



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“Fabricación de microsistemas y máscaras
de alta resolución con tecnología láser”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA:
ALEJANDRO KAYUM JIMÉNEZ ZENTENO

ASESOR: DR. MATHIEU HAUTEFEUILLE





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatorias

A Angélica y Pascual, mis padres. Por darme la vida y la libertad para vivirla.

A Yunuem, Yareni, Tania y A. Del Mar por estar siempre junto a mí.

Agradecimientos

Al Dr. Mathieu Hautefeuille por darme otra visión de la ingeniería.

Al Laboratorio de Óptica de la Facultad de Ciencias, en especial al Dr. Víctor Manuel Velázquez Aguilar por todo el apoyo brindado.

A Gerardo Fernández por ser más que un compañero de laboratorio.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser mi Alma Máter.

Índice General

Resumen	1
Capítulo 1. Introducción	2
1.1 Tecnologías para el proceso de microfabricación	2
1.2 Proceso de microfabricación para MEMS	4
1.3 La fotolitografía	5
1.4 Litografía suave	7
1.5 Panorama general de la microfabricación con láser	8
1.5.1 Tecnología láser en la microfabricación.....	8
1.5.2 Fundamentos para la aplicación de la tecnología	9
1.5.3 Ablación láser	11
1.5.4 Parámetros para una metodología de procesamiento láser	13
1.5.5 Tecnologías de micrograbación láser	15
1.6 Características principales de los sistemas de grabación de CD/DVD	16
1.6.1 Sistemas de grabación y reproducción comerciales	16
1.6.2 Principio de operación del sistema de grabación/reproducción	16
1.6.3 Arreglo óptico interno	17
1.6.4 El fotodetector y la señal de error de enfocamiento	19
1.7 Conclusiones del capítulo.....	20
Capítulo 2. Diseño e integración del sistema de microfabricación láser	22
2.1 Descripción general del sistema de microfabricación.....	22
2.2 Utilización de la unidad óptica: <i>Optical Pick-up Unit</i> (OPU).....	24
2.2.1 Obtención de la FES para ajuste de la distancia lente-superficie	27
2.3 Arreglo mecánico de posicionamiento XYZ.....	31
2.3.1 Descripción general del arreglo mecánico	31
2.3.2 Plataforma de posicionamiento XY.....	31
2.3.3 Eje de posicionamiento vertical Z.....	33
2.4 Unidad de visualización CCD	34
2.5 Integración del sistema mecánico.....	35
2.6 Sistema electrónico para el control del diodo láser y de la plataforma de posicionamiento XY	36
2.6.1 Puerto paralelo y driver de corriente.....	37
2.6.2 Unidad de control temporal del pulso de encendido del diodo láser	39
2.6.3 Unidad de control de corriente de diodo láser LDD.....	40
2.6.4 Implementación final del sistema electrónico.....	41
2.8 Conclusiones del capítulo.....	42
Capítulo 3. Caracterización para el proceso de microfabricación láser.....	43
3.1 Objetivo y metodología empleada	43
3.2 Caracterizaciones preliminares.....	44
3.2.1 Características del sustrato de tóner impreso sobre acetato.....	44
3.2.2 Caracterización de la FES en el sustrato de tóner impreso sobre acetato.....	45
3.3 Experimentación en sustrato de tóner impreso sobre acetato	46
3.3.1 Topografías características del grabado láser en tóner impreso sobre acetato	46
3.3.2 Distancia lente objetivo-superficie del sustrato: Intervalo de confianza	48
3.3.3 Intensidad de corriente eléctrica y tiempos de exposición al láser.....	50
3.3.4 Efecto en la resolución: distancia entre puntos y superposición de pulsos	53
3.3.5 Caracterización de profundidad de penetración.....	54
3.4 Metodología planteada.....	58
3.5 Conclusiones del capítulo.....	60

Capítulo 4. Manufactura de microestructuras con el equipo láser	61
4.1 Descripción general del proceso de microfabricación.....	61
4.2 Técnicas directas de microfabricación	62
4.2.1 Grabado directo sobre tóner impreso sobre acetato	62
4.2.2 Sinterización de tóner	64
4.3 Ejemplos de aplicaciones de los grabados directos	67
4.3.1 Utilización de grabados directos como molde para réplicas	67
4.3.2 Utilización de los grabados directos como máscaras para fotolitografía.....	69
4.4 Conclusiones del capítulo.....	71
Análisis de resultados y conclusiones	72
Resumen de resultados	72
Conclusiones y propuestas a futuro.....	75
Anexo A.....	77
Anexo B.....	81
Anexo C.....	83
Anexo D.....	85
Anexo E.....	87
Bibliografía.....	89

Resumen

El proyecto de tesis presenta el desarrollo de un prototipo de equipo para microfabricación láser, usando el sistema óptico de un reproductor/grabador comercial de discos ópticos que permita la fabricación directa de máscaras y moldes de alta resolución. Así mismo se presenta una serie de experimentos sobre un sustrato de tóner impreso sobre acetato. Para establecer una metodología de uso del prototipo propuesto y posteriormente generalizar el proceso sobre otros sustratos y fabricar microestructuras.

En el capítulo 1 se da un panorama general de la microfabricación láser. Partiendo de la descripción del funcionamiento de los sistemas láser y posteriormente presentando los fundamentos necesarios para la aplicación de dicha tecnología en los procesos de ablación y sinterización.

En el capítulo 2 se desarrolló una nueva herramienta de microfabricación láser la cual tiene como característica principal su bajo costo y fácil realización. El prototipo ofrece la posibilidad de realizar micrograbados, con base en un haz de diodo láser enfocado y controlando la energía suministrada al mismo; a partir de un diseño en dos dimensiones.

