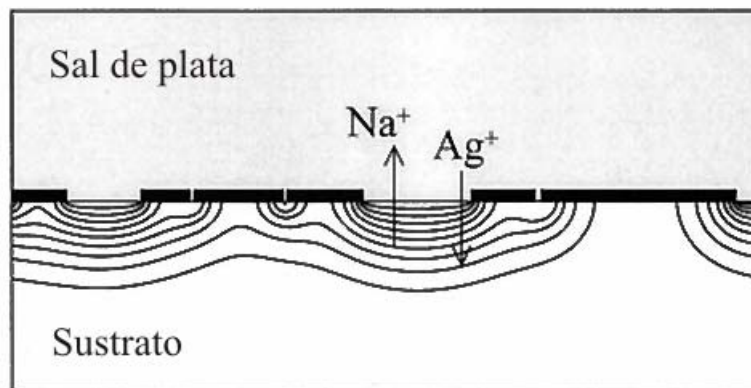


Figura 1.8. Típico proceso de difusión iónica entre una sal de plata y un sustrato sódico. La máscara limita el intercambio a la zona expuesta.

1.3. Caracterización de elementos microópticos.

La caracterización es una parte fundamental en la obtención de cualquier tipo de dispositivo. La medida de los parámetros de un dispositivo microóptico permite el análisis de la calidad del mismo, lo que también nos da una idea de la eficiencia de la técnica de fabricación. De esta forma, en caso de ser necesario, se pueden introducir mejoras en dicho proceso.

La caracterización de elementos microópticos se basa, principalmente, en la medida de los parámetros físicos (dimensiones del elemento, forma, análisis de la superficie, ...) y ópticos (eficiencia, resolución, dispersión cromática, índice de refracción, ...) de la muestra³. En este apartado comentaremos los principios básicos de los métodos de caracterización más usados en microóptica. Los utilizados para la caracterización de las muestras de este trabajo se mostrarán más detalladamente en los capítulos 3 y 4, particularizados para los elementos en cuestión.

1.3.1. Estudio de propiedades físicas: métodos físicos.

Los métodos físicos para la caracterización de elementos microópticos se basan en el análisis de su superficie mediante una sonda, con la que se realizan una serie de barridos que permiten detectar las formas u objetos presentes en dicha superficie. Con estas técnicas se obtienen perfiles e imágenes de la muestra que permiten conocer parámetros como sus dimensiones, la rugosidad superficial

o el perfil en profundidad de elementos difractivos, así como otros defectos presentes en la estructura a caracterizar^{1,44-47}.

Dentro de estos métodos físicos podemos hablar de la perfilometría o de la microscopía de fuerzas atómicas (*Atomic Force Microscope* o AFM). En ambos casos, el dispositivo sensible a las variaciones superficiales es un soporte flexible (también llamado *cantilever*) con una aguja muy fina en uno de sus extremos⁴⁸. Tanto el tamaño como la forma de la aguja son los que limitan la resolución del dispositivo de medida.

En el caso de perfilometría mecánica la aguja se encarga de escanear la superficie de la muestra, en contacto físico con la misma. Una de las desventajas, es que esta situación de contacto puede provocar algún tipo de deformación en la muestra, sobre todo en el caso de materiales plásticos^{1,48}. La aguja empleada en perfilometría tiene un tamaño de unas pocas micras.

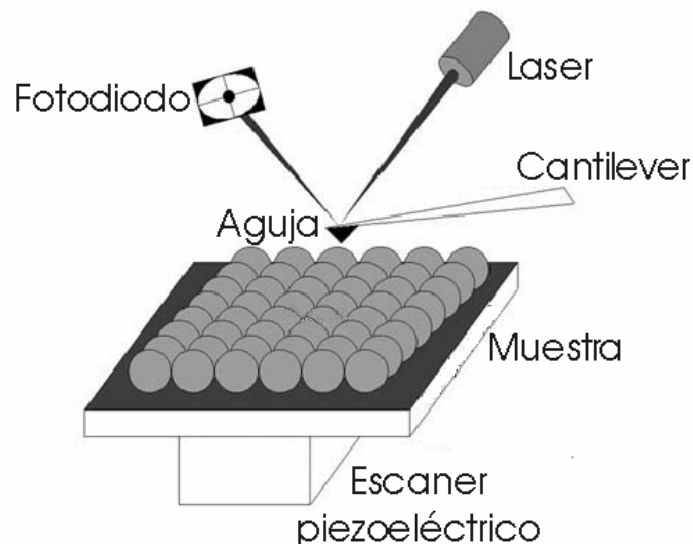


Figura 1.9. Esquema de funcionamiento de un microscopio de fuerzas atómicas.

El AFM es una de las técnicas más versátiles entre las técnicas de sonda. El funcionamiento del AFM se basa en las fuerzas atómicas que surgen entre la muestra y una aguja (con dimensiones atómicas) cuando ésta última se acerca lo suficiente⁴⁸. Esas fuerzas provocan vibraciones en el *cantilever* que pueden ser medidas utilizando para ello la reflexión de la luz proveniente de una fuente láser (ver figura 1.9). La luz reflejada es recogida por un fotodiodo mediante el cual, dependiendo de la cantidad de luz que llegue a cada una de las zonas del receptor, se puede conocer la desviación del *cantilever* con respecto a su posición original. De esta forma, y a través de un programa informático se puede obtener la

topografía superficial de la muestra que se desea caracterizar (figura 1.10). Existen diferentes modos de trabajo en los microscopios de fuerzas atómicas (contacto, no contacto y de golpeo o *tapping*) dependiendo del modo en que la aguja contacte con la superficie. El modo de contacto permite realizar análisis muy rápidos, aunque está limitado a muestras “duras”, ya que el arrastre de la aguja sobre la muestra puede provocar daños importantes en la misma (al igual que en la perfilometría mecánica). Esta desventaja se puede evitar utilizando el microscopio de fuerzas atómicas en modo de no contacto. En este caso, la sonda se coloca separada de la muestra, pero en una zona en la que se perciben las fuerzas atractivas de largo alcance. Una solución intermedia es el modo *tapping*. En este caso, la aguja golpea la superficie durante una pequeña fracción de tiempo de su período de oscilación. La reducción del tiempo de contacto conlleva una disminución de las fuerzas laterales descritas en el modo de contacto, de forma que es un método muy interesante para analizar muestras blandas o con una sujeción débil. Sin embargo, el tiempo de análisis de la muestra se incrementa respecto al modo de contacto.

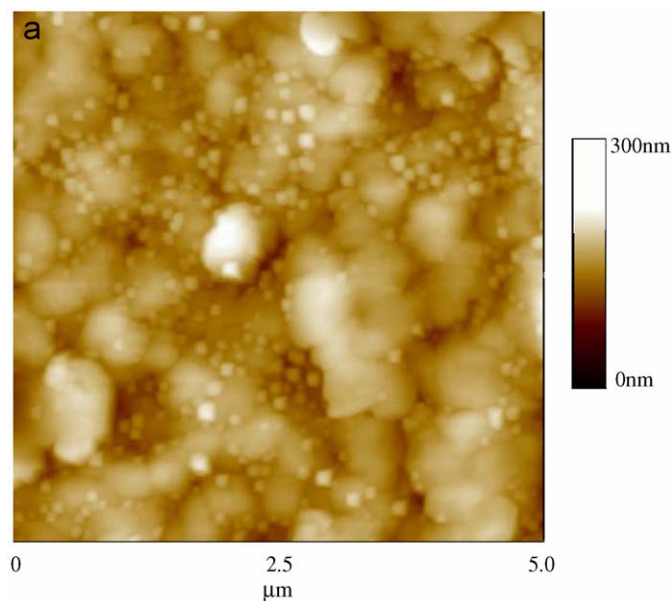


Figura 1.10. Rugosidad superficial de una capa de InN crecida sobre un sustrato de zafiro. La imagen ha sido obtenida mediante microscopía de fuerzas atómicas (AFM)⁴⁶.

1.3.2. Estudio de propiedades físicas: métodos ópticos.

Las propiedades físicas de los elementos microópticos también se pueden medir utilizando métodos basados en principios ópticos. Así, es posible conocer

sus dimensiones, perfil o defectos mediante técnicas como la microscopía⁴⁹⁻⁵¹ o la interferometría⁵²⁻⁵⁴.

La microscopía nos permite obtener imágenes del objeto que estamos analizando, a partir de las cuales es posible calcular las dimensiones más interesantes de la estructura presente en la muestra. En los microscopios tradicionales, se ilumina el objeto para obtener la imagen deseada. Es un método útil de análisis, ya que es bastante rápido y no daña la estructura a analizar¹. Sin embargo, este tipo de dispositivos no tienen suficiente resolución para observar estructuras con un tamaño del orden, o por debajo, de las micras, además de presentar ciertos problemas a la hora de analizar superficies cóncavas. En este caso, se hace necesario el uso de la microscopía electrónica, en la cual el objeto a analizar es irradiado con electrones y, a partir de la información proporcionada por estas partículas, se pueden obtener imágenes de la topografía de la muestra. Ya que la longitud de onda de éstos últimos es mucho menor que la de la luz, es posible observar estructuras de menor dimensión (figura 1.11).

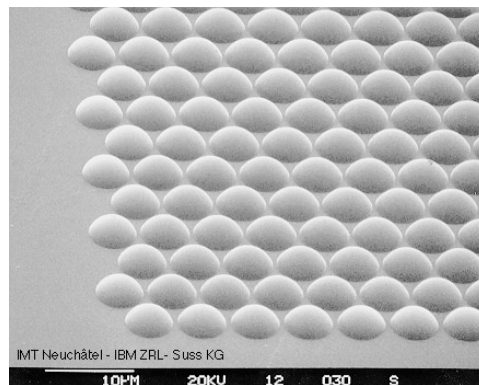


Figura 1.11. Imagen de un *array* de microlentes obtenida mediante microscopía electrónica. El diámetro de cada una de las lentes es de $5\mu\text{m}$ ⁴⁷.

Cuando un objeto se irradia con electrones se pueden producir una serie de procesos, como muestra la figura 1.12. Cierta cantidad de electrones son retrodispersados. Si el objeto es suficientemente fino tendremos también electrones transmitidos y otros dispersados por choques al atravesar la muestra, tanto inelástica como elásticamente (según pierdan energía o no con respecto al haz incidente). Además puede haber emisión de otras partículas por interacción del haz con los átomos del material (rayos X, electrones Auger, electrones secundarios,...). Según el tipo de partículas que se usen para obtener la imagen del objeto tenemos diferentes tipos de microscopios electrónicos. En el caso de microscopio electrónico de transmisión (*Transmission Electron Microscope* o

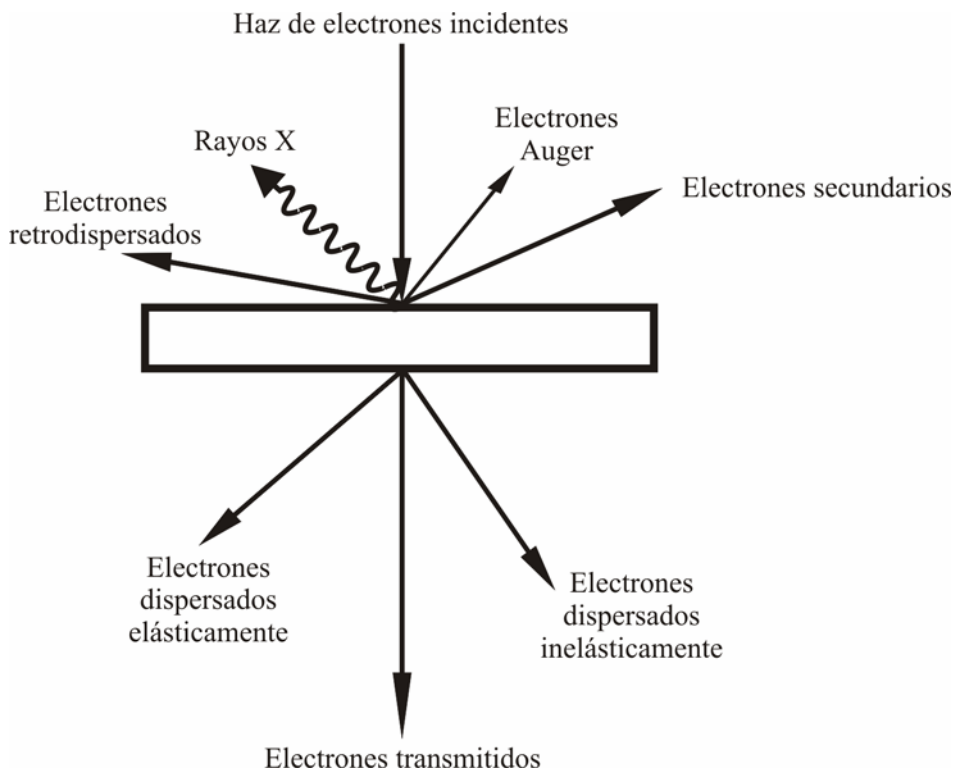


Figura 1.12. Partículas emitidas por una muestra cuando es irradiada con un haz de e^- .

TEM), el detector recoge los electrones que atraviesan la muestra para conseguir una imagen de la misma. Es un método muy interesante para analizar capas finas o muestras suficientemente delgadas, de forma que el número de electrones que atraviesan la muestra sea significativo. Por su parte, los microscopios electrónicos de barrido (*Scanning Electron Microscope* o SEM) forman la imagen al detectar los electrones secundarios de baja energía emitidos desde la superficie de la muestra, debido a la excitación producida por el haz incidente. Es un método interesante para analizar muestras gruesas, conductoras y con un número atómico alto, ya que en estos casos el número de electrones secundarios es mucho mayor.

Por otro lado, la interferometría puede ser muy útil sobre todo a la hora de evaluar radios de curvatura o desviaciones de objetos con perfiles curvos respecto del diseño original (en el caso de las microlentes o microesferas), parámetros más difíciles de analizar con buena resolución por otros métodos⁵²⁻⁵⁴. Para este tipo de análisis se utilizan principalmente interferómetros por reflexión¹. El objetivo es obtener información de la calidad superficial de los elementos a partir de las franjas de interferencia^{52,55-56}.

1.3.3. Estudio de propiedades ópticas.

Además de las propiedades físicas, es fundamental conocer las propiedades ópticas del dispositivo fabricado para poder evaluar su funcionalidad y su calidad como elemento microóptico. Para ello es necesario la medida de parámetros como la distancia focal y aberraciones (en el caso de las microlentes), la eficiencia (de elementos difractivos o guiantes) o la dispersión (también en el caso de elementos guiantes).

Es posible medir algunos de estos parámetros con montajes experimentales sencillos. Por ejemplo, la eficiencia de un elemento difractivo se puede obtener irradiando dicho elemento con una fuente láser y midiendo la irradiancia de cada uno de los órdenes, comparándola con la del haz incidente^{57,58}. Por otro lado, utilizando un sistema formador de imagen se pueden obtener parámetros que nos permiten evaluar la calidad de las microlentes (figura 1.13). A partir de la imagen de un patrón conocido proyectado con un objetivo sobre el elemento a analizar, se puede estudiar la distancia focal de dicho elemento⁴⁷ o su validez como sistema formador de imágenes (al comparar el resultado con el patrón original)⁵⁹. También es un método válido para medir la respuesta de impulso de un sistema (*Point Spread Function* o PSF) y la función de transferencia de modulación (*Modulation Transfer Function* o MTF)^{1,47,60-62}, funciones que determinan la calidad de la lente.

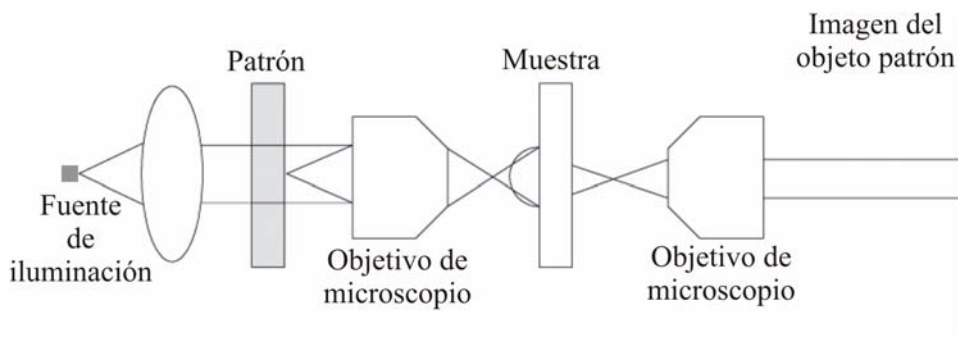


Figura 1.13. Esquema de un sistema formador de imagen para el análisis de una microlente¹.

El estudio de las aberraciones requiere el uso de un sistema experimental más complejo que permita analizar el frente de ondas, como es el interferómetro de Mach-Zehnder^{1,47,63}. En este tipo de dispositivos, el haz incidente en el sistema se separa en dos caminos, uno a través del objeto que se quiere caracterizar y otro que se utiliza como haz de referencia. A través del análisis del patrón de interferencia se puede conocer la desviación del comportamiento de la lente con

respecto al diseño original y de esta forma medir las aberraciones que presenta el elemento fabricado (ver figura 1.14).

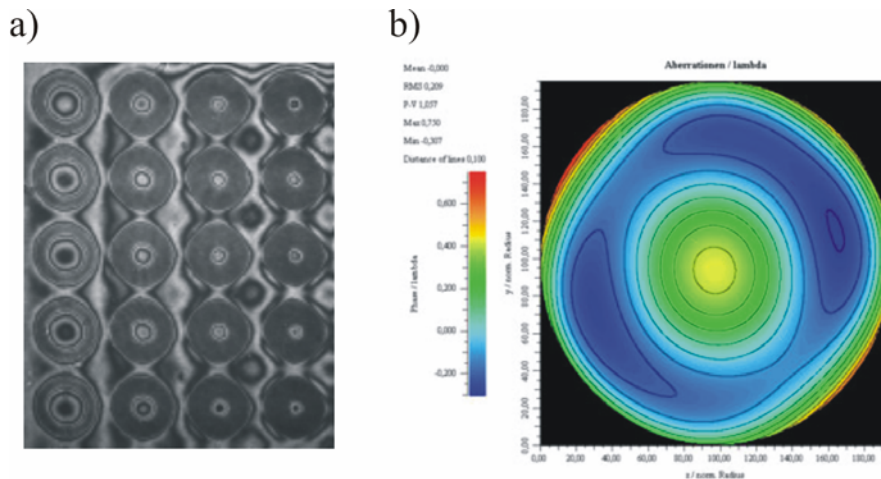


Figura 1.14. a) Interferogramma Mach-Zehnder de un *array* de microlentes; b) gráfico de la distribución de las aberraciones en una de las microlentes⁶³.

Las características básicas de algunos elementos microópticos, como los dispositivos guantes o los de gradiente de índice, vienen determinadas por la distribución del índice de refracción⁶⁴⁻⁶⁶. La medida de este parámetro puede proporcionar información básica para analizar el comportamiento de estos dispositivos, además de servir como un método útil para el control de calidad durante el proceso de fabricación⁶⁴. Existe una gran variedad de técnicas para la determinación del perfil de índice: difracción de rayos X⁶⁷, métodos interferométricos^{68,69}, métodos de campo cercano refractado (*refracted near-field technique*)^{64,70-71} o tomografía por difracción⁶⁵. Dependiendo del tipo de muestra que se quiera analizar, utilizaremos uno u otro método ya que cada uno tiene ventajas e inconvenientes. La tomografía por difracción permite la reconstrucción del perfil de índice tridimensional⁶⁵. En caso de necesitar sólo un perfil bidimensional, la técnica de campo cercano refractado es una buena alternativa, ya que tiene altas resolución y precisión y necesita un tratamiento mínimo de la muestra⁷⁰.

1.4. Técnicas de replicación.

Una vez obtenido el dispositivo microóptico original, con alguno de los métodos en el apartado 1.3, y habiendo analizado sus características y depurado el

proceso de fabricación, el siguiente paso del proceso es la replicación. El objetivo es la obtención de una serie de elementos iguales y con las propiedades ópticas y físicas deseadas, para proceder a su comercialización o a su aplicación en experimentos a gran escala. Por ello deben permitir la obtención de un número alto de muestras en el menor tiempo posible.

Podemos citar como principales técnicas de replicado la inyección en un molde (*Injection moulding*), grabado en relieve con calor (*hot embossing*) y técnicas de fundido mediante irradiación ultravioleta (*UV casting*). Con estas técnicas se pueden obtener réplicas con una resolución extremadamente alta (incluso tamaños por debajo de los 100 nm) así como elementos que se acoplen perfectamente a soportes o montajes de un tamaño mucho mayor (milímetros o centímetros), manteniendo una buena resolución óptica⁷². Los pasos del proceso de replicación son prácticamente los mismos en todas las técnicas, e incluye la fabricación de un molde adecuado a la estructura que se quiere replicar, y la producción de las mismas en el material que se desee. Se utilizan normalmente materiales maleables o fundibles, que permitan reproducir las estructuras más o menos complejas del patrón en las nuevas piezas. Para la obtención del molde se suele utilizar níquel, aunque dependiendo de la técnica de replicación puede ser necesario que el molde sea transparente (silicona, principalmente)⁷².

La principal diferencia que se encuentra entre las distintas técnicas de replicación es la resolución que se puede alcanzar con cada una de ellas, que, a su vez, influye de manera clara sobre el tiempo y el coste de producción. La evaluación de estos factores nos permitirá decantarnos por una u otra a la hora de proceder a la producción en masa de los elementos microópticos. Ya que la replicación no es el objetivo principal de este trabajo, en este apartado comentaremos brevemente algunas de las características básicas de las técnicas citadas anteriormente.

1.4.1. Moldeo por inyección (*Injection moulding*).

Como indica el nombre, este proceso consiste en la inyección del material sobre el que se van a realizar las réplicas en el molde, donde adquiere la forma deseada. Se suelen utilizar materiales termoplásticos (PC y PMMA), fácilmente fundibles y con un rango de longitudes de onda de transmisión que cubren las ventanas típicas de comunicaciones ópticas. Como se puede ver en la figura 1.15, el material plástico se introduce en forma de piezas sólidas en un depósito. La base de este depósito está conectada con un conducto cilíndrico, en el cual se funde el plástico a la vez que, por medio de la presión ejercida por un tornillo, es inyectado dentro del molde. Una vez inyectada la cantidad adecuada, dentro del molde se hace el vacío y se enfría el material, obteniéndose así la pieza deseada.

Es una técnica muy rápida, apta para un alto volumen de producción, de ahí que sea utilizada para la producción industrial⁷³⁻⁷⁷. La principal desventaja que presenta es el alto coste de fabricación del molde, que, además, ha de ser único para cada tipo de elemento microóptico.

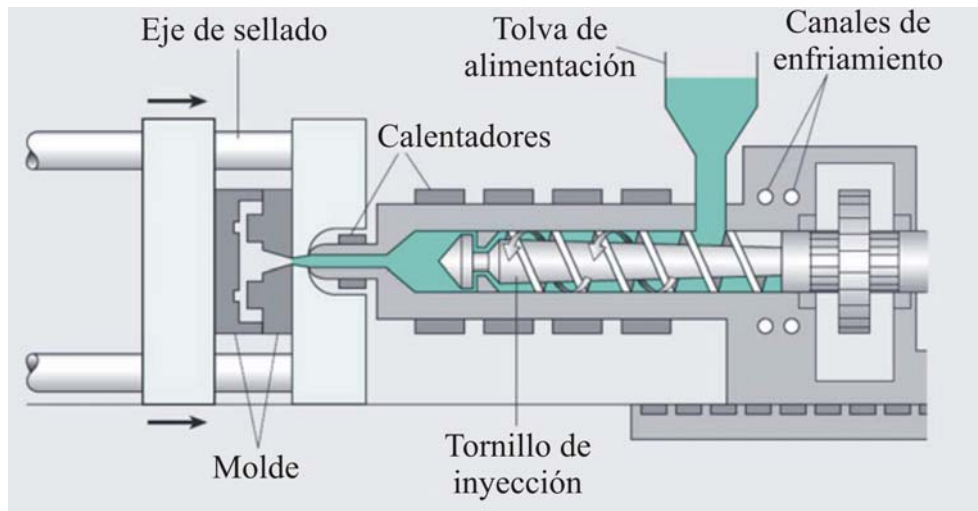


Figura 1.15. Proceso de replicado de elementos microópticos mediante *injection moulding*.

1.4.2. Moldeo por compresión (*Hot embossing*).

Es una técnica similar al *injection moulding*, ya que se utilizan el mismo tipo de materiales termoplásticos, y porque también se necesita fundir el material de replicación para adaptarlo a la forma que presenta el molde. Este es un proceso de estampado del patrón de dicho molde sobre el material de replicado, aumentando para ello la temperatura del material por encima de su temperatura de transición a vidrio. La figura 1.16 muestra un esquema de una máquina de *hot embossing*. Este proceso tiene un tiempo de producción mayor que el *injection moulding*, por lo que se utiliza en aplicaciones que necesiten una producción a menor escala o un menor número de unidades.

Una variante de esta técnica se conoce con el nombre de *roller hot embossing*. En este caso, una lámina de polímero se hace pasar entre dos rodillos con el molde del elemento microóptico deseado, de forma que el replicado se produce por la presión ejercida sobre el material.

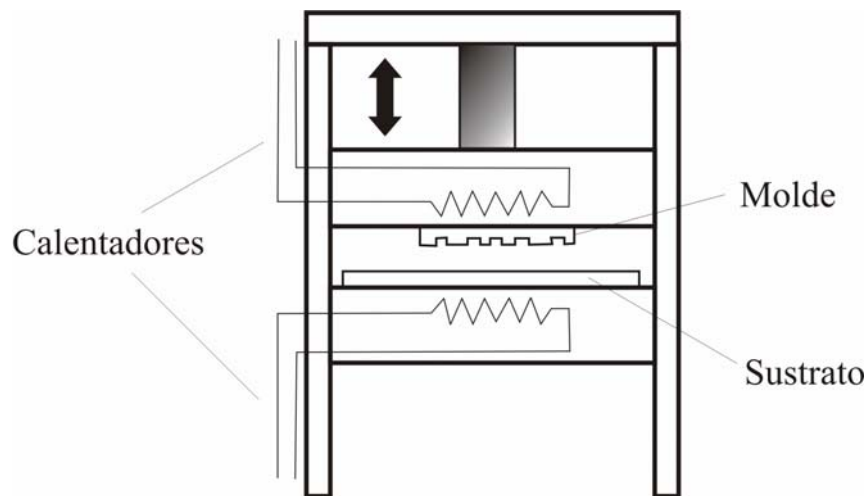


Figura 1.16. Dispositivo experimental para el estampado del patrón del molde mediante *hot embossing*.

1.4.3. Técnicas de fundido (*UV casting*).

Este conjunto de técnicas presentan unas mejores características en cuanto a la resolución de los elementos obtenidos, pero el coste de replicación aumenta considerablemente al necesitar un tiempo de procesado mucho mayor⁷³⁻⁷⁵.

Dentro de este grupo de técnicas podemos hablar del *UV casting*, en el cual se aplica el polímero en estado líquido sobre el molde para proceder a continuación a su curado mediante irradiación ultravioleta; o del *casting* en vacío, para lo cual se crea un molde introduciendo el componente original en un bloque de material plástico, en el que posteriormente se puede inyectar y curar el material de las réplicas.

1.5. Algunas aplicaciones de elementos microópticos.

Terminaremos este capítulo introductorio con un pequeño repaso a algunos ejemplos de ramas tecnológicas que hayan sufrido un importante desarrollo gracias a la aplicación e integración de elementos microópticos. En los capítulos posteriores nos centraremos en algunos ejemplos específicos de los elementos que se proponen en cada caso.

En este primer capítulo nos centraremos en tres bloques principales de aplicaciones muy conocidos y que nos podemos encontrar en dispositivos que

usamos en nuestra vida diaria: aplicaciones a comunicaciones y computación, a la detección y sensores y a la iluminación y proyección en pantallas.

1.5.1. Comunicaciones y computación.

El mundo de las comunicaciones está evolucionando a pasos agigantados. La creciente importancia de los ordenadores, de Internet y de las redes multimedia para intercambio de datos, audio o video son algunos de los ejemplos de esta evolución. Dentro de esta gran transformación, los elementos y dispositivos microópticos están jugando un papel muy importante. La combinación actual de elementos ópticos y electrónicos permite la generación, manipulación y transporte a alta velocidad de dicha información.

Diferentes tipos de elementos microópticos están integrados en los circuitos y redes que se usan actualmente. Por ejemplo, existe una gran cantidad de trabajos centrados en la utilización de guías de onda como conectores ópticos para sistemas de computadores (chips, placas, ...) ⁷⁸⁻⁸¹. También se pueden aplicar en divisores de haz ⁷⁹, interruptores y multiplexores ⁸³, reduciendo los problemas presentes en los sistemas tradicionales. Otro tipo de elementos, como los microespejos, también son de interesante aplicación en este tipo de conexiones ⁸⁴.

En el futuro sería muy interesante el desarrollo de circuitos y conexiones puramente ópticas ⁸⁵⁻⁸⁷. La ventaja fundamental de la óptica es que ofrece un aumento en el ancho de banda que está limitando en la actualidad las conexiones electrónicas ⁷⁸. Esto se traduce en menores pérdidas y distorsiones de la señal enviada, factores que vendrían a solucionar algunas de los problemas de la tecnología actual. Otro factor en contra de las interconexiones eléctricas es la posible aparición de interferencias electromagnéticas entre canales adyacentes en conectores de alta densidad ⁷⁸. El principal punto en contra de la tecnología puramente óptica es el precio. El coste de estos dispositivos todavía está por encima de los electrónicos ⁸⁸.

1.5.2. Iluminación y pantallas.

Hoy en día estamos acostumbrados al uso de elementos electrónicos que nos hacen la vida más fácil, como teléfonos móviles, cámaras digitales, ordenadores portátiles, localizadores y GPS's, ... En todos estos dispositivos la microóptica está muy presente tanto en las pantallas, como en los elementos formadores de imágenes o elementos para iluminación. La aplicación de elementos microópticos se debe a las ventajas tanto físicas (elementos más pequeños y más planos, que permiten su integración en cualquier tipo de dispositivo) como de calidad óptica (mayor

eficiencia de iluminación, posibilidad de adaptar el patrón de iluminación al deseado, ...) que ofrecen.

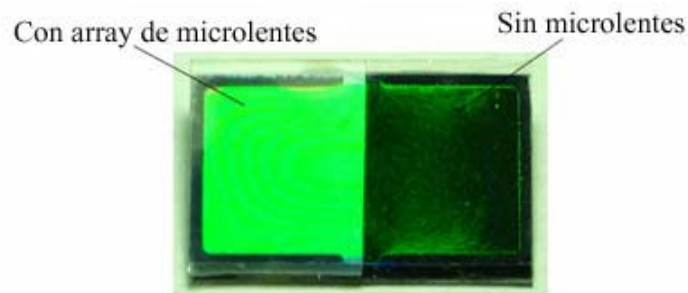


Figura 1.17. Diferencia de brillo de una pantalla de cristal líquido integrando un array de microlentes⁴.

Las pantallas de cristal líquido (*liquid-crystal displays* o LCD's) se han convertido en una tecnología muy popular, tanto en teléfonos móviles como en aplicaciones de baja intensidad. Elementos microópticos como microlentes, microcanales o redes de difracción permiten mejorar la calidad de imagen, aumentar la eficiencia de la luz o generar imágenes tridimensionales (ver figura 1.17)^{4,89-91}.

1.5.3. Detección y sensores.

La tecnología microóptica tiene algunas características, como la rápida respuesta a variaciones o la posibilidad de hacer medidas sin contacto, que la hacen muy adecuada para su aplicación a la rama de los sensores. Esta tecnología se ha aplicado a la medida de parámetros como el índice de refracción⁹² o distancias⁹³.

Por otro lado, la posibilidad de registrar patrones de difracción en fibra óptica, ha permitido el desarrollo de una serie de sensores con aplicación en campos muy diferentes: medida de parámetros físicos o químicos⁹⁴⁻⁹⁶, control *in situ* de procesos⁹⁷ o aplicaciones ambientales y biotecnológicas^{98,99}.

Referencias

[1] M. Kufner and S. Kufner, "Micro-Optics and Lithography", VUB Press, ed. (Brussels, Belgium, 1997).

- [2] H.P. Herzig, ed., "Micro-optics: elements, systems and applications", Taylor & Francis, Ltd. (London, United Kingdom, 1997).
- [3] S. Sinzinger and J. Jahns, "Microoptics", WILEY-VCH GmbH & Co. (Weinheim, Germany, 2003).
- [4] H.-P.D. Shieh, Y.-P. Huang and K.-W. Chien, "Micro-Optics for Liquid Crystal Displays Applications", *J. Disp. Technol.* **1**, 62-76 (2005).
- [5] R.K. Kupka, F. Bouamrane, C. Cremers and S. Megtert, "Microfabrication: LIGA-X and applications", *Appl. Surf. Sci.* **164**, 97-110 (2000).
- [6] B.-Y. Shew, T.-Y. Huang, K.-P. Liu and C.-P. Chou, "Oxygen quenching effect in ultra-deep x-ray lithography with SU-8 resist", *J. Micromech. Microeng.* **14**, 410-414 (2004).
- [7] W. Arden, "Optical versus X-ray lithography for future device fabrication", *Microelectron. Eng.* **13**, 231-241 (1991).
- [8] C. Vieu, F. Carcenac, A. Pépin, Y. Chen, M. Mejias, A. Lebib, L. Manin-Ferlazzo, L. Couraud and H. Launois, "Electron beam lithography: resolution limits and applications", *Appl. Surf. Sci.* **164**, 111-117 (2000).
- [9] S. Cabrini, A. Carpentiero, R. Kumar, L. Businaro, P. Candeloro, M. Prasciolu, A. Gosparini, C. Andreani, M. De Vittorio, T. Stomeo and E. Di Fabrizio, "Focused ion beam lithography for two dimensional array structures for photonic applications", *Microelectron. Eng.* **78-79**, 11-15 (2005).
- [10] H. Morimoto, Y. Sasaki, K. Saitoh, Y. Watakabe and T. Kato, "Focused ion beam lithography and its application to submicron devices", *Microelectron. Eng.* **4**, 163-179 (1986).
- [11] K. Arshak, M. Mihov, A. Arshak, D. McDonagh and D. Sutton, "Novel dry-developed focused ion beam lithography scheme for nanostructure applications", *Microelectron. Eng.* **73-74**, 144-151 (2004).
- [12] C. Debaes, J. Van Erps, M. Vervaeke, B. Volckaerts, H. Ottevaere, V. Gómez, P. Vynck, L. Desmet, R. Krajewski, Y. Ishii, A. Hermanne and H. Thienpont, "Deep proton writing: a rapid prototyping polymer micro-fabrication tool for micro-optical modules", *New J. Phys.* **8**, 270 (2006).

- [13] H. Ebendorff-Heidepriem, "Laser writing of waveguides in photosensitive glasses", *Opt. Mater.* **25**, 109-115 (2004).
- [14] A. Favre, E. Lee, V. Apostolopoulos, C.B.E. Gawith, C.-Y. Tai, E. Taylor, Y. Kondo and F. Koizumi, "Fabrication and characterization of UV-written channel waveguides in Bi₂O₃-based glass", *Opt. Mater.* **27**, 7-13 (2004).
- [15] G.D. Marshall, M. Ams and M.J. Withford, "Direct laser written waveguide-Bragg gratings in bulk fused silica", *Opt. Lett.* **31**, 2690-2691 (2006).
- [16] A. Saliminia, N.T. Nguyen, M.C. Nadeau, S. Petit, S.L. Chin and R. Vallee, "Writing optical waveguides in fused silica using 1 kHz femtosecond infrared pulses", *J. Appl. Phys.* **93**, 3724-3728 (2003).
- [17] A. Marcinkevicius, S. Juodkazis, M. Watanabe, M. Miwa, S. Matsuo, H. Misawa and J. Nishii, "Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica", *Opt. Lett.* **26**, 277-279 (2001).
- [18] F.C. Cheong, B. Varghese, S. Sindhu, C.M. Liu, S. Valiyaveetil, A.A. Bettiol, J.A. Van Kan, F. Watt, W.S. Chin, C.T. Lim and C.H. Sow, "Direct removal of SU-8 using focused laser writing", *Appl. Phys. A* **87**, 71-76 (2007).
- [19] K.K. Seet, V. Mizeikis, S. Matsuo, S. Juodkazis and H. Misawa, "Three-Dimensional Spiral-Architecture Photonic Crystals Obtained by Direct Laser Writing", *Adv. Mater.* **17**, 541-545 (2005).
- [20] J.-S. Koo, R.B. Williams, C.B.E. Gawith, S.P. Watts, G.D. Emmerson, V. Albanis, P.G.R. Smith and M.C. Grossel, "UV written waveguide devices using crosslinkable PMMA-based copolymers", *Electron. Lett.* **39**, 394-395 (2003).
- [21] H.-G. Rubahn, "Laser Applications in Surface Science and Technology", John Wiley & Sons, Ltd. (Baffins Lane, West Sussex, United Kingdom, 1999), cap 6.
- [22] N. Hendrickx, J. Van Erps, G. Van Steenberge, H. Thienpont and P. Van Daele, "Laser Ablated Micromirrors for Printed Circuit Board Integrated Optical Interconnections", *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19**, 822-824 (2007).

- [23] J. Zhang, K. Sugioka and K. Midorikawa, "Direct fabrication of microgratings in fused quartz by laser-induced plasma-assisted ablation with a KrF excimer laser", *Opt. Lett.* **23**, 1486-1488 (1998).
- [24] S. Pissadakis, L. Reekie, M. Hempstead, M.N. Zervas and J.S. Wilkinson, "Ablated gratings on borosilicate glass by 193-nm excimer laser radiation", *Appl. Phys. A* **69**, S739-S741 (1999).
- [25] J. Ihlemann, S. Müller, S. Puschmann, D. Schäfer, M. Wei, J. Li and P.R. Herman, "Fabrication of submicron gratings in fused silica by F₂-laser ablation", *Appl. Phys. A* **76**, 751-753 (2003).
- [26] G. Van Steenberge, N. Hendrickx, E. Bosman, J. Van Erps, H. Thienpont and P. Van Daele, "Laser ablation of parallel optical interconnect waveguides", *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18**, 1106-1108 (2006).
- [27] K. Naessens, H. Ottevaere, R. Baets, P. Van Daele and H. Thienpont, "Direct writing of microlenses in polycarbonate with excimer laser ablation", *Appl. Opt.* **42**, 6349-6359 (2003).
- [28] J.T. Kim, B.C. Kim, M.Y. Jeong and M.S. Lee, "Fabrication of a micro-optical coupling structure by laser ablation", *J. Mater. Proc. Technol.* **146**, 163-166 (2004).
- [29] J.C. Miller, ed., "Laser Ablation: Principles and Applications", Springer-Verlag (Berlin, Germany, 1994), cap 1.
- [30] N. Moldovan, M. Ilie, N. Dumbravescu, M. Danila, A. Vitriuc, P. Sindile and J. Mohr, "LIGA and alternative techniques for microoptical components", *Proceedings CAS'97 IEEE*, 149-152 (1997).
- [31] C.G. Blough, M. Rossi, S.K. Mack and R.L. Michaels, "Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements", *Appl. Opt.* **36**, 4648-4654 (1997).
- [32] R. Piestun and J. Shamir, "Synthesis of Three-Dimensional Light Fields and Applications", *Proceedings of the IEEE* **90**, 222-244 (2002).

- [33] B. Messerschmidt, T. Possner and R. Göring, “Colorless gradient-index cylindrical lenses with high numerical apertures produced by silver-ion exchange”, *Appl. Opt.* **34**, 7825-7830 (1995).
- [34] J. Bähr, K.-H. Brenner, S. Sinzinger, T. Spick and M. Testorf, “Index-distributed planar microlenses for three-dimensional micro-optics fabricated by silver-sodium ion exchange in BGG35 substrates”, *Appl. Opt.* **33**, 5919-5924 (1994).
- [35] J. Bähr and K.-H. Brenner, “Realization and optimization of planar refracting microlenses by Ag-Na ion-exchange techniques”, *Appl. Opt.* **35**, 5102-5107 (1996).
- [36] A. Tervonen, “Theoretical Analysis of ion-exchanged glass waveguides”, in *Introduction to Glass Integrated Optics*, S.I. Najafi, ed. (Artech, Boston, U.S.A., 1992), 73-105.
- [37] G. Li, K.A. Winick, H.C. Griffin and J.S. Hayden, “Systematic modeling study of channel waveguide fabrication by thermal silver ion exchange”, *Appl. Opt.* **45**, 1743-1755 (2006).
- [38] R.-P. Salmio, J. Saarinen, J. Turunen and A. Tervonen, “Graded-index diffractive structures fabricated by thermal ion exchange”, *Appl. Opt.* **36**, 2048-2057 (1997).
- [39] T. Yatagai, R. Sugawara, H. Hashizume and M. Seki, “Phase-only computer-generated hologram produced by an ion-exchange technique”, *Opt. Lett.* **13**, 952-954 (1988).
- [40] E.J. Patej and B. Oron, “Realisation and investigation of phase diffraction gratings in glass”, in *Optical Fibres and Their Applications V*, R.S. Romaniuk and M. Szustakowski, eds., *Proceedings SPIE* **1085**, 436-437 (1989).
- [41] J. Saarinen, A. Tervonen, J. Turunen and S. Honkanen, “Electric-field assisted silver-film ion-exchange in glass for the fabrication of index-modulated diffractive elements”, in *Meeting Digest-Frontiers in Information Optics, Topical Meeting of ICO* (International Commission for Optics, Kyoto, Japan, 1994), 76.
- [42] G. Sorbello, S. Taccheo, M. Marano, M. Marangoni, R. Osellame, R. Ramponi and P. Laporta, “Comparative study of Ag-Na thermal and field-assisted ion exchange on Er-doped phosphate glass”, *Opt. Mater.* **17**, 425-435 (2001).

- [43] P. Mrozek, E. Mrozek and T. Lukaszewicz, "Side diffusion modelling by the explicit consideration of a space-charge buildup under the mask during strip waveguide formation in the Ag^+ - Na^+ field-assisted ion-exchange process", *Appl. Opt.* **45**, 619-625 (2006).
- [44] A. Duparré, J. Ferre-Borrull, S. Gliech, G. Notni, J. Steinert, and J.M. Bennett, "Surface Characterization Techniques for Determining the Root-Mean-Square Roughness and Power Spectral Densities of Optical Components", *Appl. Opt.* **41**, 154-171 (2002).
- [45] S.V. Bagul, S.D. Chavhan and R. Sharma, "Growth and characterization of Cu_xS ($x=1.0, 1.76, \text{ and } 2.0$) thin films grown by solution growth technique (SGT)", *J. Phys. Chem. Solids* **68**, 1623-1629 (2007).
- [46] X.L. Zhu, L.W. Guo, N.S. Yu, J.F. Yan, M.Z. Peng, J. Zhang, H.Q. Jia, H. Chen and J.M. Zhou, "Structural characterization of InN films grown on different buffer layers by metalorganic chemical vapor deposition", *J. Crystal Growth* **306**, 292-296 (2007).
- [47] P. Nussbaum, R. Völkel, H.P. Herzig, M. Eisner and S. Haselbeck, "Design, fabrication and testing of microlens arrays for sensors and microsystems", *Pure Appl. Opt.* **6**, 617-636 (1997).
- [48] G. Binnig, C.F. Quate and Ch. Gerber, "Atomic Force Microscope", *Phys. Rev. Lett.* **56**, 930-934 (1986).
- [49] K. Naessens, H. Ottevaere, P. Van Daele and R. Baets, "Flexible fabrication of microlenses in polymer layers with excimer laser ablation", *Appl. Surf. Sci.* **208-209**, 159-164 (2003).
- [50] B. Kaplan, T. Novikova, A. De Martino and B. Drévilon, "Characterization of bidimensional gratings by spectroscopic ellipsometry and angle-resolved Mueller polarimetry", *Appl. Opt.* **43**, 1233-1240 (2004).
- [51] A. Castelo, D. Nieto, C. Bao, M.T. Flores-Arias, M.V. Pérez, C. Gómez-Reino, C. López-Gascón and G.F. de la Fuente, "Laser backwriting process on glass via ablation of metal targets", *Opt. Comm.* **273**, 193-199 (2007).

- [52] S. Reichelt and H. Zappe, “Combined Twyman-Green and Mach-Zender interferometer for microlens testing”, *Appl. Opt.* **44**, 5786-5792 (2005).
- [53] K.O. Merserau, R.J. Crisci, C.R. Nijander, W.P. Townsend, D.J. Daly and M.C. Hutley, “Testing and measurement of microlenses”, in *Miniature and Micro-Optics and Micromechanics*, N.C. Gallagher and C.S. Roychoudhuri, eds., Proceedings SPIE **1992**, 210-215 (1993).
- [54] J. Schwyder and H. Sickinger, “Array test for microlenses”, *Optik* **107**, 26-34 (1997).
- [55] J. Schwyder and O. Falkenstörfer, “Twyman-Green interferometer for testing microspheres”, *Opt. Eng.* **34**, 2972-2975 (1995).
- [56] L. Falco, J.-C. Vuilleumier and E. Muharemovic, “Automated Twyman-Green interferometer for micro-lens arrays characterization”, presented at the 10th Microoptics Conference, Jena, Germany, 1-3 September 2004.
- [57] J. Lim, G.-B. Jeong, S.-M. Kim, J. Han, J.-M. Yoo, N.-C. Park and S. Kang, “Design and fabrication of a diffractive optical element for the objective lens of a small form factor optical data storage device”, *J. Micromech. Microeng.* **16**, 77-82 (2006).
- [58] J.-S. Sohn, M.-B. Lee, W.-C. Kim, E.-H. Cho, T.-W. Kim, C.-Y. Yoon, N.-C. Park and Y.-P. Park, “Design and fabrication of diffractive optical elements by use of gray-scale photolithography”, *Appl. Opt.* **44**, 506-511 (2005).
- [59] M. Kufner, S. Kufner, M. Frank, J. Moisel and M. Testorf, “Microlenses in PMMA with high relative aperture: a parameter study”, *Pure Appl. Opt.* **2**, 9-19 (1993).
- [60] M.C. Hutley, D. Daly and R.F. Stevens, “The testing of microlens arrays”, in *IOP Short Meeting Series* **30**, 67-81 (1991).
- [61] J. Casas, “Óptica”, 7^a Ed., Distrib. Librería Pons, Artes Gráficas-Librería General, Coop. (Zaragoza, Spain, 1994).
- [62] J.W. Goodman, “Introduction to Fourier Optics”, 2nd Ed., The Mac-Graw Companies, Inc. (San Francisco, U.S.A., 1996).

- [63] H. Ottevaere, B. Volckaerts, J. Lamprecht, J. Schwider, A. Hermanne, I. Veretennicoff and H. Thienpont, "Two-dimensional plastic microlens arrays by deep lithography with protons: Fabrication and characterization", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **4**, S22-S28 (2002).
- [64] P. Oberson, B. Gisin, B. Huttner and N. Gisin, "Refracted near-field measurements of refractive index and geometry of silica-on-silicon integrated optical waveguides", *Appl. Opt.* **37**, 7268-7272 (1998).
- [65] W. Singer, B. Dobler, H. Schreiber, K.-H. Brenner and B. Messerschmidt, "Refractive-index measurement of gradient-index microlenses by diffraction tomography", *Appl. Opt.* **35**, 2167-2171 (1996).
- [66] C. Gómez-Reino, M.V. Pérez and C. Bao, "Gradient-Index Optics: Fundamentals and Applications", Springer-Verlag (Berlin, Germany, 2002).
- [67] S.N. Houde-Walter, J.M. Inman, A.J. Dent and G.N. Greaves, "Sodium and silver environments and ion-exchange processes in silicate and aluminosilicate glasses", *J. Phys. Chem.* **97**, 9330-9336 (1993).
- [68] K. Iga, M. Oikawa, S. Misawa, J. Banno and Y. Kokubun, "Stacked planar optics: an application of the planar microlens", *Appl. Opt.* **21**, 3456-3460 (1982).
- [69] L. Goldberg, "Interferometric method for measuring diffused channel waveguide-index profile", *Appl. Opt.* **20**, 3580-3588 (1981).
- [70] R. Rangel-Rojo, A. Castelo, M.T. Flores-Arias, C. Gómez-Reino, C.I. López-Gascón and G.F. de la Fuente, "Refractive index modification in glass by laser backwriting ablation of metals", *Opt. Express* **14**, 8765-8771 (2006).
- [71] R. Göring and M. Rothhardt, "Application of the refracted near field technique to multimode planar and channel waveguides in glass", *J. Opt. Commun.* **7**, 82-85 (1986).
- [72] M.T. Gale, C. Gimkiewicz, S. Obi, M. Schnieper, J. Söchtig, H. Thiele and S. Westenhöfer, "Replication technology for optical microsystems", *Opt. Laser Eng.* **43**, 373-386 (2005).
- [73] M.T. Gale, "Replication techniques for diffractive optical elements", *Microelectron. Eng.* **34**, 321-339 (1997).

- [74] F. Nikolajeff, S. Jacobsson, S. Hård, Å. Billman, L. Lundbladh and C. Lindell, “Replication of continuous-relief diffractive optical elements by conventional compact disc injection-molding techniques”, *Appl. Opt.* **36**, 4655-4659 (1997).
- [75] E.J. de Carvalho, E.d.S. Braga and L.H. Cescato, “Study of the injection molding of a polarizing beam splitter”, *Appl. Opt.* **45**, 100-103 (2006).
- [76] R.D. TeKolste, W.H. Welch and M.R. Feldman, “Injection molding for diffractive optics”, in *Diffractive and Holographic Optics Technology II*, I. Cindrich and S.H. Lee, eds., Proceedings SPIE **2404**, 129-131 (1995).
- [77] J.K. Nisper, “Injection-molded replication of binary optic structures”, in *Design, Fabrication and Applications of Precision Plastic Optics*, A. Ning and R.T. Hebert, eds., Proceedings SPIE **2600**, 56-64 (1995).
- [78] H. Ma, A.K.-Y. Jen and L.R. Dalton, “Polymer-Based Optical Waveguides: Materials, Processing, and Devices”, *Adv. Mater.* **14**, 1339-1365 (2002).
- [79] M. Hikita, R. Yoshimura, M. Usui, S. Tomaru and S. Imamura, “Polymeric optical waveguides for optical interconnections”, *Thin Solid Films* **331**, 303-308 (1998).
- [80] J. Moisel, J. Guttman, H.-P. Huber, O. Krumphoiz, M. Rode, R. Bogenberger and K.-P. Kuhn, “Optical backplanes with integrated polymer waveguides”, *Opt. Eng.* **39**, 673-679 (2000).
- [81] D.V. Plant and A.G. Kirk, “Optical Interconnects at the Chip and Board Level: Challenges and Solutions”, *Proceedings of the IEEE* **88**, 806-818 (2000).
- [82] S. Nolte, M. Will, J. Burghoff and A. Tuennermann, “Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics”, *Appl. Phys. A* **77**, 109-111 (2003).
- [83] A. Himeno, K. Kato and T. Miya, “Silica-Based Planar Lightwave Circuits”, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **4**, 913-924 (1998).
- [84] C. Choi, L. Lin, Y. Liu, J. Choi, L. Wang, D. Haas, J. Magera and R.T. Chen, “Flexible Optical Waveguide Film Fabrications and Optoelectronic Devices

Integration for Fully Embedded Board-Level Optical Interconnects”, *J. Lightwave Technol.* **22**, 2168-2176 (2004).

[85] L.W. Shacklette, K.M.T. Stengel, L. Elduda, C. Xu and J.T. Yerdley, “Polymeric waveguides for optical backplane”, *Proceedings SPIE* **2467**, 107-117 (1995).

[86] M.R. Feldman, S.C. Esener, C.C. Guest and S.H. Lee, “Comparison between optical and electrical interconnects based on power and speed considerations”, *Appl. Opt.* **27**, 1742-1751 (1988).

[87] M.T. Flores-Arias, C. Bao, A. Castelo, M.V. Perez and C. Gomez-Reino, “Crossover interconnects in gradient-index planar optics”, *Opt. Comm.* **266**, 490-494 (2006).

[88] M. Taubenblatt, “Challenges and opportunities for integrated optics in computing systems”, in *Photonics West’06, Optoelectronic Integrated Circuits*, *Proceedings SPIE* **6124**, 612406 (2006).

[89] Y.-P. Huang, H.-P.D. Shieh and S.-T. Wu, “Applications of multidirectional asymmetrical microlens-array light-control films on reflective liquid-crystal displays for image quality enhancement”, *Appl. Opt.* **43**, 3656-3663 (2004).

[90] H. Ren, Y.-H. Fan and S.-T. Wu, “Liquid-crystal microlens arrays using patterned polymer networks”, *Opt. Lett.* **29**, 1608-1610 (2004).

[91] K.-W. Chien and H.-P.D. Shieh, “Design and fabrication of an integrated polarized light guide for liquid-crystal-display illumination”, *Appl. Opt.* **43**, 1830-1834 (2004).

[92] L. Huang, A.L. Glebov, S. Aoki and K. Yokouchi, “A Novel Method to Measure Refractive Index of Liquid and Curable Liquid Substances”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 1137-1139 (2004).

[93] H. Nakajima, P. Ruther, J. Mohr, M. Tsugai and T. Usami, “Micro-optical distance sensor fabricated by deep x-ray lithography”, *Opt. Eng.* **40**, 1667-1673 (2001).

[94] V. Bhatia, “Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing”, *Opt. Express* **4**, 457-466 (1999).

- [95] T. Zhu, Y.J. Rao, J.L. Wang and Y. Song, "Strain sensor without temperature compensation based on LPFG with strongly rotary refractive index modulation", *Electron. Lett.* **43**, 1132-1134 (2007).
- [96] J.C.C. da Silva, C. Martelli, H.J. Kalinowski, E. Penner, J. Canning and N. Groothoff, "Dynamic analysis and temperature measurements of concrete cantilever beam using fibre optic sensor", *Opt. Lasers Eng.* **45**, 88-92 (2007).
- [97] S.J. Buggy, E. Chehura, S.W. James and R.P. Tatam, "Optical fibre grating refractometers for resin cure monitoring", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **9**, S60-S65 (2007).
- [98] R. Willsch, W. Ecke and G. Schwotzer, "Spectrally encoded optical fibre sensor systems and their application in process control, environmental and structural monitoring", *Proceedings SPIE* **5952**, 1-14 (2005).
- [99] Y.-J. Rao, "Recent progress in in-fibre Bragg grating sensors: applications", *Proceedings SPIE* **3555**, 429-441 (1998).

Capítulo 2

MATERIALES Y ELEMENTOS DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

2.1. Introducción.

Como el objetivo del trabajo es la fabricación de dispositivos microópticos mediante irradiación láser en sustratos de vidrio, en este capítulo vamos a describir los elementos empleados para ello. Comenzaremos analizando las características de los equipos láser que hemos utilizado, continuando con el estudio de las propiedades de los materiales utilizados. Indicaremos los parámetros más útiles de los vidrios y máscaras que serán empleados en el proceso de fabricación. Esta descripción previa nos permitirá, en los capítulos siguientes, referirnos a estos apartados a la hora de explicar las configuraciones experimentales o los resultados obtenidos.

2.2. Características de los equipos láser.

Una fuente láser es esencialmente un amplificador de radiación realimentado^{1,2}. La propia palabra LÁSER es el acrónimo para *Light*

Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación). Básicamente, consta de un medio activo (colección de átomos, iones, moléculas,... con diferentes niveles energéticos) en el que, por diversos métodos, se induce una inversión de población al transferirles cierta cantidad de energía. Dos características fundamentales de la radiación emitida por las fuentes láser son la monocromaticidad y la direccionalidad, consecuencia de su coherencia temporal y espacial.

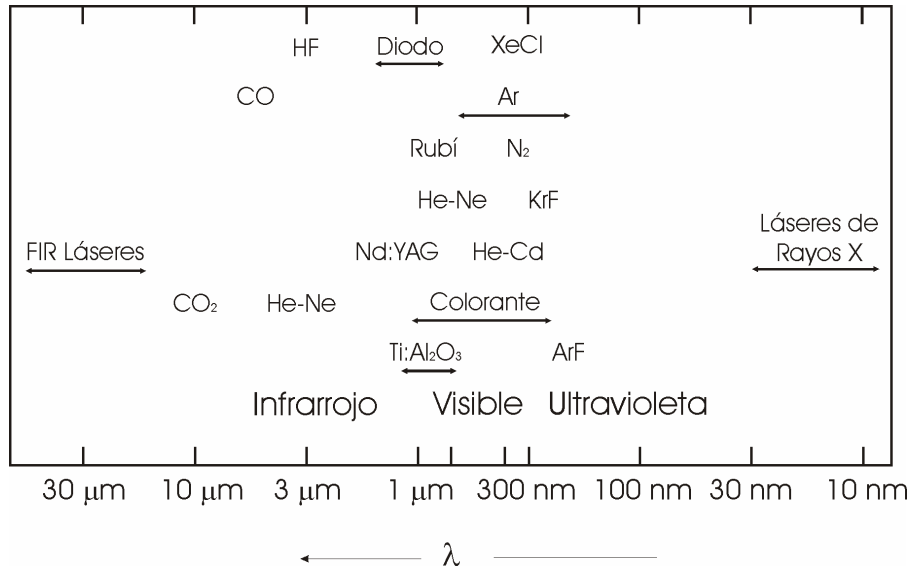


Figura 2.1. Rango de longitudes de onda de diferentes tipos de fuentes láser.

En la figura 2.1 se puede ver un mapa de los diferentes tipos de láser disponibles actualmente, encuadrados según su longitud de onda de emisión. Como vemos, se pueden encontrar fuentes que emitan radiación de longitudes de onda que van desde el infrarrojo lejano ($\lambda=1000 \mu\text{m}$) hasta la región de rayos X ($\lambda=3 \text{ nm}$), cubriendo un rango de longitudes de onda de casi seis órdenes de magnitud. En los siguientes apartados comentaremos algunas de las características de los láseres empleados en este trabajo.

2.2.1. Láser Nd:YAG I.

Analizaremos en primer lugar la fuente láser a la que nos referiremos en los próximos capítulos con el nombre de **Nd:YAG I³** (figura 2.2), y que corresponde con el modelo Quanta-Ray GCR-130 de Spectra Physics. Es un láser de estado sólido (el medio activo es un cristal denominado *Yttrium Aluminum Garnet* o YAG dopado con átomos de Nd), pulsado (en régimen Q-Switch) y

bombeado por lámparas de destellos. Como se puede observar en la figura 2.1, emite típicamente radiación a una longitud de onda de 1064 nm. En nuestro caso, disponemos de un generador de armónicos que nos permite trabajar a otras longitudes de onda: 532, 355 y 266 nm (segundo, tercer y cuarto armónico, respectivamente). Estas cuatro longitudes de onda (1064, 532, 355 y 266 nm)



Figura 2.2. Fotografía del láser Nd:YAG I.

cubren el espectro electromagnético desde el infrarrojo cercano hasta el ultravioleta, lo que convierte a este equipo láser en una fuente muy interesante en un gran número de aplicaciones⁴⁻⁸. El láser incluye un sistema de refrigeración por agua.

Tabla 2.1. Anchura y energía de pulso para las diferentes longitudes de onda del láser Nd:YAG I³, siendo FWHM la anchura total a la mitad del pulso (*Full Width at Half Maximum*).

Longitud de onda	Anchura de pulso (FWHM)	Energía de pulso
1064 nm	8-9 ns	200 mJ
532 nm	6-7 ns	70 mJ
355 nm	5-6 ns	30 mJ
266 nm	4-5 ns	15 mJ

En la tabla 2.1 se pueden observar algunas de las características de los pulsos emitidos para las diferentes longitudes de onda disponibles³. La frecuencia de repetición del láser es de 50 Hz y la anchura del pulso de nanosegundos, variando ligeramente para las diferentes longitudes de onda.

2.2.2. Láser Nd:YAG II.

El láser **Nd:YAG II** corresponde al modelo RSM PowerLine E de la compañía ROFIN (figura 2.3)⁹. Es un equipo ampliamente utilizado en aplicaciones de corte, marcado y tratamiento de superficies. El medio activo es el mismo que en el láser **Nd:YAG I**, trabajando también en régimen Q-switch. Sin embargo, en este caso el bombeo se realiza por diodos, lo que se traduce en una mayor calidad del haz. Emite en la longitud de onda fundamental, 1064nm, y tiene una potencia media de 20W.

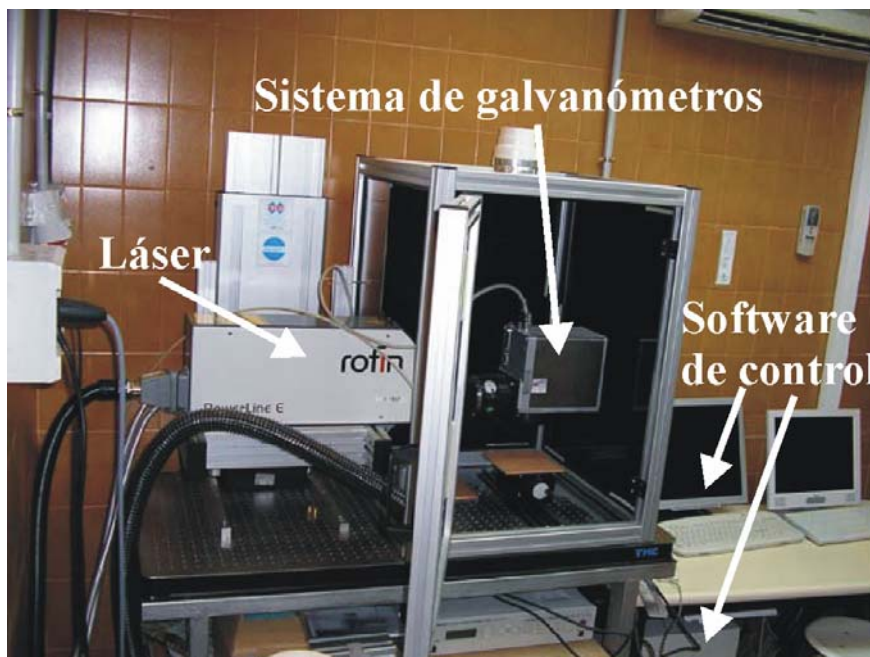


Figura 2.3. Fotografía del láser Nd:YAG II.

Para el manejo de este láser, se dispone de un software comercial, que permite definir las condiciones de trabajo deseadas, i.e., se puede variar la potencia de emisión del láser, la frecuencia de repetición de pulsos en el régimen Q-switch y, consecuentemente, la anchura de pulso del haz con el que se trabaja.

En las tablas 2.2 y 2.3 se incluyen algunos datos orientativos para diferentes corrientes y frecuencias de repetición suministrados por el fabricante.

Tabla 2.2. Anchuras de pulso para las diferentes frecuencias del Nd:YAG II, para una corriente de 35 A.

Frecuencias (KHz)	1	2	5	10	40
Anchura de pulso (FWHM) (ns)	8	10	12	20	40

Tabla 2.3. Potencias para diferencias corrientes y frecuencias de repetición del láser Nd:YAG II.

	Frecuencia (KHz)		
	CW	10	40
20	1.30	0.84	1.00
21	1.80	1.32	1.40
22	3.00	1.9	2.00
23	3.80	2.33	2.49
24	4.60	2.75	3.03
25	5.70	3.12	3.34
26	6.40	3.42	3.77
27	7.40	3.61	3.97
28	8.00	3.8	4.21
29	8.80	4.06	4.47
30	9.10	4.19	4.71
31	9.70	4.32	4.81
32	10.30	4.35	5.00
33	11.00	4.38	5.10
34	11.60	4.33	5.03

El cabezal láser lleva acoplado un sistema de dos galvanómetros que permite el desplazamiento del haz con gran precisión, según el patrón que nosotros diseñemos en el software comercial. Esto representa una gran ventaja respecto al láser **Nd:YAG I**, ya que permite trabajar con la muestra en posición estática. El software permite variar, además de los parámetros de trabajo del haz anteriormente citados, la velocidad de desplazamiento del mismo, pudiendo obtenerse el solapamiento de pulsos o bien la separación deseada entre ellos. Existen otros muchos parámetros que se pueden variar (dirección de recubrimiento, solapamiento del recubrimiento, anchura de línea, etc.), cuya importancia será comentada en los siguientes capítulos.

El cabezal del láser permite también intercambiar la lente con la que se trabaja para focalizar el haz láser. Se dispone de varias lentes, de distancias focales 100 mm, 160 mm y 240 mm, si bien se trabajará principalmente con la lente de 100mm por obtenerse en este caso mayor resolución o, lo que es lo mismo, menor tamaño del spot. Todas las lentes son de campo plano lo que nos garantiza que la irradiancia del pulso será la misma si se opera en el extremo del campo de trabajo o en el centro.

2.3. Propiedades de los materiales.

El vidrio es uno de los elementos más utilizados en dispositivos optoelectrónicos. Este material tiene algunas características que hacen que sea muy interesante para su aplicación en componentes ópticos, como su alta transmisión en un amplio rango de longitudes de onda (desde la región ultravioleta hasta la infrarroja), excelentes propiedades térmicas y eléctricas y una alta resistencia a ataques de productos químicos. Además, las propiedades del vidrio son controlables de forma precisa durante el propio proceso de fabricación^{10,11}.

En este apartado analizaremos las propiedades de los vidrios que hemos empleado como sustratos en el trabajo que se desarrollará en los capítulos 3 y 4 de esta tesis. Hemos utilizado tres tipos de vidrio: vidrios sodo-cálcicos, vidrios borosilicatados y vidrios de plomo. Los dos primeros son interesantes por su bajo coste y disponibilidad comercial a gran escala. Los vidrios de plomo, como se mostrará, presentan una serie de propiedades que los hacen muy adecuados para ser irradiados con un haz láser. Finalizaremos comentando algunas características de otro elemento que será utilizado en el trabajo desarrollado en los próximos capítulos, una máscara de fase.

2.3.1. Vidrios sodo-cálcicos.

El vidrio sodo-cálcico es un vidrio muy común y recibe su nombre debido a la presencia en su composición de óxidos de sodio y calcio, aunque la sílice es su componente principal. Es un vidrio barato, relativamente fácil de fundir y fabricar y químicamente inerte. Su resistencia térmica es limitada, por lo que grandes y repentinos cambios de temperatura pueden provocar su rotura. Tienen numerosas aplicaciones industriales, e incluso artísticas.

Tabla 2.4. Composición de los vidrios sodo-cálcicos¹².

Composición	Soda-Lima
SiO ₂	72.20 %
Na ₂ O	14.30 %
CaO	6.40 %
MgO	4.30 %
K ₂ O	1.20 %
Al ₂ O ₃	1.20 %
SO ₃	0.30 %
Fe ₂ O ₃	0.03 %

En este trabajo hemos utilizado vidrios comerciales de la compañía Menzel-Gläser. La composición aproximada de estos vidrios¹² se muestra en la tabla 2.4. Como ya hemos comentado, estos vidrios presentan en su composición importantes cantidades de óxido de sodio y óxido de calcio. El óxido de sodio, Na₂O, actúa como fundente, favoreciendo la formación del vidrio y su elaboración. El óxido de calcio, CaO, aumenta la estabilidad química y mecánica del vidrio, por lo que actúa como estabilizante, aunque estructuralmente tenga el carácter de modificador de red. Se puede observar también la presencia de pequeñas cantidades de óxido de magnesio (MgO) y de alúmina (Al₂O₃). El primero complementa en cierto modo la acción del óxido de calcio, dándole al vidrio mayor estabilidad y disminuyendo su tendencia a la desvitrificación. La alúmina aumenta la resistencia mecánica, la estabilidad química y la resistencia al choque térmico del vidrio.

Tabla 2.5. Características de los vidrios sodo-cálcicos¹².

Propiedades	Valores
Densidad relativa (g/cm ³)	2.47
Índice de refracción, n	
- Para λ_e (546.07 nm)	$n_e=1.513$
- Para λ_c (643.85 nm)	$n_c=1.523$
Coefficientes de expansión, α (10 ⁻⁷ /°C)	
- Entre 20 y 300 °C	90.3

En la tabla 2.5 se presentan los valores de algunas propiedades físicas de los vidrios sodo-cálcicos, proporcionados por el fabricante¹². Además, la figura 2.4 nos muestra su espectro de transmisión. Este tipo de vidrio presentan valores de absorción muy altos para irradiación con longitudes de onda ultravioletas (por debajo de 300 nm) y del infrarrojo medio (a partir de los 2700 nm).

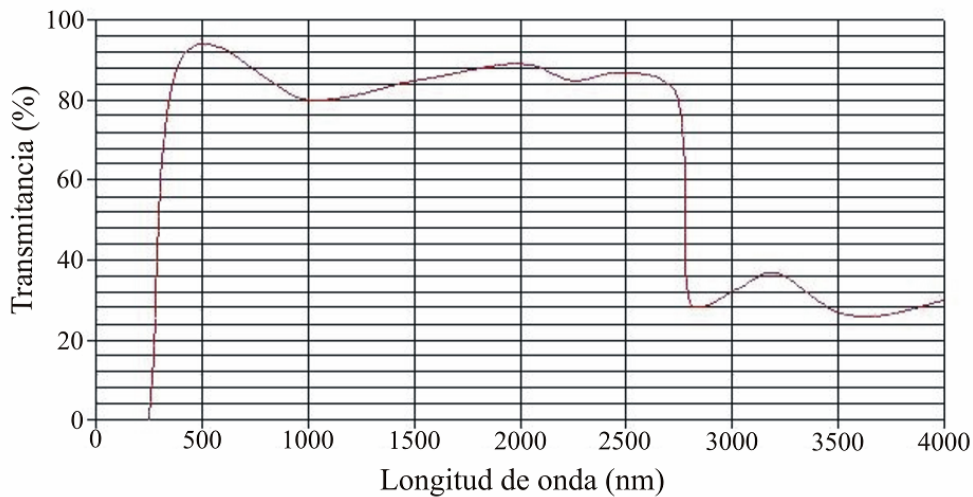


Figura 2.4. Espectro de transmisión de los vidrios sodo-cálcicos.

2.3.2. Vidrios borosilicatados.

Los vidrios borosilicatados son un tipo de vidrios cuyos principales constituyentes son la sílice y el óxido de boro. Son materiales de bajo coste y con unas excelentes propiedades térmicas (bajo coeficiente de expansión térmica y

Tabla 2.6. Características de los vidrios borosilicatados.

Propiedades	Valores
Densidad relativa (g/cm^3)	2.23
Índice de refracción, n	
- Para λ_D (589.3 nm)	$n_D=1.472$
Coefficientes de expansión, α ($10^{-7}/^\circ\text{C}$)	
- Entre 20 y 300 $^\circ\text{C}$	33

alta temperatura de reblandecimiento). Este comportamiento se traduce en una reducción de las tensiones que se inducen en el material cuando se aplica un gradiente de temperatura, lo que conlleva una mayor resistencia a la rotura. En nuestro caso, su composición aproximada incluye un 80% SiO_2 y un 13% B_2O_3 , además de pequeños porcentajes de otros constituyentes (como alúmina, sosa o potasa). En nuestro caso, son vidrios distribuidos por ServiQuimia, y en la tabla 2.6 se pueden ver los valores aproximados de algunas de sus propiedades físicas. Además, la figura 2.5 nos muestra el espectro de transmisión de este tipo de vidrios. Tienen una amplia ventana de longitudes de onda en la que la transmisión del vidrio es cercana al 90%, entre 300 y 2500 nm aproximadamente.

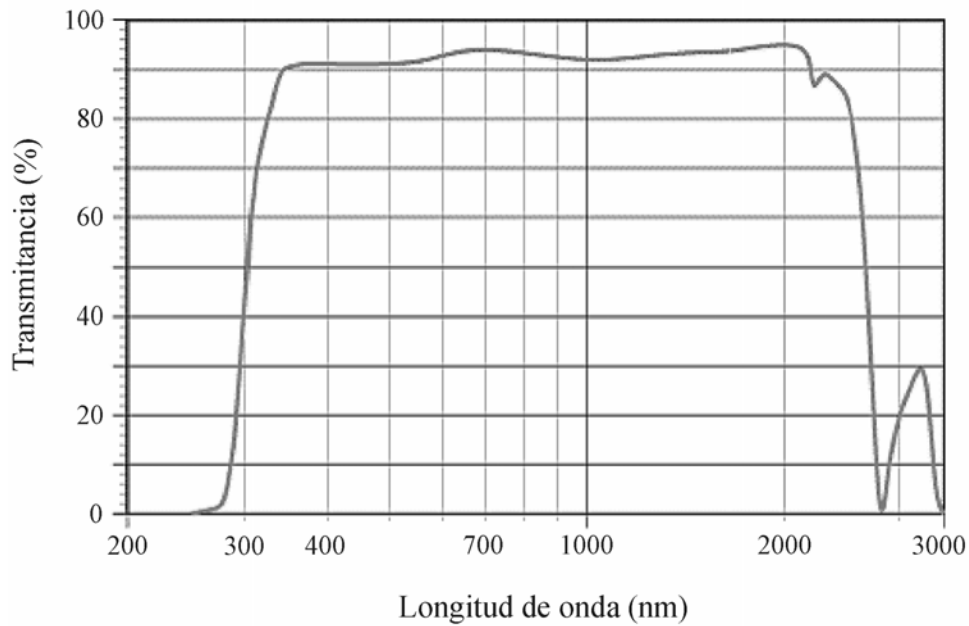


Figura 2.5. Espectro de transmisión de los vidrios de borosilicato.

2.3.3. Vidrios de plomo.

Los vidrios de plomo tienen una composición similar a los sodo-cálcicos, pero en este caso se han sustituido los componentes con calcio y sodio por óxido de plomo. En nuestro caso, hemos usado vidrios de la compañía Ohara Corporation, modelo PBH71. La tabla 2.7 muestra las propiedades físicas de estos materiales, proporcionadas por el fabricante¹³. Los vidrios de plomo son igual de transparentes que los sodo-cálcicos pero un poco más blandos y más densos, con lo que tienen un mayor poder de refracción y dispersión. Es un vidrio bastante fácil de fundir y también se corta, graba y pule sin dificultad. Presenta también una alta resistencia eléctrica. Este tipo de vidrios tiene un índice de refracción alto, lo que le confiere un aspecto claro y brillante.

La composición aproximada¹³ de estos vidrios se presenta en la tabla 2.8. En general, los vidrios con cierto contenido de Pb presentan una no linealidad de tercer orden muy grande y, por tanto, una alta fotosensitividad, por lo que son materiales en los que es posible conseguir grandes cambios del valor del índice de refracción. Estos cambios pueden ser debidos a algún tipo de variación en la estructura o a la formación de centros de color. La presencia de un alto porcentaje de PbO en la composición del vidrio se traduce en una temperatura de fusión bastante baja, mientras que la presencia de anhídrido bórico (B_2O_3) refuerza la red estructural para mejorar la resistencia química y las propiedades mecánicas.

Tabla 2.7. Características mecánicas y térmicas del vidrio PBH71¹³.

Propiedades	Valores
Densidad relativa (g/cm ³)	6.05
Número de Abbe, $v_d=(n_d-1)/(n_F-n_C)$	21.46
Índice de refracción, n	
- Para $\lambda_F = 486.13$ nm	$n_F=1.954$
- Para $\lambda_d = 587.56$ nm	$n_d=1.923$
- Para $\lambda_C = 656.27$ nm	$n_C=1.911$
Coefficientes de expansión, α (10 ⁻⁷ /°C)	
- Entre -30 y 70 °C	89
- Entre 100 y 300 °C	101
Conductividad térmica, k (W/m·K)	0.546

Tabla 2.8. Composición de los vidrios PBH71¹³.

Composición	PBH71
PbO	75-85 %
SiO ₂	15-25 %
B ₂ O ₃	< 3 %
K ₂ O	< 2 %
Sb ₂ O ₃	< 1 %

La figura 2.6 muestra la gráfica de transmisión de este tipo de vidrios. Por encima de los 400 nm prácticamente transmite toda la luz que le llega, presentando gran absorción para longitudes de onda por debajo de ese valor (longitudes de onda ultravioletas).

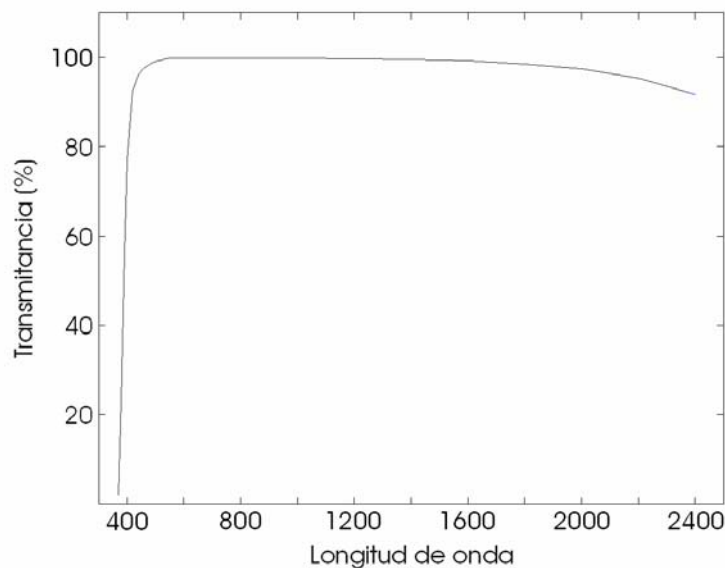


Figura 2.6. Espectro de transmisión del vidrio PBH71.

2.3.4. Máscara de fase.

Otro de los elementos a utilizar es una máscara de fase (figura 2.7). En nuestro caso, la máscara es de la compañía StockerYale Inc., código de referencia BZY 30 A, y está optimizada para obtener el máximo valor de los órdenes de difracción ± 1 para una longitud de onda de trabajo de 266 nm.

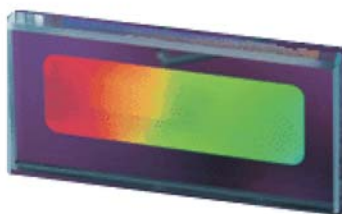


Figura 2.7. Imagen de la máscara de fase utilizada en este experimento.

En la tabla 2.9 presentamos las principales características de la máscara de fase¹⁴, proporcionadas por el fabricante, donde se incluye el valor de las eficiencias para la longitud de trabajo óptima

Tabla 2.9. Características de la máscara de fase¹⁴.

Propiedades	Valores
Período	1.12008 μm
Eficiencia del orden 1	38.0
Eficiencia del orden 0	0.9
Eficiencia del orden -1	37.8

Finalmente, la figura 2.8 muestra el espectro de transmisión de este elemento. Vemos que tiene una alta transmisión en todas las longitudes de onda del rango visible y ultravioleta cercano

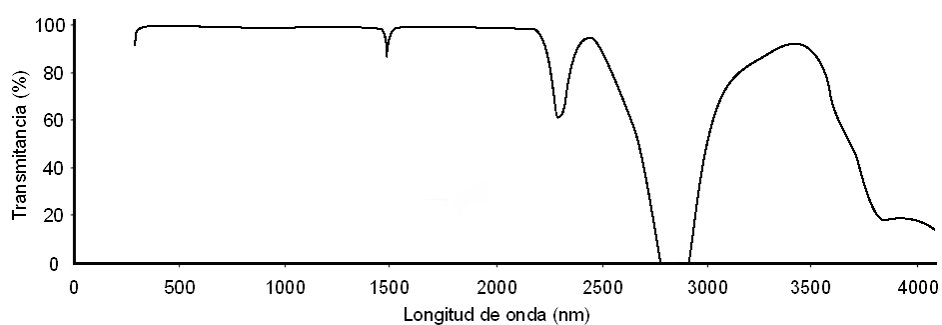


Figura 2.8. Espectro de transmisión del vidrio de la máscara de fase.

Referencias

- [1] J.T. Verdeyen, “*Laser Electronics*”, Prentice Hall (New Jersey, United States, 1995).
- [2] W.T. Silfvast, “*Laser Fundamentals*”, Cambridge University Press (Cambridge, United Kingdom, 1996).
- [3] Spectra-Physics, “Pulsed Nd:YAG Lasers: User’s Manual”, Mountain View (California, United States, 2001).
- [4] M. Liu, B.Y. Man, X.C. Lin, X.Y. Li and C.S. Chen, “Effect of temperature on pulsed laser deposition of HgCdTe films”, *Appl. Surf. Sci.* **253**, 9291-9294 (2007).
- [5] Yu. Syvenkyy, B. Kotlyarchuk, V. Savchuk, A. Zaginey, S. Dabos-Seignon, B. Derkowska, O. Lychak and B. Sahraoui, “Laser-induced formation of periodical structures on the A^{II}B^{VI} semiconductors surfaces”, *Opt. Mater.* **30**, 380-383 (2007).
- [6] A. Lasagni, M. D’Alessandria, R. Giovanelli and F. Mücklich, “Advanced design of periodical architectures in bulk metals by means of Laser Interference Metallurgy”, *Appl. Surf. Sci.* **254**, 930-936 (2007).
- [7] C. Bao, A. Castelo, M.T. Flores-Arias, C. Gómez-Reino and M.V. Pérez, “Grabado de redes de fase con un láser Nd:YAG”, *Opt. Pur. y Apl.* **36**, 103-107 (2003).
- [8] R. Ostrowski, J. Marczak, M. Strzelec and A. Koss, “Laser damage thresholds of bone objects”, in *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology*, Costas Fotakis, Luca Pezzati and Renzo Salimbeni, ed., Proceedings of SPIE **6618**, 66181D (2007).
- [9] <http://www.rofin.com/index-e.htm>
- [10] A.R. Kortan y N. Kopylov, “Glass Materials for Photonics”, IEEE Workshop on New and Emerging Technologies, New Jersey (2001).

[11] J.M. Fernández Navarro, “El Vidrio”, Centro Superior de Investigaciones Científicas (Madrid, España, 1991).

[12] <http://www.menzel.de/>

[13] <http://www.oharacorp.com/index.html>

[14] <http://www.stockeryale.com/index.htm>

Capítulo 3

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE REDES DE FASE

3.1. Introducción.

En el capítulo 1 hemos realizado una breve descripción de las etapas que se han de seguir para obtener un elemento microóptico. Muchos de los procedimientos comentados en dichas etapas son aplicables, en particular, a los elementos ópticos difractivos. Este tipo de elementos ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años, debido principalmente al perfeccionamiento tanto de las herramientas de diseño como de las técnicas de fabricación propiamente dichas¹.

Las propiedades difractivas han encontrado aplicación en un gran número de campos. En particular, las redes de difracción son elementos que han estado en constante evolución para la realización de diversas funciones ópticas y para su implementación en diferentes tipos de dispositivos. Por ejemplo, este tipo de elementos han jugado un papel importante en la fabricación de láseres de alta potencia². Este tipo de fuentes, que necesitan amplificar pulsos de luz ultracortos para obtener grandes potencias pico, cuentan con dispositivos basados en redes de difracción para realizar esta función^{2,3}. Al trabajar con altas potencias, se ha

recurrido a materiales metálicos o dieléctricos que aseguren la eficiencia deseada así como la durabilidad del dispositivo⁴. Asimismo, las redes de difracción se usan en sistemas formadores de imágenes de superresolución⁵. Otra aplicación interesante es la seguridad, ya que se han desarrollado elementos basados en las propiedades de las redes de difracción que permiten detectar falsificaciones, solventando los problemas que presentaban los métodos de seguridad tradicionales⁶. Este tipo de elementos se conoce con el nombre de dispositivos ópticamente variables (*optically variable devices* u OVD's)⁶⁻⁸ y son elementos de seguridad que aseguran la autenticidad de documentos valiosos. Por otro lado, la implementación de este tipo de elementos en fibras ópticas ha abierto una gran cantidad de posibilidades a campos como las telecomunicaciones^{9,10} o los sensores de fibra¹¹⁻¹³.