El capítulo 3 presenta los resultados de los experimentos realizados sobre el sustrato seleccionado, tóner impreso sobre acetato, que sirven como base para establecer una metodología para el uso del prototipo.

En el capítulo 4 se propone el proceso general para la manufactura de microestructuras. Tomando como punto de partida la metodología para la utilización del prototipo y la experimentación previa. Finalmente se presenta la utilización de los grabados para la obtención de moldes utilizados en litografía suave y como máscaras de procesos fotolitográficos.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Tecnologías y procesos de microfabricación

La microfabricación se refiere a la tecnología que se encarga de la fabricación plana y tridimensional de estructuras y sistemas con dimensiones micrométricas. Los procesos de fabricación a ésta escala generalmente utilizan técnicas provenientes de la microelectrónica y están basados en la industria de semiconductores y circuitos integrados [1.1, 1.2].

Se pueden clasificar los procesos de fabricación en función de su origen: Tecnologías de Microsistemas (MST: *micro systems technology*) y Tecnologías de MicroIngeniería (MET: *MicroEngineering Technologies*) [1.1 p.19].

Los procesos MST engloban principalmente métodos de fabricación que difieren significativamente de los procesos convencionales con herramientas mecánicas, estos métodos de fabricación incluyen a los Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS: *MicroElectroMechanical Systems*) y Sistemas Micro Opto Electro Mecánicos (MOEMS: *MicroOptoElectroMechanical Systems*).

Los procesos MET incluyen otra serie de métodos que se caracterizan por la producción de componentes, moldes y superficies microestructuradas basados principalmente en procesos mecánicos. La figura 1.1 muestra de forma gráfica la clasificación antes descrita, se observa que los subconjuntos no son completamente independientes entre sí, ya que presentan un cierto grado de interacción entre ellos. El tamaño de las flechas representa con qué frecuencia cada subconjunto se emplea en las tecnologías MST y MET.

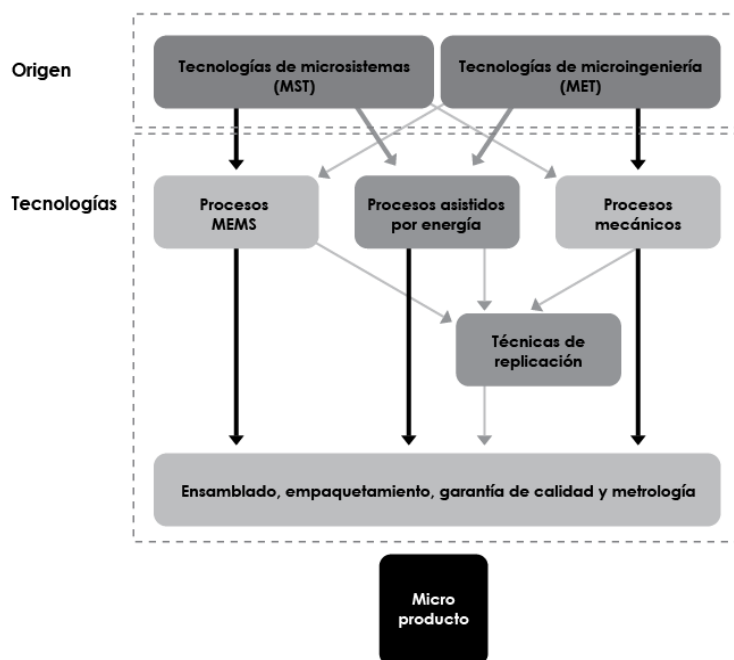


Figura 1.1: Clasificación de las tecnologías de microfabricación. Fuente: [1.1 p.20].

En la figura 1.1 pueden observarse cuatro grandes subconjuntos, los cuales se describen brevemente a continuación.

- Procesos mecánicos, como el micromaquinado con diamante, el microfresado, el microtaladrado y el microrrectificado.
- Procesos asistidos por energía [I.1 p.23], tales como
 - ✓ Maquinado por haz láser (LBM, *Laser Beam Machining*)
 - ✓ Maquinado por microelectroerosión (MicroEDM, *Micro Electro Discharge Machining*)
 - ✓ Maquinado por haz de electrones(EBM, *Electron Beam Machining*)
 - ✓ Maquinado por haz de iones enfocados(FIB, *Focused Ion Beam*)
 - ✓ Maquinado por haz de plasma (PBM, *Plasma Beam Machining*)
- Los procesos de microfabricación para MEMS. Los MEMS aprovechan los fenómenos de la mecánica a escala micrométrica y se caracterizan por incluir tanto componentes eléctricos como mecánicos. Se subdividen en MOEMS, MEMS de RF, PowerMEMS, BioMEMS (microfluidica / lab-on-a-chip). Consisten básicamente en la miniaturización de soluciones existentes o de nuevas aplicaciones a micro escala gracias a la integración de varios componentes activos en un solo chip. De este tipo de procesos se hablará con mayor detalle en la sección 1.2
- Métodos de réplica, como el estampado (*hot embossing*) o el moldeado de réplica. Estas tecnologías se clasifican en un grupo en sí mismo aunque requieran de una etapa de microfabricación previa para la obtención de moldes. Está contenida dentro de las técnicas de litografía suave, de la cual se hablará en la sección 1.4

Marc J. Madou enumera las tecnologías de miniaturización más relevantes, organizándolas en métodos tradicionales o no tradicionales y métodos litográficos o no litográficos. En la figura 1.2 se observa una descripción de las técnicas de microfabricación existentes.