En este capítulo abordaremos la fabricación y caracterización de redes de transmisión de fase en sustratos de vidrio, mediante técnicas de irradiación láser. Comenzaremos analizando las principales características de este tipo de elementos difractivos, para dar paso a continuación a los dos métodos empleados para su fabricación. En el primer caso, se ha grabado el patrón procedente de una máscara sobre el sustrato mediante irradiación láser. En el segundo método, se ha realizado ablación láser de láminas metálicas para generar la red de difracción en el sustrato. En ambos casos, se han caracterizado las muestras mediante la medida de su eficiencia, su período y el análisis de su perfil físico.

3.2. Elementos difractivos: redes de difracción.

La difracción es un fenómeno óptico que fue descrito, por vez primera, por Francesco Maria Grimaldi quien, en su libro “*Physicomathesis de lumine, coloribus et iride*” (Bologna, 1665), describe un detallado estudio sobre la desviación que sufre la luz en su propagación rectilínea cuando pasa a través de una abertura, y dice:

“Lumen propagatur seu diffunditur non solum Directe, Refracte, ac Reflexe sed etiam alio quodam quarto modo, Diffracte”

que se puede traducir, de forma libre, como:

“Existe un cuarto modo de propagación de la luz, la propagación por difracción, distinta de los tres modos conocidos hasta ahora: propagación directa, reflexión y refracción”

Es de señalar que esta manera de tratar la difracción como otra forma de propagación de la luz es muy similar a la formulación establecida por Arnold Sommerfeld en el volumen IV de “*Lectures on Theoretical Physics*” (Academic Press, 1954), dedicado a la Óptica, donde dice:

“Cualquier desviación de los rayos luminosos de sus trayectorias rectilíneas que no puede ser interpretada como reflexión o refracción se denomina difracción”

Una formulación actual de la difracción la definiría “como un fenómeno que aparece cuando una onda que se propaga libremente sufre alguna modificación local en su amplitud, en su fase o en ambas, debido a la interacción con obstáculos y/o aberturas”. Una plausible explicación de este fenómeno se basaría en el Principio de Huygens complementado con el Principio de superposición (Principio de Huygens-Fresnel) descrito, por ejemplo, en el libro de J.W. Goodman sobre “*Introduction to Fourier Optics*”, Third Edition, Roberts & Company Publishers (Colorado, 2005).

Como hemos comentado, cualquier tipo de obstáculo y/o abertura produce la difracción de la luz: por ejemplo, una abertura circular, un obstáculo opaco, una rendija,... El patrón de difracción o distribución de irradiancia obtenido más allá del obstáculo y/o abertura depende de su geometría y de la longitud de onda. En el caso de contar con un conjunto repetitivo de estos elementos difractivos (tanto aberturas como obstáculos) podemos hablar de redes de difracción. El efecto de estas redes de difracción sobre la luz consiste en alteraciones periódicas de fase, amplitud o de ambas.

Las primeras redes de difracción fabricadas consistían básicamente en una serie de regiones transparentes y opacas alternadas. Cuando un frente de ondas pasa a través de un dispositivo de este tipo, sufre una modulación de su amplitud. Las **redes de transmisión de amplitud** más comunes se hacen con una configuración múltiple de rendijas, o con una serie de hendiduras paralelas practicadas con un buril sobre un sustrato plano de vidrio o cuarzo.

Cuando la red es totalmente transparente, de forma que hay modulación en amplitud despreciable, las variaciones regulares en el espesor óptico producen una modulación de fase en el frente de onda incidente. En este caso podemos hablar de **redes de transmisión de fase**. Este tipo de modificación también afecta al frente de onda reflejado. Los elementos diseñados específicamente para provocar una variación de fase en el frente reflejado, reciben el nombre de redes de reflexión de fase.

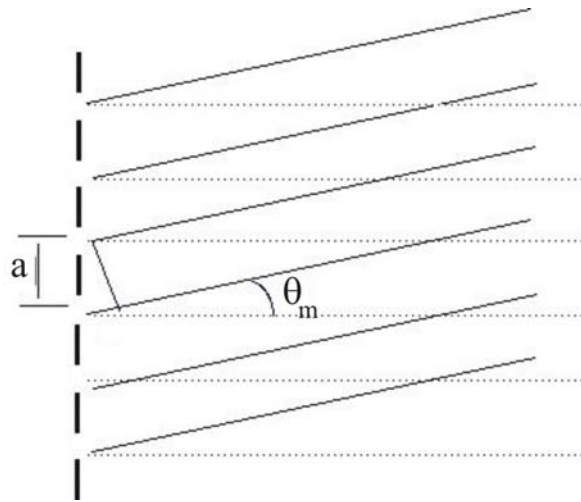


Figura 3.1. Órdenes de difracción transmitidos a través de una red de difracción.

En ambos casos, redes de amplitud o de fase, el patrón de difracción que se obtiene de la red sigue la expresión¹⁵:

$$a \cdot \text{sen} \theta_m = m\lambda \quad [3.1]$$

que se conoce como ecuación de la red para incidencia normal, siendo a el período de la red, m el orden de los máximos principales y θ_m el ángulo que se desvía cada uno de estos órdenes respecto de la normal (ver Fig. 3.1). Esta ecuación puede extenderse al caso general de incidencia oblicua¹⁵:

$$a \cdot (\text{sen} \theta_m - \text{sen} \theta_i) = m\lambda \quad [3.2]$$

donde θ_i es el ángulo de incidencia con respecto a la normal a la red.

Uno de los aspectos más interesantes de las redes de difracción es su eficiencia, que se refiere a la cantidad de luz que lleva cada uno de sus órdenes. Para un orden n podemos definir la eficiencia como la cantidad de luz difractada en ese orden respecto a la irradiancia incidente:

$$\varepsilon_n = \frac{I_n}{I_i} \quad [3.3]$$

3.3. Fabricación de redes de fase por irradiación a través de una máscara.

El procesado de materiales vítreos mediante láser se basa en la propiedad de producir cambios en el índice de refracción mediante irradiación. Ha sido aplicado en el grabado de redes de Bragg tanto en fibras¹⁶⁻¹⁸ como en guías de onda planas¹⁹, con diferentes tipos de vidrios. Con respecto a otros métodos de fabricación de dispositivos microópticos, como la litografía, la irradiación láser ofrece las ventajas de su sencillez (al ser un proceso directo de una sola etapa) y mayor rapidez del proceso²⁰.

Hemos aprovechado la sensibilidad de los vidrios a la luz para proceder al grabado de redes de difracción bajo irradiación con una fuente láser. Se han utilizado dos sustratos con diferentes composiciones: vidrios sodo-cálcicos (*soda-lime glasses*) y vidrios de plomo (ver Capítulo 2). En el primer caso, la elección se debe a su disponibilidad comercial y bajo coste. Los vidrios de plomo se han escogido por su sensibilidad a la radiación láser ultravioleta²¹⁻²⁴. Las propiedades y posibilidades de este tipo de vidrios han sido ampliamente estudiadas, así como la variación de su comportamiento con la composición²⁴⁻²⁶.

En nuestro caso, hemos hecho uso de estas propiedades para transferir una red comercial de difracción de fase, que denominaremos máscara, al sustrato de vidrio^{18,21,25,27}. El conjunto máscara-sustrato se ha irradiado con un láser Nd:YAG Q-switch de alta potencia (el láser **Nd:YAG I** descrito en el capítulo 2). La configuración experimental que hemos utilizado se muestra en la figura 3.2. Como podemos ver, el haz láser se redirecciona con la ayuda de dos espejos (E₁ y

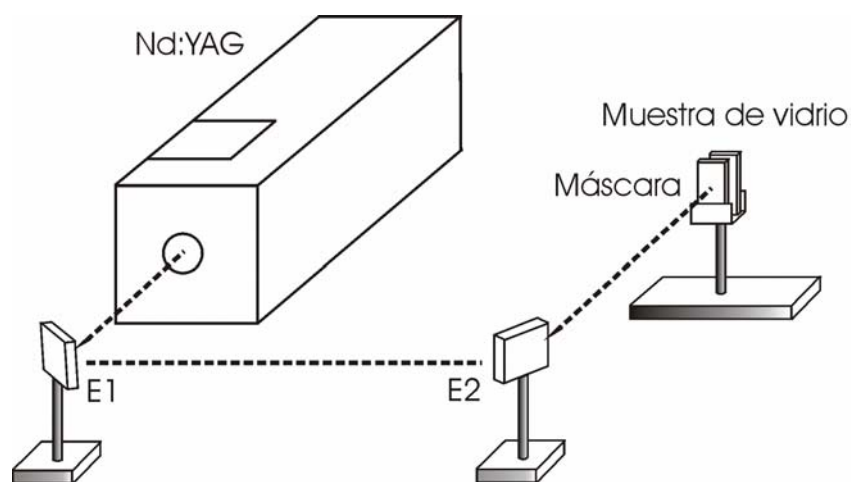


Figura 3.2. Configuración del dispositivo experimental.

E₂) optimizados para cada una de las longitudes de onda de los armónicos del láser. El objetivo es trabajar en campo lejano, de forma que podamos utilizar la zona más homogénea del haz. El conjunto máscara-muestra está situado sobre una plataforma motorizada (modelo Splindler & Hoyer x.act LT 100 ST) que permite el desplazamiento de ambas en la dirección perpendicular a la de propagación del haz (figuras 3.3 a) y b)). Debido a las características de potencia del láser utilizado, en el proceso de grabado de las redes de difracción interviene un proceso de ablación del vidrio y la fotosensibilidad del mismo a las longitudes de onda utilizadas²⁸.

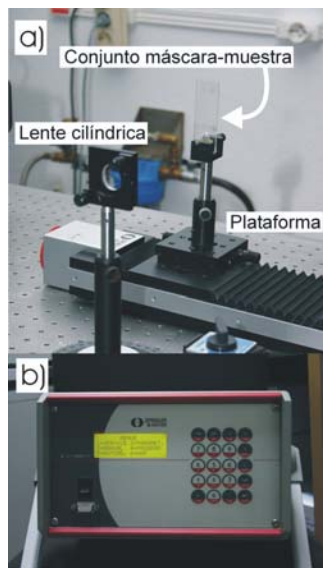


Figura 3.3: a) Configuración experimental con la plataforma; y b) dispositivo de control de la plataforma.

En los siguientes apartados analizaremos los resultados de las pruebas preliminares, que nos han permitido escoger tanto la configuración como los parámetros del láser más adecuados para nuestro propósito. A continuación, nos centraremos en el proceso mismo de grabado para finalizar con la caracterización de las muestras obtenidas.

3.3.1. Pruebas iniciales.

Como ya hemos comentado, realizamos una serie de pruebas para analizar las modificaciones que se provocaban en cada uno de los vidrios al ser irradiados con el láser. Dichas pruebas consisten en la irradiación directa de los sustratos escogidos con las diferentes longitudes de onda disponibles en el equipo láser. Además, se han variado otros parámetros del proceso como el tiempo de

irradiación o la velocidad de desplazamiento del conjunto máscara-muestra. Estas experiencias iniciales han facilitado la selección de configuraciones experimentales y parámetros para el posterior grabado de redes de difracción.

Antes de irradiar las muestras de vidrio es necesario realizar una limpieza de las mismas. El proceso es diferente según el tipo de vidrio utilizado. En el caso de los vidrios sodo-cálcicos hemos seguido los pasos siguientes. En primer lugar, se introduce el vidrio en una disolución de jabón en agua y se realiza un baño de ultrasonidos durante 25 ó 30 minutos, a una temperatura entre 40 y 50 °C. A continuación retiramos esta disolución y se realiza otro baño de ultrasonidos, esta vez sólo con agua desionizada, durante 20 minutos a 20 ó 30 °C. Secamos bien la muestra y la introducimos en una disolución de metanol y agua desionizada. Esta disolución recibe un último baño de ultrasonidos, durante 20 minutos a una temperatura de 30 °C. Finalmente se retira la solución de metanol y se seca de nuevo el vidrio.

En el caso de los vidrios de plomo, éstos no pueden tratarse con metanol ni con alcohol isopropílico, ya que se producen reacciones químicas superficiales que impiden el grabado de las redes por irradiación o empeoran su calidad. En estos casos la limpieza se realiza utilizando una disolución de agua con jabón para eliminar todos los restos de grasa, y posteriormente se secan cuidadosamente los vidrios. Si después de esta limpieza todavía quedara algún resto de suciedad en los vidrios, podemos realizar un baño de ultrasonidos con el vidrio introducido únicamente en agua, durante 25 ó 30 minutos a una temperatura entre 40 y 50 °C.

3.3.1.1. Vidrios sodo-cálcicos.

a) Irradiación con $\lambda=266$ nm.

Los vidrios sodo-cálcicos, como se indicó en la figura 2.2, presentan una alta absorción para longitudes de onda por debajo de 300 nm. Por ello, realizamos la primera prueba para irradiación directa con el láser trabajando con una longitud de onda de 266 nm y una potencia de 0.5 W. En este caso, se han utilizado diferentes tiempos de exposición de la muestra, desde 3 a 25 minutos. Se observa un oscurecimiento de la zona irradiada, más pronunciado a medida que aumenta el tiempo de exposición. El análisis de la transmitancia del vidrio irradiado en un espectrómetro, permite observar un descenso en la transmisión de las muestras expuestas a la radiación con respecto a las no expuestas, sobre todo para longitudes de onda cortas (figura 3.4).

Para analizar la dependencia de este fenómeno con la potencia, introdujimos en la configuración una lente cilíndrica, de 10 cm de distancia focal, entre el espejo E_2 y la muestra de vidrio. De esta forma, se consigue un aumento

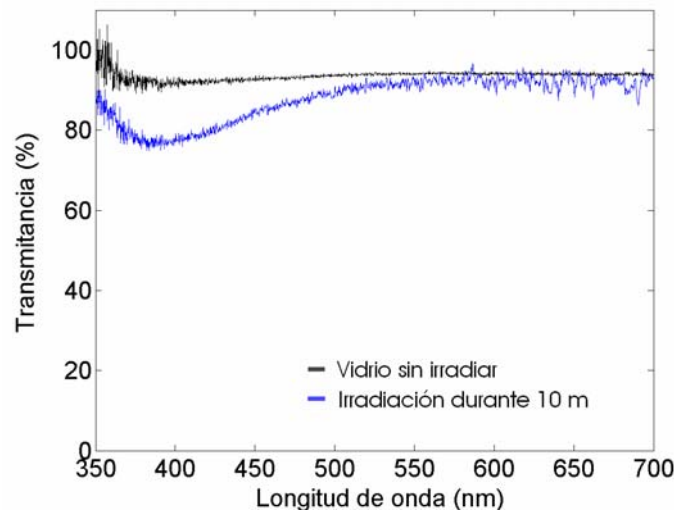


Figura 3.4. Variación de la transmittancia de vidrios los sodo-cálcicos para el cuarto armónico (266 nm) con un tiempo de exposición de 10 minutos.

en la densidad de energía, ya que el haz se concentra en una superficie más pequeña, de forma aproximadamente elíptica. Además, la muestra se coloca en la plataforma motorizada (figura 3.3). Esta configuración también permite analizar la respuesta del vidrio frente a la velocidad de desplazamiento. Para realizar este análisis dinámico seleccionamos tres velocidades de 30, 70 y 200 mm/min, que corresponden a tiempos de exposición de 50, 21 y 7.5 s, respectivamente. De nuevo, se observa en el vidrio un oscurecimiento de la zona irradiada, que es tanto

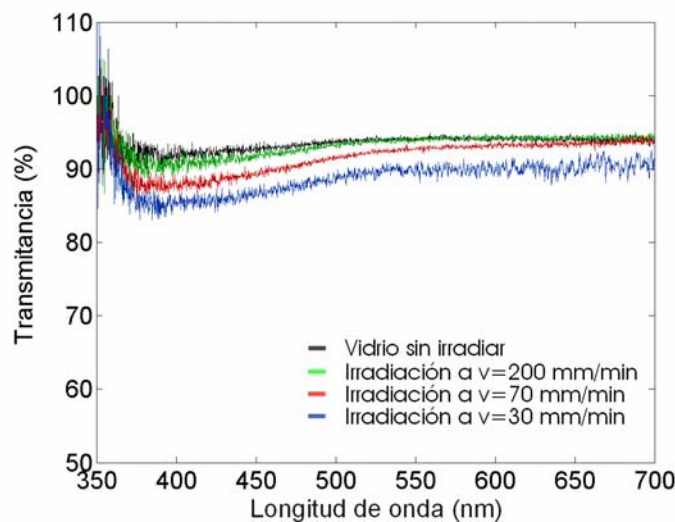


Figura 3.5. Variación de la transmittancia en vidrios sodo-cálcicos con la velocidad de la plataforma para irradiación con 266 nm.

más pronunciado cuanto menor es la velocidad de desplazamiento de la plataforma. En la figura 3.5, que muestra los resultados del análisis en el espectrómetro, se observa que los cambios son mucho más marcados debido al aumento en la densidad de energía: la transmitancia del vidrio disminuye al descender la velocidad de desplazamiento de la plataforma.

Otro factor a tener en cuenta es la variación del tamaño del haz láser con la distancia entre la lente cilíndrica y la muestra, que corresponde con una variación de la densidad de potencia del haz (la superficie en la que se concentra el haz es diferente en cada posición de la lente). Se ha analizado esta dependencia estudiando el comportamiento del vidrio para tres distancias de 7.2, 7.5 y 8 cm, que nos aseguran que existe una modificación en el vidrio. No podemos situar el vidrio más cerca del foco de la lente ya que se producen daños en su superficie, llegando incluso a la rotura del mismo. Hemos analizado las muestras en el espectrómetro, y el resultado se muestra en la figura 3.6. La mayor modificación en el vidrio (que corresponde con el mayor descenso de la transmitancia y la mayor coloración del sustrato) se obtiene cuando se sitúa el vidrio cerca del foco de la lente, esto es, a 8 cm. Este comportamiento se debe a que, en esa posición, se consigue el mayor valor de densidad de energía sin provocar la rotura del sustrato, ya que la energía del haz se concentra en una superficie más pequeña.

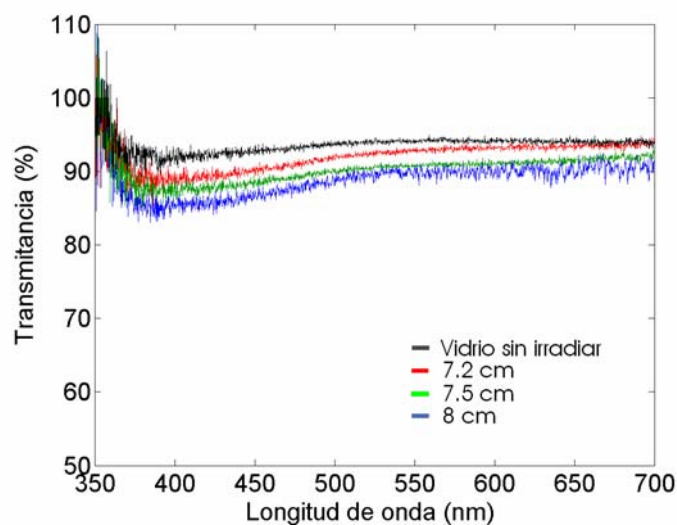


Figura 3.6. Variación de la transmitancia en vidrios sodo-cálcicos con la distancia entre la lente cilíndrica y la muestra de vidrio irradiada con 266 nm.

Por lo tanto, las pruebas realizadas con la longitud de onda de 266 nm nos permiten concluir que se producen modificaciones en el vidrio después de la irradiación, y que aumentan con el tiempo de exposición y con la densidad de

potencia de exposición. Estos resultados los convierten en buenos candidatos a priori como sustratos para el grabado de redes.

b) Irradiación con $\lambda=355$ nm.

A continuación pasamos a trabajar con el láser a una longitud de onda de 355 nm y una potencia de 4.5 W. Como mostramos en la figura 2.2 del Capítulo 2, este tipo de vidrios todavía no alcanzan el máximo valor de transmisión para esta longitud de onda, de forma que, a priori, podríamos esperar algún resultado de interés. De nuevo utilizamos la configuración mostrada en la figura 3.2 para irradiar directamente con el haz. Para tiempos de exposición grandes se observaban cambios de color muy débiles en el vidrio, mucho más débiles que en las muestras tomadas para 266 nm. En el espectrómetro no se observa cambio alguno en la transmisión respecto al vidrio sin irradiar. Por lo tanto, nos centramos en la configuración dinámica ya utilizada anteriormente (figura 3.3), para ver si el aumento de la densidad de energía puede producir cambios más pronunciados. En primer lugar analizamos el comportamiento del sustrato con la velocidad de desplazamiento de la plataforma. Al igual que en el caso anterior, hemos utilizado 30, 70 y 200 mm/min. Los resultados del espectrómetro se muestran en la figura 3.7, que coinciden con los obtenidos para irradiación con 266 nm. De nuevo se

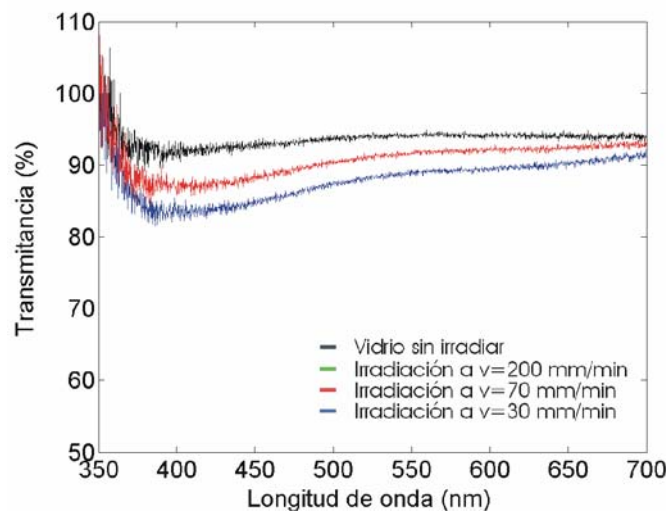


Figura 3.7. Variación de la transmitancia en vidrios sodo-cálcicos con la velocidad de la plataforma para irradiación con 355 nm.

observa un descenso importante en la transmitancia del sustrato para las velocidades más lentas. Sin embargo, en este caso se ha observado un comportamiento diferente para las velocidades más altas. En el espectrómetro no se

observa modificación en el sustrato irradiado con velocidad de 200 mm/min: en la figura 3.7 la curva de esta velocidad se superpone con la del vidrio sin irradiar.

Finalmente hemos utilizado una lente de distancia focal 11 cm, adecuada para trabajar con 355 nm. En este caso situamos el vidrio a distancias de 9 y 10.2 cm, para evitar daños en el vidrio. La respuesta del espectrómetro se muestra en la figura 3.8. En este caso, debemos situar el vidrio muy cerca de la focal de la lente para conseguir una variación apreciable en el mismo: para 10.2 cm hay un descenso del 10% en la transmisión del material.

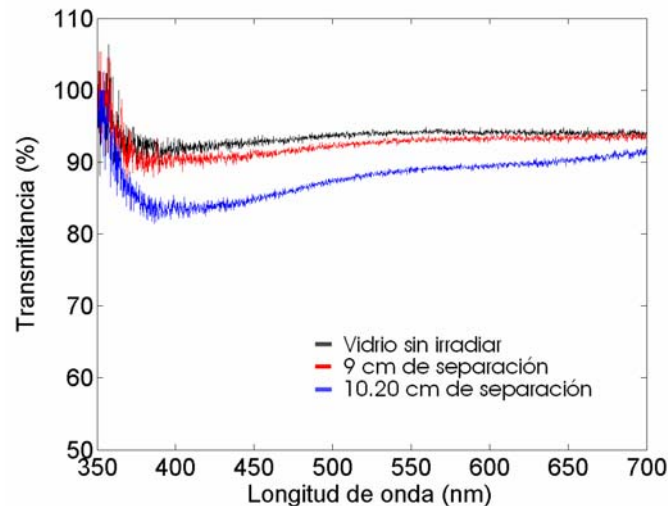


Figura 3.8. Variación de la transmittancia en vidrios sodo-cálcicos con la separación entre la lente cilíndrica y la muestra de vidrio irradiada con 355 nm.

c) Irradiación con $\lambda=532$ nm.

Finalmente, se irradiaron los vidrios sodo-cálcicos con el láser emitiendo a 532 nm y con una potencia de 8.4 W. No se produjo ningún cambio en los vidrios. Este comportamiento se podía presuponer de la gráfica 2.2 del Capítulo 2, donde se ve que, para esta longitud de onda, el vidrio transmite prácticamente toda la energía que le llega.

3.3.1.2. Vidrios de plomo.

a) Irradiación con $\lambda=266$ nm.

A continuación irradiamos directamente con el láser a una longitud de onda de 266 nm. Con esta configuración no se produjo, como en el caso anterior, un cambio significativo del color de los vidrios con tiempos de exposición (entre 30 s y 10 min). Continuamos con el análisis del efecto de la velocidad de la

plataforma (figura 3.3), trabajando con las mismas velocidades que para los vidrios sodo-cálcicos. El análisis del espectrómetro muestra un descenso importante (hasta del 30 %) de la transmitancia de los vidrios, que aumenta de forma considerable cuando disminuye la velocidad de la plataforma (figura 3.9).

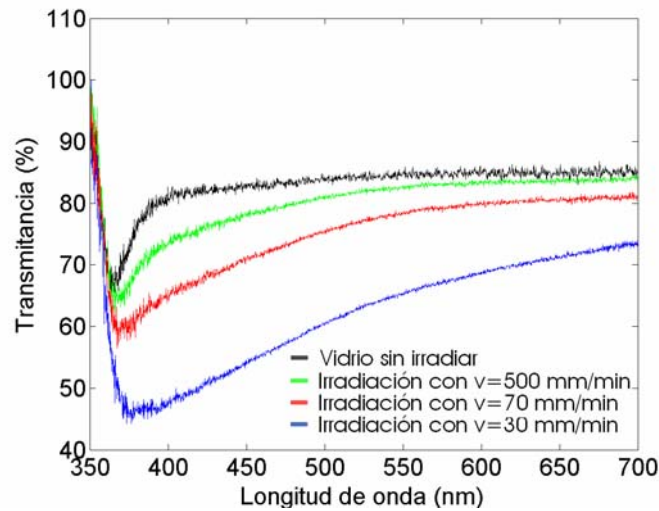


Figura 3.9. Variación de la transmitancia en vidrios dopados con plomo con la velocidad de la plataforma irradiada con 266 nm.

También analizamos los efectos de la variación de la distancia entre la lente cilíndrica y la muestra de vidrio, para valores de 7.5 y 8 cm de separación (figura 3.10). De nuevo, se observa un importante descenso en la transmitancia de los vidrios cuando aumenta la densidad de energía.

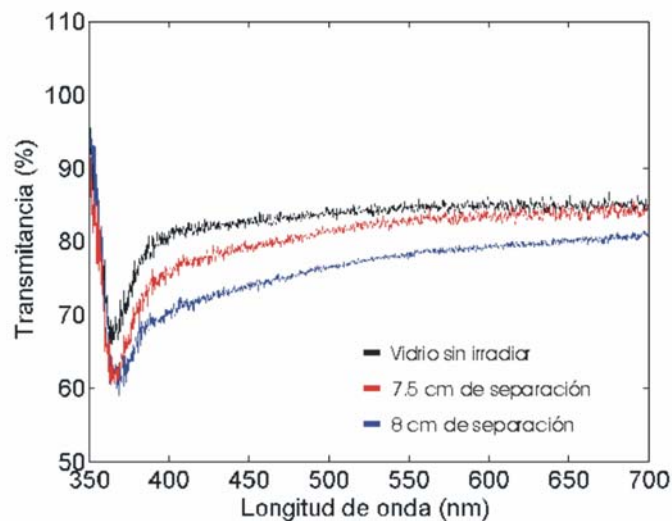


Figura 3.10. Variación de la transmitancia en vidrios dopados con plomo con la separación entre la lente cilíndrica y la muestra de vidrio para irradiación con 266 nm.

El último análisis realizado con estos vidrios se refiere a la variación de la respuesta del vidrio con la potencia del láser. Desplazamos la plataforma motorizada a baja velocidad (30 mm/min) e irradiamos el vidrio con potencias de 0.5 y 0.4 W. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 3.11 donde se observa que la transmisión disminuye fuertemente con la potencia del láser: hay un salto del 20 % para una variación de 0.1 W en la potencia del láser.

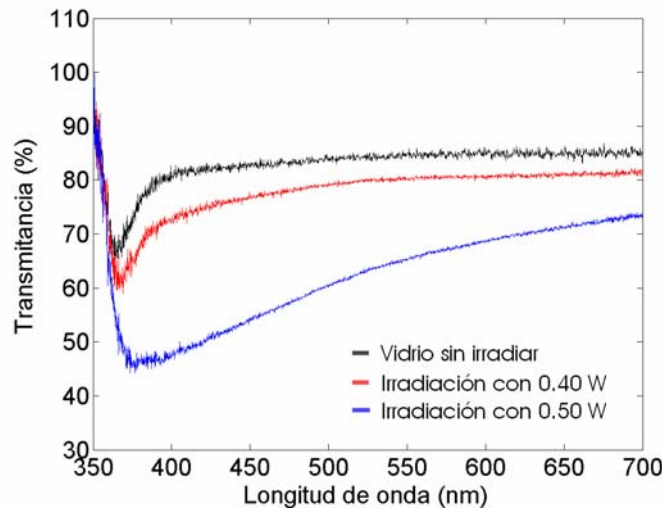


Figura 3.11. Variación de la transmitancia en vidrios dopados con plomo con la potencia del láser irradiada con 266 nm.

Después de todas estas pruebas se puede concluir que, bajo irradiación con 266 nm, este tipo de vidrios es un candidato idóneo para el grabado de redes de difracción.

b) Irradiación con $\lambda=355$ nm.

Comenzamos exponiendo directamente los vidrios de plomo a la longitud de onda de 355 nm y a una potencia de 4.5 W. En este caso, los sustratos no sufrieron prácticamente ninguna alteración de color. Utilizamos a continuación la configuración dinámica (figura 3.3) y, aunque se detectó un ligero cambio de coloración, la transmitancia del vidrio era prácticamente igual a la del vidrio sin irradiar, aún para las velocidades de desplazamiento más lentas.

Debido a la alta transmisión de los vidrios de plomo para 532 nm (figura 2.6) y, teniendo en cuenta los resultados obtenidos con el sustrato anterior, no hemos realizado pruebas preliminares con esta longitud de onda.

3.3.2. Irradiación de los sustratos para la fabricación de redes de difracción.

Una vez analizadas las condiciones de emisión del láser bajo las que se producen modificaciones en las muestras de vidrio, procedemos al grabado de las redes. En este apartado explicamos los diferentes métodos y configuraciones utilizados en el grabado.

3.3.2.1. Vidrios sodo-cálcicos.

Como hemos visto, estos vidrios presentaban una respuesta interesante bajo irradiación con una longitud de onda de 266 nm. El dispositivo experimental básico para el grabado de las redes se ha presentado en la figura 3.2. En este caso, utilizamos una máscara optimizada para la longitud de onda de trabajo situada delante y en contacto físico con la muestra, para tener una buena calidad de grabado. Trabajamos con la máxima potencia del láser para esta longitud de onda, 0.5 W, y realizamos pruebas con diferentes tiempos de exposición desde 30 segundos hasta 5 minutos. La evaluación preliminar de las redes obtenidas (análisis visual de los órdenes de difracción bajo irradiación con láser de He-Ne) nos mostró la baja calidad de las mismas.

Debido al resultado de dicha evaluación preliminar procedimos a la variación del montaje experimental. En este segundo caso, montamos la máscara y el vidrio sobre la plataforma motorizada, introduciendo la lente cilíndrica de distancia focal 10 cm entre el espejo E_2 y la máscara (figura 3.3). Intentamos grabar redes variando la velocidad de la plataforma y la distancia entre lente y máscara. Los resultados no fueron los esperados pues, o bien no se grababan redes, o bien las registradas eran de muy baja calidad.

Aunque las pruebas iniciales no se producían grandes modificaciones en el vidrio al ser irradiado con 355 nm, grabamos muestras con esta longitud de onda. Se han utilizado diferentes tiempos de exposición, desde 1 hasta 30 minutos. Todas las redes obtenidas presentaban órdenes de baja intensidad y bastante ruido (luz difusa alrededor de los diferentes órdenes). Con el fin de mejorar la calidad del grabado introducimos una lente esférica para aumentar la densidad de potencia. Esta nueva configuración experimental nos obligó a trabajar lejos del foco de la lente, ya que la alta densidad de potencia quebraba el vidrio en esa posición. Analizamos diferentes tiempos de exposición, desde 1 hasta 15 minutos, pero todas las redes presentaban de nuevo baja eficiencia y bastante ruido.

Por lo tanto, a pesar de los resultados preliminares, en los que analizamos el comportamiento de los vidrios sodo-cálcicos con diferentes longitudes de onda

y densidades de potencia, este tipo de vidrios no son un buen sustrato para el replicado de redes de difracción de fase con una máscara comercial.

3.3.2.2. Vidrios de plomo.

A continuación, utilizamos los vidrios de plomo para el grabado de las redes de fase. Habíamos visto como este tipo de vidrios presentaba una disminución importante de la transmitancia para longitudes de onda por debajo de los 400 nm (figura 2.3), por lo que en principio el cuarto armónico del láser (266 nm) es un candidato adecuado para la irradiación. Esta apreciación concuerda con los resultados de las pruebas iniciales, ya que es la única longitud de onda en la que se provocaba algún tipo de modificación en el vidrio.

Comenzamos trabajando con toda la potencia del láser, 0.5 W, y situamos la muestra de vidrio en contacto físico con la máscara de fase, de la misma forma que en los vidrios anteriores, para tener una buena calidad de grabado. Al exponer el vidrio durante un minuto conseguimos grabar una red de fase. Sin embargo, en este momento detectamos un problema importante: debido a la ablación de la muestra se crea una pluma de plomo que se adhiere a la máscara cuando ésta se encuentra en contacto físico con el vidrio. Este efecto provoca la deposición de material procedente del vidrio sobre la máscara, reduciendo su vida útil (figura 3.12). Para solventar este problema, decidimos separar el vidrio de la máscara. El objetivo era encontrar una distancia óptima que permitiera grabar redes de buena calidad y, al mismo tiempo, prolongar la vida útil de la máscara. Después de una serie de pruebas, fijamos esta distancia en 150 μm , que será la que utilizemos a partir de ahora en todas las configuraciones experimentales.

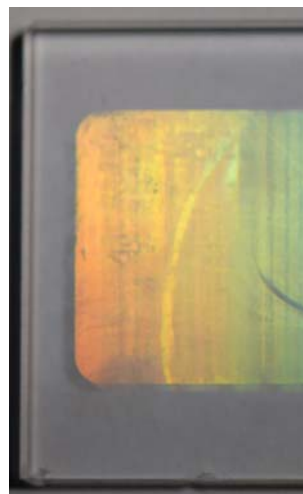


Figura 3.12. Residuos depositados en la superficie de la máscara de fase después de la irradiación en contacto directo con los vidrios de plomo.

Una vez fijadas las condiciones de trabajo, procedimos a grabar redes con diferentes tiempos de exposición y potencias de láser. Para variar la potencia utilizamos un atenuador Optec AT2040 (figura 3.13), de forma que grabamos redes con potencias de 0.50, 0.45, 0.40 y 0.25 W y tiempos de exposición comprendidos entre 10 s y 10 min.

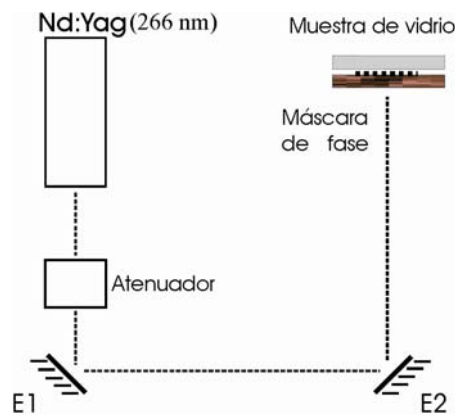


Figura 3.13. Grabado de redes de fase en vidrios dopados con plomo para diferentes tiempos de exposición y potencias del láser.

A continuación, estudiamos la dependencia del grabado de las redes con la velocidad de desplazamiento del conjunto muestra-máscara. Al igual que en los vidrios sodo-cálcicos, hemos introducido una lente cilíndrica entre el espejo E_2 y la máscara, pues de este modo se consigue una mayor concentración de energía. Evaluamos la respuesta del vidrio en diferentes posiciones a partir de la distancia focal de la lente, resultando que la distancia más próxima al foco en la que el vidrio no sufre daño físico es de 7.3 cm. Con esta distancia procedimos al grabado de redes para diferentes potencias del láser (desde 0.3 hasta 0.5 W) y para velocidad de desplazamiento entre 30 y 500 mm/min. Con los mismos valores de potencia y velocidades, se grabó un conjunto de redes para una distancia de 6.7 cm entre lente cilíndrica y muestra de vidrio.

3.3.3. Caracterización de las redes: medida de la eficiencia.

Una vez grabadas las redes en los sustratos de vidrio con PbO, procedimos a su caracterización (como ya habíamos indicado en el primer capítulo). En este apartado, analizaremos las propiedades ópticas de las redes, mediante la medida de su eficiencia (ver apartado 3.2). Hemos utilizado dos longitudes de onda diferentes, con el objetivo de comparar los comportamientos. Además, mostraremos la variación de las propiedades de las muestras con los diferentes parámetros fijados

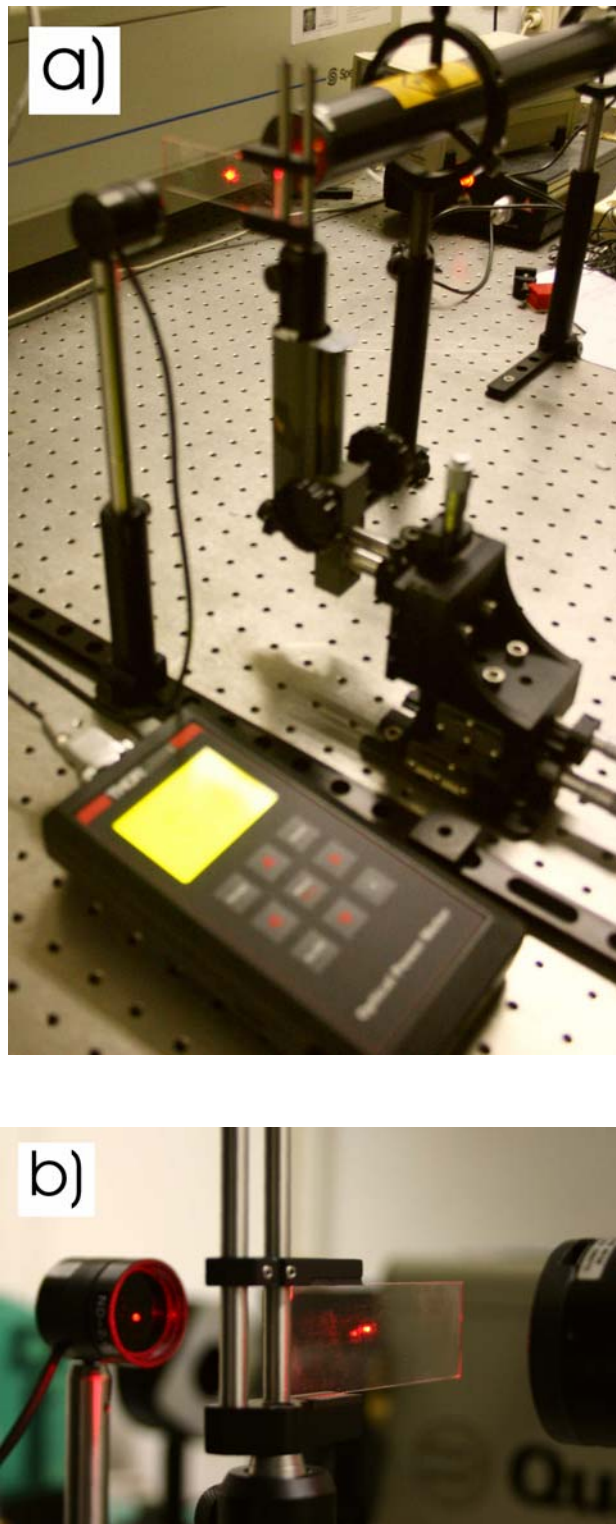


Figura 3.14. Fotografía del dispositivo utilizado para medir la eficiencia: a) visión general; y b) detalle del detector.

en el proceso de fabricación. Los métodos utilizados en la caracterización serán descritos con más detalle en cada uno de los apartados.

3.3.3.1. Eficiencia para una longitud de onda $\lambda=632.8$ nm.

Para medir la eficiencia hemos iluminado la muestra con un láser de He-Ne, midiendo a continuación la potencia de cada uno de los órdenes (ver figura 3.14). Para ello, hemos empleado un medidor de potencia láser modelo Scientech Astral AA30.

En nuestro caso, las redes grabadas sobre vidrio de plomo sólo tienen tres órdenes, el 0 y el ± 1 . Como ya indicamos en el apartado 3.2 de este capítulo, para obtener la eficiencia simplemente tenemos que comparar los valores de irradiancia obtenidos en cada orden, con la irradiancia incidente. Analizaremos el conjunto de redes grabadas con diferentes parámetros experimentales, según han sido indicadas en el apartado 3.3.2.

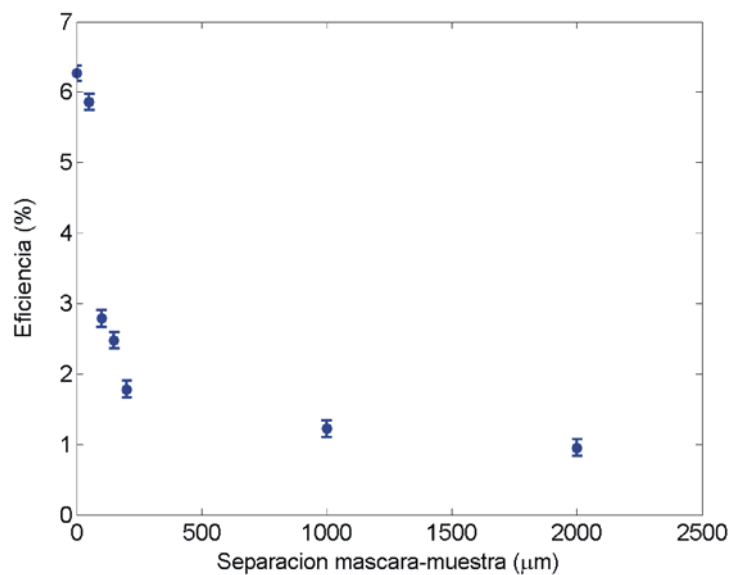


Figura 3.15. Variación de la eficiencia del primer orden de difracción con la distancia de separación entre máscara de fase y muestra de vidrio para exposición durante 1 min.

En primer lugar analizamos las redes grabadas con diferente separación entre la máscara de fase y el sustrato de vidrio. La figura 3.15 muestra la eficiencia del primer orden de las redes. La máxima eficiencia se obtiene cuando ambas se encuentran en contacto físico y decrece con la separación entre ambos. El decrecimiento es bastante pronunciado desde el contacto hasta una separación de 200 μm , para continuar con un descenso más suave a partir de este valor. Este

comportamiento se debe a que el contacto físico reduce la expansión lateral del haz, aumentando así la intensidad de la pluma que provoca el cambio de índice en el sustrato. Por eso, a partir de cierta distancia, la expansión lateral aumenta mucho más lentamente y el cambio inducido en el sustrato es muy parecido. Sin embargo, como ya hemos comentado en el apartado anterior, el daño producido en la máscara de fase debido al depósito de restos de la ablación nos ha obligado a trabajar con cierta separación de seguridad (en nuestro caso de 150 μm).

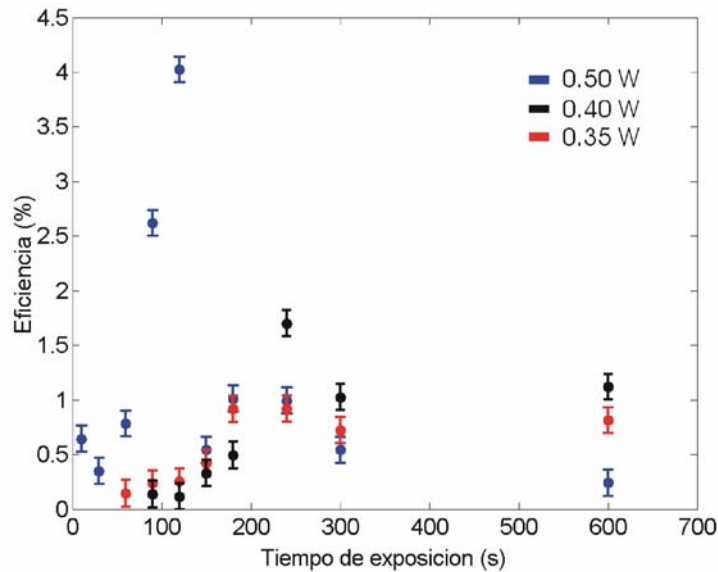


Figura 3.16. Variación de la eficiencia del primer orden de difracción para diferentes tiempos de exposición y potencias del láser.

Una vez escogida la distancia de separación más adecuada, grabamos una serie de redes en configuración estática, variando el tiempo de exposición y la potencia del láser. Como se observa en la figura 3.16, los mayores valores de la eficiencia se obtienen para tiempos intermedios de exposición en todos los casos. El sustrato necesita cierto tiempo de irradiación para alcanzar el máximo cambio de índice de refracción. A partir de ese momento, el depósito de material adicional sobre el sustrato empeora la calidad de las redes. En nuestro caso, para una potencia de trabajo de 0.50 W, la mayor eficiencia se alcanza para una exposición de 120 segundos. Al reducir la potencia del láser se necesita un tiempo mayor de exposición para conseguir una eficiencia también mayor. Debido a este efecto, para potencias de 0.40 y 0.35 W, el tiempo de exposición de la eficiencia máxima es de 240 segundos. Con una potencia de 0.30 W sólo conseguimos grabar redes para grandes tiempos de exposición (al incidir con el haz del He-Ne se observan

los órdenes en la pantalla) pero presentan una eficiencia muy pequeña, que se confunde con el ruido del detector.

A continuación mostramos los resultados obtenidos sobre el grabado de redes en configuración dinámica, con diferentes velocidades de la plataforma. Como ya hemos comentado, se ha utilizado una lente cilíndrica para focalizar el haz procedente del láser. En la figura 3.17 se presentan las eficiencias del primer orden para una distancia de 7.3 cm entre lente y máscara. La eficiencia aumenta con la velocidad, hasta llegar al máximo para un valor de 200 mm/min. Por encima de este valor, el desplazamiento es demasiado rápido, de forma que el haz no tiene tiempo suficiente para cambiar las propiedades del vidrio. Por debajo, el haz pasa muy lentamente por el vidrio y aumenta de forma importante la cantidad de material arrancado del sustrato y depositado sobre la superficie, empeorando la calidad y aspecto físico de las redes. Además, en todos los casos, para una velocidad dada, la eficiencia disminuye al decrecer la potencia del láser. Este resultado viene a confirmar el mostrado en la figura 3.16. Finalmente debemos comentar que para potencias menores que 0.35 W no se ha conseguido grabar redes.

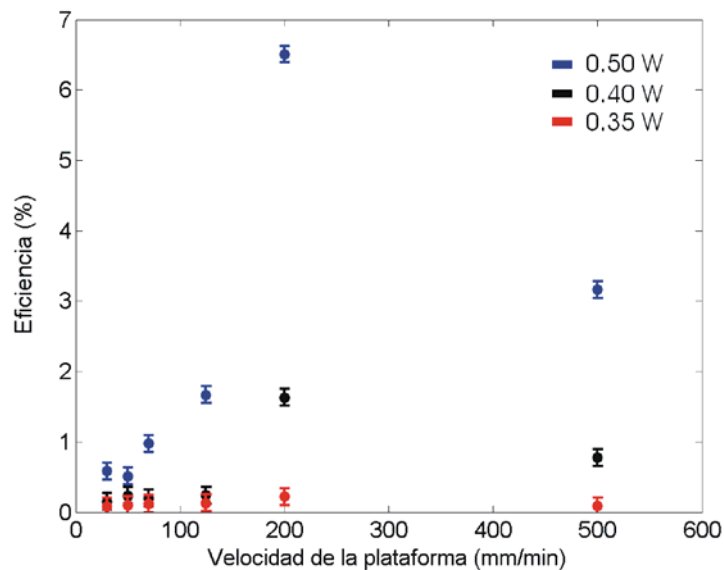


Figura 3.17. Variación de la eficiencia del primer orden de difracción para diferentes velocidades de la plataforma y potencias del láser para una separación de 7.3 cm entre lente cilíndrica y lámpara.

Finalmente en la figura 3.18 se dan los resultados obtenidos para la eficiencia cuando la distancia entre lente y máscara es de 6.7 cm. Comparando con los resultados de las medidas del caso anterior, los valores de la eficiencia son mucho menores en este caso. Como ya hemos comentado, este comportamiento se

debe a que, en esta posición de la lente, se reduce la densidad de potencia, ya que el haz se concentra en una superficie mayor. En cuanto a la variación con la velocidad, debemos decir que el comportamiento para el caso de máxima potencia (0.50 W) es similar al obtenido trabajando con la lente a 7.3 cm. Sin embargo, al disminuir la potencia observamos algunas diferencias. Para 0.40 y 0.35 W, la velocidad de la plataforma para la que se obtienen los mejores resultados es de 125 mm/min. Esto quiere decir que la intensidad del haz focalizado es bastante menor en este caso, de forma que el láser debe incidir durante más tiempo en el sustrato (menor velocidad) para conseguir el mayor cambio. Antes y después del pico, los valores siguen el mismo patrón que el comentado en la gráfica anterior.

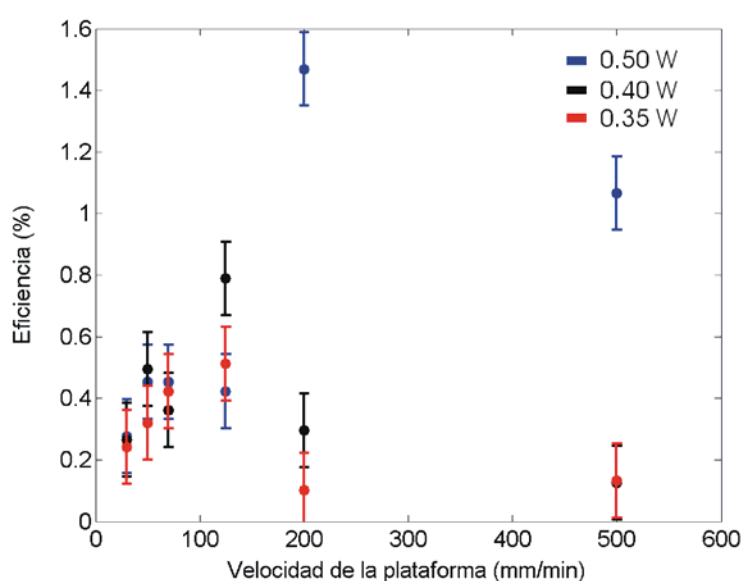


Figura 3.18. Variación de la eficiencia del primer orden de difracción para diferentes velocidades de la plataforma y potencias del láser en la segunda posición de la lente cilíndrica para una separación de 6.7 cm entre lente y máscara.

3.3.3.2. Eficiencia para una longitud de onda $\lambda=514.5$ nm.

Hemos realizado el mismo estudio de la eficiencia con la línea 514.5 nm del láser de Ar. El objetivo es comparar el comportamiento de las redes bajo diferentes longitudes de onda. En primer lugar mostramos los resultados para las redes grabadas con diferente distancia entre la máscara y la muestra (véase figura 3.19). De la misma forma que para los resultados obtenidos con el He-Ne, se aprecia cómo la eficiencia de las redes alcanza el máximo valor cuando la máscara y la muestra están en contacto, disminuyendo con la separación entre ambas.

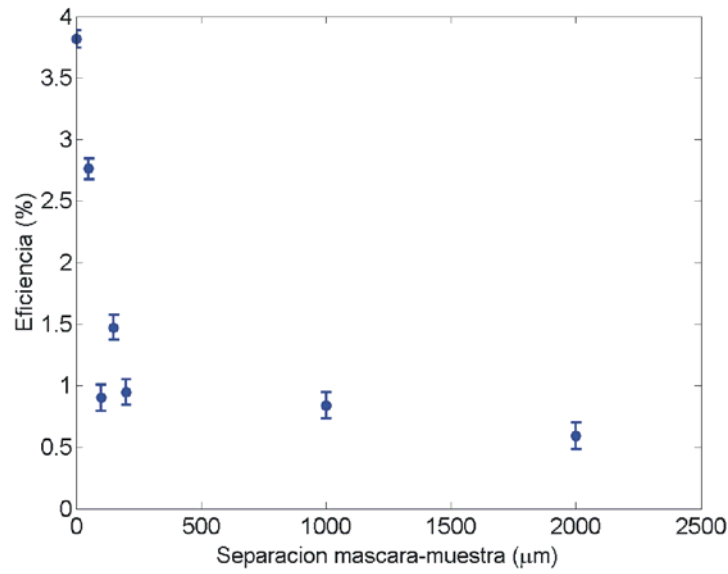


Figura 3.19. Variación de la eficiencia del primer orden de difracción para diferentes distancias de separación entre máscara de fase y muestra de vidrio.

La figura 3.20 muestra los datos de la eficiencia de las redes grabadas con diferentes tiempos de exposición y potencias de emisión del láser. El comportamiento es similar, con los máximos de eficiencia en los mismos tiempos de exposición, al caso de la irradiación con láser de He-Ne. La única diferencia es

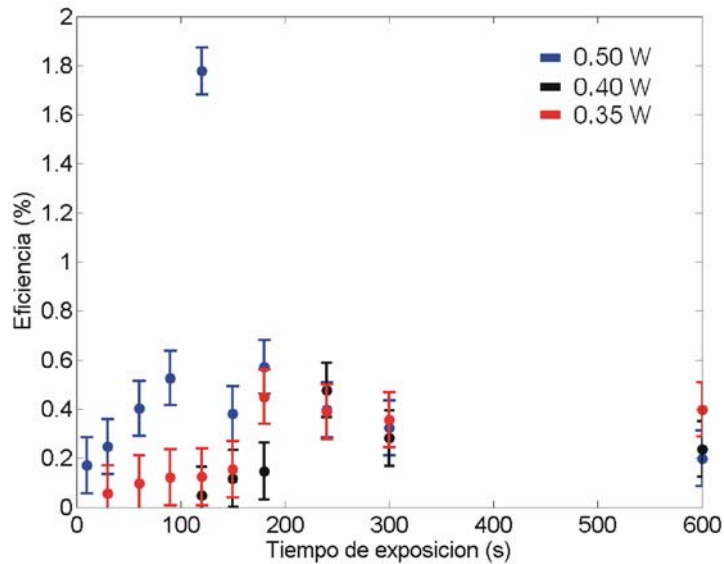


Figura 3.20. Variación de la eficiencia del primer orden de difracción para diferentes tiempos de exposición y diferentes potencias del láser.

una clara disminución en los valores de eficiencia, de más del 50 % en los valores-pico. Este efecto nos permite concluir que las redes fabricadas están optimizadas para trabajar con longitudes de onda más cercanas al He-Ne.

La figura 3.21 presenta la eficiencia en función de la velocidad de la plataforma motorizada y de la potencia para la primera separación entre lente y máscara (7.3 cm). De nuevo, su comportamiento es similar al caso del láser de He-Ne con valores de eficiencia más pequeños. El máximo aparece de nuevo para 200 mm/min de velocidad, disminuyendo los valores con la potencia del láser.

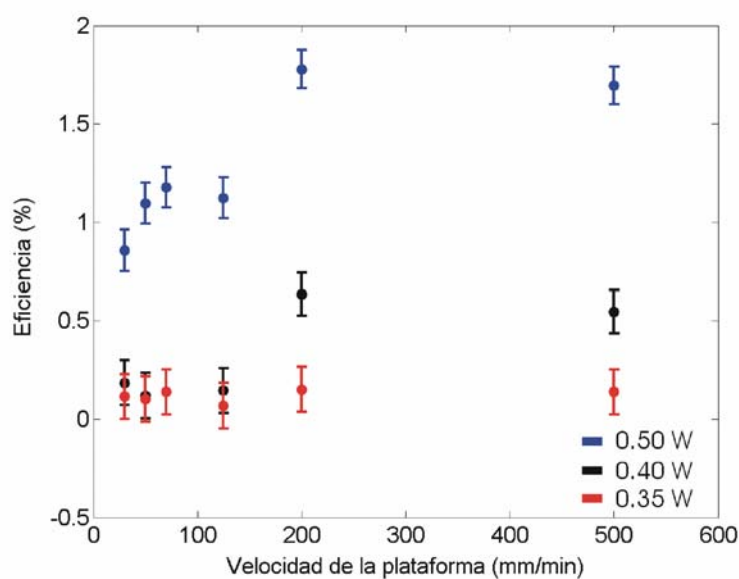


Figura 3.21. Variación de la eficiencia del primer orden de difracción para diferentes velocidades de la plataforma y potencias del láser para una separación de 7.3 cm entre lente cilíndrica y máscara.

Finalmente (figura 3.22), mostramos los valores para la segunda posición de la lente cilíndrica (a 6.7 cm de la máscara). Al igual que en los casos anteriores, se observa la misma tendencia que para irradiación con 633 nm. La única diferencia es la disminución de la intensidad del haz focalizado, lo que repercute en el valor de velocidad que se requiere para obtener la máxima eficiencia. Para 0.40 y 0.35 W, los mejores resultados se obtienen para velocidades por debajo de 100 mm/min, lo que indica que la potencia es demasiado baja y se necesita que el haz irradie durante bastante tiempo el sustrato para conseguir el mayor cambio.

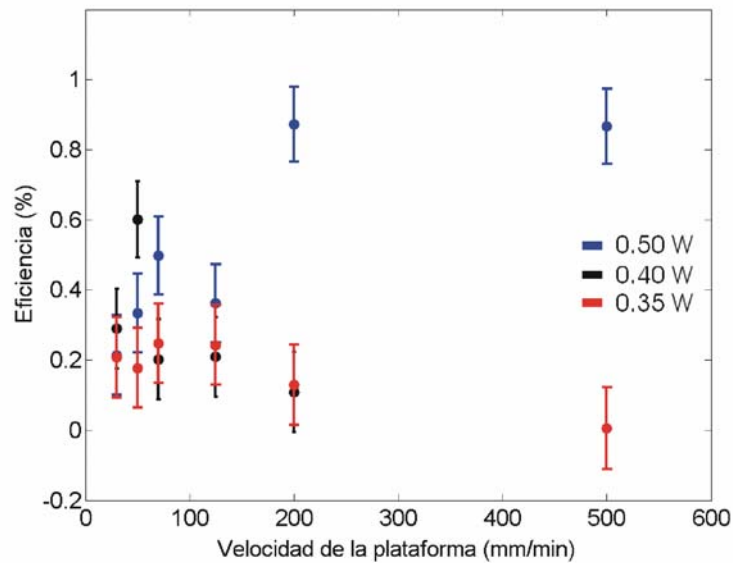


Figura 3.22. Variación de la eficiencia del primer orden de difracción para diferentes velocidades de la plataforma y diferentes potencias del láser para 6.7 cm entre lente cilíndrica y máscara

3.3.4. Caracterización de las redes: análisis del período.

Además de la eficiencia es interesante analizar los parámetros físicos de las muestras. En primer lugar, realizamos medidas del período de las redes para conocer su variación con los diferentes parámetros experimentales. Es una medida sencilla teniendo en cuenta la ecuación de la red para incidencia normal (ecuación [3.1]). Mediante incidencia normal con un láser de longitud de onda conocida, hemos obtenido el patrón de difracción de las redes sobre una pantalla. Calculando el ángulo de desviación de cada uno de los órdenes, se obtiene el valor del período de forma directa.

En la tabla 3.1, se muestran las medidas del período para diferentes distancias entre la máscara de fase y el sustrato de vidrio. Como ya se ha indicado en el apartado 3.3.2.2, se han fabricado con irradiación directa para 266 nm de longitud de onda, con una potencia de 0.5 W y un tiempo de exposición de 1 min. Se observa que el período se mantiene prácticamente constante en todas las posiciones, en torno a 1.12 μm .

El segundo grupo de muestras nos permite analizar la variación del período en función de la velocidad de la plataforma motorizada, para irradiación con 266 nm y potencia de 0.5 W. Los valores se muestran en la tabla 3.2, y se

Tabla 3.1. Período de las redes grabadas con diferentes distancias de separación entre máscara de fase y muestra de vidrio.

Separación máscara-muestra (μm)	Período (μm)
0	1.11936 \pm 0.00075
50	1.11782 \pm 0.00074
100	1.12249 \pm 0.00076
150	1.12680 \pm 0.00078
200	1.12009 \pm 0.00075
1000	1.11776 \pm 0.00074
2000	1.12108 \pm 0.00076

Tabla 3.2. Datos del período de las redes grabadas con diferentes velocidades de la plataforma.

Velocidad de la plataforma (mm/min)	Período (μm)
30	1.12013 \pm 0.00082
50	1.12694 \pm 0.00085
70	1.12487 \pm 0.00087
125	1.12337 \pm 0.00083
200	1.12918 \pm 0.00086
500	1.12410 \pm 0.00084

observa que el período de las redes también se mantiene prácticamente invariante (la diferencia es de unos pocos nanómetros).

3.3.5. Caracterización de las redes: análisis mediante microscopía electrónica.

La microscopía electrónica es una técnica que nos permite obtener imágenes de la superficie de la muestra. Estas imágenes nos ayudan a entender el comportamiento de un elemento microóptico en particular o a detectar posibles errores de fabricación. En nuestro caso, hemos empleado la microscopía electrónica de barrido o SEM, de la que ya habíamos comentado algunos aspectos en el capítulo 1. Se ha hecho uso de un microscopio electrónico de barrido, modelo LEO-435VP.

Con las imágenes obtenidas podemos comprobar, en primer lugar, los valores obtenidos del período mediante la ecuación de la red. La figura 3.23 muestra la imagen aumentada de una de las redes de difracción fabricada. Se puede observar que la referencia de 20 μm corresponde a algo menos de 18 surcos. Tomando el período como la distancia entre dos surcos consecutivos, a partir de estos datos se obtiene un valor del período entre 1.11 y 1.12 μm , que coinciden con los calculados con la ecuación de la red (apartado 3.3.4).

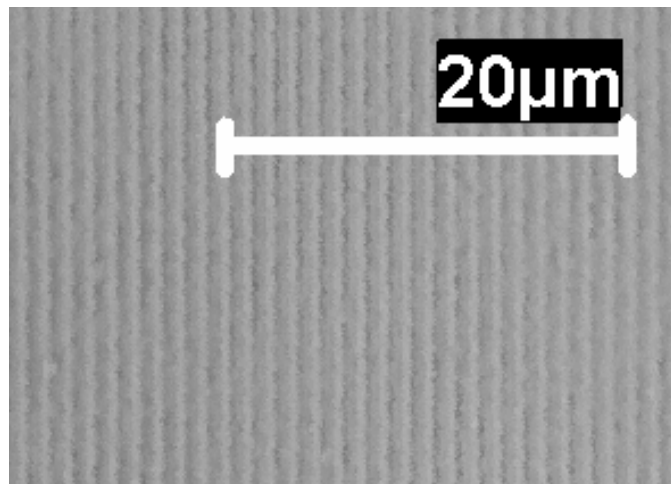


Figura 3.23. Imagen obtenida por SEM de una de las redes grabadas.

Por otro lado, podemos analizar a que se debe el diferente comportamiento que detectamos en la eficiencia de las redes con los diferentes parámetros experimentales. Podemos observar, en primer lugar, un conjunto de tres redes grabadas con diferentes velocidades de desplazamiento: 30 mm/min, 125 mm/min

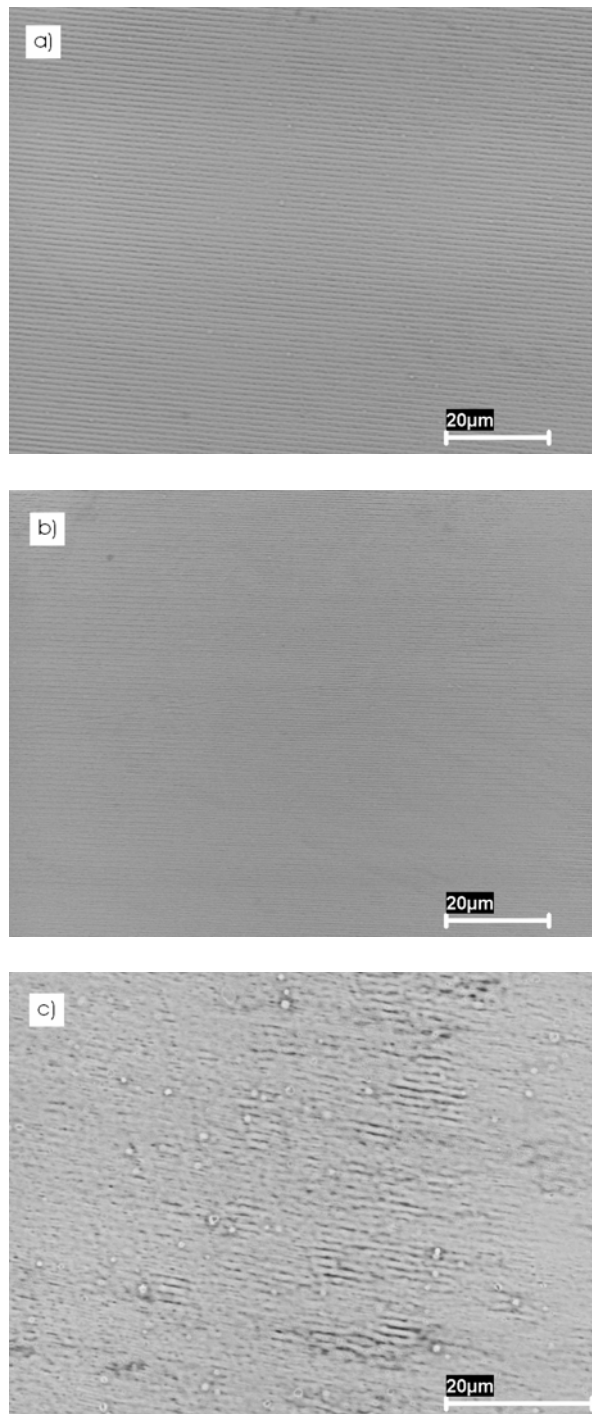


Figura 3.24. Fotografías obtenidas con un microscopio electrónico de redes grabadas con diferentes velocidades de la plataforma: a) 200 mm/min; b) 125 mm/min; y c) 30 mm/min.

y 200 mm/min (figura 3.24), y con la máxima potencia del láser de 0.50 W. Se observa que la calidad de la red es diferente en cada una de las muestras. La

muestra irradiada con una velocidad de desplazamiento de 200 mm/min (figura 3.24 a)) presenta un patrón mucho más claro y uniforme que las otras. Esta observación concuerda con las gráficas de eficiencia del apartado 3.3.3, en las que esta red era la que presentaba la mayor eficiencia de difracción. Por otro lado, la muestra grabada con velocidad de 30 mm/min (figura 3.24 c)) presenta un patrón muy sucio e irregular, que explica los bajos valores de eficiencia mostrados anteriormente. En este caso, el láser ha irradiado el sustrato durante un largo tiempo, arrancando una gran cantidad de material en el proceso, que es depositado en forma de residuos sobre la superficie del mismo.

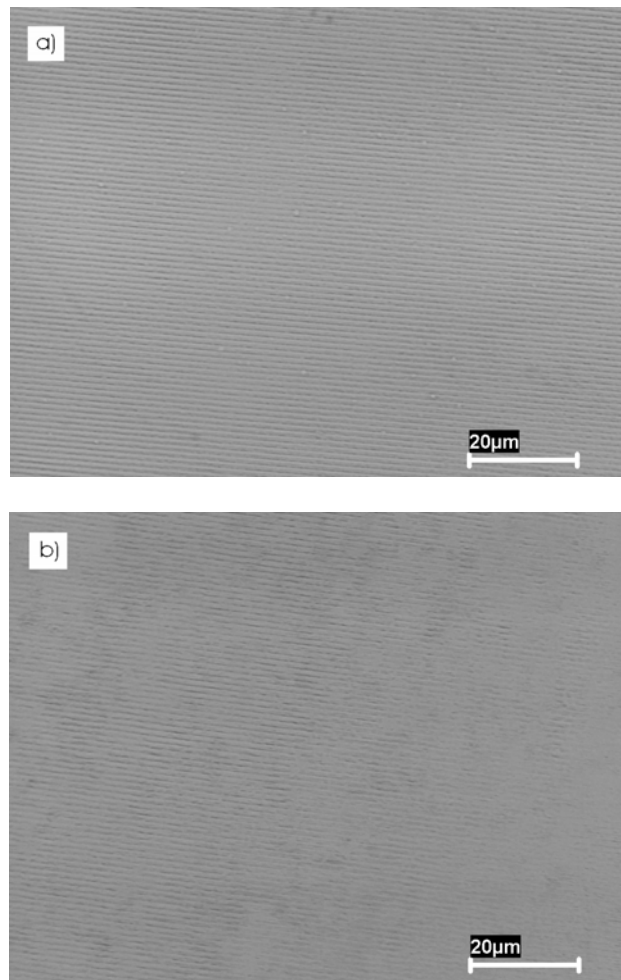


Figura 3.25. Fotografías obtenidas con un microscopio electrónico de redes grabadas con diferentes potencias del láser: a) 0.50 W; y b) 0.40 W.

En la figura 3.25 podemos comparar las redes grabadas con diferentes potencias de trabajo del láser: 0.50 y 0.40 W, ambas con una velocidad de desplazamiento de 200 mm/min. Se observa, para la menor potencia del láser, que

algunas zonas del sustrato se han grabado más intensamente que otras, resultando finalmente un patrón muy irregular. De nuevo, las imágenes SEM concuerdan con los datos experimentales de eficiencia mostradas en el apartado 3.3.3.

3.3.6. Caracterización de las redes: análisis mediante microscopía de fuerzas atómicas.

El microscopio de fuerzas atómicas (*atomic force microscope* o AFM) proporciona una reproducción de la superficie de la muestra que se desea estudiar. Se basa en la detección del movimiento de una aguja muy fina cuando es atraída o repelida por las fuerzas atómicas de atracción o repulsión. La fácil preparación de la muestra, junto con la alta resolución del microscopio y el carácter no destructivo de la interacción, conforman un método muy eficaz para reproducir con gran precisión la superficie de la muestra. Las imágenes que proporciona son representaciones tridimensionales cuantitativas de la superficie en el espacio real. Este tipo de microscopios tiene un amplio rango de aplicaciones, en electrónica, telecomunicaciones, automoción, industria aeroespacial... y permite el estudio de fenómenos como abrasión, adhesión, limpieza, pulido, corrosión y ablación. Los materiales que se pueden analizar con este tipo de microscopios pueden ser cerámicas, vidrios, membranas sintéticas y biológicas, metales, polímeros o semiconductores.

Hemos analizado con este microscopio las redes grabadas en los vidrios de plomo. En primer lugar, hemos considerado una de las redes grabadas en configuración estática, en concreto la expuesta a la radiación láser durante un tiempo de 3 minutos. En la figura 3.26, se muestra una vista cenital de la superficie del sustrato irradiado (3.26 a)), así como la reconstrucción tridimensional del elemento (3.26 b)) y el perfil medido en la dirección perpendicular a la de las franjas de la red (3.26 c)). En la vista cenital se observan claramente las franjas de la red de fase, que están separadas una distancia de 1.12 μm , como ya se ha mostrado. Con el perfil bidimensional podemos ver que la altura de los picos de la red alcanza los 10 nm y tienen una anchura de unos 200 nm. Sin embargo, se nota una zona dañada en la parte derecha de la red, como se muestra en el perfil. Este comportamiento puede ser debido a la configuración experimental utilizada. Como se observa en la figura 3.2, estamos trabajando con el vidrio y la máscara en posición vertical, de forma que el efecto de la gravedad puede provocar la deposición selectiva de los residuos por debajo de cada una de las franjas grabadas.

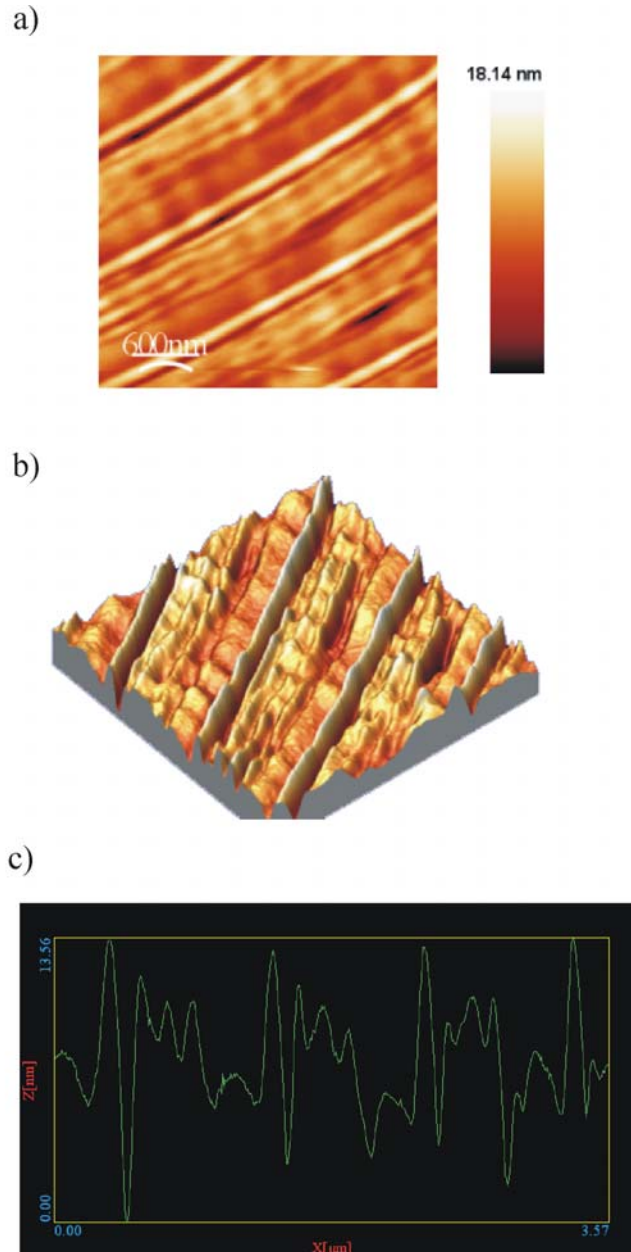
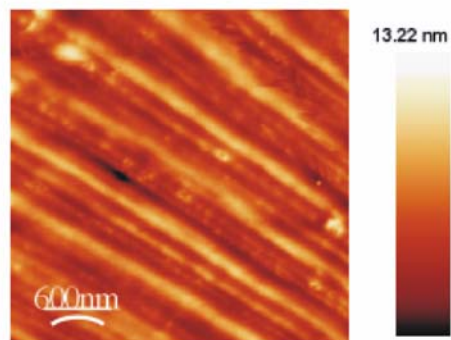


Figura 3.26. Imagen de la red grabada con un tiempo de exposición de 3 minutos: a) vista cenital; b) imagen tridimensional; y c) perfil de la superficie.

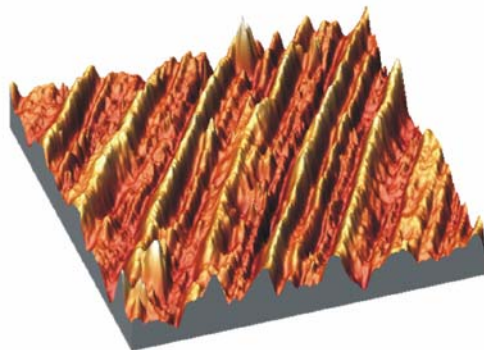
A continuación mostramos las imágenes obtenidas para una de las redes grabadas en configuración dinámica (figura 3.27) con una velocidad de la plataforma de 125 mm/min. Los picos alcanzan una altura de 7.5 nm, aproximadamente, y tienen una anchura media en torno a los 300 nm. En este caso, entre picos sucesivos de la red se advierte la presencia de otros picos más bajos (secundarios), formando aparentemente una estructura con un período que

es la mitad del medido experimentalmente. A partir de la información del perfil bidimensional (figura 3.27 c)) hemos calculado la distancia entre picos sucesivos, resultando un valor de $0.555 \mu\text{m}$ (ver apartado 3.3.4). Este comportamiento se debe a la interferencia de los órdenes difractados por la máscara de fase²⁹. Se ha estudiado la dependencia de este fenómeno con el valor del orden cero de difracción en la máscara, así como con la distancia de separación entre máscara y sustrato. Teniendo en cuenta la coherencia espacial y temporal del láser utilizado,

a)



b)



c)

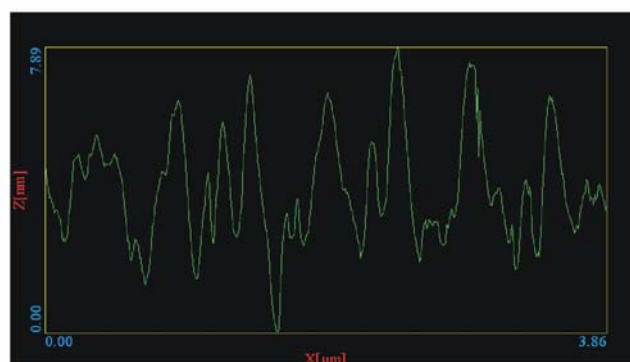


Figura 3.27. Imagen de la red grabada con con 125 mm/min de velocidad de la plataforma: a) vista cenital; b) imagen tridimensional; y c) perfil de la superficie.

es posible obtener diferentes estructuras dependiendo del valor de estos parámetros. En nuestra configuración, la máscara de fase presentaba un orden cero con eficiencia del 0.9 %, siendo 150 μm la distancia entre máscara y muestra. Para estos valores, la distribución de irradiancia después de la máscara²⁹ está formada por picos dominantes separados una distancia igual al período, acompañados de otros secundarios a una distancia igual al semiperíodo de la red (ecuación [3.1]). Esta distribución explica el perfil obtenido mediante AFM. Por

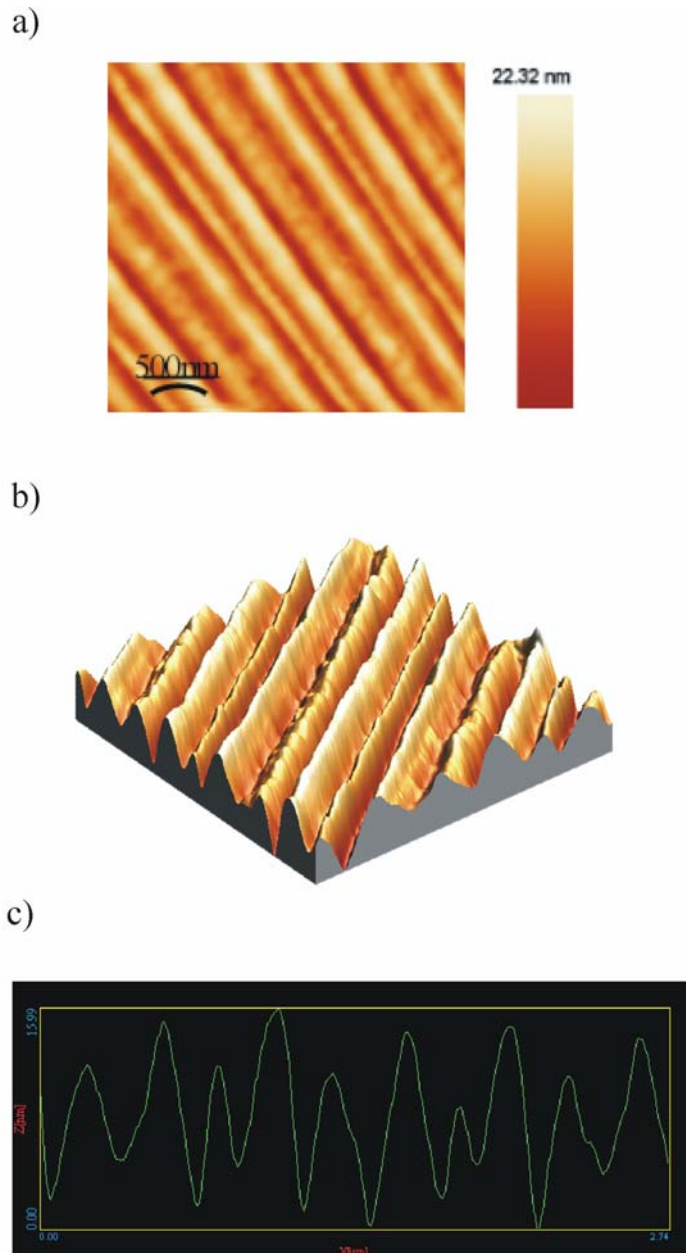


Figura 3.28. Imagen de la red grabada con con 30 mm/min de velocidad de la plataforma: a) vista cenital; b) imagen tridimensional; y c) perfil de la superficie.

otro lado, se ha probado experimentalmente que la difracción de la luz se debe a la estructura principal²¹, cuyo período tiene el mismo valor que la máscara de fase, lo que concuerda con las medidas mostradas en el apartado 3.3.4.

Finalmente mostramos las fotografías de una red grabada en configuración dinámica con una velocidad de 30 mm/min (figura 3.28). La vista cenital muestra claramente las franjas de la red, cuyos picos superan los 13 nm de altura y cuya anchura está en torno a los 280 nm. El perfil superficial es mucho más suave que en los casos anteriores. Los picos de la estructura secundaria son mucho mayores, de forma que no se distingue de la estructura principal. Este perfil se debe al mayor tiempo de exposición de la red al haz láser, ya que se ha empleado una menor velocidad de desplazamiento. Ésto se traduce, como hemos visto en el apartado 3.3.3, en una disminución de la eficiencia de la red.

3.4. Fabricación de redes de fase por ablación de muestras metálicas.

Dentro de las diferentes aplicaciones que ha encontrado el procesado mediante láser, la deposición de capas metálicas en sustratos transparentes ha experimentado un gran desarrollo debido principalmente a la aplicación de la escritura directa mediante láser³⁰. Esta técnica ha sido recientemente utilizada para la fabricación de recubrimientos metálicos en sustratos de poliamida mediante la reducción de soluciones salinas organometálicas³¹. En este caso, se ha empleado un láser continuo de Argón (con una longitud de onda de 488 nm) que permite iniciar selectivamente el proceso de deposición a través de una reacción fototérmica. Alternativamente, se han empleado otras técnicas de metalización láser de precisión, como la transferencia inducida por láser (*laser-induced forward transfer* o LIFT). Este método se basa en la ablación de láminas metálicas delgadas sobre sustratos de vidrio^{32,33}, para transferir el material arrancado a otro sustrato aceptor. Una característica diferenciadora de este proceso es que el haz láser debe atravesar el sustrato en su camino hacia el blanco metálico. Esta técnica fue empleada inicialmente con blancos de cobre y plata en sustratos de silicio y sílice fundida bajo irradiación con láseres de Nd:YAG o excímeros^{30,34}, aunque su uso se ha extendido a otros metales, óxidos metálicos e incluso semiconductores^{33,35}. Esta técnica ha demostrado ser muy adecuada para la fabricación de interconexiones o como un método para reparar máscaras metálicas³⁶.