Técnicas tradicionales (No involucrando fotolitografía)	Grabado químico Maquinado electromecánico EDM EDWC EBM Deposición continua FIB Híbridos de película gruesa	LBM PBM Estereolitografía Maquinado de ultraprecisión Microdispensación Hot embossing Chorro de agua abrasivo
Técnicas NO tradicionales (Involucrando fotolitografía)	Fotofabricación Fotograbado químico Dry/Wet etching SOI	LIGA Transparencia al UV Micromoldeado HEXSIL
Técnicas NO tradicionales (No usando fotolitografía)	AFM, STM Monocapas Autoensambladas	

Figura 1.2: Clasificación de las técnicas de microfabricación por Marc J. Madou.
Fuente: [I.1 p.18].

1.2 Proceso de fabricación para MEMS

En la presente sección únicamente se hará referencia al proceso de fabricación para microsistemas conocidos como MEMS, debido a que se hará uso de técnicas para transferencia de patrón en el presente proyecto.

La mayoría de las técnicas de fabricación de MEMS tienen sus raíces en los métodos de fabricación estándar desarrollados por la industria de semiconductores. Además los materiales de fabricación utilizados en MEMS son más variados ya que se pueden usar polímeros, cerámica, biomateriales, carbono, etc. [1.3].

Puede visualizarse en la figura 1.3 el proceso básico de fabricación para MEMS del cual se distinguen cinco grandes etapas para llegar a un producto o prototipo final, teniendo un diseño previo.

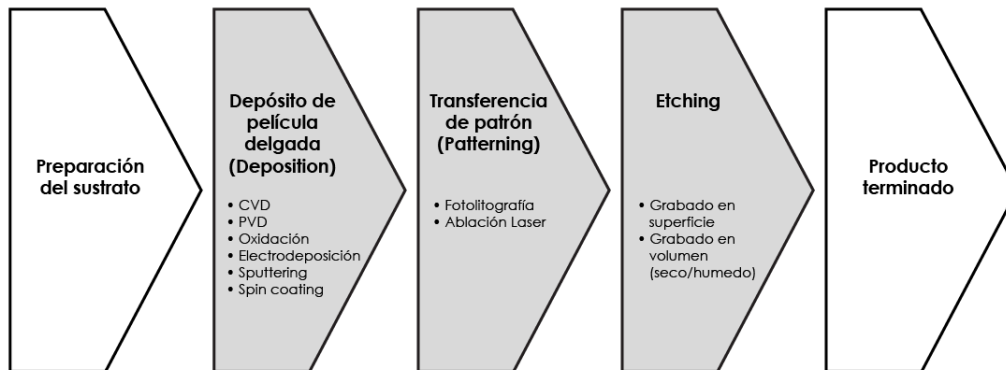


Figura 1.3: Proceso básico de fabricación para MEMS

Las películas delgadas de distintos materiales se depositan con diversas técnicas químicas o físicas. Las propiedades de la película dependen en gran medida de la técnica utilizada, estas pueden ser: deposición química por vapor (CVD: *Chemical Vapor Deposition*), deposición física por vapor (PVD: *Physical Vapor Deposition*), oxidación, electro deposición, *sputtering* (chisporroteo de partículas del material deseado en alto vacío) y técnica de recubrimiento por giro (*spin coating*) [1.5].

Posterior a la deposición de la película delgada, se realiza una etapa de fotolitografía con el fin de transferir el patrón diseñado en una resina fotosensible depositada a su vez sobre la película a grabar.

Otra técnica utilizada para transferir el patrón en la resina o directamente en el material sin requerir a la fotolitografía es el grabado directo por medio de la ablación láser. La transferencia de patrón por fotolitografía o ablación láser es generalmente seguida por un paso de grabado, con productos químicos en estado líquido o gaseoso, con el fin de obtener una película de dibujos o la remoción de material selectivo sobre el sustrato. Sin embargo, como se ha mencionado, la ablación láser puede ser muy útil

ya que si se realiza en el material a grabar directamente no requiere de una etapa posterior de grabado.

El grabado puede ser superficial (*surface micromachining*) o de volumen (*bulk micromachining*) y este último a su vez puede realizarse en seco o húmedo según el tipo de productos utilizados (*Dry/Wet etch*) [1.4]. Por último, se realiza la unión de sustratos ya sea para integrar múltiples funcionalidades, estructuras de mayor complejidad o para fines de empaquetado para llegar a un producto o prototipo terminado con el cual se puedan realizar las pruebas de caracterización.

Dentro de este proceso, el depósito de material, la transferencia de patrón y el grabado son tres etapas que pueden ser repetidas de acuerdo a las especificaciones del diseño y condiciones de fabricación de la estructura micrométrica [1.2, 1.4].

1.3 La fotolitografía

La fotolitografía es una derivación de la técnica general conocida como litografía y es comúnmente utilizada en la microlitografía. Es necesario introducir dicha técnica para posteriormente explicar la litografía suave, que complementara la etapa de transferencia de patrón dentro del proceso de fabricación de microestructuras.

En este proceso un patrón se transfiere a una resina fotosensible debido a la exposición a una fuente de luz UV a través de una máscara. La máscara, generalmente de cromo u óxido de hierro, consiste de patrones opacos sobre un soporte transparente, que se utiliza para definir las características de diseño sobre el sustrato expuesto. El material fotosensible expuesto a la luz se vuelve más soluble (resina positiva) o menos soluble (resina negativa) en una solución química [1.3]. La resolución final del diseño en la resina depende de la resolución en el plano de la máscara, de la potencia de exposición a la luz y de la longitud de onda utilizada.

A continuación se presentan los pasos básicos de la fotolitografía los cuales se observan gráficamente en la figura 1.4

1. Preparar la superficie: Limpiar el sustrato de cualquier contaminante, deshidratarlo en un horno y eventualmente depositar un químico que promueva la adhesión de la resina fotosensible (por ejemplo el HMDS: *Hexamethyldisilazane*)
2. Depositar el material fotosensible: Deposito mediante *Spin coating* para homogeneizar la capa y controlar el espesor de la resina fotosensible. Posteriormente se puede aplicar un horneado suave (llamado recocido o *soft bake*) para mejorar la adhesión al sustrato.
3. Alinear la máscara y exponer: Se alinea la máscara para transferir el patrón en la zona y según la orientación deseada y se transfiere el patrón de la misma, en seguida se expone el material fotosensible a la luz. Es importante caracterizar bien el material, es decir establecer la potencia de la fuente luminosa y el tiempo de exposición.

4. Revelar: Se disuelven las zonas solubles de acuerdo al tipo de resina. En esta misma etapa se aplica un segundo horneado (*hard bake*) para endurecer la resina fotosensible restante.

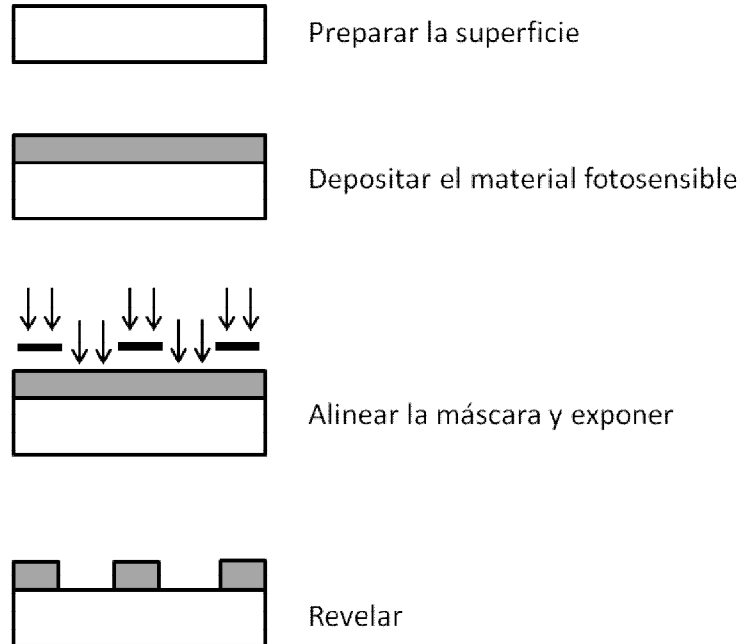


Figura 1.4: Proceso básico de fotolitografía.

Posteriormente se procede a la remoción del material fotosensible en las zonas deseadas. El patrón transferido puede ser modificado después por otro proceso aditivo (depósito) o sustractivo (grabado) en varias capas.

La alineación precisa de una sucesión de máscaras y la exposición de estos modelos conduce a complejas estructuras tridimensionales de varias capas. Cada implementación del proceso de fotolitografía tiene requisitos específicos de acuerdo a la complejidad de la estructura. La precisión de la alineación es absolutamente crítica en este caso.

Existen otras derivaciones de litografía en los que se varía básicamente la fuente de luz tales como: *extreme UV lithography* (EUV), *E-beam projection lithography* (EPL), *Ion projection lithography* y *X-ray lithography*. También otras donde se modifican las condiciones externas como la litografía de inmersión (*Immersion Photolithography*) [1.6].

1.4 Litografía suave

La mayoría de los procesos de microfabricación comunes basados en la microelectrónica requieren de equipo especializado y preparación de máscaras de alta resolución, resultando en un proceso costoso y que consume mucho tiempo. Por lo tanto, es deseable desarrollar métodos alternativos más sencillos para la realización rápida de prototipos [1.7].

Las técnicas reunidas bajo el término de litografía suave permiten el acceso a estructuras en tres dimensiones y perfiles curvos en una gran variedad de polímeros generando superficies bien definidas y controlables. También la litografía suave permite más flexibilidad en el uso de materiales compatibles con aplicaciones biológicas. Existen diversas técnicas de litografía suave, entre las principales se encuentran las siguientes [1.8]:

- Monocapa de auto ensamblaje (SAM: *Self Assembly Monolayer*)
- Molde/Réplica (REM: *REplica Molding*)
- Impresión de microcontacto (μ CP: *Micro-Contact Printing*)
- Micro moldeo con solvente (SAMIM: *Solvent-Assisted Micro Molding*)
- Moldeado de capilaridad (MIMIC: *Microm-Molding In Capillaries*)
- Moldeado de micro-transferencia (*micro-transfer molding*)
- Estampado (*hot embossing*)
- Moldeado por inyección (*injection molding*)

La principal ventaja de la litografía suave es su tiempo de desarrollo ya que se realiza el diseño deseado y obtiene la estructura micrométrica resultante en menos de 24 horas. Los métodos son generalmente de bajo costo y, a diferencia de la fotolitografía, la litografía suave se aplica a una gran variedad de polímeros y, por lo tanto, existen muchos materiales que se pueden preparar a partir de ellos [1.8].

Es una técnica de fabricación viable ampliamente utilizada en entornos de investigación [1.3, 1.9]. También es de bajo costo, experimentalmente conveniente y se ha convertido en una tecnología útil para una serie de aplicaciones que incluyen la biología celular, microfluídica, lab-on-a-chip, sistemas microelectromecánicos y electrónica / fotónica flexible [1.8].

1.5 Panorama general de la microfabricación con láser

1.5.1 Tecnología láser en la microfabricación

La aplicación de la tecnología láser (ver anexo A sobre la tecnología láser) en la microfabricación implica ventajas tales como ser un proceso sin contacto mecánico, facilitar la creación rápida de prototipos sin bajar la calidad y la precisión del corte en los materiales. También ofrece la posibilidad de utilizar al láser para microfabricación local basada en la ablación (se remueve una parte del material) o bien en la sinterización (se adhiere un material a un sustrato dado por calentamiento).