En este trabajo hemos aplicado una variación de la técnica de transferencia inducida por láser a la fabricación de redes de difracción en sustratos de vidrio. En

nuestro caso, el objetivo es lograr la modificación del sustrato transparente después de realizar la ablación de blancos metálicos de cierto grosor (ver figura 3.29). Este procedimiento presenta una serie de ventajas frente a otras técnicas de fabricación de redes de difracción. Es un proceso de una sola etapa y no es necesaria la utilización de elementos externos como resinas o máscaras, lo que minimiza los errores del proceso. La configuración experimental es sencilla y el proceso muy rápido. Además, es posible obtener elementos de diferentes características de forma sencilla, reajustando simplemente los parámetros de trabajo, y con un área de trabajo de hasta 120x120 mm². En este apartado comenzaremos analizando las configuraciones experimentales empleadas y mostraremos algunos resultados previos de ablación mediante este método. A continuación, describiremos el proceso de fabricación y finalizaremos con la caracterización de los diferentes parámetros de las redes obtenidas.

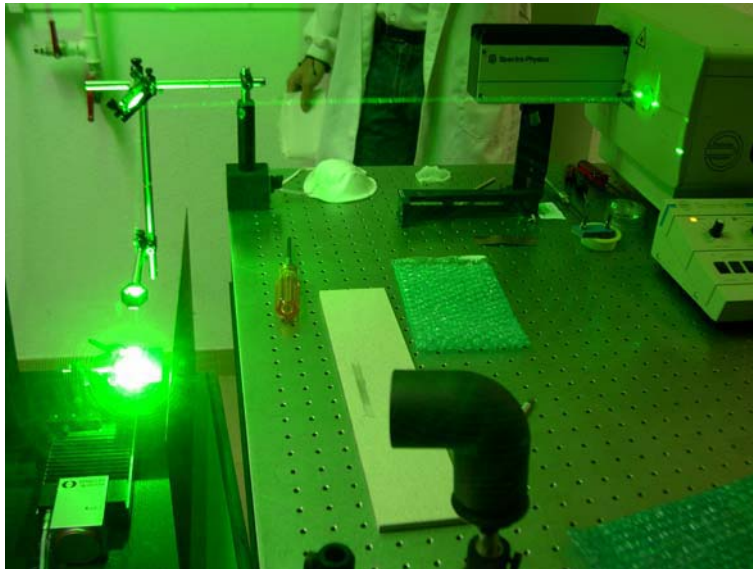


Figura 3.29. Proceso ablación mediante transferencia inducida por láser.

3.4.1. Configuración experimental.

Para el caso de materiales vítreos y aislantes en general, se ha estudiado la ablación láser para diferentes fuentes láser convencionales: láser excímero de F₂³⁷, láseres excímeros de KrF y ArF^{38,39}, láseres de CO₂⁴⁰ y, como en nuestro caso, láseres de Nd:YAG^{41,42}. En este apartado vamos a comentar los elementos empleados en las configuraciones experimentales de la técnica LIFT.

El montaje usado inicialmente se muestra en la figura 3.30. En este caso, hemos empleado el láser **Nd:YAG I** (cuyas características ya se han indicado en

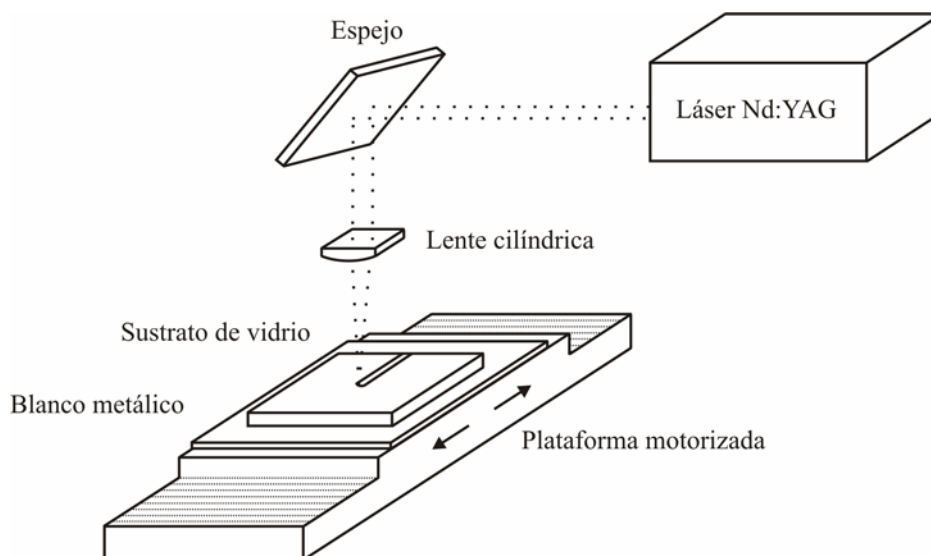


Figura 3.30. Configuración experimental empleada para la fabricación de guías de onda por transferencia inducida por láser.

el Capítulo 2) trabajando a una longitud de onda de 355 nm. El láser se focaliza a través de una lente cilíndrica sobre un blanco metálico, que en nuestro caso es una lámina metálica plana (ver figura 3.31). Sobre dicha lámina, se coloca el sustrato de vidrio en el que se quiere fabricar la red de difracción, y ambos se sitúan en una plataforma motorizada. Con esta configuración se produce la ablación dinámica del blanco metálico, de forma que se induce un cambio del índice de refracción del sustrato en la zona irradiada, debido al paso de partículas metálicas al vidrio desde la lámina.

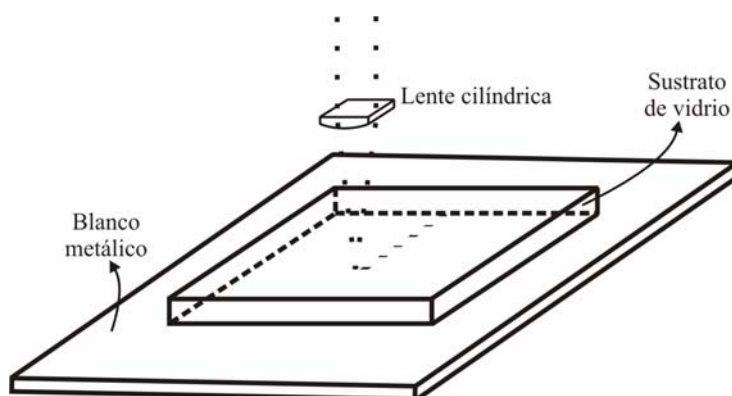


Figura 3.31. Configuración experimental: Detalle de la zona del sustrato y del blanco metálico.

Se ha escogido esta disposición de los elementos, en la que el haz láser incide verticalmente sobre el conjunto sustrato-blanco, para asegurar que el efecto de la pluma sobre el vidrio es el adecuado (y evitar los posibles efectos gravitacionales en el proceso, como los que hemos indicado en el apartado 3.3.6). En la figura 3.32 se observa una ilustración del proceso de ablación dinámica que tiene lugar en el experimento indicado. La alta energía del haz incidente (línea punteada) focalizado sobre la lámina metálica provoca la aparición de la pluma de ablación, que se dirige hacia el sustrato de vidrio. La zona central más oscura de

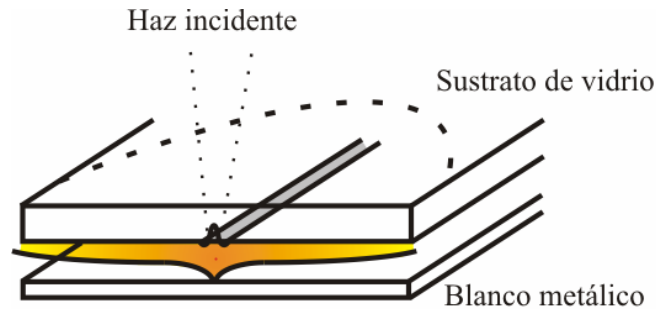


Figura 3.32. Efecto de la pluma durante la ablación del blanco metálico.

la figura 3.32 indica la marca permanente inducida en el sustrato debido a la interacción de la zona central de la pluma con el vidrio. La línea discontinua lateral indica la expansión dinámica de la pluma, que se dirige hacia los bordes del sustrato y en la dirección opuesta a la de desplazamiento, afectando muy débilmente al sustrato de vidrio.

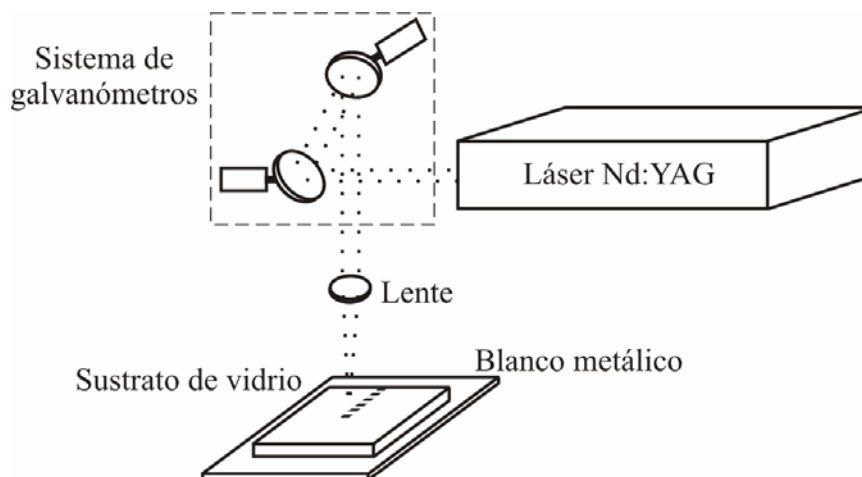


Figura 3.33. Configuración experimental con sistema de galvanómetros.

Asimismo, hemos utilizado otra configuración experimental con el láser **Nd:YAG II** (ver Capítulo 2). En este caso, como se muestra en la figura 3.33, un sistema de galvanómetros acoplado a la salida del láser permite controlar el desplazamiento del haz con gran precisión, con lo que no es necesario incluir ningún elemento motorizado.

3.4.2. Transferencia inducida por láser: resultados previos.

La ablación láser de materiales es un proceso complejo, en el cual se produce una transferencia de energía (de distinta forma dependiendo del tipo de pulso y la intensidad del haz) al sustrato a través de la absorción de los fotones del mismo. Esta transferencia puede provocar los efectos deseados en el material (como el cambio de la forma o las propiedades del mismo) o efectos no deseados (roturas o aparición de grietas) que dañan el material reduciendo la calidad del elemento a fabricar. Por ello se hace necesario controlar el proceso, lo que permitirá conseguir los efectos deseados y evitar o minimizar los posibles daños⁴³.

En este apartado vamos a comentar algunos de los resultados de la ablación de muestras metálicas mediante la técnica de transferencia inducida por láser. Este análisis nos permitirá controlar posteriormente el proceso de fabricación de guías de onda. Nos hemos centrado en el estudio de los perfiles de los surcos obtenidos en los sustratos de vidrio en el proceso de ablación, con el objetivo de relacionarlos con los parámetros de ablación presentes en la literatura⁴⁴. Distinguiremos los resultados obtenidos para irradiación con el láser **Nd:YAG I**, trabajando a una longitud de onda de 355 nm, y con el láser **Nd:YAG II** (en el capítulo 2 se han indicado las especificaciones de cada uno).

3.4.2.1. Irradiación con el láser Nd:YAG I.

Partiendo de la configuración experimental mostrada en la figura 3.30, hemos realizado la ablación de varios blancos metálicos mediante irradiación con el láser **Nd:YAG I** trabajando a una longitud de onda de 355 nm, asegurando una potencia de trabajo adecuada. En nuestro caso, dichos blancos son láminas planas de diferentes metales: acero, aluminio, cobre, latón y oro. Con esta fuente láser tenemos fijada la frecuencia de repetición, trabajando con la máxima potencia para asegurar la calidad del haz. El único parámetro experimental que podemos variar es la velocidad de desplazamiento de la plataforma. Hemos analizado la cantidad de material eliminado en el proceso de ablación, teniendo en cuenta tanto profundidad del surco excavado en el proceso como el volumen de material

eliminado⁴⁵. Para ello, realizamos medidas del perfil superficial de las muestras irradiadas mediante un Perfilómetro Dektak³, con una resolución vertical de 10 Å.

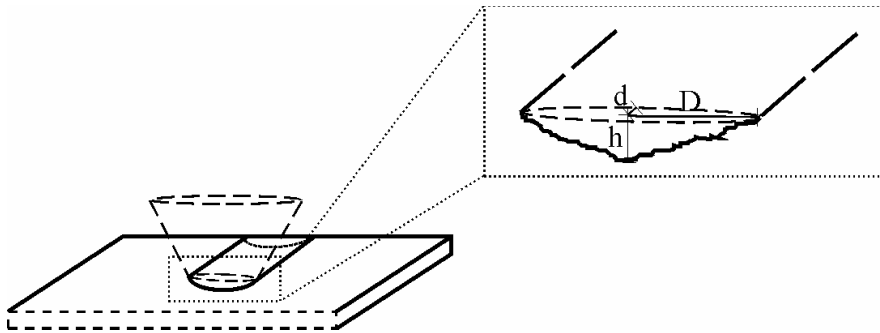


Figura 3.34. Aproximación del volumen de ablación a un cono de base elíptica. Los semiejes de la base son D y d , y la altura del cono corresponde a la profundidad del surco h .

Para el cálculo del volumen de ablación hemos considerado la aproximación que se muestra en la figura 3.34. Al estar focalizado con una lente cilíndrica, el haz láser llega a la superficie del metal con una forma elíptica. De la misma forma, consideramos que la pluma de ablación se proyecta hacia el sustrato de vidrio después de incidir en el blanco metálico en forma de cono con una base elíptica (de semieje mayor D y semieje menor d) y altura h , que corresponde con la profundidad del surco excavado en la muestra de vidrio. Por lo tanto, vamos a tomar como medida del volumen de ablación la cantidad de material contenido en ese cono individual, tal y como se puede ver en la figura 3.34.

En primer lugar, comparamos el resultado obtenido al situar el sustrato de vidrio y la lámina metálica en contacto, o con una separación de 1 mm entre ellos. Los resultados obtenidos para una velocidad de desplazamiento de la plataforma motorizada de 50 mm/min, se muestran en la tabla 3.3. Se observa que la ablación producida cuando el sustrato y el blanco se encuentran en contacto es considerablemente mayor que en el caso en que la separación sea de 1 mm entre ambos. La diferencia se debe a la evolución de la pluma de ablación durante el proceso de irradiación. En el primer caso, con el vidrio y el metal en contacto, la expansión de la pluma hacia los bordes del sustrato se ve reducida de forma importante, provocando la concentración de la ablación en la zona central (figura 3.32). Cuando la separación entre el sustrato y el blanco aumenta, la pluma se encuentra menos constreñida, de forma que se reduce el daño localizado en la zona de focalización. Este comportamiento se puede ver en la figura 3.35, para el caso del blanco de cobre. En las siguientes pruebas se ha decidido situar el sustrato y el blanco en contacto, ya que al provocar efectos más pronunciados en el sustrato nos permitirá distinguir más fácilmente las diferencias existentes en las distintas configuraciones.

Tabla 3.3. Datos de profundidad y volumen de ablación en los vidrios de borosilicato con los diferentes blancos metálicos, en contacto o con un 1 mm de separación.

	Metal	En contacto	Separación: 1 mm
Profundidad (μm)	Acero	10.489	0.0978
	Aluminio	3.370	0.0079
	Oro	1.956	0.1502
	Latón	15.863	0.0822
	Cobre	6.144	0.0914
Volumen de ablación (mm^3)	Acero	3.468e-02	3.233e-04
	Aluminio	1.114e-02	0.261e-04
	Oro	0.647e-02	4.966e-04
	Latón	5.244e-02	2.718e-04
	Cobre	2.031e-02	3.022e-04

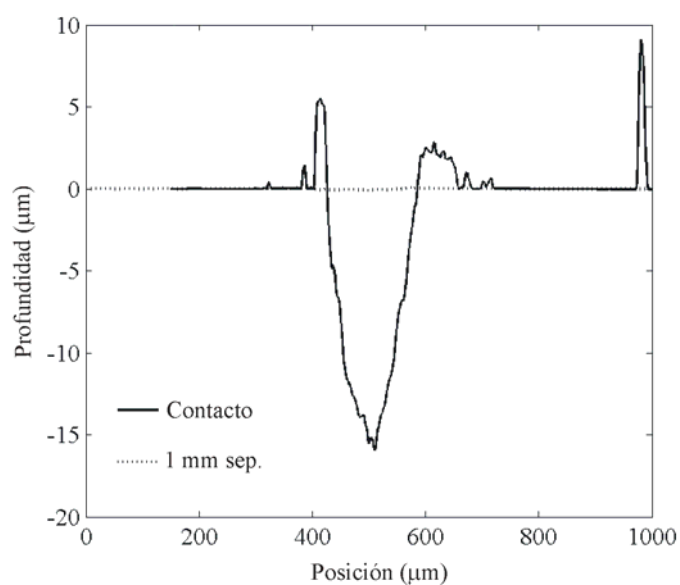


Figura 3.35. Cráter provocado en el sustrato de vidrio después de la ablación de una lámina metálica de latón, con una velocidad de desplazamiento de 50 mm/min. Se muestran los resultados cuando el sustrato y el blanco se sitúan en contacto o con 1 mm de separación entre ambos.

Como se ve en la figura 3.30, la plataforma motorizada permite el desplazamiento del conjunto máscara-muestra en la dirección perpendicular al haz láser incidente. Por tanto es interesante la dependencia del proceso dinámico de ablación con la velocidad transversal. La tabla 3.4 muestra los resultados obtenidas para las muestras irradiadas, con velocidades de desplazamiento de 50, 125, 300 y 500 mm/min. Cuanto menor es la velocidad de desplazamiento mayor es la cantidad de material eliminado en el proceso de ablación, como se ve en la figura 3.36. Este resultado coincide con el hecho de que a menor velocidad transversal, el haz permanece más tiempo en cada intervalo espacial, por lo que es mayor tanto la densidad de energía (cantidad de energía que se concentra en una unidad de superficie, conocida también con el nombre de fluencia) como la irradiancia acumulada en cada zona del blanco irradiada.

Tabla 3.4. Datos de profundidad y volumen de ablación en los vidrios de borosilicato con los diferentes blancos metálicos, para diferentes velocidades de desplazamiento.

	Metal	50 mm/min	125 mm/min	300 mm/min	500 mm/min
Profundidad (μm)	Acero	10.489	1.752	0.555	0.081
	Aluminio	3.370	1.179	0.877	0.036
	Oro	1.956	2.344	0.816	0.013
	Latón	15.863	0.829	1.439	0.382
	Cobre	6.144	4.520	0.669	0.011
Volumen de ablación (mm^3)	Acero	3.468e-02	0.579e-02	1.835e-03	0.269e-03
	Aluminio	1.114e-02	0.390e-02	2.899e-03	0.119e-03
	Oro	0.647e-02	0.775e-02	2.698e-03	0.043e-03
	Latón	5.244e-02	0.274e-02	4.757e-03	1.263e-03
	Cobre	2.031e-02	1.494e-02	2.212e-03	0.036e-03

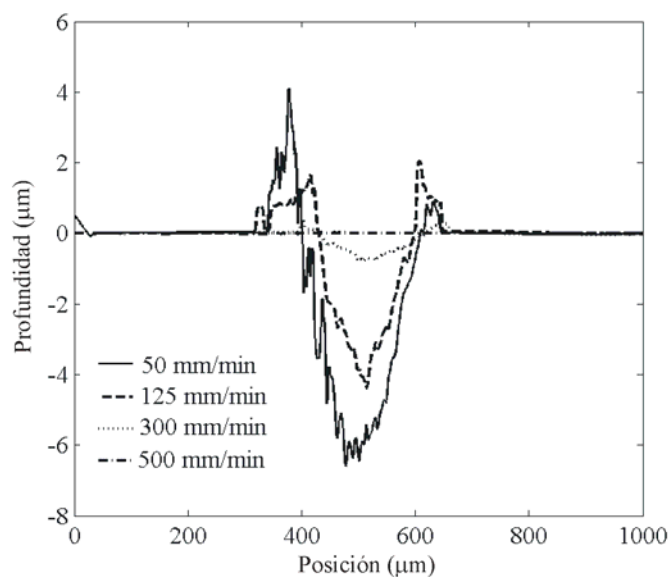


Figura 3.36. Cráter provocado en el sustrato vidrios por ablación de un blanco metálico de latón, para diferentes velocidades de desplazamiento de la plataforma (50, 125, 300 y 500 mm/min).

Para analizar la dependencia del proceso de ablación láser con la acumulación de energía, se puede observar la evolución del volumen de material eliminado con el número de pulsos láser emitidos (figura 3.37). Como la fuente utilizada emite siempre el mismo número de pulsos por segundo (al estar fijada su

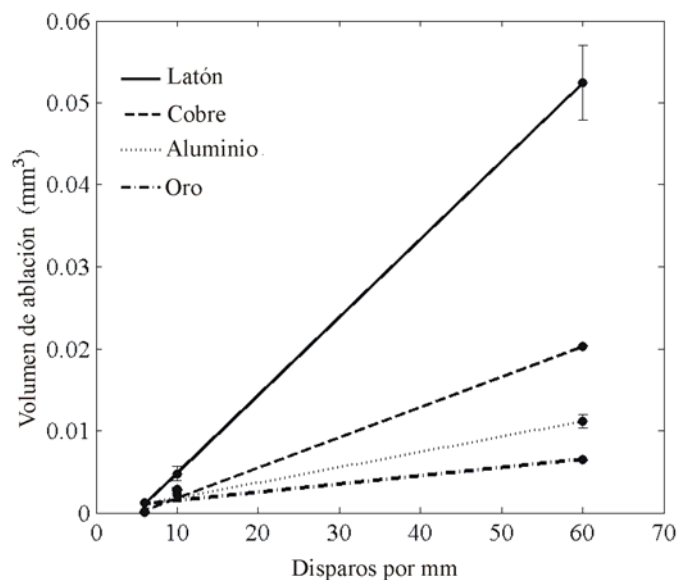


Figura 3.37. Volumen de ablación frente al número de disparos por milímetro para diferentes láminas metálicas.

frecuencia de repetición en 50 Hz), hemos analizado este comportamiento teniendo en cuenta el fenómeno de ablación dinámico con el que hemos trabajado: al variar la velocidad de desplazamiento, el número de pulsos que inciden sobre cada zona del sustrato también varía. Hemos representado el volumen de ablación frente al número de disparos por milímetro y, como era de esperar, se observa un aumento en el daño de material al aumentar el número de pulsos (y, por tanto, la energía con que es irradiado el sustrato). Además, este aumento varía linealmente para todos los blancos metálicos empleados.

Todos los perfiles que se han obtenido son similares, incluyendo dos regiones que se distinguen claramente: un profundo valle, donde el vidrio ha sido excavado por la acción de la pluma de ablación; y dos picos adyacentes que se proyectan fuera de la superficie de la muestra. Este comportamiento ya ha sido descrito en la literatura^{46,47}, y está relacionado con los procesos que aparecen en la interacción entre láser y superficie en la región de los nanosegundos. Como ya se ha mostrado en la figura 3.32, la radiación láser se acumula en el punto central mientras que las partículas arrancadas en el proceso de ablación son expulsadas hacia los laterales. Este último proceso tiene lugar mientras el haz láser se desplaza a lo largo del sustrato, de forma que los residuos se adhieren o incorporan a la superficie del sustrato formando los picos observados.

En el tratamiento de la superficie de un material metálico mediante irradiación láser, varios procesos físicos pueden tener lugar⁴⁶. En primer lugar, la absorción de la energía procedente de la radiación provoca el calentamiento del material. Por lo tanto, la temperatura en la superficie se incrementa pudiendo alcanzar el valor de la transición de fase. En este punto, parte del material se evapora creando un vapor metálico sobre la superficie. Esta nube absorbe parte de la radiación láser, de forma que un pequeño aumento de la irradiancia no provoca cambios importantes en la superficie metálica. La presencia de esta nube provoca el incremento de las colisiones elásticas e inelásticas entre las partículas presentes en el vapor, y entre éstas últimas y las de la red del sólido⁴⁶, produciendo la emisión de fotones o de otras partículas (emisiones termoiónicas). Si continuamos aumentando la intensidad del haz incidente llegaremos a un valor umbral de la irradiancia a partir del cual todas las partículas dentro de este vapor actúan colectivamente, formándose un plasma en la superficie del material. Por lo tanto dos condiciones son necesarias para conseguir la formación del plasma: en primer lugar, la densidad de energía ha de ser suficientemente alta para provocar la evaporación de material de la superficie; en segundo lugar, la intensidad del haz incidente ha de ser suficiente para provocar la ruptura dieléctrica en el vapor metálico generado⁴⁸.

Podemos relacionar la aparición de un plasma en la superficie del metal, con el material eliminado en el proceso de transferencia inducida por láser. Este

comportamiento se observa en la figura 3.38, en la que se representa el volumen de ablación frente a la irradiancia efectiva de cada metal, señalados en la gráfica con una letra mayúscula. Dicha irradiancia efectiva se ha calculado teniendo en cuenta los datos del haz incidente así como la energía absorbida por cada metal, para quedarnos únicamente con la energía que participa en el tratamiento superficial. En la figura se observa un comportamiento diferente entre una región aproximadamente lineal hasta un valor de $5.4 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ y un brusco incremento en el volumen de ablación por encima de este valor. En el caso de los metales de oro, cobre y aluminio, la energía suministrada en estas condiciones provoca simplemente el calentamiento y la fusión de material. Sin embargo, en el caso del latón se supera el umbral de irradiancia y se produce la formación del plasma, que se traduce en un mayor daño del material. Además, este salto abrupto se produce para un valor del producto de la irradiancia por la raíz cuadrada de la anchura de pulso superior a los $4 \cdot 10^4 \text{ Ws}^{1/2}/\text{cm}^2$, que coincide con el valor umbral de formación de plasma presente en la literatura^{46,49}.

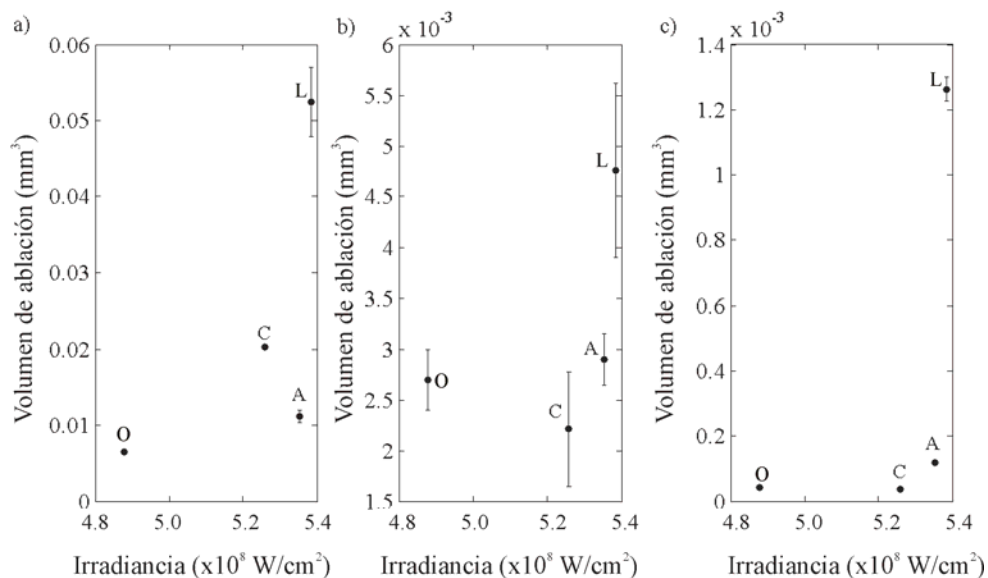


Figura 3.38. Volumen de ablación frente a la irradiancia efectiva para velocidades de desplazamiento de: a) 50 mm/min; b) 300 mm/min; y c) 500 mm/min. La irradiancia para cada metal se indica con la primera letra de su nombre (O, oro; C, cobre; A, aluminio; y L, latón).

3.4.2.2. Irradiación con el láser Nd:YAG II.

Como acabamos de ver, el montaje experimental con el láser Nd:YAG I ofrece poca flexibilidad para estudiar el proceso de ablación. La frecuencia de repetición es fija, teniendo que trabajar con el láser a máxima potencia para evitar

problemas de calidad en el haz. Aún así, hemos obtenido resultados interesantes de ablación a alta potencia. La configuración experimental con el **Nd:YAG II** permite realizar pruebas con diferentes parámetros de irradiación, de forma que se pueden analizar más posibilidades para su aplicación a la fabricación de elementos microópticos. Con esta fuente láser y el montaje mostrado en la figura 3.33, hemos estudiado el proceso de transferencia inducida por láser para blancos de acero, cobre y latón mate. Para ello, se han utilizado de nuevo las imágenes obtenidas en el análisis perfilométrico.

Hemos aprovechado resultados previos de trabajos de marcado de láminas de acero con esta fuente láser para escoger los parámetros de irradiación de partida. En concreto, fijamos la frecuencia de repetición en 30 KHz y la velocidad de desplazamiento del haz en 40 mm/s, variando la potencia de salida del láser entre 3.975 y 7.3 W. El haz se ha focalizado utilizando una lente de distancia focal 100 mm, como se muestra en la imagen del montaje (figura 3.33).

Con estos valores procedimos a la irradiación del sustrato. En la figura 3.39 podemos ver el resultado del proceso de ablación: un surco en el sustrato de

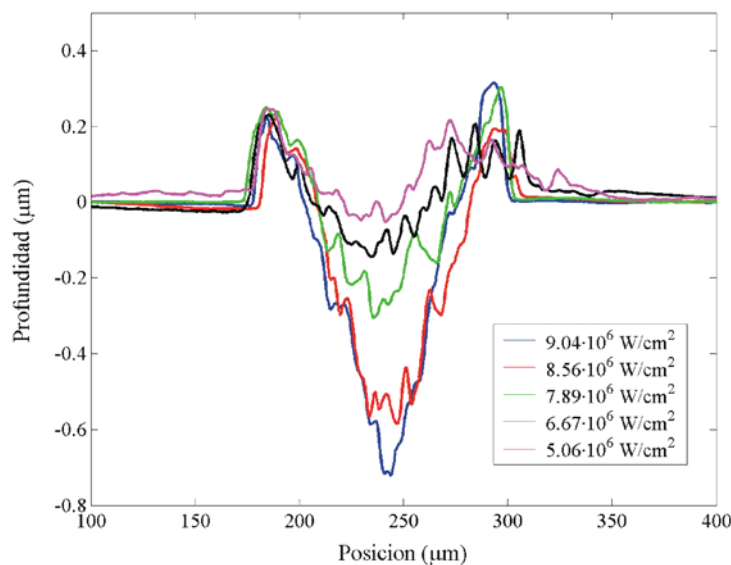


Figura 3.39. Cráter provocado en el sustrato de vidrio bajo irradiación con el láser **Nd:YAG II**, para frecuencia de repetición de 30 KHz, velocidad de desplazamiento de 40 mm/s y diferentes potencias láser.

vidrio. La estructura tiene una apariencia similar a la mostrada en el apartado anterior, con un valle central y los dos picos adyacentes de los residuos del proceso. Como cabría esperar, el daño producido en el vidrio es mayor al aumentar la irradiancia. Este comportamiento se observa más claramente en la figura 3.40, donde se muestra el volumen de material eliminado en el proceso de

ablación. El incremento de la velocidad de desplazamiento del haz provoca una reducción en la cantidad de material extraído del sustrato, ya que al mantener el valor de la irradiancia constante se consigue que el haz incida durante menos tiempo en cada zona del sustrato, disminuyendo de esta forma el efecto de la ablación. Además, la cantidad de material eliminado en el proceso de ablación es inferior a los valores obtenidos con el láser **Nd:YAG I** (el volumen de material eliminado en el apartado anterior era aproximadamente $4 \cdot 10^4 \mu\text{m}^3$). Esta diferencia está relacionada con la irradiancia del haz empleado en cada caso, ya que influye en la cantidad de material que se extrae en el proceso de ablación⁵⁰. Como ya comentamos en el apartado anterior, el valor de este parámetro indica los mecanismos que dominan el proceso de extracción de material. En la literatura se ha especificado que en la región de baja irradiancia ($<3 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ para un láser pulsado de nanosegundos) entran en juego mecanismos puramente térmicos, como la evaporación⁵¹. Como vemos en la figura 3.40, esta es la zona en la que se

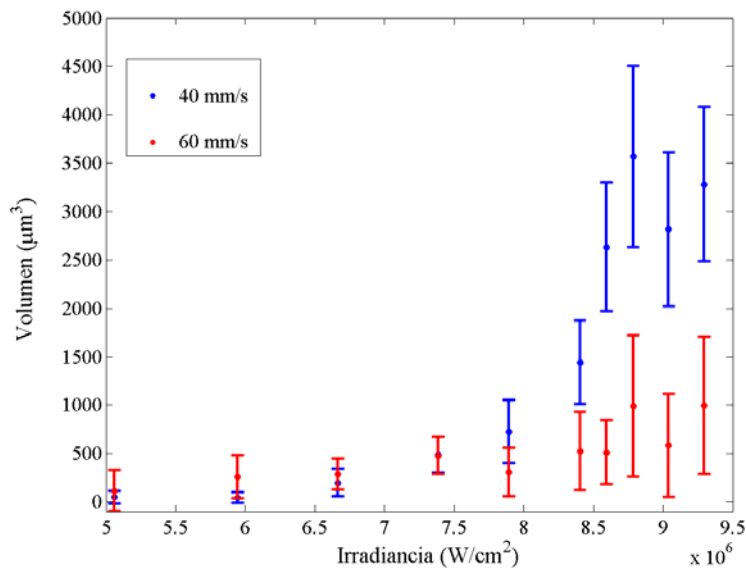


Figura 3.40. Volumen retirado en el proceso de ablación de una lámina de acero para valores de la velocidad de desplazamiento de 40 y 60 mm/s.

encuadra nuestra técnica de transferencia inducida por láser con la segunda configuración experimental. A partir de ese valor de irradiancia (que correspondería al proceso mostrado en el apartado anterior) comienzan a tener relevancia otros efectos no térmicos, llegándose a partir de un valor umbral a la formación de plasma en la superficie del sólido (ver apartado 4.3.2.1). De todas formas, el comportamiento con esta fuente láser puede resultar mucho más

interesante para nuestro objetivo, ya que es importante que el daño superficial sea el menor posible a la hora de fabricar elementos microópticos.

Para el blanco de acero hemos estudiado también el efecto que produce en el sustrato la variación de la frecuencia de repetición (figura 3.41). Para ello se ha irradiado el conjunto blanco-muestra con valores de 10, 20 y 30 KHz manteniendo constante de la intensidad (24 A) y la velocidad del desplazamiento del haz (40 mm/s). Vemos que el volumen de material extraído disminuye cuando aumentamos el número de pulsos emitidos. Este comportamiento se debe a que la energía de cada pulso disminuye con el valor de la frecuencia. Al pasar de 10 a 20 KHz, la energía por pulso se reduce, aproximadamente, a la mitad de su valor, y lo mismo ocurre al pasar de 20 a 30 KHz. Por tanto, el efecto producido en el vidrio por un número “pequeño” de pulsos (cada uno con una energía determinada) es más importante que el producido por un número mayor de pulsos cuya energía individual es bastante más pequeña.

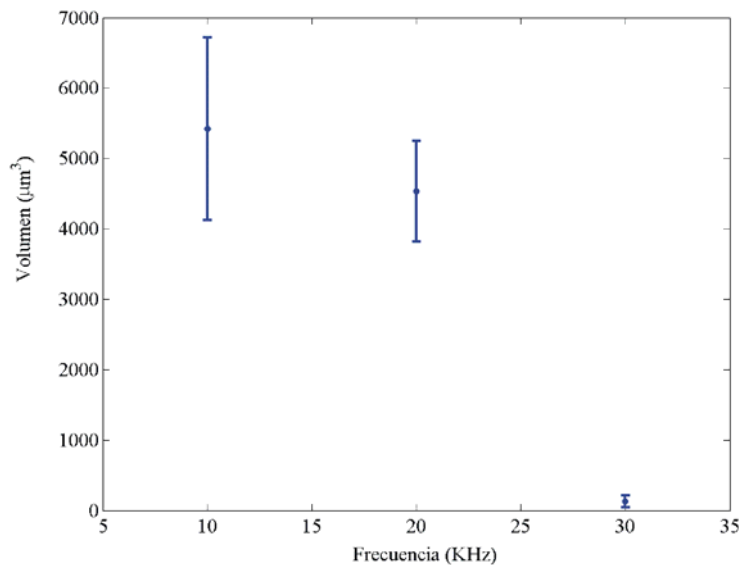


Figura 3.41. Volumen eliminado en el proceso de ablación de una lámina de acero para diferentes frecuencias de repetición.

En segundo lugar, realizamos pruebas de ablación para una lámina de cobre. Comenzamos utilizando los mismos parámetros que en el caso del acero, con una corriente de 24 A, frecuencias de repetición entre 10 y 30 KHz y velocidades de desplazamiento entre 40 y 60 mm/s. Sin embargo, con este blanco no se producía prácticamente ninguna modificación en el vidrio. Aunque a primera vista se observaba una capa metálica depositada en el sustrato, la

posterior limpieza con ácido eliminaba todos los restos y el análisis en el perfilómetro no revelaba la existencia de ningún canal o daño provocado en el vidrio. Con estos resultados decidimos aumentar la densidad de energía del haz reduciendo la frecuencia de repetición (hasta 5 KHz) y aumentando la intensidad (hasta 34 A), para conseguir un mayor impacto en el vidrio. Asimismo, trabajamos con velocidades más bajas (llegando a los 5 mm/s) para que el haz irradiara la zona de interés durante más tiempo. A pesar de llegar prácticamente a los límites del sistema, seguimos sin conseguir provocar ningún daño en el vidrio. Aunque en apariencia la cantidad de residuos depositada era cada vez mayor, después de la limpieza con agua regia (*aqua regia*, formada por ácido nítrico y ácido clorhídrico, en proporción de 1 en 3) eliminábamos todos los restos presentes en el sustrato. El perfil obtenido en todos los casos no se diferenciaba del realizado para el propio vidrio sin irradiar. Este comportamiento tan diferente puede ser debido, entre otros factores, a la diferencia en las propiedades térmicas de estos metales. Como ya hemos comentado, en el rango de irradiancias de trabajo, la extracción de material por ablación se debe fundamentalmente a efectos térmicos⁴⁴. En la literatura⁵² está descrito que la conductividad térmica del acero está en torno a los 14 W/m·K, mientras que para el cobre este valor alcanza los 401 W/m·K. Por tanto, para conseguir el mismo efecto en la lámina de cobre es necesario que el haz láser tenga un valor de irradiancia mucho mayor.

Finalmente, analizamos el proceso para una lámina de latón mate. Al igual que con el blanco anterior, utilizamos también los parámetros iniciales de la ablación de la lámina de acero. En este caso, la irradiación con estos parámetros producía un daño muy importante en el vidrio, llegando a la rotura en algunos casos. Por ello, aumentamos tanto la velocidad de desplazamiento del haz como la frecuencia de repetición. De esta forma conseguimos pulsos de menor energía incidiendo durante un período más breve de tiempo sobre el sustrato. Conseguimos resultados interesantes para valores en torno a 200 KHz y 400 mm/s. En la figura 3.42 podemos ver la apariencia de los cráteres en el sustrato de vidrio. Se han realizado todos con los mismos parámetros de irradiación láser (24 A, 150 KHz y $6.8 \cdot 10^6$ W/cm²) y hemos variado la velocidad de desplazamiento entre 300 y 500 mm/s. Como ya hemos comentado, al aumentar la velocidad disminuye el daño provocado en el vidrio, ya que estamos irradiando el material durante menos tiempo. Los cráteres son menos profundos que el caso del blanco de acero y la cantidad de material eliminado es mucho menor ya que estamos trabajando con valores muy altos tanto en frecuencia como en velocidad. Este comportamiento se observa más claramente en la figura 3.43, donde representamos el volumen de ablación con diferentes velocidades de desplazamiento, siendo la frecuencia de repetición de 200 KHz y la irradiancia

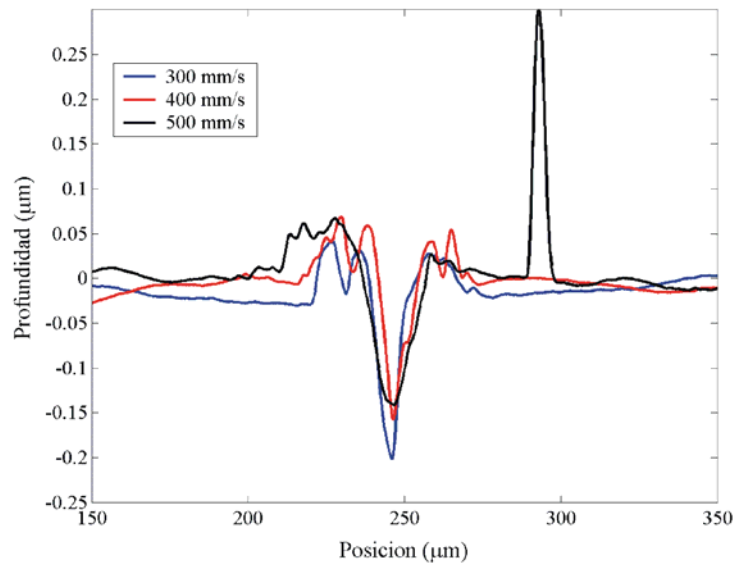


Figura 3.42. Cráter provocado en el sustrato con el blanco de latón para frecuencia de repetición de 150 KHz, irradiancia de $6.8 \cdot 10^6$ W/cm² y diferentes velocidades de desplazamiento.

$7 \cdot 10^6$ W/cm². El volumen eliminado está entre 5 y 15 µm³. Al igual que en la figura 3.42, el daño en el vidrio disminuye al aumentar la velocidad de desplazamiento del haz, aunque debido a las pequeñas cantidades en las que nos movemos, la diferencia es despreciable.

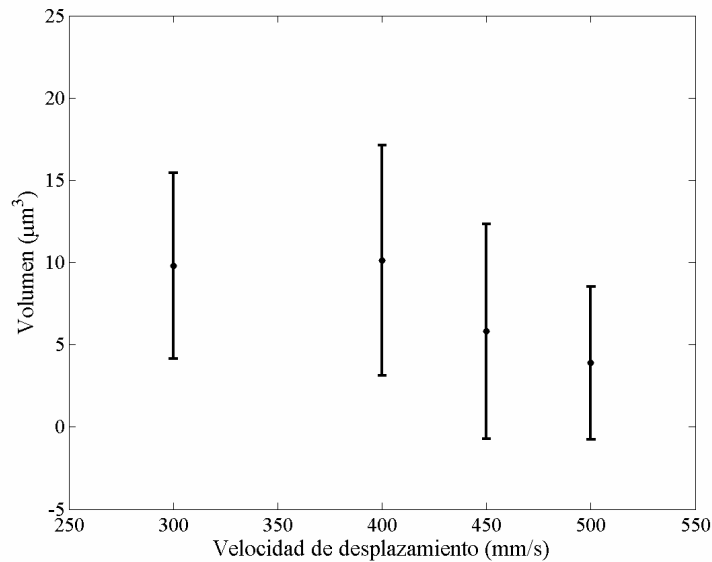


Figura 3.43. Volumen retirado del sustrato en el proceso de ablación de una lámina de latón para diferentes velocidades de desplazamiento y 200 KHz de frecuencia de repetición.

3.4.3. Proceso de fabricación de las redes de difracción.

Como hemos visto en el apartado anterior, la irradiación de los sustratos de vidrio con el láser **Nd:YAG I** provoca daños importantes en el mismo, excavando profundos cráteres y depositando importantes cantidades de residuos de ablación. Este comportamiento se debe a las características de esta fuente láser. En primer lugar, el sistema de bombeo por lámparas de destellos provoca que la calidad del haz sea bastante baja. La emisión no se produce con el típico perfil gaussiano, sino que la potencia del haz se distribuye en una serie de anillos concéntricos en torno a una zona central continua. En segundo lugar, el sistema ofrece poca flexibilidad a la hora de utilizar diferentes configuraciones, ya que no podemos variar parámetros como la potencia o la frecuencia de repetición del haz.

La fabricación de redes de difracción exige que el daño provocado en la superficie del elemento sea mínimo, de forma que no afecte a su posterior uso como elemento difractivo. Por ello se ha utilizado la configuración con el láser **Nd:YAG II**, que permite controlar de forma más efectiva el proceso de ablación. La posibilidad de trabajar con diferencias potencias, frecuencias de repetición y velocidades de desplazamiento abre un gran abanico de posibilidades, de forma que es posible escoger la configuración final más adecuada para cada sustrato y cada blanco.

El objetivo es analizar la fabricación de redes de difracción en sustratos de bajo coste y disponibles comercialmente. Por ello, hemos utilizado vidrios sodocálcicos y vidrios de borosilicato. La configuración experimental se ha mostrado en la figura 3.33. El blanco metálico se sitúa por debajo del sustrato de vidrio en la mesa de trabajo, estando ambos en contacto. El haz proveniente de la fuente láser se focaliza sobre dicho blanco, de forma que en su camino pasa a través del sustrato (que debe ser transparente a la longitud de onda de irradiación). Una lente de campo plano actúa como homogeneizador de haz, consiguiendo que la densidad de potencia sea homogénea en el área de trabajo. Acoplado al cabezal del láser se dispone de un sistema de galvanómetros que permite desplazar el haz para dibujar el patrón de la red de difracción definido en el software informático sobre el conjunto sustrato-blanco. En este proceso, la pluma de ablación provoca que iones provenientes de los blancos metálicos se incorporen al sustrato de vidrio. Estos iones modifican la composición y propiedades (el índice de refracción, entre otros) de las zonas deseadas del sustrato formándose la red de difracción de fase. Una vez terminada la exposición al haz láser, las superficies de las muestras deben ser tratadas para eliminar los residuos de ablación depositados en el proceso. Para ello, se introducen los vidrios en un baño de *aqua regia* durante 1 hora.

Como indicamos en el capítulo 2, el software de control del láser **Nd:YAG II** también permite controlar los valores deseados de los parámetros de irradiación (potencia, velocidad de desplazamiento, frecuencia de repetición,...). Uno de los parámetros fundamentales de la técnica que hemos empleado es el factor de superposición, que indica en qué porcentaje se solapan los diferentes barridos que ha de realizar el haz para completar el patrón definido en el software. Los diferentes valores de todos estos parámetros nos han permitido obtener redes de difracción de características deseadas.

3.4.4. Caracterización de las redes: medida de la eficiencia.

Para la medida de la eficiencia de las redes grabadas en los sustratos de vidrio hemos utilizado el procedimiento mostrado en el apartado 3.3.3, utilizando de nuevo un láser de He-Ne emitiendo en una longitud de onda de 632.8 nm. Hemos grabados redes en sustratos de vidrios sodo-cálcicos y de borosilicato, utilizando como blancos láminas de latón mate y acero. Los parámetros de irradiación han sido escogidos en cada caso teniendo en cuenta las pruebas preliminares de ablación. Para el acero, hemos utilizado intensidades en torno a los 24 A, velocidades de desplazamiento en torno a los 50 mm/s y frecuencias de repetición de 30 KHz (donde el daño en el vidrio era menor). Para el blanco de latón mate hemos utilizado el mismo valor de intensidad, aumentando hasta 400 mm/s y 200 KHz los valores de velocidad y frecuencia. En todos los casos, se han escogido diferentes valores del factor de superposición, entre el 20 y el 90%.

Las redes con mayor eficiencia son las fabricadas en sustratos de vidrio sodo-cálcicos y blanco de latón mate. En la figura 3.44 se muestra la eficiencia de los órdenes de difracción para los diferentes valores de superposición. Tenemos redes de buena calidad para factores de superposición entre 20 y 50 % (alcanzando el primer orden de difracción un máximo de eficiencia del 18 % para un valor del factor de superposición 40%). A medida que aumentamos este factor, los barridos del haz se solapan de forma que no se dibuja un buen patrón sobre el sustrato de vidrio, sino que tiene lugar una deposición continua de material metálico. De esta forma se explica la baja calidad de las redes para valores altos de este parámetro (incluso por encima del 80% no se observa difracción de luz). Este comportamiento se observa más claramente en la figura 3.45, donde se muestra únicamente los valores de eficiencia para el primer orden de difracción.

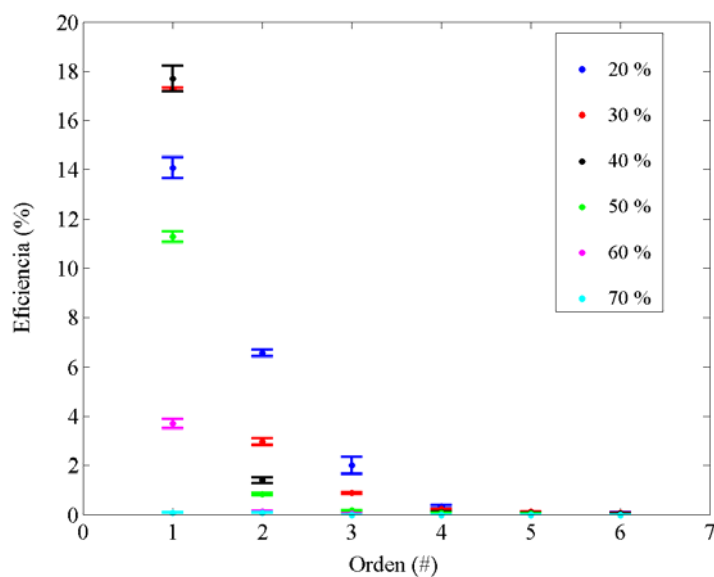


Figura 3.44. Eficiencia de difracción para las redes grabadas en vidrio sodo-cálcico con blanco de latón mate y parámetros láser de 24 A, 200 KHz y 450 mm/s, para diferentes valores del factor de superposición.

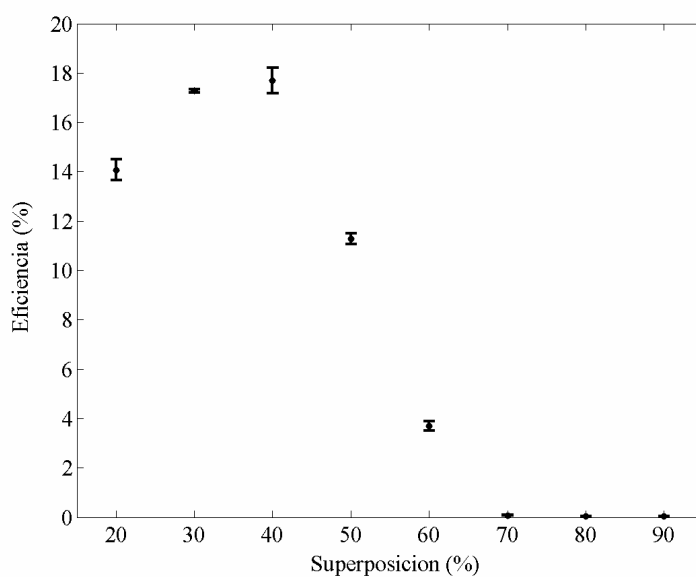


Figura 3.45. Eficiencia del primer orden de difracción para los diferentes valores del factor de superposición.

Hemos caracterizado también las redes fabricadas en sustratos de borosilicato con el blanco de latón mate. La eficiencia de los órdenes sigue una distribución similar al caso anterior, siendo máxima para el orden ± 1 y

decreciendo para órdenes superiores. Sin embargo, los valores de eficiencia son mucho menores. El máximo se obtiene para superposiciones de 20, 30 y 40%, ya que tienen un valor de eficiencia similar, en torno al 0.30 %. En la figura 3.46 podemos ver la comparación con los vidrios sodo-cálcicos, donde se observa la gran diferencia de calidad de las diferentes redes.

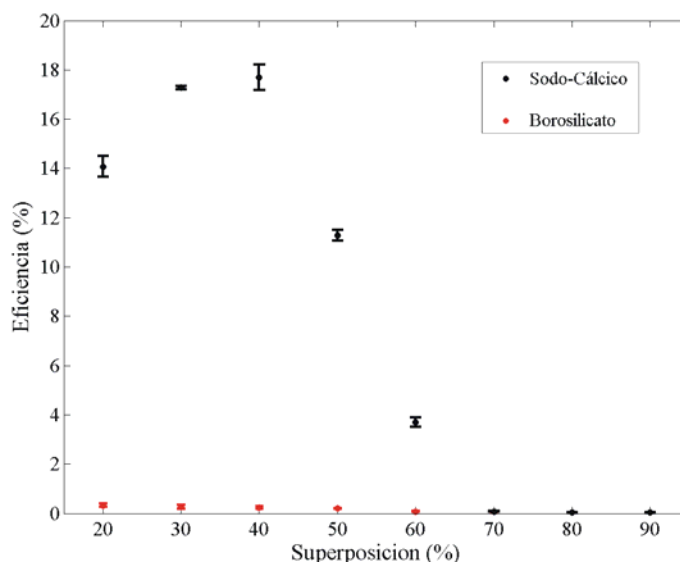


Figura 3.46. Comparación de la eficiencia del primer orden de difracción en los sustratos sodo-cálcicos y borosilicatados, para los diferentes factores de superposición.

Finalmente, diremos que las redes grabadas con el blanco de acero presentaban muy baja calidad. Los diferentes órdenes eran muy poco intensos, y presentaban alrededor un halo de luz difusa, lo que imposibilitaba la medida de la eficiencia con el experimento utilizado.

3.4.5. Caracterización de las redes: análisis mediante microscopía confocal.

La microscopía confocal es una técnica que permite obtener imágenes tridimensionales del objeto a analizar. Utiliza un láser como fuente y un sistema de lentes y diafragmas para focalizar la luz sobre un punto de la muestra. La imagen se obtiene a partir de los datos obtenidos al realizar el barrido de la muestra con la fuente luminosa. Además permite obtener fotografías de la superficie de la muestra que se desea analizar. Con las imágenes obtenidas

mediante esta técnica vamos a analizar los resultados obtenidos en el apartado anterior.

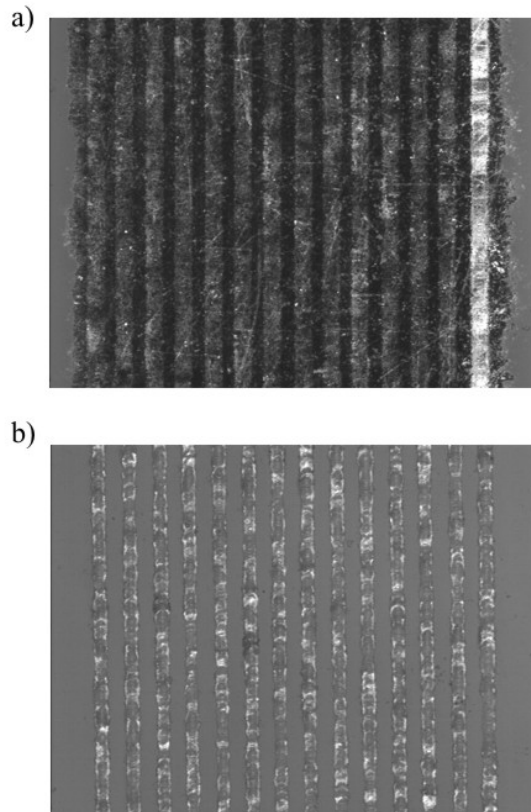


Figura 3.47. Imagen de una red grabada en sustrato sodo-cálcico con parámetros 24 A, 200 KHz y 450 mm/s: a) antes del proceso de limpieza; y b) después de eliminar los residuos superficiales.

En primer lugar podemos ver el efecto que produce la etapa de lavado con *aqua regia* en las muestras fabricadas. En la figura 3.47 podemos ver la imagen de una red antes y después de su limpieza. En la muestra recién irradiada se puede ver una gran cantidad de residuos y depósitos metálicos en la superficie del sustrato. El proceso de lavado con ácido retira todo el material sobrante, dejando la zona tratada limpia de residuos de forma que se aprecia con claridad la red que hemos grabado. Es muy importante realizar esta etapa previamente a la medida de la eficiencia, para evitar la pérdida de luz por procesos de difusión en los residuos, que no están depositados de forma homogénea.

En los apartados anteriores hemos comentado la diferencia en el comportamiento de las redes dependiendo de un factor: la superposición de los

barridos realizados con el haz. Hemos visto que para valores altos de este parámetro, no obtenemos ningún tipo de red de difracción. En la figura 3.48 podemos ver las imágenes de dos redes grabadas con los mismos parámetros de irradiación (24 A, 200 KHz y 450 mm/s) pero diferentes factores de superposición: la primera con el 40% (que era la que presentaba máxima eficiencia en la gráfica 3.45) y otra con el 90%. Se observa claramente la diferencia. En el primer caso, la distancia entre los barridos es suficiente para modificar las propiedades de ciertas zonas del sustrato, formando las franjas de una red de difracción. Sin embargo, para el 90% se observa únicamente un continuo de material depositado. Esta imagen explica los resultados de la eficiencia obtenidos para valores altos de la superposición: no existe ningún patrón que difracte la luz.

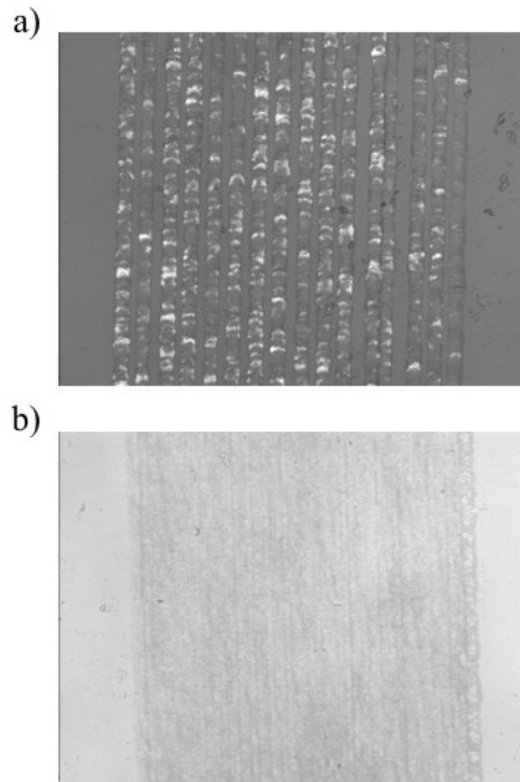


Figura 3.48. Patrón obtenido en los sustratos de vidrio sodo-cálcico para dos redes fabricadas con parámetros 24 A, 200 KHz y 450 mm/s y factores de superposición: a) 40%; y b) 90%.

En la figura 3.49 podemos ver la imagen tridimensional de una de estas redes, con factor de superposición del 20 %. A diferencia de lo que ocurría para

los elementos grabados por irradiación UV a través de una máscara de fase, en este caso estamos marcando surcos en el sustrato de vidrio. Para los mismos parámetros de irradiación, cuanto menor sea el factor de superposición que tengamos la profundidad de los surcos es mucho mayor. Este comportamiento es debido a que para valores bajos de superposición los barridos del haz se realizan de forma mucho más limpia, sin que el material extraído al marcar un surco se deposite sobre el siguiente. A medida que aumentamos el factor de superposición el daño al sustrato y los depósitos de residuos entre surco y surco son mucho mayores, de forma que el perfil superficial resulta mucho menos claro (figura 3.50).

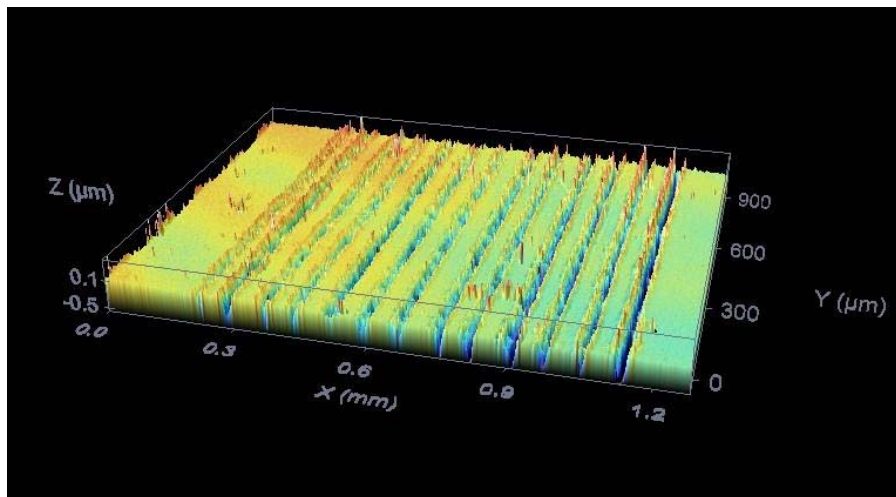


Figura 3.49. Imagen tridimensional obtenida mediante microscopía confocal de una red fabricada con parámetros 24 A, 200 KHz y 450 mm/s y factor de superposición del 20%.

Hemos analizado también las muestras fabricadas con el blanco de acero, que tenían muy baja calidad. La figura 3.51 nos muestra una imagen tridimensional de la superficie del vidrio y una vista superior del mismo, grabado con los parámetros óptimos para este blanco. El vidrio no presenta un patrón claro, sino que está bastante dañado después de la irradiación. En la vista superior se puede intuir la presencia de franjas en algunas zonas del sustrato, aunque es una imagen de pobre claridad.

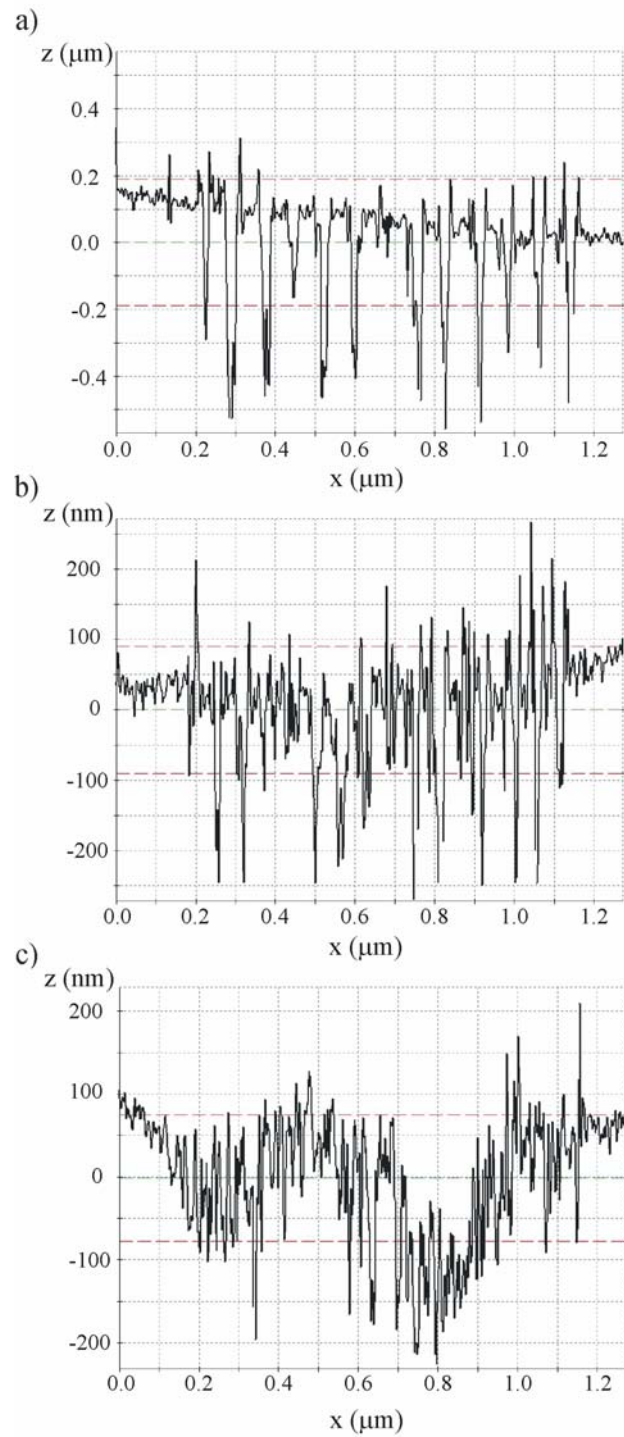


Figura 3.50. Perfil obtenido mediante microscopía confocal de tres redes fabricadas con parámetros 24 A, 200 KHz y 450 mm/s y factores de superposición: a) 20%; b) 40 %; y c) 70%.

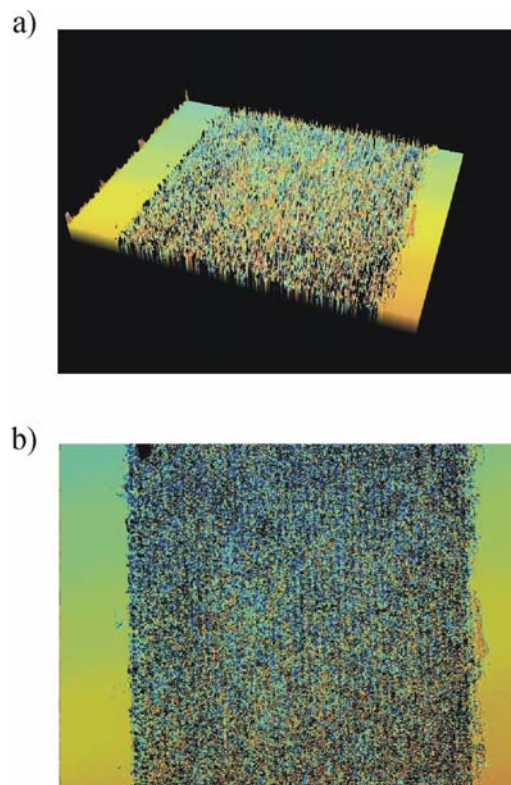


Figura 3.51. Imagen mediante microscopía confocal de las muestras en sustrato de vidrio sodocálcico y blanco de acero: a) imagen tridimensional; y b) vista superior.

3.4.6. Caracterización de las redes: análisis del período.

A partir de las imágenes que hemos realizado mediante microscopía confocal hemos obtenido el período de las redes fabricadas con esta técnica, midiendo la distancia entre franjas consecutivas de la red. Se han analizado los patrones obtenidos para diferentes metales, valores de potencia, frecuencias de repetición,... sin tener en cuenta la eficiencia de las mismas. El resultado obtenido se muestra en la figura 3.52. El período de las redes sólo depende del factor de superposición de las líneas dibujadas por el haz láser, disminuyendo de forma lineal al aumentar éste. Los valores de período son independientes de los demás parámetros del láser, y van desde las 76 micras para un factor del 20% hasta las 30 micras para una superposición del 70 %, aproximadamente. Como ya hemos comentado, para factores de superposición superiores no existe ningún patrón grabado en el sustrato de vidrio.

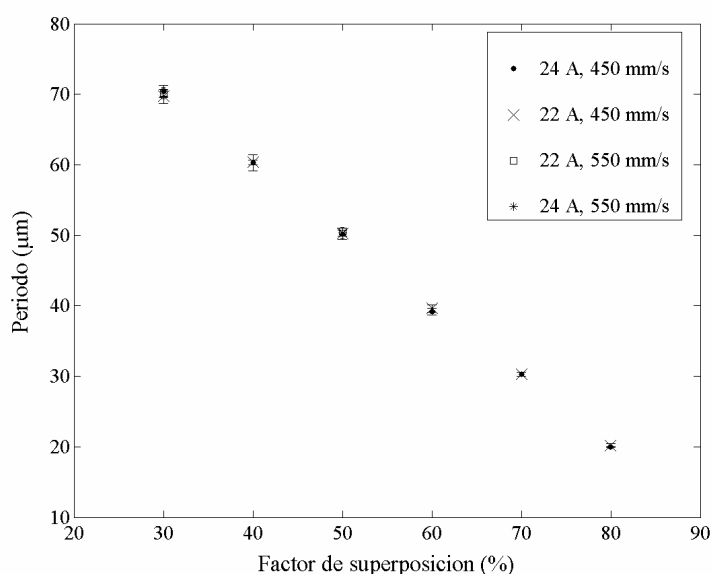


Figura 3.52. Período de las redes grabadas para diferentes potencias y velocidades de desplazamiento del haz láser.

3.4.7. Caracterización de las redes: análisis mediante microscopía electrónica.

Con la técnica de transferencia inducida por láser hemos fabricado redes de difracción en sustratos de vidrio. Ya se ha comentado que, durante el tratamiento mediante láser, partículas procedentes del blanco se incorporan al sustrato, de forma que se altera la composición original del mismo en la zona irradiada. Para comprobar que la composición del vidrio ha sido modificada en el proceso, hemos recurrido a la microscopía electrónica de barrido para analizar los elementos químicos presentes en las zonas de interés. Al igual que con las redes fabricadas con la máscara de fase, se ha utilizado el modelo LEO-435VP. Este microscopio incluye un sistema de Microanálisis EDX, que permite detectar elementos químicos a partir del berilio.

Hemos analizado una red de difracción grabada sobre un sustrato de vidrio sodo-cálcico tratado con un blanco de latón mate, con los parámetros más adecuados para este material (24 A, 200 KHz y 450 mm/s). Se ha escogido la zona irradiada con un parámetro de superposición del 90% para asegurar que toda la superficie haya sido modificada (ver figura 3.48 b)). El resultado del análisis EDX se muestra en la figura 3.53. Además de los picos de los elementos que conforman el vidrio (como el Si, O, Na, Ca, Mg, Al,..., ver apartado 2.3.1), se

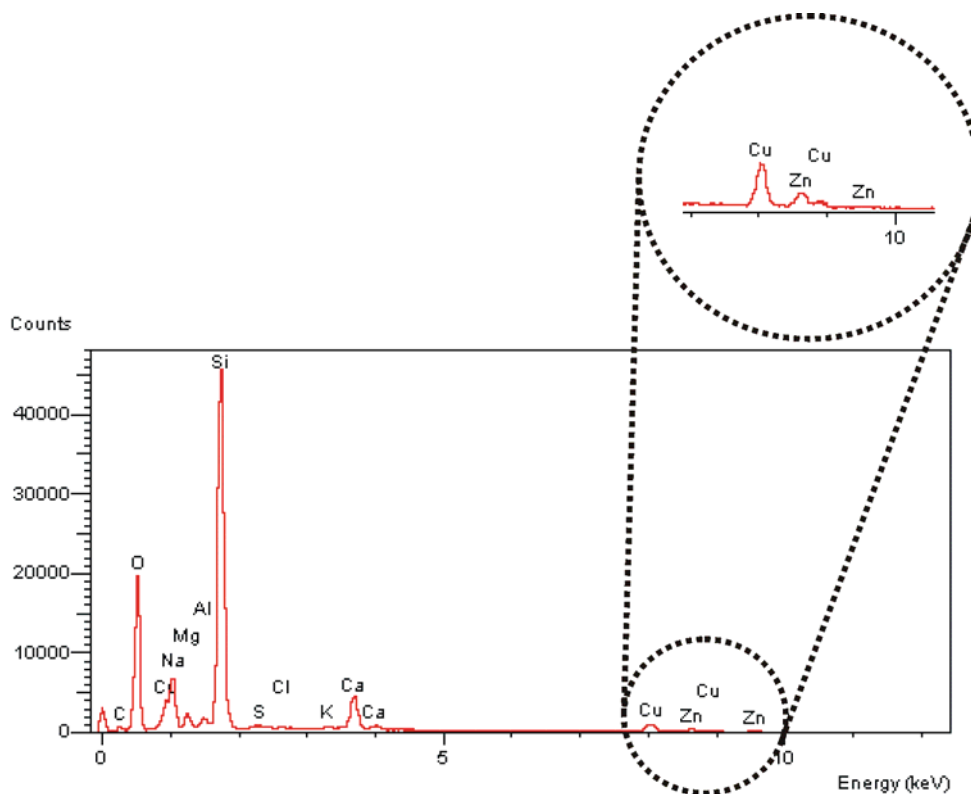


Figura 3.53. Análisis de la muestra después de la ablación de una lámina de latón.

observa la presencia de picos de cobre (Cu) y zinc (Zn), elementos que no forman parte del vidrio original y que proceden del blanco metálico después del proceso de irradiación (el latón es una aleación de cobre y zinc). El sistema EDX permite realizar también un mapa de composición, analizando la presencia del elemento deseado en la superficie de la muestra. Si no tenemos en cuenta el ruido de fondo del sistema (que provoca que aparezcan puntos donde no debería), se observa la presencia de cobre en la zona irradiada. Al comparar el mapa de composición con la imagen de la muestra se puede ver claramente la acumulación de puntos en la zona central, que corresponde a la zona donde ha incidido la pluma de ablación procedente de la lámina metálica (ver figura 3.54 a)). Ocurre lo mismo con el análisis realizado con el zinc (ver figura 3.54 b)), aunque la cantidad de partículas depositadas de este elemento es mucho menor.

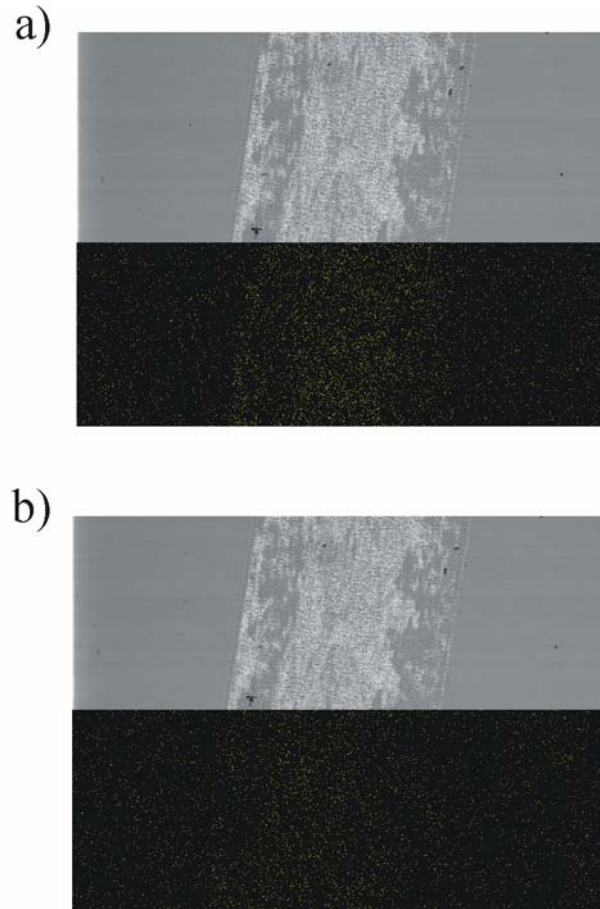


Figura 3.54. Mapa de composición de la zona irradiada del sustrato. Se muestra la presencia de: a) cobre; y b) zinc.

3.5. Conclusiones.

En este capítulo hemos utilizado dos métodos para fabricar redes de difracción en sustratos de vidrio mediante irradiación láser. En primer lugar, hemos aprovechado la sensibilidad de los vidrios de plomo a la luz ultravioleta para transferir el patrón presente en una máscara comercial de fase a este tipo de sustratos. Se han utilizado dos configuraciones experimentales: estática (irradiación directa del sustrato a través de la máscara) y dinámica (concentrando el haz con una lente cilíndrica y desplazando el conjunto máscara-muestra en una dirección perpendicular a éste). Hemos trabajado con una distancia de separación de $150\ \mu\text{m}$ entre máscara y muestra para evitar el deterioro de la primera. La máxima eficiencia del primer orden se obtiene para un tiempo de exposición de 120 s en configuración estática (en torno al 4%) y para una velocidad de desplazamiento de 200 mm/min en configuración dinámica (el 6.5%, aproximadamente), trabajando en ambos casos con la máxima potencia del láser

(0.50 W). El estudio mediante microscopía AFM ha revelado la existencia de una red secundaria, más importante cuanto mayor es el tiempo de exposición al haz láser. Esta estructura secundaria disminuye la calidad de las redes como elementos difractivos.

En segundo lugar, hemos utilizado el láser para transferir el material arrancado en la ablación de un blanco metálico a un sustrato de vidrio. El control de los parámetros del láser nos ha permitido modificar ciertas zonas del sustrato para fabricar una red de difracción. Se han estudiado varios blancos metálicos y sustratos de vidrio. Los mejores resultados se han obtenido para la ablación de blancos de latón mate en sustratos de vidrio sodo-cálcico, en los que hemos conseguido una eficiencia del primer orden de difracción del 18%. El análisis mediante microscopía confocal ha mostrado que el período de las redes depende únicamente del solapamiento entre los diferentes barridos que realiza el haz láser. El microanálisis EDX ha revelado la presencia de elementos químicos del blanco metálico incorporados al sustrato de vidrio.

En ambos casos, hemos realizado un estudio previo de los métodos para diferentes materiales, configuraciones experimentales y parámetros del láser, con el fin de conocer las condiciones de trabajo más adecuadas en cada caso para la fabricación de las redes de difracción.

Referencias

- [1] J. Turunen and F. Wyrowski, eds., “Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications”, Akademie Verlag (Berlin, Germany, 1997).
- [2] R.D. Boyd, J.A. Britten, D.E. Decker, B.W. Shore, B.C. Stuart, M.D. Perry and L. Li, “High-efficiency metallic diffraction gratings for laser applications”, *Appl. Opt.* **34**, 1697-1706 (1995).
- [3] K. Hehl, J. Bischoff, U. Mohaupt, M. Palme, B. Schnabel, L. Wenke, R. Bödefeld, W. Theobald, E. Welsch, R. Sauerbrey and H. Heyer, “High-efficiency dielectric reflection gratings: design, fabrication, and analysis”, *Appl. Opt.* **38**, 6257-6271 (1999).
- [4] F. Canova, R. Clady, J.-P. Chambaret, M. Flury, S. Tonchev, R. Fechner and O. Parriaux, “High-efficiency, broad band, high-damage threshold high-index gratings for femtosecond pulse compression”, *Opt. Express* **15**, 15324-15334 (2007).

- [5] A. Shemer, D. Mendlovic, Z. Zalevsky, J. Garcia and P. Garcia Martinez, "Superresolving optical system with time multiplexing and computer decoding", *Appl. Opt.* **38**, 7245-7251 (1999).
- [6] R.A. Lee, "Micro-Technology for Anti-Counterfeiting", *Microelectron. Eng.* **53**, 513-516 (2000).
- [7] P.W. Leech and R.A. Lee, "Hot embossing of grating-based optically variable images in thermoplastic acrylic lacquer", *J. Mater. Sci.* **42**, 4428-4434 (2007).
- [8] P.W. Leech, B.A. Sexton, R.J. Marnock and F. Smith, "Fabrication of hologram coins using electron beam lithography", *Microelectron. Eng.* **71**, 171-176 (2004).
- [9] J.F. Brennan III, "Broadband fiber Bragg gratings for dispersion management", *J. Opt. Fiber Commun. Rep.* **2**, 397-434 (2005).
- [10] R.J. Campbell and R. Kashyap, "The properties and applications of photosensitive germanosilicate fibre", *Int. J. Optoelectron.* **9**, 33-57 (1994).
- [11] A.D. Kersey, M.A. Davis, H.J. Patrick, M. LeBlanc, K.P. Koo, C.G. Askins, M.A. Putnam and E.J. Friebele, "Fiber grating sensors", *J. Lightwave Technol.* **15**, 1442-1463 (1997).
- [12] V. Bhatia, "Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing", *Opt. Express* **4**, 457-466 (1999).
- [13] V. Bhatia and A.M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors", *Opt. Lett.* **21**, 692-694 (1996).
- [14] J.W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", 3th Ed., Roberts & Company Publishers (Greenwood Village, U.S.A., 2004).
- [15] E. Hecht and A. Zajac, "Óptica", Addison-Wesley Iberoamericana, S.A. (Wilmington, Delaware, United States of America, 1986).
- [16] G. Meltz, W.W. Morey and W.H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", *Opt. Lett.* **14**, 823-825 (1989).

- [17] P.G. Kryukov, Yu.V. Larionov, A.A. Rybaltovskii, K.A. Zagorul'ko, A. Dragomir, D.N. Nikogosyan and A.A. Ruth, "Long-period fibre grating fabrication with femtosecond pulse radiation at different wavelengths", *Microelectron. Eng.* **69**, 248-255 (2003).
- [18] L. Zhang, H. Zhang, J. Wang, J. Zheng, W. Zheng and Y. Zhang, "Photosensitivity in GeO₂-SiO₂ glasses and optical waveguides", *Mater. Lett.* **60**, 3610-3613 (2006).
- [19] C. Montero, C. Gomez-Reino and J.L. Brebner, "Planar Bragg gratings made by excimer-laser modification of ion-exchanged waveguides", *Opt. Lett.* **24**, 1487-1489 (1999).
- [20] A. Favre, E. Lee, V. Apostolopoulos, C.B.E. Gawith, C.-Y. Tai, E. Taylor, Y. Kondo and F. Koizumi, "Fabrication and characterization of UV-written channel waveguides in Bi₂O₃-based glass", *Opt. Mater.* **27**, 7-13 (2004).
- [21] X.-C. Long and S.R.J. Brueck, "Large photosensitivity in lead-silicate glasses", *Appl. Phys. Lett.* **74**, 2110-2112 (1999).
- [22] H. Jia, G. Chen and W. Wang, "UV irradiation-induced Raman spectra changes in lead silicate glasses", *Opt. Mater.* **29**, 445-448 (2006).
- [23] C. Contardi, E.R. Taylor and A. Fu, "Study of UV-written channels in lead silicate glasses", *J. Non-Cryst. Solids* **291**, 113-120 (2001).
- [24] H. Jia, G. Chen, Z. Hou, L. Liu, W. Wang, M. Affatigato and S. Feller, "UV-visible absorption changes of lead silicate glasses after UV laser irradiation", *J. Non-Cryst. Solids* **319**, 322-326 (2003).
- [25] X.-C. Long and S.R.J. Brueck, "Composition dependence of the photoinduced refractive-index change in lead silicate glasses", *Opt. Lett.* **24**, 1136-1138 (1999).
- [26] H. Jia, G. Chen and W. Wang, "Refractive index and absorption spectra changes induced by UV irradiation in lead silicate glasses", *J. Non-Cryst. Solids* **347**, 220-223 (2004).

- [27] K.O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D.C. Johnson and J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask", *Appl. Phys. Lett.* **62**, 1035-1037 (1993).
- [28] E.J. Thompson, E.D. Brass, K. Samuel, S.R. Bullock, J. Lindesay and D.R. Lyons, "Formation of phase gratings on the end of gradient-index lenses with ultraviolet ablation at 193 nm", *Appl. Opt.* **38**, 6494-6497 (1999).
- [29] P.E. Dyer, R.J. Farley and R. Giedl, "Analysis of grating formation with excimer laser irradiated phase mask", *Opt. Comm.* **115**, 327-334 (1995).
- [30] J. Bohandy, B.F. Kim and F.J. Adrian, "Metal deposition from a supported metal film using an excimer laser", *J. Appl. Phys.* **60**, 1538-1539 (1986).
- [31] K. Kordás, K. Bali, S. Leppävuori, A. Uusimäki and L. Nánai, "Laser direct writing of copper on polyimide surfaces from solution", *Appl. Surf. Sci.* **154–155**, 399-404 (2000).
- [32] A.C. Tien, Z.S. Sacks and F.J. Mayer, "Precision laser metallization", *Microelectron. Eng.* **56**, 273-279 (2001).
- [33] H. Yamada, T. Sano, T. Nakayama and I. Miyamoto, "Optimization of laser-induced forward transfer process of metal thin films", *Appl. Surf. Sci.* **197–198**, 411-415 (2002).
- [34] J. Bohandy, B.F. Kim, F.J. Adrian and A.N. Jette, "Metal deposition at 532 nm using a laser transfer technique", *J. Appl. Phys.* **63**, 1158-1162 (1988).
- [35] T. Sano, H. Yamada, T. Nakayama and I. Miyamoto, "Experimental investigation of laser induced forward transfer process of metal thin films", *Appl. Surf. Sci.* **186**, 221-226 (2002).
- [36] A. Piqué, D.B. Chrisey, R.C.Y. Auyeung, J. Fitz-Gerald, H.D. Wu, R.A. McGill, S. Lakeou, P.K. Wu, V. Nguyen and M. Duignan, "A novel laser transfer process for direct writing of electronic and sensor material", *Appl. Phys. A* **69**, S279-S284 (1999).
- [37] I.A. Konovalov and P.R. Herman, "Ablation-induced stresses in fused silica by 157-nm F₂-laser irradiation", in *Materials Research Society Symposium, Proceedings* **617**, J331-J336 (2000).