La tecnología láser en la microfabricación puede ser aplicada como

- herramienta directa por medio de la ablación, corte y adición de material como las técnicas de estereolitografía (SLA: Stereolithography), sinterización con láser (SLS: Selected Laser Sintering), y Fused Deposition Modelling (FDM).
- herramienta indirecta para la fabricación de máscaras para procesos litográficos y transferencia de patrones.

La microfabricación a partir de la tecnología láser se basa en el hecho de aprovechar el calor producido por la luz láser y en la propiedad de que el haz puede ser enfocado. Además se aprovecha el principio de absorción de la luz por un material, el cual es una característica propia del material bajo prueba.

El desarrollo de la técnica de microfabricación láser requiere

(1) del conocimiento de los parámetros propios de las fuentes láser [I.12], [I.15]

- Longitud de onda
- Irradiancia de la luz láser [W/m^2]
- Diámetro mínimo del punto en la superficie (*spot*) a la distancia focal
- Perfil espacial del haz láser (gaussiano o no)

(2) la comprensión de los fenómenos ópticos, térmicos, físicos y químicos que ocurren durante la interacción del haz láser con los materiales [I.10]

- Absorción y reflexión
- Ablación

(3) del conocimiento de los parámetros de procesamiento [I.12] láser óptimos que conlleven a una metodología de procesamiento

- La tasa de repetición del grabado o superposición de grabados
- El número de pulsos aplicados y el tiempo de exposición
- Las condiciones ambientales y del lugar de trabajo

1.5.2 Fundamentos para la aplicación de la tecnología

Diámetro del spot a la distancia focal

El diámetro del *spot* de un haz láser enfocado por una lente puede ser calculado si se conoce la distancia focal de la lente de enfocamiento f , la longitud de onda del láser λ y el diámetro del haz antes de pasar por esa lente D [I.10]. Para un haz Gaussiano en el aire, el tamaño del punto focal d se puede estimar mediante la siguiente ecuación (1.1).

$$d = \frac{4 \lambda f}{\pi D} \quad (1.1)$$

Debido a que el diámetro de un haz no depende de la intensidad de radiación, si no que sólo depende de las características de las lentes de enfoque específicamente de la apertura numérica NA , de la longitud de onda λ y del factor de calidad de la radiación, que en este caso está representado por la calidad de láser M . El diámetro del *spot* también puede ser obtenido con la ecuación (1.2), según nos indica la ecuación paraxial (Teoría paraxial) [I.13].

$$d = 2M^2 \frac{\lambda}{\pi NA} \quad (1.2)$$

Podemos asumir entonces que la variación de la densidad de energía en la zona donde el haz es enfocado sólo depende de la intensidad de radiación incidente.

Absorción de la luz láser y profundidad de difusión térmica

La absorción, que corresponde a una fracción de la luz láser incidente, depende de parámetros del láser tales como la intensidad, longitud de onda, polarización, ángulo de incidencia así como de las propiedades del material como la composición, la temperatura, la rugosidad de la superficie entre otros [I.10].

La ley de Beer-Lambert, descrita en la ecuación (1.3) relaciona la intensidad de luz entrante en un medio con la intensidad saliente después de que dicho medio haya absorbido una parte. Podemos decir que una cantidad de la luz del haz incidente es absorbida, otra es reflejada y otro tanto es transmitida a través del material, ver figura 1.5. Si definimos a la irradiancia del haz láser incidente como I_0 y la reflectancia de la superficie como R , la irradiancia de la luz transmitida decrece exponencialmente con la distancia.

$$I(z) = (1 - R)I_0 e^{-az} \quad (1.3)$$

En la ley de Beer-Lambert, a es el coeficiente de absorción y z la profundidad del material según muestra la figura 1.5. El inverso del coeficiente de absorción $1/a$, representa el punto hasta donde la luz se propaga antes de la absorción completa, este dato también es conocido como la profundidad de penetración óptica. El

coeficiente de absorción se puede expresar en términos de longitud de onda del haz láser incidente, según la ecuación (1.4).

$$a = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (1.4)$$

En la expresión anterior k , representa la parte imaginaria del índice de refracción del material y es conocido como el coeficiente de extinción. De lo antes mostrado se puede observar la dependencia que existe entre la longitud de onda del láser y la profundidad de penetración. Además la composición físico-química del material resulta un parámetro importante que determina la cantidad de luz que es absorbida [1.10], por lo cual es necesario conocer el efecto térmico que la luz absorbida causa al material.

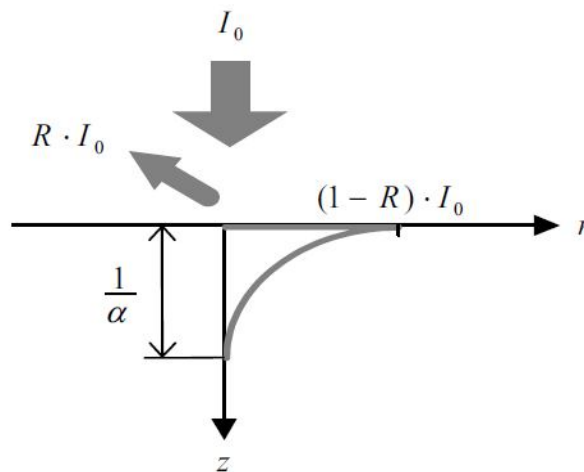


Figura 1.5: Absorción de la luz con base en la ecuación de Beer-Lambert. Fuente: [1.10]