- [38] J. Ihlemann and B. Wolff-Rottke, "Excimer laser micro machining of inorganic dielectrics", *Appl. Surf. Sci.* **106**, 282-286 (1996).
- [39] P.E. Dyer, R.J. Farley, R. Giedl and D.M. Karnakis, "Excimer laser ablation of polymers and glasses for grating fabrication", *Appl. Surf. Sci.* **96-98**, 537-549 (1996).
- [40] G. Allcock, P.E. Dyer, G. Elliner and H.V. Snelling, "Experimental observations and analysis of CO₂ laser-induced microcracking of glass", *J. Appl. Phys.* **78**, 7295-7303 (1995).
- [41] A. Salleo, T. Sands and F.Y. Génin, "Machining of transparent materials using an IR and UV nanosecond pulsed laser", *Appl. Phys. A* **71**, 601-608 (2000).
- [42] S. Nikumb, Q. Chen, C. Li, H. Reshef, H.Y. Zheng, H. Qiu and D. Low, "Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers", *Thin Solid Films* **477**, 216-221 (2005).
- [43] A. Salleo, T. Sands and F.Y. Génin, "Machining of transparent materials using an IR and UV nanosecond pulsed laser", *Appl. Phys. A* **71**, 601-608 (2000).
- [44] J.H. Yoo, O.V. Borisov, X. Mao and R.E. Russo, "Existence of Phase Explosion during Laser Ablation and Its Effects on Inductively Coupled Plasma-Mass Spectroscopy", *Anal. Chem.* **73**, 2288-2293 (2001).
- [45] A. Castelo, D. Nieto, C. Bao, M.T. Flores-Arias, M.V. Pérez, C. Gómez-Reino, C. López-Gascón and G.F. de la Fuente, "Laser backwriting process on glass via ablation of metal targets", *Opt. Comm.* **273**, 193-199 (2007).
- [46] H.-G. Rubahn, "Laser Applications in Surface Science and Technology", John Wiley & Sons, Ltd. (Baffins Lane, West Sussex, United Kingdom, 1999), cap 5.
- [47] B. Sallé, C. Chaléard, V. Detalle, J.L. Lacour, P. Mauchien, C. Nouvellon and A. Semerok, "Laser ablation efficiency of metal samples with UV laser nanosecond pulses", *Appl. Surf. Sci.* **138-139**, 302-305 (1999).
- [48] S. Petzoldt, J. Reif and E. Matthias, "Laser plasma threshold of metals", *Appl. Surf. Sci.* **96-98**, 199-204 (1996).

[49] A. Sappey and N. Nogar, "Diagnostic Studies of Laser Ablation for Chemical Analysis", in *Laser Ablation*, J.C. Miller, ed., Springer-Verlag (Berlin, Germany, 1994).

[50] S.H. Jeong, O.V. Borisov, J.H. Yoo, X.L. Mao and R.E. Russo, "Effects of Particle Size Distribution on Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Signal Intensity during Laser Ablation of Glass Samples", *Anal. Chem.* **71**, 5123-5130 (1999).

[51] X.L. Mao, A.C. Ciocan and R.E. Russo, "Preferential Vaporization during Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy", *Appl. Spectrosc.* **52**, 913-918 (1998).

[52] <http://www.higgins.ucdavis.edu/UCDMath/ThermalPropMetals.php>

Capítulo 4

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GUÍAS DE ONDA

4.1. Introducción.

Como ya comentamos en el capítulo 1, el uso de elementos ópticos en conexiones para comunicaciones o computación es una solución prometedora a la hora de superar las limitaciones físicas de las conexiones electrónicas. Sin embargo, esta solución se ha visto frenada por el mayor coste de dichos elementos. Por ello, existe un gran interés en el desarrollo de técnicas de fabricación de elementos para el guiado de la luz que sean más rápidas y con menor coste efectivo. En los últimos años se han presentado numerosas soluciones basadas en el uso de fibra óptica¹ o en espacio libre^{2,3}. Sin embargo, los circuitos basados en fibra presentan problemas en las interconexiones, debido al alto precio de los conectores de fibra⁴. Además, las fibras sólo ofrecen conexiones punto a punto, por lo que para dividir el haz se necesita introducir componentes adicionales. En cuanto a los dispositivos de espacio libre, su principal ventaja es la baja atenuación que existe cuando se usa el aire como medio de propagación. Sin embargo, presentan importantes problemas de alineamiento y sensibilidad a las condiciones ambientales^{5,6}, con lo que las distancias que se pueden cubrir son relativamente cortas.

Integrando el elemento guiante en un sustrato de forma compacta (guías de onda planas), se pueden solucionar algunos de estos problemas: menor coste de fabricación, mayor capacidad de integración en un circuito, arrays con mayor densidad de elementos^{7,8}, ... Las técnicas tradicionales de fabricación de este tipo de dispositivos son un complejo conjunto de pasos que incluyen procesos litográficos así como varias etapas de deposición de capas de diferentes materiales^{5,9,10}.

Recientemente se ha comenzado a trabajar con métodos de escritura directa mediante láser para la fabricación de dispositivos guiantes^{11,12}. El objetivo es provocar un cambio del índice de refracción localizado en un determinado material mediante irradiación con un haz focalizado. Como ya comentamos en el capítulo 1, es una técnica rápida y que evita la utilización de otro tipo de elementos como moldes o resinas que aumentan la complejidad del proceso. La ablación láser es otra técnica que ofrece prácticamente las mismas ventajas que la escritura directa y que ha sido aplicada también a la fabricación de guías de onda¹³.

En este capítulo analizaremos la fabricación de guías de onda en sustratos de vidrio mediante ablación de láminas metálicas. En primer lugar haremos una breve introducción sobre los elementos guiantes. A continuación, nos centraremos en el proceso de fabricación de guías de onda, objetivo de este capítulo, para terminar con la caracterización de las muestras obtenidas.

4.2. Guías de onda.

La óptica guiada se ocupa del estudio, fabricación y caracterización de estructuras que confinan la luz y trata, básicamente, de las guías de onda y de las fibras ópticas. La estructura de una guía de onda tiene geometría cartesiana y está formada por un conjunto de superficies planoparalelas que separan medios dieléctricos transparentes de distinto índice de refracción. Para que el confinamiento sea efectivo, el medio guiante ha de estar rodeado por otro u otros de menor índice de refracción.

Para una guía homogénea o de salto de índice (índice de refracción constante), el guiado resulta de múltiples reflexiones totales internas de la luz en la la(s) superficie(s) de separación del medio guiante con el resto. El guiado se puede “visualizar” por medio de rayos que describen trayectorias en zig-zag. Para una guía inhomogénea o de gradiente de índice (índice de refracción variable), el guiado se debe a la refracción continua de la luz en el medio confinante causada por la variación continua del índice. Esta variación ha de ser máxima en el centro y disminuir de forma suave hacia el borde. El hecho de que los rayos se curven hacia la región de índice más alto, hace que la luz se quede confinada y se pueda

“visualizar” como rayos que describen trayectorias sinusoidales alrededor del eje longitudinal del medio confinante.

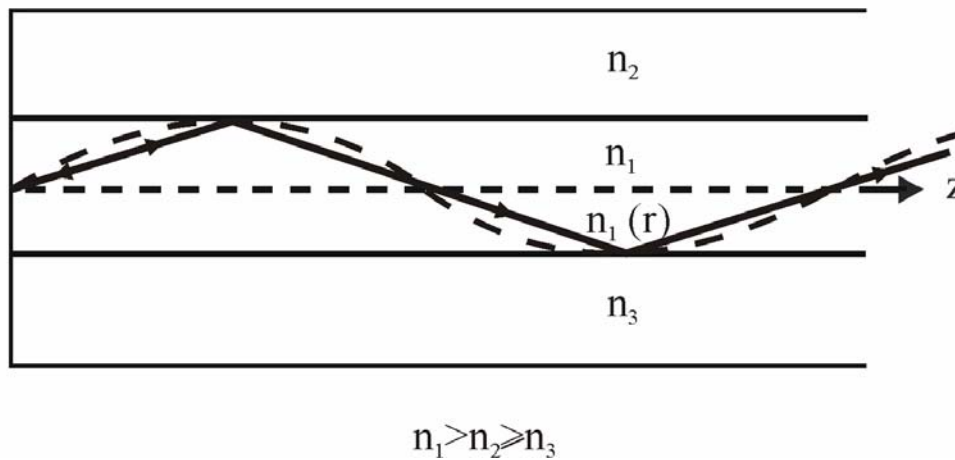


Figura 4.1. Propagación de rayos en una guía de onda: a) trazo continuo, homogénea con índice constante n_1 ; b) trazo discontinuo, inhomogénea con índice variable $n_1(r)$.

La guía de onda, asimismo, es una estructura bi o tridimensional que confina y transporta la luz. El confinamiento se realiza en una dirección transversal y la propagación en la dirección longitudinal. En ambas estructuras, el medio guiante puede estar rodeado por dos medios de distinto índice de refracción (guía asimétrica) o por uno sólo (guía simétrica). El medio guiante, que es una delgada película de índice de refracción n_1 , se denomina núcleo de la guía y se encuentra situado entre un sustrato de índice n_3 y una cubierta o recubrimiento de índice n_2 (figura 4.1).

4.3. Fabricación de guías de onda en vidrio por ablación de muestras metálicas.

En el capítulo 1 se han comentado algunas de las ventajas de los métodos de irradiación láser frente a otras técnicas convencionales. En particular, para el tratamiento de materiales vítreos o cerámicos, las técnicas basadas en el uso del láser destacan por ser procesos de una sola etapa y por tener una alta flexibilidad y alta velocidad de procesamiento¹⁴. La posibilidad de focalizar el haz de forma precisa, ha permitido la fabricación de elementos con una gran precisión y alta repetibilidad¹⁵. Diversos trabajos se han centrado en la aplicación de estos métodos, u otros similares, a la fabricación de guías de onda en vidrios. Favre et al. han obtenido guías de onda en vidrios de Bi_2O_3 mediante escritura láser directa ultravioleta trabajando a una longitud de onda de 244 nm¹⁶, de forma que la

radiación láser es absorbida directamente en la superficie del sustrato. Los autores han conseguido un núcleo guiante en las regiones del vidrio adyacentes a las áreas expuestas a la radiación, atribuyendo su origen a la aparición de tensiones mecánicas y estructurales asociadas a la absorción de la radiación en la superficie del sustrato. Otro trabajo reciente se ha centrado en el potencial de la escritura láser directa en vidrios fotosensibles, prestando especial atención a la irradiación con longitudes de onda ultravioletas y a métodos de autoescritura, analizando la evolución, dinámica y parámetros experimentales del proceso¹⁷.

Aunque la mayoría de los trabajos presentes en la literatura muestran las ventajas del láser respecto a otras técnicas convencionales, en el proceso utilizan vidrios con composiciones especiales¹⁸⁻²¹. Este tipo de materiales no están disponibles comercialmente a gran escala y son, por ello, caros. El objetivo de este capítulo es explorar la viabilidad de vidrios comercialmente disponibles y de bajo coste como sustratos para la fabricación de guías de onda planas, de forma se produzcan elementos que puedan ser más atractivos desde el punto de vista industrial. Nos centraremos en la técnica de transferencia inducida por láser (LIFT) ya comentada, utilizando de nuevo láminas metálicas planas como blancos metálicos. En este apartado, analizaremos en primer lugar el proceso de fabricación de las guías de onda mediante esta técnica, para continuar con la caracterización de las muestras obtenidas.

4.3.1. Fabricación de guías de onda.

El proceso seguido para fabricar guías de onda en sustratos de vidrio mediante transferencia inducida por láser es similar al utilizado para obtener las redes de difracción, descrito en el capítulo 3. En primer lugar realizamos algunas pruebas con la fuente **Nd:YAG I**, trabajando con la longitud de onda fundamental. Irradiamos sustratos de borosilicato y sodo-cálcicos utilizando diferentes láminas metálicas, de acero y de cobre. Sin embargo, al igual que para las longitudes de onda analizadas en el capítulo anterior, el daño provocado en la superficie del vidrio es muy importante (incluso a las velocidades de desplazamiento más altas), repercutiendo en las características del elemento fabricado. Por ello, se ha escogido la configuración experimental con la fuente láser **Nd:YAG II** (ver figura 4.2), que permite una mayor flexibilidad a la hora de variar los parámetros de irradiación. Las muestras se han realizado sobre sustratos de borosilicato y como blanco se ha empleado una lámina de acero de 1mm de grosor.

El proceso consiste en el trazado de una línea con el haz láser, con el objetivo de conseguir un cambio de índice de refracción en la zona tratada del vidrio. El sustrato está situado en contacto directo con el blanco metálico, y el haz

láser se focaliza sobre este último. Para que el daño superficial sea el menor posible, los parámetros de irradiación se han escogido teniendo en cuenta los resultados de ablación previos (ver capítulo 3). Como estamos usando un blanco de acero, hemos realizado una serie de muestras con frecuencias de repetición de 5, 10, 15, 20 y 25 KHz y velocidad de desplazamiento de 50 mm/s. Esto significa que estamos trabajando con potencias entre 5 y 5.8 W. Además, a diferencia de lo que ocurría con las redes de difracción, nos interesa que el factor de superposición sea lo más alto posible para conseguir un recubrimiento homogéneo de la zona tratada y, en consecuencia, una modificación homogénea del índice de refracción del sustrato en esta zona. Después de la exposición láser, se han limpiado las muestras para eliminar los residuos depositados en la superficie de las mismas, introduciéndolas en un baño de *aqua regia* durante 1 hora.

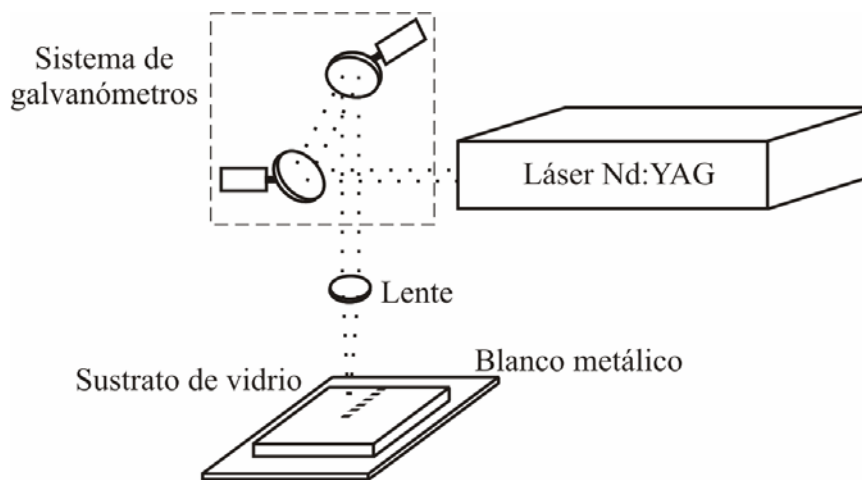


Figura 4.2. Configuración experimental empleada en la fabricación de guías de onda.

4.3.2. Caracterización de las guías de onda: análisis del perfil de índice de refracción.

Como ya hemos comentado, las propiedades básicas de los dispositivos guiantes vienen determinadas por la distribución del índice de refracción del medio. Es una exigencia de los elementos guiantes que el índice del núcleo sea mayor que el de las capas adyacentes (ver apartado 4.2). Por eso es necesaria una caracterización de este parámetro para conocer su influencia y su dependencia con las diferentes configuraciones experimentales.

Existen diferentes métodos para la medida del índice de refracción, pero nosotros hemos escogido la técnica de campo cercano refractado (*refracted near-*

field technique o RNF) debido a sus numerosas ventajas: presenta una alta resolución y precisión, la interpretación de los resultados es sencilla y permite la obtención de perfiles de índice bidimensionales de diferentes materiales²². Además los requerimientos a la hora de preparar la muestra para la realización de la medida son mínimos. En este apartado comenzaremos con una pequeña introducción sobre el funcionamiento del método, continuaremos con una descripción de la configuración experimental empleada en nuestro caso y finalizaremos con un análisis de las medidas realizadas.

4.3.2.1. Técnica de campo cercano refractado.

La obtención del perfil de índice de refracción mediante esta técnica se basa en la medida de la intensidad de la luz refractada en diferentes medios, algunos de los cuales tienen un índice de refracción conocido²². La figura 4.3 muestra un esquema de los elementos necesarios en la configuración experimental. En primer lugar, el haz atraviesa un obstáculo sectorial que nos permite eliminar los rayos marginales, cuya presencia no es deseable. A continuación, es necesario acoplar la luz sobre la guía de onda. Para ello, se utiliza un objetivo de microscopio que permite focalizar la luz sobre la superficie de interés, cuya apertura numérica debe ser mayor que la de la guía a estudiar. El

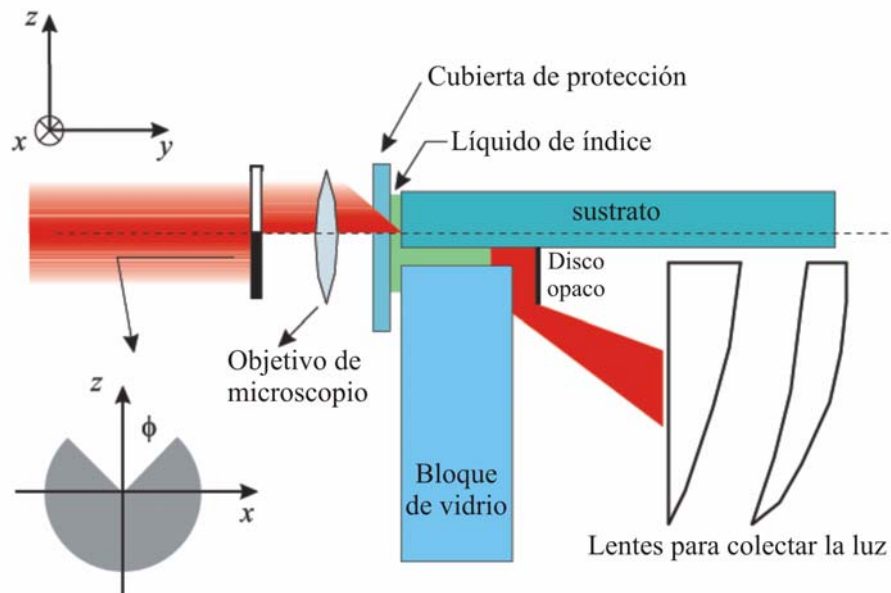


Figura 4.3. Esquema experimental del dispositivo empleado para medir el índice de refracción mediante la técnica de campo cercano refractado.

sustrato que contiene la guía de onda se sitúa sobre un bloque de vidrio, de índice de refracción conocido, depositándose entre ambas una capa de líquido para adaptación del índice de refracción (*index matching liquid*). En esta situación, parte de la luz será guiada mientras el resto se propagará a través del bloque de vidrio formando un cono con una zona central hueca. La parte más interna de este cono contiene modos evanescentes (luz que ha recorrido cierta distancia dentro de la guía, para después escapar de ella), mientras que la parte externa contiene la luz puramente refractada. La técnica RNF se basa en el análisis de la luz refractada, ya que la presencia de estos modos evanescentes varía de una a otra muestra de forma importante y su contribución es difícil de evaluar. Por ello se introduce un disco opaco que bloquee estos modos. Finalmente, una serie de lentes colectan la luz haciéndola incidir sobre un detector de potencia.

Considerando que el cambio de índice de refracción inducido en la zona irradiada es $\Delta n(r)$, podemos definir el índice de la guía como:

$$n(r) = n_s + \Delta n(r) \quad [4.1]$$

donde n_s es el índice de refracción del sustrato. Suponiendo que dicho cambio de índice es pequeño, es posible demostrar²³ que la potencia que atraviesa el disco ($P(q)$) es proporcional al índice de refracción en el punto de incidencia, y se escribe:

$$P(q) = a_1 - a_2 * n(r) \quad [4.2]$$

donde a_1 y a_2 son constantes que dependen de las condiciones experimentales, y cuyo valor será fijado mediante un proceso de calibración. En este proceso se utilizan los valores de potencia proporcionados por el detector al medir la luz que atraviesa tanto el bloque de vidrio como el líquido de adaptación de índice, cuyos valores del índice de refracción son conocidos.

4.3.2.2. Configuración experimental empleada.

La configuración experimental que hemos empleado se muestra en la figura 4.4. Para realizar la medida del índice de refracción hemos utilizado el haz proveniente de un láser de He-Ne (632.8 nm de longitud de onda). En una primera etapa, se colima el haz, mediante un conjunto de lentes y diafragmas. Después de atravesar estos elementos, el haz expandido se recorta mediante un obturador. El objetivo es eliminar los anillos de difracción, de forma que nos queda un haz más homogéneo para realizar las medidas de índice de refracción. En la figura 4.5 vemos una imagen ampliada de la zona de medida, que corresponde con el

esquema ya mostrado en la figura 4.3. Como ya hemos comentado en el apartado anterior, el haz láser se focaliza mediante un objetivo de microscopio sobre la superficie de la muestra a medir. Como se puede ver en la figura 4.5, la guía de onda se sitúa sobre un bloque de vidrio, depositando una capa de líquido de adaptación de índice entre ambos. El conjunto está situado sobre dos plataformas motorizadas (modelo Splindler & Hoyer x.act LT 100 ST), que permiten el desplazamiento de la muestra en las direcciones x y z , según se muestra en el esquema de la figura 4.3. La luz es colectada por un conjunto de lentes e incide en el detector de potencia (modelo Scientech Astral AA30) que nos permitirá realizar las medidas de índice de refracción, tal y como se indicó en el apartado anterior.

Los índices tanto del bloque como del líquido nos sirven para calibrar el dispositivo. En nuestro caso, el bloque de vidrio está fabricado en vidrio borosilicatado cuyo índice de refracción es de $n=1.470$ para la longitud de onda del He-Ne. Por otro lado, las especificaciones del líquido de índice muestran un valor de $n_D=1.4500\pm 0.0002$ para la línea D del sodio ($\lambda=589.3$ nm) a una temperatura de 20 °C. Estos valores de índice han de ser corregidos para la longitud de onda del láser empleado (632.8 nm), para lo cual hemos realizado una interpolación utilizando además otros valores especificados por los fabricante (valores n_C y n_F). El objetivo es obtener un perfil como el que se muestra en la figura 4.6, realizado sobre un sustrato de borosilicato sin irradiar. Se pueden distinguir claramente tres zonas en la gráfica: inicialmente, el haz del láser se



Figura 4.4. Configuración experimental de la técnica de campo cercano refractado.

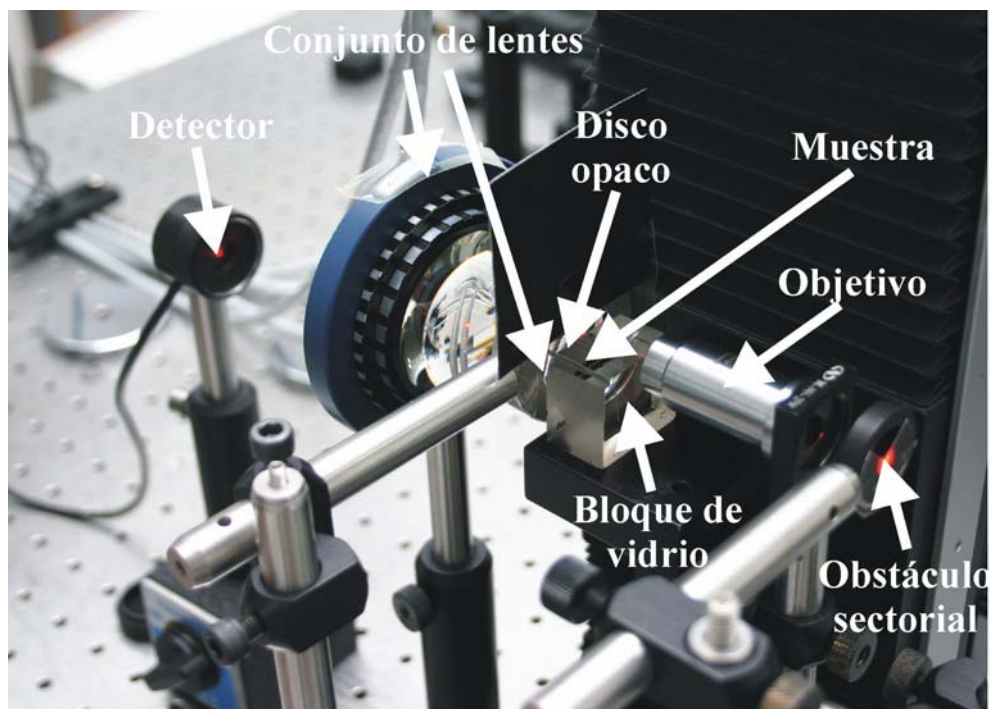


Figura 4.5. Imagen ampliada de la zona de medida.

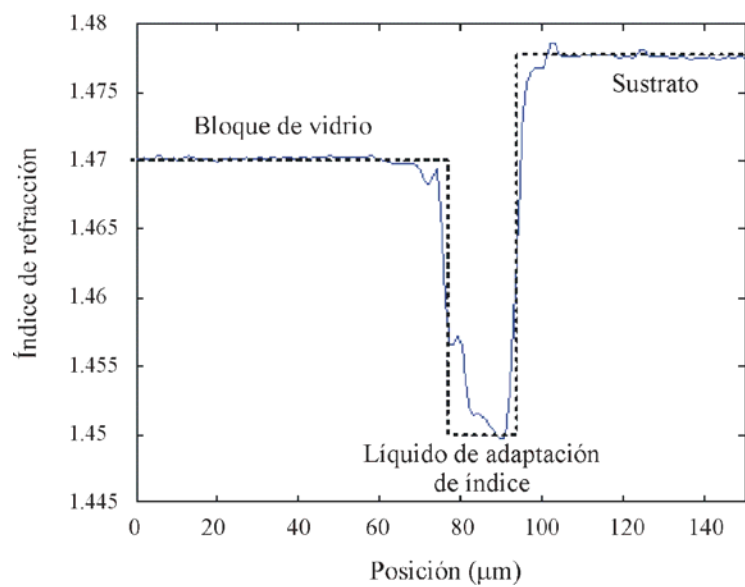


Figura 4.6. Perfil de índice obtenido mediante la técnica de campo cercano refractado para un sustrato de borosilicato sin irradiar.

focaliza sobre el bloque de vidrio, de forma que el detector recoge la luz refractada por este medio; a medida que desplazamos la muestra, el haz incide sobre la interfase de líquido de índice n_2 , finalmente, llega al sustrato, siendo diferente la cantidad de luz recogida por el detector en cada caso.

Además del perfil unidimensional que se indica en la figura 4.6, las dos plataformas nos permitirán realizar un barrido de la superficie en dos direcciones, de forma que podremos obtener un mapa de índice bidimensional de la superficie que se desee analizar.

4.3.2.3. Análisis de los resultados.

En este apartado vamos a analizar el perfil de índice de las muestras fabricadas mediante la ablación de muestras metálicas con el láser **Nd:YAG II**. Como ya hemos comentado, los diferentes desplazamientos de la plataforma nos permitirán obtener los perfiles en diferentes direcciones, tal y como se indica en la figura 4.7. En esta figura se incluyen también los ejes x e y a los que se hará referencia en las figuras que se mostrarán más adelante.

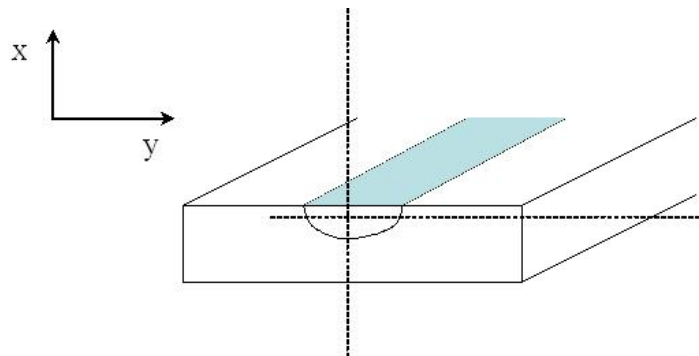


Figura 4.7. Direcciones en las que se realizará la medida del perfil de índice, mediante el desplazamiento de la muestra situada en las plataformas motorizadas.

Como ya hemos comentado, hemos fabricado una serie de guías con diferentes valores de la frecuencia de repetición del láser utilizado. Vamos a analizar en primer lugar el perfil de índice de la muestra fabricada con parámetros de irradiación de 25 KHz de frecuencia y 5.8 W de potencia. El perfil unidimensional, al desplazar la muestra en la dirección del eje x , se muestra en la figura 4.8. Como ya vimos en la figura 4.6, se pueden distinguir claramente los tres medios de diferente índice de refracción: el bloque de vidrio, el líquido de

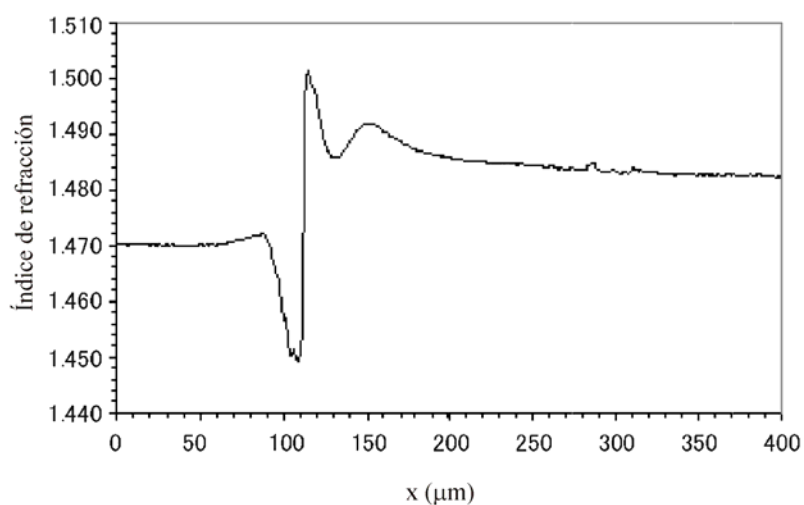


Figura 4.8. Perfil del índice de refracción en la dirección del eje x de la guía fabricada mediante transferencia inducida con láser con parámetros 25 KHz y 5.8 W.

adaptación de índice y el sustrato. Sin embargo, en este caso se observa un cambio importante del índice de refracción en la región del sustrato en contacto con el líquido de adaptación (y que corresponde a la zona que ha sido tratada con el láser). Por tanto, en el proceso de transferencia inducida por láser, las partículas del blanco que se han introducido en el sustrato provocan un cambio de índice del mismo que se observa con mayor claridad al realizar un barrido en la dirección del eje y . El resultado se presenta en la figura 4.9 y muestra una diferencia de índice que va de $1.5 \cdot 10^{-2}$ a $2 \cdot 10^{-2}$. La zona de cambio de índice tiene una anchura de $60 \mu\text{m}$ y una profundidad de $18 \mu\text{m}$ en el sustrato.

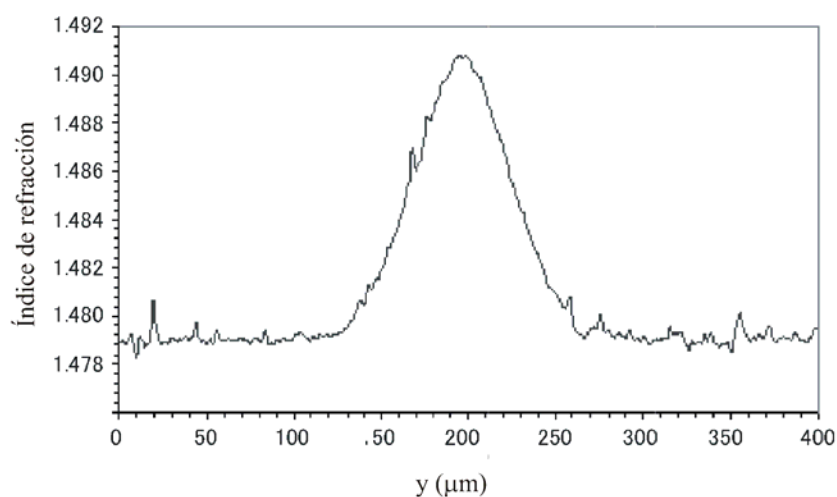


Figura 4.9. Perfil del índice de refracción en la dirección del eje y de la guía fabricada mediante transferencia inducida con láser con parámetros 25 KHz y 5.8 W.

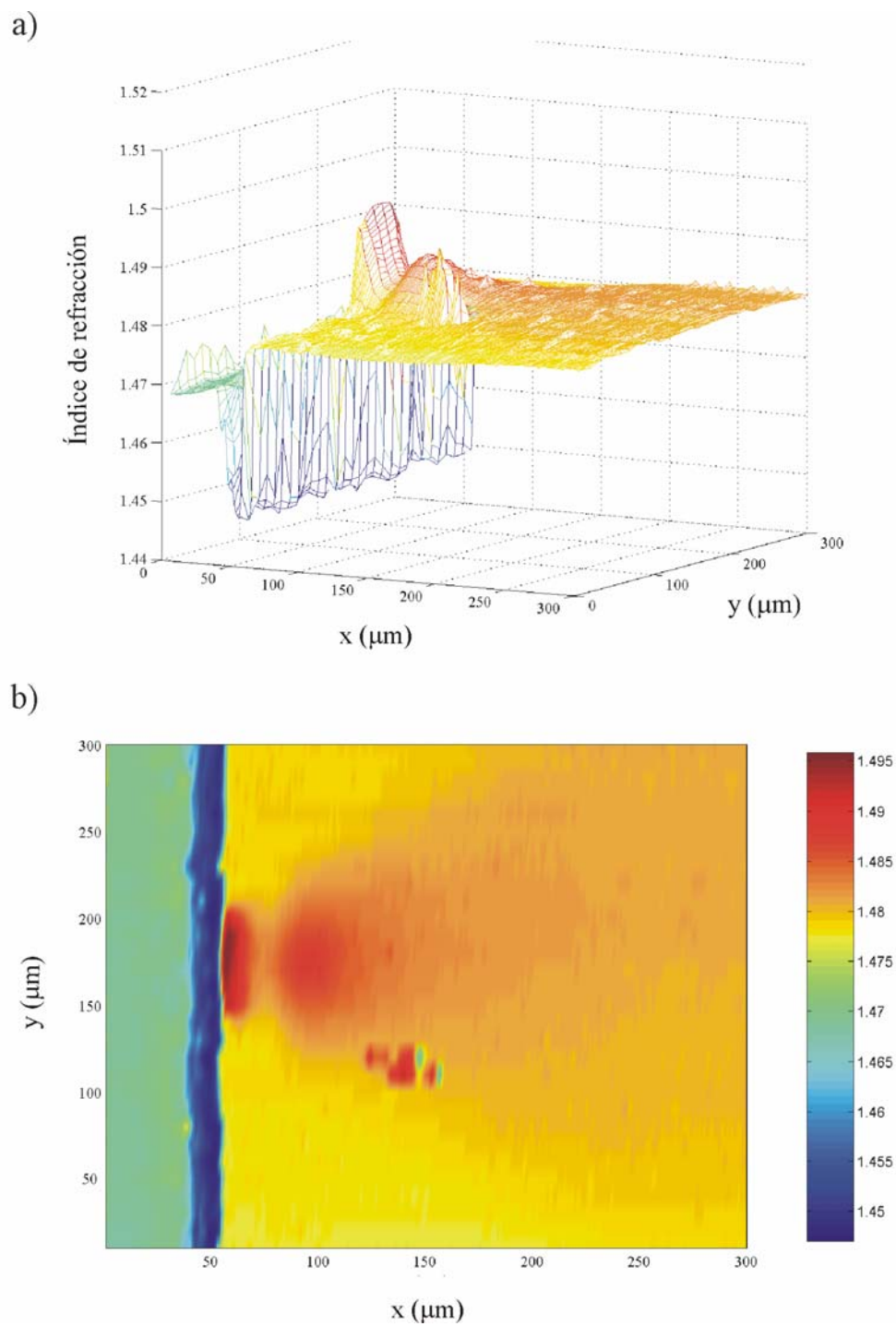


Figura 4.10. Perfil del índice de refracción bidimensional de la guía fabricada mediante transferencia inducida con láser con parámetros 25 KHz y 5.8 W.

Además del pico de la superficie del vidrio, se puede observar también una segunda zona de cambio de índice dentro del sustrato, menos abrupto y con un menor valor de índice de refracción. Se puede ver con mayor claridad en la imagen tridimensional de la guía (figura 4.10). Los diferentes colores de la figura corresponden a los diferentes materiales sobre los que incide el haz, en este caso el bloque de vidrio (color verde), el líquido de adaptación de índice (color azul) y el sustrato (colores amarillo y rojo). Hemos analizado una zona de $300 \times 300 \mu\text{m}$ en torno a la zona de cambio de índice. El pico más suave que se observaba en la zona más interna del sustrato puede ser debido a la interacción del láser **Nd:YAG II** con el propio vidrio ya que, como hemos comentado, el haz debe atravesar este material para enfocarse sobre el blanco metálico. Se observan también algunas crestas aisladas en la región en torno a $x=140 \mu\text{m}$ e $y=120 \mu\text{m}$, aunque éstas son debidos simplemente a imperfecciones en la superficie del sustrato debido al pulido del mismo.

A continuación, analizamos la muestra fabricada con la menor frecuencia de repetición: 5 KHz. El perfil unidimensional se presenta en la figura 4.11. En este caso, el índice de refracción en el sustrato es prácticamente constante, sin zona abrupta de transición, y con un valor similar al de la muestra analizada anteriormente. El perfil bidimensional (figura 4.12) nos ayuda a comprender el comportamiento de esta muestra. Hemos ampliado la zona de trabajo a un área de $400 \times 300 \mu\text{m}$, para ver la evolución del cambio a mayor profundidad. Se observa una extensa zona de material modificado por el proceso de transferencia inducida por láser, con una mayor anchura (en torno a las $220 \mu\text{m}$) y una profundidad de

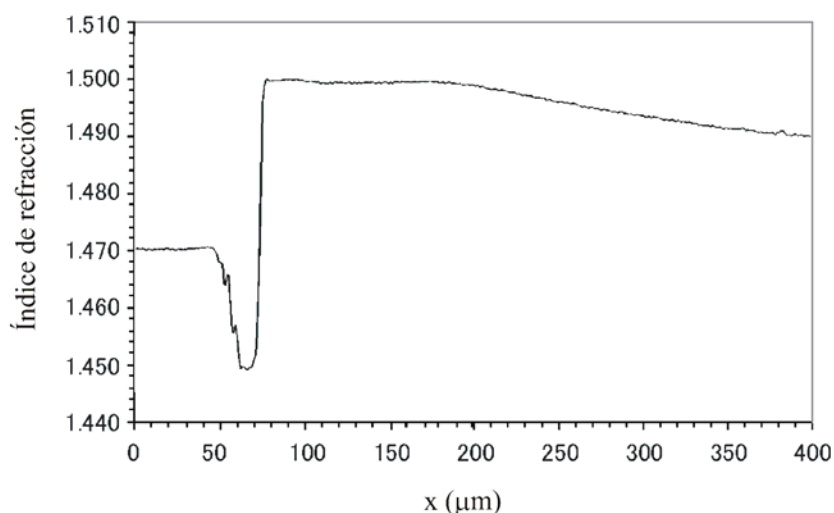


Figura 4.11. Perfil del índice de refracción en la dirección del eje x de la guía fabricada mediante transferencia inducida con láser con parámetros 5 KHz y 5 W.