La profundidad de penetración térmica en el material puede ser descrita por la ecuación (1.5), y es una forma de conocer la propagación del calor en un material [1.15].

$$\mu = \sqrt{\frac{k}{\rho c \pi f}} = \sqrt{\frac{1}{\rho c} k \tau} \quad (1.5)$$

Donde

k es la conductividad térmica del material

ρ es la densidad del material

c calor específico

τ es la duración temporal del pulso

1.5.3 Ablación láser

La ablación láser es una técnica que se usa para quitar o extraer localmente una parte de material deseado de su superficie mediante la irradiación de este con un rayo láser a una densidad de energía por encima del umbral de ablación, el cual es el límite inferior de energía que debe ser suministrado al material para producir un cambio en la superficie del mismo. Normalmente, la ablación hace referencia a quitar material superficial mediante un pulso de radiación, pero también es posible conseguir la ablación del material con un flujo continuo de radiación, si la intensidad de esta es lo suficientemente alta.

Cuando la densidad de energía es baja, la superficie del material se calienta al absorber la energía de los fotones del rayo y se sublima, pasa del estado sólido al gaseoso sin pasar por el estado líquido, o se evapora [I.16]. Si la densidad de energía está por encima del umbral de ablación es factible que exista un proceso de expansión dinámica del plasma, ver figura 1.6, el cual se describe a continuación: primero ocurre la absorción de fotones del láser (L: láser) por parte del material en un área igual al tamaño de la cintura del haz o punto focal, provocando un aumento de la temperatura del sustrato hasta cuando existe un cambio de fase y expulsión de masa en estado líquido (M: material fundido) y gaseoso (V: vapor), lo que conduce posteriormente a la formación de un plasma de alta densidad (DP: denso plasma) que únicamente permite una absorción parcial de la energía al material sólido o fundido y sigue contribuyendo a la transformación del material. Posteriormente ocurre el sobrecalentamiento en una zona situada por debajo de la superficie debido a que el calor del plasma se transfiere al material, originándose una microexplosión que es la causa predominante de la salpicadura (*splashing*), a continuación el plasma baja de densidad (LDP: Plasma de baja densidad) debido a la expansión adiabática y finalmente ocurre el colapso en la superficie. La duración del proceso de la expansión dinámica del plasma y la profundidad de penetración dependerán de las propiedades ópticas y termodinámicas del material [I.12, I.15].

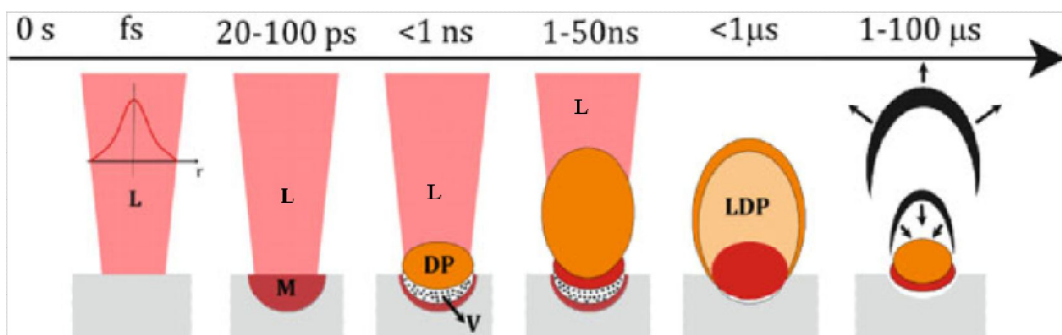


Figura 1.6: Dinámica de la formación del plasma durante la ablación con láser. L: Láser M: Material fundido. V: Vapor. DP: Denso Plasma. LDP: Plasma de baja densidad. Fuente: [I.15 p.165]

Como resultado del proceso de ablación, figura 1.7 se genera un cráter de ablación, el cual corresponde a la zona donde el material fue extraído. Dicho cráter se caracteriza por tener un diámetro externo y una profundidad. A la región circundante al cráter se le conoce como zona afectada por el calor e incluye al relieve formado por los restos de material resolidificado sobre el cráter conocido como borde. El diámetro externo corresponde a la dimensión que incluye al borde de ablación.

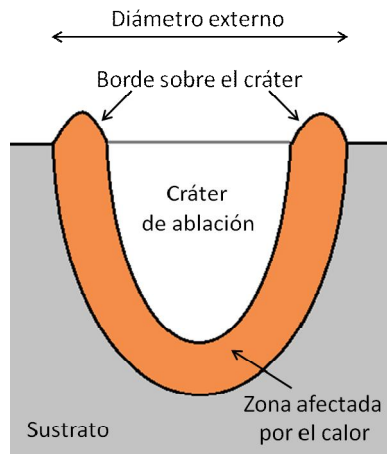


Figura 1.7: Cráter generado por ablación láser, en el se puede observar la zona denominada cráter de ablación, el diámetro externo, el borde de ablación y la zona afectada por el calor.

El aumento de energía altera entonces todas las dimensiones de cráter tanto en diámetro como en profundidad como se muestra en la figura 1.8 [I.14]. Teóricamente, cuando el haz se enfoca con una lente, a la distancia focal, el perfil de intensidad es uniforme pero debido a la naturaleza gaussiana del haz de excitación, los cráteres generados tienden a tener perfiles gaussianos también, figura 1.8b. En los cráteres generados con mayor densidad de energía, los efectos de borde sobre el cráter de ablación son más pronunciados debido a los restos de materia resolidificada, resultado del material expulsado además aumentan las dimensiones del diámetro del cráter (figura 1.8a) y se genera un cráter más pronunciado [I.13], [I.15].