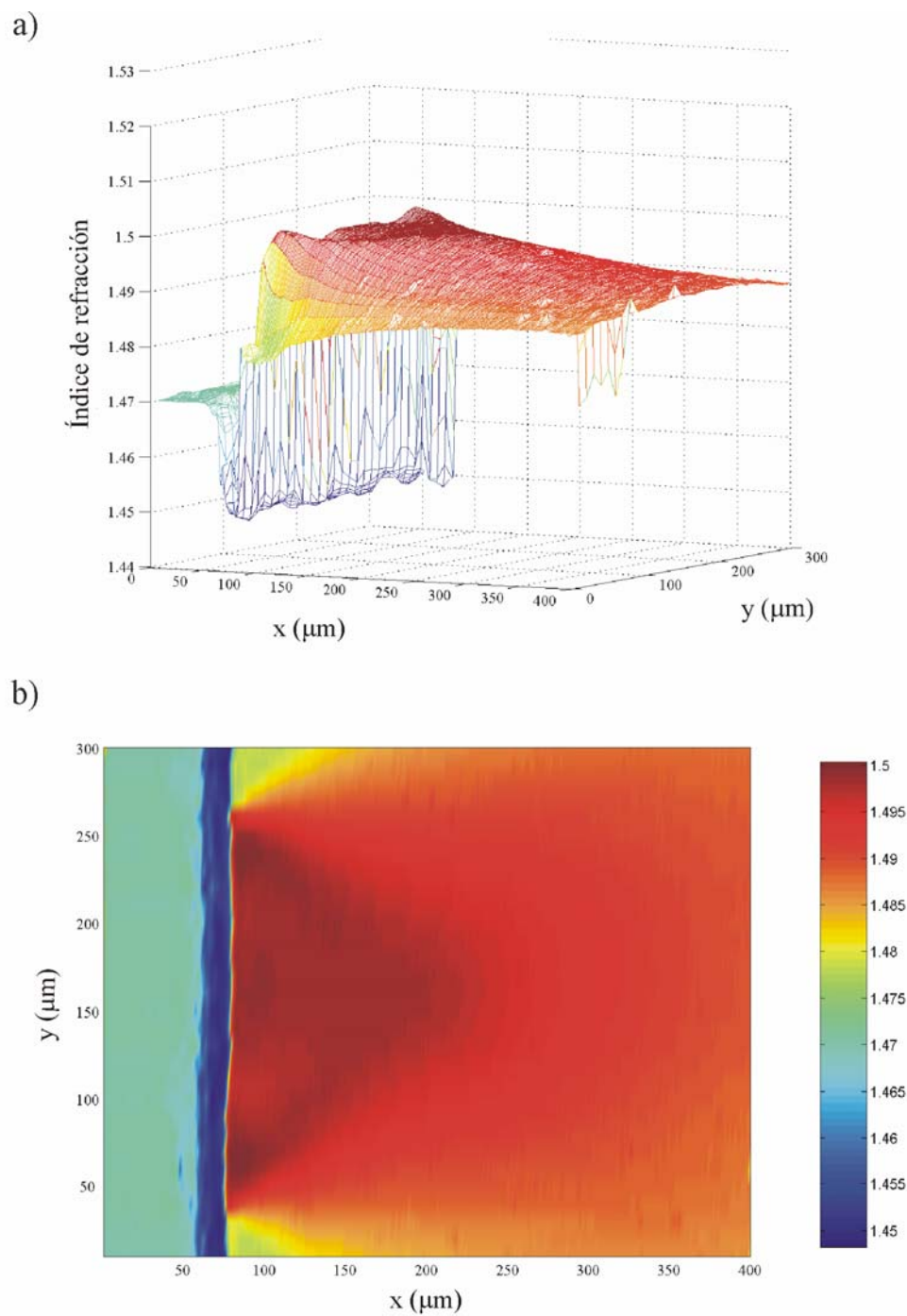


Figura 4.12. Perfil del índice de refracción bidimensional de la guía fabricada mediante transferencia inducida con láser con parámetros 5 KHz y 5 W.

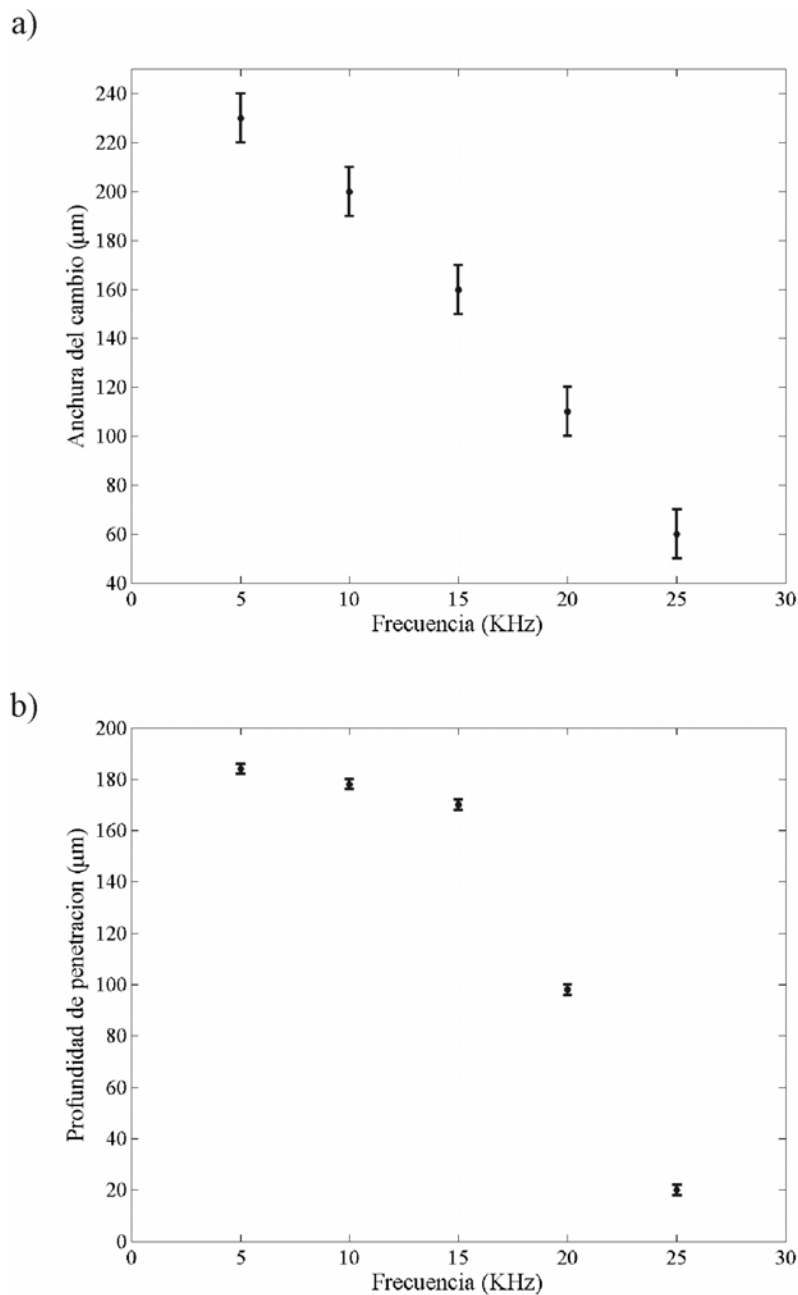
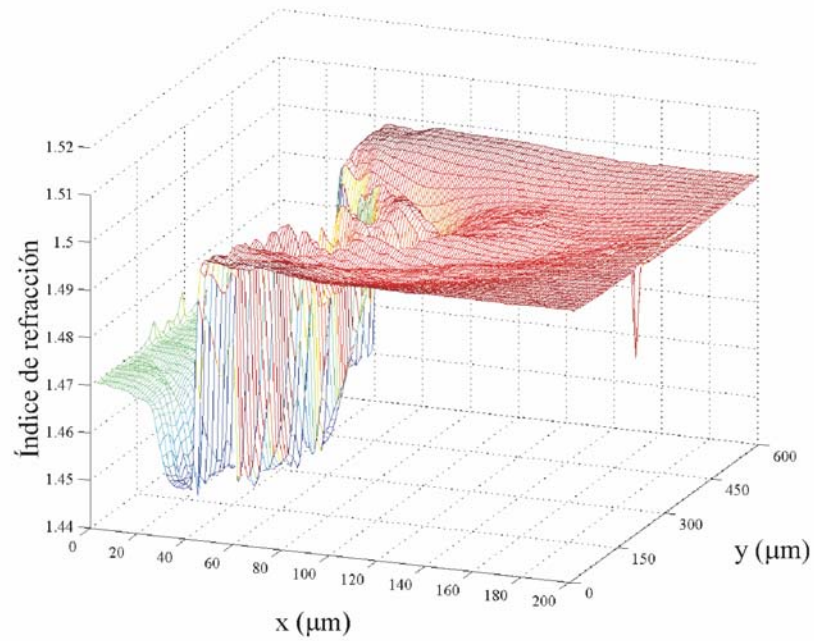


Figura 4.13. Variación de la anchura (a) y profundidad (b) de la zona de cambio de índice de refracción en las guías fabricadas con el láser **Nd:YAG II** para diferentes frecuencias de repetición.

penetración mucho mayor que en el caso anterior (alrededor de 180 μm). Por tanto, se muestra que, al disminuir la frecuencia de repetición, el cambio inducido en el sustrato de vidrio es mucho mayor. A partir de los perfiles de índice de todas las muestras fabricadas (desde 5 a 25 KHz) hemos analizado tanto la anchura

a)



b)

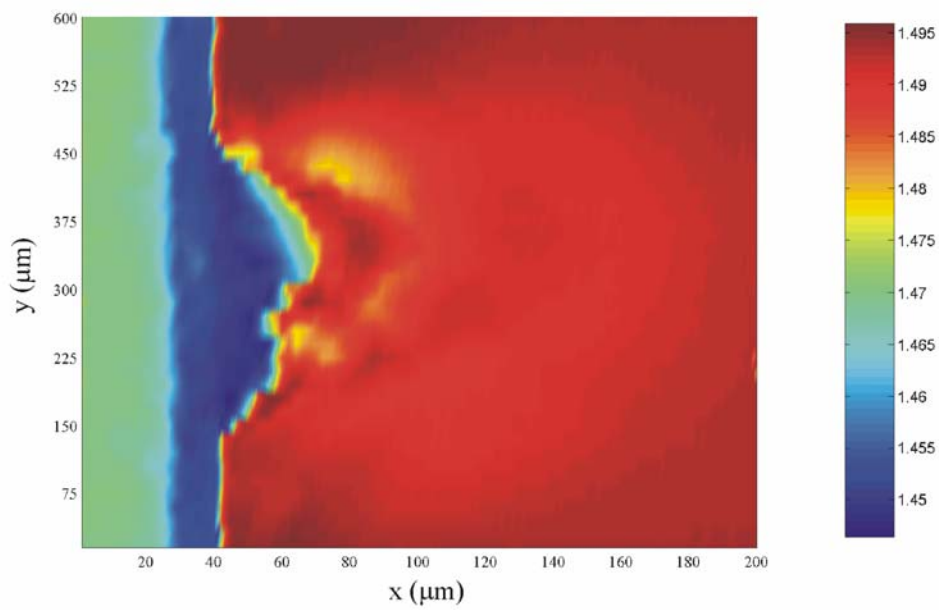


Figura 4.14. Perfil del índice de refracción bidimensional de la muestra fabricada con el láser **Nd:YAG I** por ablación de una lámina de cobre.

como profundidad de penetración del cambio en el índice de refracción en el sustrato, para ver su evolución con la frecuencia de repetición. Los resultados se muestran en las figuras 4.13 a) y b). Se ve claramente que la anchura de la zona modificada por el proceso de irradiación láser aumenta al disminuir el número de pulsos emitidos. Asimismo, el cambio del índice de refracción que se induce en el sustrato de vidrio alcanza una mayor profundidad al aumentar la frecuencia de repetición del láser. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos en el apartado 3.4.2.2 (figura 3.42) al analizar el proceso de ablación con el láser **Nd:YAG II**. Habíamos visto que el daño inducido en el vidrio era mayor con frecuencias de repetición bajas, ya que en esta fuente láser la energía de cada pulso disminuía al aumentar la frecuencia.

Finalmente, hemos analizado las muestras fabricadas con la configuración del láser de **Nd:YAG I**, que habían sido descartadas por el daño provocado en el vidrio. Todas siguen un comportamiento similar, por lo que nos centramos en la muestra fabricada en un vidrio sodo-cálcico por ablación de una lámina de cobre, y con el láser trabajando a la longitud de onda fundamental (1064 nm). Mostramos directamente el perfil bidimensional (figura 4.14), ya que las gráficas unidimensionales resultan difíciles de analizar. El área de trabajo en este caso es de 200x600 μm . Se observa un daño muy importante en la superficie del vidrio, ya que el líquido de índice penetra en el surco excavado en el sustrato. Además, existe una zona de cambio de índice con una forma irregular, entre 60 y 80 μm de profundidad, que el daño causado en el vidrio impide analizar.

4.3.3. Caracterización de las guías de onda: análisis mediante microscopía electrónica.

La microscopía electrónica nos permite analizar algunas características de las redes grabadas con esta técnica. En primer lugar vamos a comprobar los resultados obtenidos con el método de campo cercano refractado para la medida del perfil de índice. En la figura 4.15 mostramos la imagen lateral de la guía fabricada con una frecuencia de 25 KHz con el láser **Nd:YAG II**, que corresponde a la zona de coloración más clara dentro del área marcada con el círculo. Esta zona con propiedades diferentes al resto del sustrato tiene una anchura de 70 μm , aproximadamente, y una profundidad entre 18 y 20 μm . Estos datos corroboran las medidas mostradas en la figura 4.13, obtenidas a partir de los perfiles de índice de refracción.

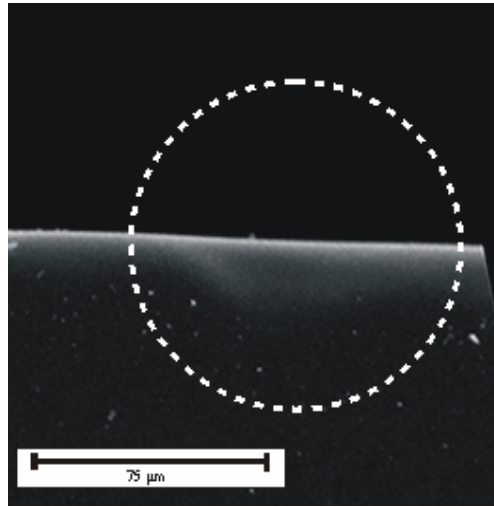


Figura 4.15. Imagen lateral obtenida mediante SEM de la guía fabricada con el láser **Nd:YAG II** y la lámina de acero, con parámetros 25 KHz y 5.8 W.

Como ya hemos comentado, el cambio de índice de refracción después de la irradiación se debe a la introducción de partículas metálicas del blanco en el sustrato de vidrio. Al igual que en capítulo anterior, hemos utilizado el Microanálisis EDX del microscopio electrónico para analizar los elementos químicos presentes en las zonas irradiadas. En este caso, el modelo utilizado es el Microscopio Electrónico de Barrido JSM-6400, y el sistema de microanálisis por rayos X es el INCA 300. Este modelo no permite detectar elementos ligeros como el boro, que está presente en la composición original del vidrio. En la figura 4.16 mostramos las zonas en las que hemos analizado la presencia de partículas ajenas al sustrato, algunas de las cuales están situadas en la zona que ha sido irradiada y otros en la zona no tratada del sustrato. En la tabla 4.1 se indican los porcentajes encontrados de cada elemento. Podemos ver que el análisis en los puntos 5, 6 y 7 revela un aumento del porcentaje de hierro en la composición (pasamos de una media del 0.27% al 0.42% en las zonas irradiadas) y, además, aparece un pequeño porcentaje de cromo, que no está en la composición original del sustrato. Ambos elementos forman parte de la lámina de acero que se ha empleado como blanco, lo que pone en evidencia que el cambio de índice observado en el sustrato se debe al paso de partículas metálicas al sustrato de vidrio.

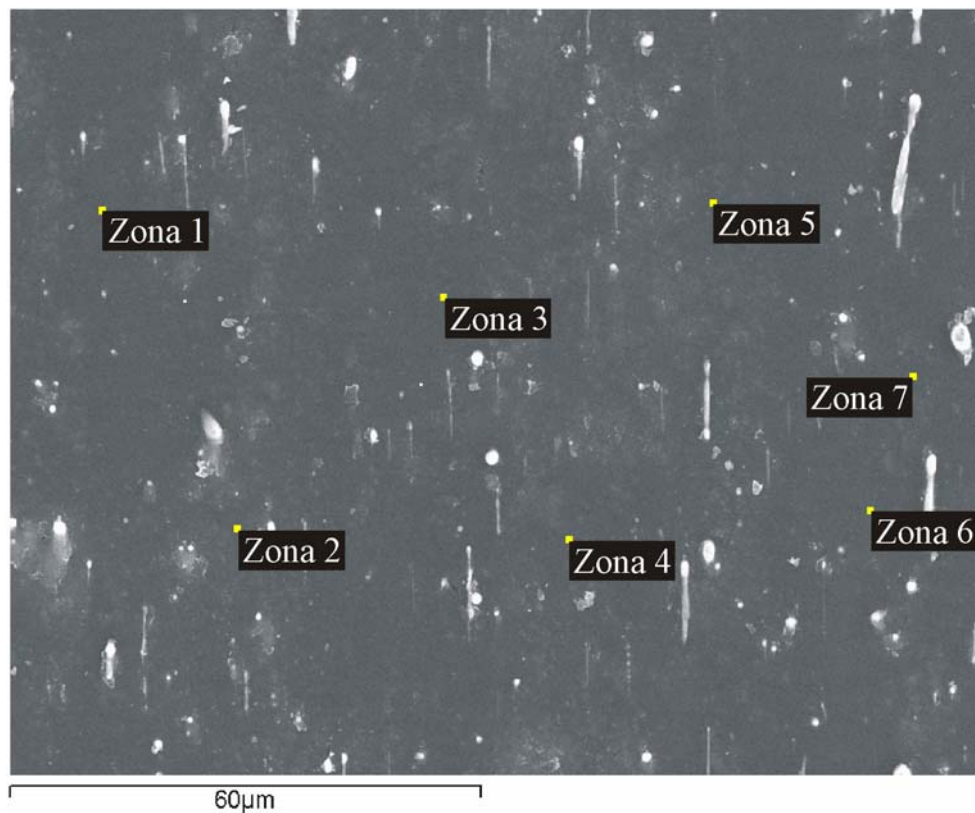


Figura 4.16. Zonas de la superficie del vidrio de borosilicato analizadas.

Tabla 4.1. Composición (en %) de las zonas analizadas mediante Microanálisis EDX.

	O	Na	Al	Si	K	Cr	Fe
Zona 1	69.42	1.40	0.86	27.84	0.24		0.25
Zona 2	70.06	1.55	0.84	27.02	0.24		0.30
Zona 3	70.48	1.36	0.79	26.96	0.19		0.22
Zona 4	69.70	1.51	0.74	27.50	0.24		0.31
Zona 5	69.56	1.55	0.89	27.26	0.19	0.14	0.41
Zona 6	71.50	1.53	0.79	25.53	0.22		0.42
Zona 7	69.35	1.29	0.89	27.61	0.24	0.17	0.45

4.3.4. Caracterización de las guías de onda: medida de las pérdidas.

Se han realizado algunas medidas para analizar la calidad de los elementos fabricados como guías de onda. Para ello, se ha intentado acoplar luz con una fibra multimodo 50 μm /125 μm . El resultado de la muestra fabricada con 25 KHz de frecuencia de repetición, en la que la zona de modificación de índice tenía una anchura de 60 μm y una profundidad de 18 μm en el sustrato, se muestra en la figura 4.17. La luz proveniente de un láser He-Ne comienza a guiarse por el elemento, pero el guiado sufre una rápida atenuación. De las medidas realizadas podemos concluir que, como trabajo futuro, debemos optimizar el proceso de fabricación de estos elementos, para conseguir una modificación homogénea del sustrato de vidrio. Además, debemos prestar especial atención al pulido de las caras laterales, que es otra fuente importante de pérdidas. El análisis en el microscopio óptico (utilizando un objetivo 40x) muestra la mala calidad de los bordes de nuestro elemento (figura 4.18).

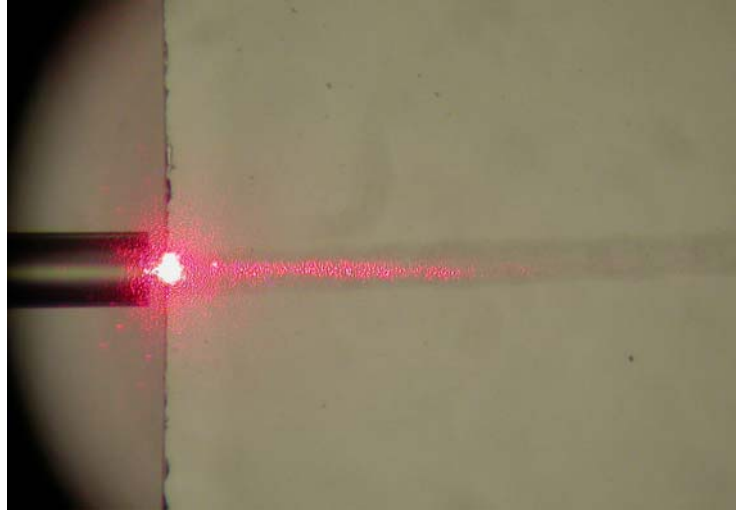


Figura 4.17. Acoplamiento de luz mediante fibra óptica en el elemento analizado.

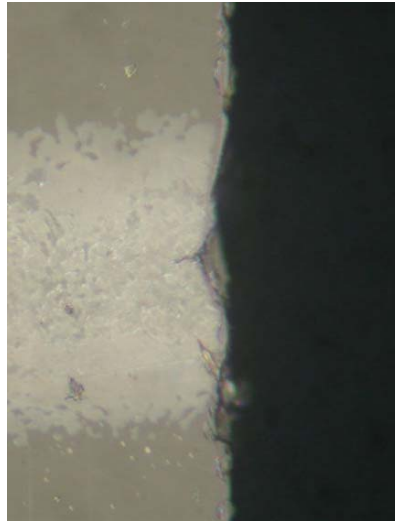


Figura 4.18. Imagen obtenida en el microscopio óptico de los bordes del elemento analizado.

4.4. Conclusiones.

Se ha aplicado el método de transferencia inducida por láser a la fabricación de guías de onda, modificando el índice de refracción de los sustratos de vidrio con adición de partículas provenientes de los blancos metálicos. Hemos utilizado la técnica de campo cercano refractado para medir el perfil de índice de las diferentes muestras fabricadas, obteniéndose una diferencia de $1.8 \cdot 10^{-2}$ con respecto al índice del vidrio sin tratar. Se ha estudiado la variación del tamaño y profundidad de penetración de la zona de cambio de índice con los diferentes parámetros láser utilizados. Finalmente, el microanálisis EDX ha revelado la presencia de partículas provenientes del blanco en las zonas irradiadas del sustrato. La medida de las pérdidas de los elementos fabricados demuestra la necesidad de un trabajo futuro para la optimización del proceso de fabricación, así como para la mejora en el proceso de pulido de los bordes.

Referencias

[1] Y. Li, J. Ai and J. Popelek, “Board-Level 2-D Data-Capable Optical Interconnections Circuits Using Polymer Fiber-Image Guides”, Proceedings of the IEEE **88**, 794-805 (2000).

- [2] D.V. Plant and A.G. Kirk, "Optical Interconnects at the Chip and Board Level: Challenges and Solutions", *Proceedings of the IEEE* **88**, 806-818 (2000).
- [3] A.G. Kirk, D.V. Plant, T.H. Szymanski, Z.G. Vranesic, F.A.P. Tooley, D.R. Rolston, M.H. Ayliffe, F.K. Lacroix, B. Robertson, E. Bernier and D.F.-Brosseau, "Design and implementation of a modulator-based free-space optical backplane for multiprocessor applications", *Appl. Opt.* **42**, 2465-2481 (2003).
- [4] C. Berger, B.J. Offrein and M. Schmatz, "Challenges for the introduction of board-level optical interconnect technology into product development roadmaps", in *Photonics West'06, Optoelectronic Integrated Circuits*, *Proceedings SPIE* **6124**, p. 61240J-1 (2006).
- [5] H. Ma, A.K.-Y. Jen and L.R. Dalton, "Polymer-Based Optical Waveguides: Materials, Processing, and Devices", *Adv. Mater.* **14**, 1339-1365 (2002).
- [6] M.T. Flores-Arias, C. Bao, A. Castelo, M.V. Pérez and C. Gomez-Reino, "Crossover interconnects in gradient-index planar optics", *Opt. Comm.* **266**, 490-494 (2006).
- [7] Y. Li and J. Popelek, "Volume-consumption comparisons of free-space and guided-wave optical interconnections", *Appl. Opt.* **39**, 1815-1825 (2000).
- [8] J. Jahns and A. Huang, "Planar integration of free-space optical components", *Appl. Opt.* **28**, 1602-1605 (1989).
- [9] K. Okamoto, "Recent progress of integrated optics planar lightwave circuits", *Opt. Quant. Electron.* **31**, 107-129 (1999).
- [10] M. Immonen, M. Karppinen and J.K. Kivilahti, "Fabrication and Characterization of Polymer Optical Waveguides with Integrated Micromirrors for Three-Dimensional Board-Level Optical Interconnects", *IEEE Transac. Electron. Pack. Manuf.* **28**, 304-311 (2005).
- [11] L. Eldada and L.W. Shacklette, "Advances in Polymer Integrated Optics", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **6**, 54-68 (2000).
- [12] L. Eldada, C. Xu, K. Stengel, L. Shacklette and J.T. Yardley, "Laser-fabricated low-loss single-mode raised-rib waveguiding devices in polymers", *J. Lightwave Technol.* **14**, 1704-1713 (1996).

- [13] G. Van Steenberge, P. Geerinck, S. Van Put, J. Van Koetsem, H. Ottevaere, D. Morlion, H. Thienpont and P. Van Daele, "MT-Compatible Laser-Ablated Interconnections for Optical Printed Circuit Boards", *J. Lightwave Technol.* **22**, 2083-2090 (2004).
- [14] S. Nikumb, Q. Chen, C. Li, H. Reshef, H.Y. Zheng, H. Qiu and D. Low, "Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers", *Thin Solid Films* **477**, 216-221 (2005).
- [15] D. Bauerle, "Laser Processing and Chemistry", Springer-Verlag (Berlin, Germany, 1996).
- [16] A. Favre, E. Lee, V. Apostolopoulos, C.B.E. Gawith, C.-Y. Tai, E. Taylor, Y. Kondo and F. Koizumi, "Fabrication and characterization of UV-written channel waveguides in Bi₂O₃-based glass", *Opt. Mater.* **27**, 7-13 (2004).
- [17] H. Ebendorff-Heidepriem, "Laser writing of waveguides in photosensitive glasses", *Opt. Mater.* **25**, 109-115 (2004).
- [18] A.K. Mairaj, C. Riziotis, A.M. Chardon, P.G.R. Smith, D.P. Shepherd and D.W. Hewak, "Development of channel waveguide lasers in Nd³⁺-doped chalcogenide (Ga:La:S) glass through photoinduced material modification", *Appl. Phys. Lett.* **81**, 3708-3710 (2002).
- [19] C. Contarde, E.R. Taylor and A. Fu, "Study of UV-written channels in lead silicate glasses", *J. Non-Cryst. Solids* **291**, 113-120 (2001).
- [20] D. Milanese, A. Fu, C. Contardi, E.R.M. Taylor and M. Ferraris, "Photosensitivity and directly UV written waveguides in an ion exchangeable bulk oxide glass", *Opt. Mater.* **18**, 295-300 (2001).
- [21] A.K. Mairaj, P. Hua, H.N. Rutt and D.W. Hewak, "Fabrication and characterization of continuous wave direct UV ($\lambda=244\sim$ nm) written channel waveguides in chalcogenide (Ga:La:S) glass", *J. Lightwave Technol.* **20**, 1578-1584 (2002).
- [22] R. Rangel-Rojo, A. Castelo, M.T. Flores-Arias, C. Gómez-Reino, C.I. López-Gascón and G.F. de la Fuente, "Refractive index modification in glass by laser backwriting ablation of metals", *Opt. Express* **14**, 8765-8771 (2006).

- [23] R. Göring and M. Rothhardt, "Application of the refractive near field technique to multimode planar and channel waveguides in glass", *J. Opt. Commun.* **7**, 82-85 (1986).

Conclusiones

En este trabajo se han aplicado varias técnicas de fabricación de elementos microópticos basados en tratamiento de materiales mediante láser. En particular, se ha utilizado la irradiación UV a través de una máscara comercial de fase y la técnica de transferencia inducida por láser para la fabricación de redes de difracción y guías de onda en sustratos de vidrio.

Del trabajo realizado se han derivado las siguientes conclusiones:

- Se ha transferido una máscara de fase a vidrios de plomo mediante irradiación UV. Se han utilizado dos configuraciones experimentales: una estática, en la que el conjunto máscara/sustrato se irradia directamente y otra dinámica en la que se focaliza el láser sobre el conjunto máscara/sustrato, que se desplaza perpendicularmente a éste. Para evitar el deterioro de la máscara de fase por deposición de residuos provenientes del proceso de ablación, se hace necesario trabajar con una distancia de separación de 150 μm entre máscara y muestra.
- La caracterización de las muestras se ha realizado mediante la medida de la eficiencia difraccional del primer orden de las redes fabricadas para las dos configuraciones. Los mayores valores obtenidos son del 4%, en el caso de la

configuración estática, y del 6.5%, para la configuración dinámica. El estudio mediante microscopía de fuerzas atómicas (AFM) de las redes grabadas ha revelado la presencia de una red secundaria, que se hace patente con el tiempo de irradiación láser. Esta estructura secundaria provoca la disminución de la eficiencia del primer orden de difracción de la red primaria.

- Se ha estudiado el daño provocado en los vidrios, mediante la técnica de transferencia inducida por láser, encontrando, con las medidas de los perfiles transversales, la cantidad de material arrancado en el proceso y la profundidad del cráter generado en función de los sustratos utilizados y de los parámetros del láser. Este estudio se ha realizado para los equipos láser de Nd:YAG utilizados.
- Los resultados obtenidos muestran una importante diferencia en el comportamiento de los dos equipos láser. La mayor potencia del equipo **Nd:YAG I** provoca un mayor daño en el vidrio siendo más difícil de controlar por la poca flexibilidad a la hora de manejar los parámetros láser. Se observa que el volumen de material eliminado en el proceso aumenta con la irradiancia de forma suave, hasta un valor de $5.4 \cdot 10^8$ W/cm², en el que se produce un brusco salto en el volumen de ablación. Este valor de irradiancia corresponde al valor de formación de plasma en metales.
- La configuración con el equipo láser **Nd:YAG II** permite un mayor control del proceso de transferencia inducida por láser. En este equipo podemos variar parámetros como potencia, frecuencia de repetición y velocidades de desplazamiento, que se traduce en un control más efectivo del proceso de ablación. La irradiancia que se consigue es sensiblemente inferior a la del caso anterior, de forma que tanto el tamaño del cráter como el volumen de material eliminado son varios órdenes de magnitud inferiores a los obtenidos con el equipo **Nd:YAG I**.
- Este estudio previo nos ha servido para aplicar la técnica de transferencia inducida por láser a la fabricación de elementos microópticos. La necesidad de tener el menor daño superficial posible, para evitar que los defectos afecten al uso final de dicho elemento, marca la elección de la mejor configuración experimental (el equipo **Nd:YAG II**). En primer lugar, hemos empleado esta técnica para fabricar una red de difracción en un sustrato de vidrio. El objetivo era transferir de forma selectiva el material arrancado en la ablación del blanco metálico. En este proceso, hemos utilizado como sustratos, vidrios sodo-cálcicos y de borosilicato, y blancos de acero y latón.

- Al igual que con el primer método, las muestras obtenidas se han caracterizado mediante la medida de su eficiencia y de su perfil físico. En la medida de la eficiencia del primer orden de difracción, se ha detectado una importante dependencia del resultado con el factor de superposición, uno de los parámetros de trabajo de los equipos láser. En nuestro caso, se han obtenido los mejores resultados para un factor de superposición del 40 %, para todos los sustratos y blancos analizados.
- El mayor valor de eficiencia se ha obtenido para la ablación de blancos de latón mate en sustratos de vidrio sodo-cálcico, en los que hemos conseguido un 18%. Las muestras fabricadas con sustratos de borosilicato presentaban una eficiencia considerablemente inferior, por debajo del 1%.
- El estudio del perfil físico se ha realizado con microscopía confocal y electrónica. El análisis mediante microscopía confocal nos ha permitido comparar los perfiles de las redes fabricadas con diferentes configuraciones experimentales y parámetros de trabajo. Además, se ha mostrado que el período de las redes obtenidas depende únicamente del solapamiento entre los diferentes barridos que realiza el haz láser. Por último, el microanálisis EDX realizado con un microscopio SEM, ha revelado la presencia de elementos químicos del blanco metálico incorporados al sustrato de vidrio.
- Hemos aplicado la técnica de transferencia inducida por láser a la fabricación de guías de onda. Este método permite modificar el índice de refracción de los sustratos de vidrio mediante la adición de partículas provenientes de los blancos metálicos. Hemos utilizado la técnica de campo cercano refractado para medir el perfil de índice de las diferentes muestras fabricadas. Los perfiles obtenidos con esta técnica muestran un aumento del valor del índice de refracción en la zona del vidrio irradiada, aunque con diferente comportamiento para las distintas configuraciones experimentales. En particular, el tamaño y profundidad de penetración de la zona de cambio de índice varían de forma apreciable con los diferentes parámetros del láser. En la zona de mayor cambio hemos alcanzado una diferencia de índice de $1.8 \cdot 10^{-2}$ con respecto al del vidrio sin tratar.
- La caracterización de las guías se ha completado con un análisis de la composición de las muestras fabricadas. El microanálisis EDX de las zonas tratadas ha revelado la diferencia de composición de las zonas irradiadas del sustrato, en las que se ha detectado la presencia de partículas provenientes del blanco metálico.

- Finalmente, se ha realizado la medida de las pérdidas de los elementos fabricados. Los resultados obtenidos muestran la necesidad de un trabajo futuro para la optimización del proceso de fabricación. Además, el proceso de pulido de los bordes ha de ser mejorado para favorecer el acoplamiento de la luz a la guía.

Agradecimientos

Parecía que no iba a llegar nunca. Pasados los días de dudas y desconfianza, esta tesis culmina el trabajo realizado durante estos cuatro años. En estos momentos, cuando echo la vista atrás, veo que ha habido mucha gente que ha contribuido, de una u otra forma, a que este trabajo haya llegado a buen puerto.

En primer lugar quiero agradecer a mis directoras de tesis, M^a del Carmen Bao Varela y María Teresa Arias, así como a los “jefes” del grupo de óptica GRIN, Carlos Gómez-Reino y María Victoria Pérez, el haberme dado la oportunidad de incorporarme, hace algunos años ya, a su grupo de investigación. Gracias por su continuo seguimiento, por toda la ayuda prestada y los consejos dados, y, por qué no, por todas las correcciones hechas durante todos estos años.

Gracias también a nuestro mago del laboratorio, Dani, cuya ayuda ha resultado fundamental durante todos estos años para realizar muchos de los experimentos descritos en esta tesis, y a los otros miembros del grupo GRIN, Miguel, Laura, Paco, Mar y Jose, que han conseguido crear un ambiente de trabajo genial, y con los que he compartido bastantes horas de ocio y unas pocas de trabajo.

Quiero mencionar al grupo del Instituto de Materiales de Aragón, Germán, Ruth, Clarisa y Vassili, por toda la ayuda prestada y también por el buen trato cada vez que me he pasado por allí. También a Raúl Rangel, del CICESE, que en

su breve estancia en nuestro grupo de investigación dejó una importante huella, tanto de trabajo como personal.

I would like to thank to Peter Van Daele, for giving me the opportunity to join the TFCG group of the Universiteit Gent, and all the other members of ELINTEC-TFCG. Thanks to Wim, Frauke, Sarah and Ben for all those good moments in the 2nd floor, and to everybody I met in that great city.

Gracias a todos los compañeros de despacho, por sus consejos, las bromas y también todas las conversaciones inútiles. A los que ya no están (Justo, Jorge, Paula, Bea,...), deciros que os echamos de menos y espero que os siga yendo tan bien como hasta ahora. Y a toda la gente con la que he compartido grandes momentos fuera de este despacho. Sería imposible citaros a todos, pero vosotros sabéis a quien me refiero.

Finalmente quería agradecerle a mi familia toda la paciencia y el apoyo mostrado estos años. Una gran parte de este trabajo también os la debo a vosotros.

Lista de patentes y publicaciones

PATENTE DE INVENCIÓN

Número de Solicitud: P200703475

Título de la invención: “Procedimiento de obtención de redes de difracción de fase en un sustrato mediante ablación láser de un blanco”.

Inventores: María Teresa Flores Arias, Antonio Castelo Porta, Carlos Gómez-Reino Carnota y Germán de la Fuente Leis.

CAPÍTULOS DE LIBROS

- C. Gómez-Reino, C. Bao, A. Castelo, M.T. Flores-Arias, M.V. Pérez, X. De la Fuente y R. Rangel-Rojo, “Laser backwriting ablation of metals for refractive index modification in glass”, Nova Publisher, eds. (Hauppauge, New York, United States), *Pendiente de Publicación*.

ARTÍCULOS

- A. Castelo, C. Bao, M.T. Flores, C. Gómez-Reino y M.V. Pérez, “Grabado de Redes de Fase con un Láser Nd:YAG”, *Opt. Pur. y Apl.* **36**, 103-107 (2003).

- M.V.Perez, C.Bao, M.T.Flores-Arias, A.Castelo and C.Gomez-Reino, “Talbot effect in selfoc microlens: application in manufacturing”, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7**, 286-289 (2005).
- M.T. Flores-Arias, M.V. Pérez, C. Bao, A. Castelo and C. Gómez-Reino, “Gradient-index human lens as a quadratic phase transformer”, *J. Mod. Opt.* **53**, 495-506 (2006).
- R. Rangel-Rojo, A. Castelo, M.T. Flores-Arias, C. Gómez-Reino, C.I. López-Gascón and G.F. de la Fuente, “Refractive index modification in glass by laser backwriting ablation of metals”, *Opt. Express* **14**, 8765-8771 (2006).
- M.T. Flores-Arias, C. Bao, A. Castelo, M.V. Pérez y C. Gómez-Reino, “Crossover interconnects in gradient-index planar optics”, *Opt. Comm.* **266**, 490-494 (2006).
- A. Castelo, D. Nieto, C. Bao, M.T. Flores-Arias, M.V. Pérez, C. Gómez-Reino. C. López-Gascón, G.F. de la Fuente, “Laser backwriting process in glass via ablation of metal targets”, *Opt. Comm.* **273**, 193-199 (2007).
- M.T. Flores-Arias, A. Castelo, C. Gomez-Reino and G.F. de la Fuente, “Phase diffractive optical gratings on glass substrates by laser ablation”, *Opt. Comm.* (2008), *Pendiente de publicación*.

COMUNICACIONES A CONGRESOS

- A. Castelo, C. Bao, M.T. Flores-Arias, C. Gómez-Reino y M.V. Pérez, “Fabricación of Phase Gratings by Nd:YAG Laser Irradiation”, *Ninth International Conference on Photorefractive Effects, Materials and Devices* (17-21 June 2003, Le Colle sur-Loup, Nice, France), *TOPS OSA* **87**, 200-204 (2003).
- A. Castelo, M.T. Flores-Arias, C. Bao, M.V. Pérez y C. Gómez-Reino, “Grabado de una Red de Fase con un Láser Nd:YAG: Influencia del Tiempo de Exposición”, *7ª Reunión Nacional de Óptica* (8-11 September 2003, Santander, Spain), *Actas del Congreso*, pags. 127-128 (2003).
- M.V. Pérez, C. Bao, M.T. Flores-Arias, A. Castelo, C. Gómez-Reino y C.R. Fernández-Pousa, “Optical Sensor by Talbot effect in selfoc lens”, *Second*

European Workshop on Optical Fiber Sensors (9-11 June, 2004, Santander, Spain), Proceedings SPIE **5502**, 427-430 (2004).

• A. Castelo, D. Nieto, C. Bao, M.T. Flores-Arias y M.V. Pérez, “Fabrication and characterization of phase gratings on PbO-SiO₂ glasses by laser irradiation”, *10th Microoptics Conference MOC’04* (1-3 September 2004, Jena, Germany), pags. 127-128 (2004).

• A. Castelo, D. Nieto, M.T. Flores-Arias, C. Gómez-Reino y G. De la Fuente, “Escritura láser en vidrio por ablación de muestras metálicas”, *4^a Reunión Española de Optoelectrónica* (13-15 July 2005, Elche, Spain), Actas del Congreso, pags. 285-288 (2005).

• A. Castelo, D. Nieto, M.T. Flores-Arias, C. Gómez-Reino y G. de la Fuente, “Laser backwriting process on glass via ablation of metal targets”, *International Congress on Optics and Optoelectronics* (28 August-2 September 2005, Warsaw, Poland), Proceedings SPIE **5958**, 59582H-1 – 59582H-8 (2005).

• A. Castelo, M.T. Flores-Arias, M.V. Pérez, C. Bao, M.G. Allegue y C. Gómez-Reino, “Aplicación del efecto Talbot en la fabricación de microlentes”, *XXX Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física* (12-16 September 2005, Orense, Spain), Actas del Congreso, pags. 694-695 (2005).

• A. Castelo, D. Nieto, M.T. Flores-Arias, C. Bao, C. Gómez-Reino y G.F. de la Fuente, “Escritura láser en vidrio mediante ablación de muestras metálicas: estudio para diferentes velocidades de trabajo”, *XXX Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física* (12-16 September 2005, Orense, Spain), Actas del Congreso, pags. 713-714 (2005).

• A. Castelo, D. Nieto, M.T. Flores-Arias, C. Bao, M.V. Pérez, C. Gómez-Reino, C.I. López-Gascón, X. De la Fuente, R. Rangel-Rojo, “Temperature dependence of laser backwriting process on glass”, *Photonics Europe* (3-7 April 2006, Strasbourg, France), Proceedings SPIE **6185**, nº 61851B (2006).

• C. Gómez-Reino, M.T. Flores-Arias, A. Castelo, Y. Meuret, C. Ruwisch, H. Thienpont, N. Lindlein, “Light propagation in a GRIN microlens with gain or loss and comparison with lossless case”, *Photonics Europe* (3-7 April 2006, Strasbourg, France), Proceedings SPIE **6185**, nº 618515 (2006).

- A. Castelo, M.T. Flores-Arias, C.Bao, C. Gómez-Reino y G. De la Fuente, “Fabricación de redes de difracción mediante ablación de láminas metálicas”, *5ª Reunión Española de Optoelectrónica* (11-13 July 2007, Bilbao, Spain), Actas del Congreso, pags. 149-152 (2007).
- A. Castelo, M.T. Flores-Arias, C. Bao, C. Gómez-Reino, “Fabrication of diffraction gratings by laser ablation”, *EOS Topical Meeting on Diffractive Optics 2007* (20-23 November 2007, Barcelona, Spain), pags. 146-147.