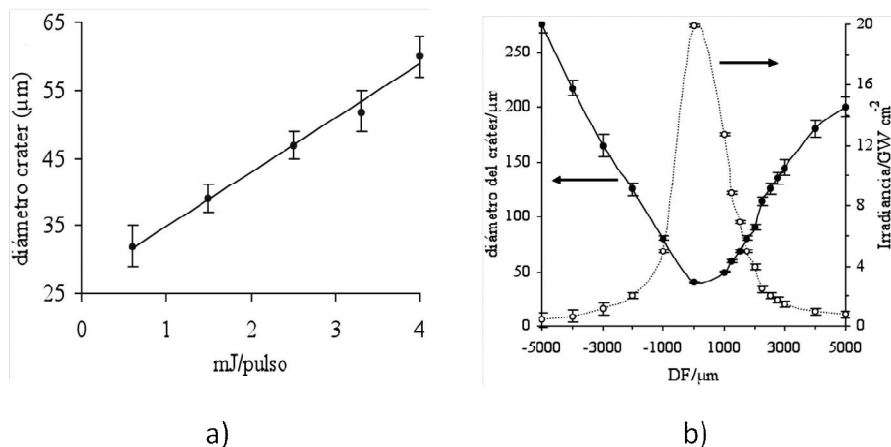


Figura 1.8: a) Influencia de la energía del pulso en el diámetro del cráter. b) Influencia de la focalización en el diámetro e irradiancia. Ambas muestras sobre metales. Fuente: [I.14]

Un enfoque común, con base en la ecuación 1.5, para reducir al mínimo el impacto de los procesos térmicos en la zona afectada por el calor, es utilizar pulsos cortos, es decir el procesamiento láser de nanosegundos o femtosegundos. En general, conforme la longitud del pulso se acorta el volumen de ablación se hace más definido y tiene menos residuos [I.15].

La ablación láser es una de las técnicas más conocidas, pero existen otros enfoques para la fabricación rápida tal como la sinterización como se presenta en [I.17] mediante el grabado directo con láser sobre partículas de polvo y a partir del cual se da un tratamiento térmico al material haciéndolo compacto y con distintas características mecánicas.

1.5.4 Parámetros para una metodología de procesamiento láser

Superposición de pulsos grabados

La superposición de pulsos se refiere a la coincidencia espacial entre dos pulsos láser consecutivos, en un supuesto ideal, cada pulso láser debería arrancar una cantidad de muestra de manera reproducible y la relación entre la profundidad del cráter y el número de pulsos debería ser lineal [I.14]. Pero por encima del umbral de ablación, el volumen de material removido por pulso normalmente muestra un incremento logarítmico de acuerdo con la ley de Beer-Lambert [I.15], ver ecuación (1.3).

Influencia de la distancia entre pulsos láser consecutivos

Cuando los grabados realizados están separados entre centros por una distancia inferior al diámetro del cráter, la profundidad de los cráteres coincidentes se hace mayor [I.15]. En ambos casos, sea superposición de pulsos o separación entre pulsos, existe una acumulación de defectos y una disminución significativa de la calidad debido a los efectos térmicos de la reducción del tiempo de difusión del calor en la pieza de trabajo, lo cual lleva implícito un aumento en la dimensión del diámetro del cráter. Para el caso del grabado de canales, se observa en la figura 1.9 la influencia de la separación entre pulsos en la profundidad reportado por [I.15].

Grabados repetitivos

De [I.15 p.114] se obtiene que el ancho de la ranura grabada con la técnica de grabados repetitivos, es decir realizar más de una grabado en la misma zona de la superficie, no se ve afectado significativamente por el número de pasadas, pero sí afecta la profundidad del canal, lo cual permite un mayor control de la pendiente de la pared del mismo.

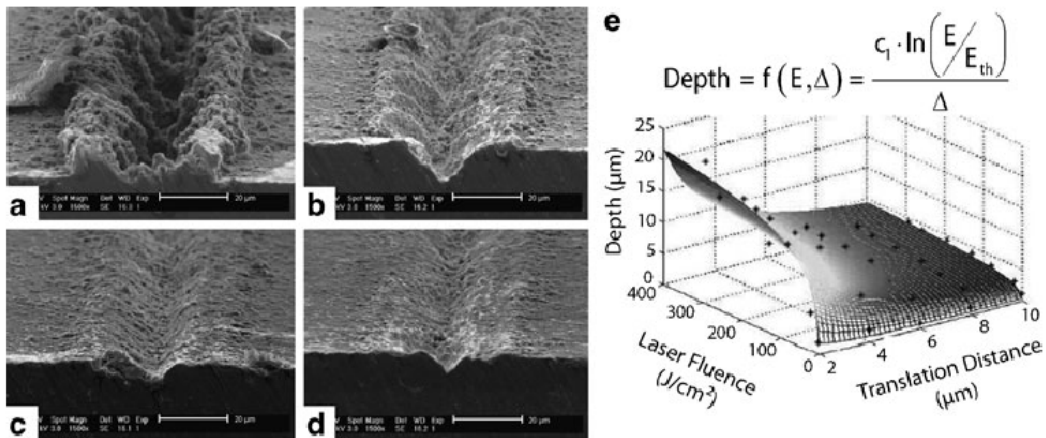


Figura 1.9: Decrecimiento del tamaño y de la pendiente de las paredes de los canales con el incremento de la distancia entre pulsos consecutivos para a) 2μm, b) 4μm, c) 6μm, d) 8μm. e) Medición de la profundidad de canal en función de la distancia entre puntos y la energía láser. Fuente: [I.15 p.114]

Velocidad de barrido

Un efecto similar al provocado por la distancia entre puntos consecutivos se presenta cuando se estudia la influencia de la velocidad de barrido en el grabado, aunado al pulsado del láser. La profundidad del canal varía de manera inversamente proporcional a la velocidad de barrido, a menor velocidad de barrido mayor es la profundidad del surco, ya que existe una superposición de los cráteres durante la ablación [I.14]. La figura 1.10 muestra el comportamiento típico de la profundidad en relación con la velocidad de barrido.

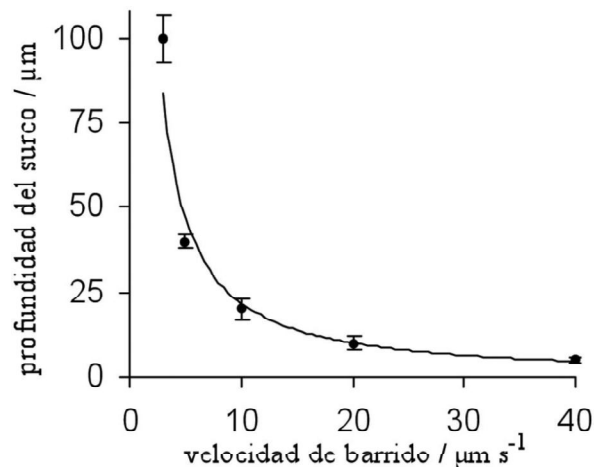


Figura 1.10: Profundidad del canal en función de la velocidad de barrido. Muestra sobre superficie metálica. Fuente: [I.14].

1.5.5 Tecnologías de micrograbación láser

Las tecnologías de microfabricación con láser se basan en láseres ultra rápidos, especialmente los láseres pulsados de nanosegundos y femtosegundos. Esto debido a que un laser de pulsos ultracortos conduce fácilmente a una radiación extremadamente alta dando como resultado un cráter afilado con casi ninguna zona afectada por el calor [I.10].

La tabla 1.1, muestra algunos dispositivos láser comúnmente utilizados para la microfabricación.

Estado Físico	Medio activo (longitud de onda central)	Método de excitación	Características
Gas (Excimeros)	ArF (193nm) KrF (248nm) XeCl (308nm)	Descarga eléctrica	De alta energía, pulsos de nanosegundos con relativamente baja tasa de repetición (menos de varios kHz)
Estado sólido	Cristales no lineales (Típicamente visible o UV)	Bombeo de alta potencia para láseres IR	Generación de armónicos con la óptica no lineal
Estado sólido	Ti: zafiro (800nm) Nd: YAG (1064nm) Nd: YVO ₄ (1064nm) Yb: YAG (1030nm) Yb: fibra de vidrio (1.07µm)	Bombeo óptico	Potente o Emisión ultrarrápida Amplia variedad de modos de operación Amplia variedad de modos de operación Amplia variedad de modos de operación Eficaces y haz de alta calidad
Gas (molecular)	CO ₂ (10.6µm or 9.4µm)	Descarga eléctrica	Eficiente y alta energía en el infrarrojo medio

Tabla1.1: Dispositivos láser comunes utilizados en la microfabricación. Fuente [I.15 p.65]

Las tecnologías láser con mayor aplicación en la microfabricación, debido a sus características de alta velocidad de pulsado y rapidez, son: el láser de excimeros, láser de CO₂ y el láser de Nd-YAG [I.10]. Estos equipos son caros, requieren de condiciones de cuarto limpio y de una preparación técnica particular para su manejo, aunque la utilización de ellos en la ablación ofrece la posibilidad de obtener grabados con dimensiones submicrométricas.

A pesar de la existencia de una gran variedad de equipos comerciales para microfabricación con láser en el mercado actual, el difícil acceso a dichas herramientas limita la experimentación actual, por ello se plantea ofrecer una nueva herramienta de fabricación de máscaras y moldes de alta resolución para complementar los procesos actualmente realizados y utilizados en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, basados en un haz láser enfocado obtenido de la OPU de un grabador/reproductor de discos ópticos del cual se hablará en la siguiente sección.

1.6 Características principales de los sistemas de grabación de CD/DVD

1.6.1 Sistemas de grabación y reproducción comerciales

Los sistemas de grabación/reproducción de Compact Disc (CD) y Digital Versatil Disc (DVD) ofrecen una tecnología que a lo largo de su existencia ha ido evolucionando y perfeccionando su capacidad de almacenamiento al grado de evolucionar a otras como el Blu-Ray o HD DVD. Estos avances se han podido realizar gracias a la gran flexibilidad de longitudes de onda que ofrecen los diodos láseres actuales.

El desarrollo de dicha tecnología permite tener en la actualidad sistemas comerciales capaces de reproducir y grabar los formatos CD/DVD en un mismo dispositivo. Dicho logro se debe a la integración de sistemas electrónicos, ópticos y mecánicos, teniendo como base el enfocamiento preciso de un haz de luz láser, así como al desarrollo de la tecnología de materiales para la fabricación de los sustratos o discos ópticos.

1.6.2 Principio de operación del sistema de grabación /reproducción

Los grabadores de discos ópticos trabajan bajo el mismo principio, para grabar un CD o DVD grabable. En la figura 1.11 se observa la superficie *virgen* de la capa reflectante de los discos ópticos en cuestión (ver anexo B sobre los discos ópticos). Un láser es enfocado sobre la capa reflectante y sobre la pista pre-ranurada se graban los *pits* (pozos) a partir del calor producido por el láser enfocado, generando así la transferencia de la información previamente digitalizada. Al espacio entre dos *pits* se le llama *land*. En la figura 1.11, también se observa la resolución alcanzada por el grabado láser sobre la superficie reflectante de cada uno de los discos.

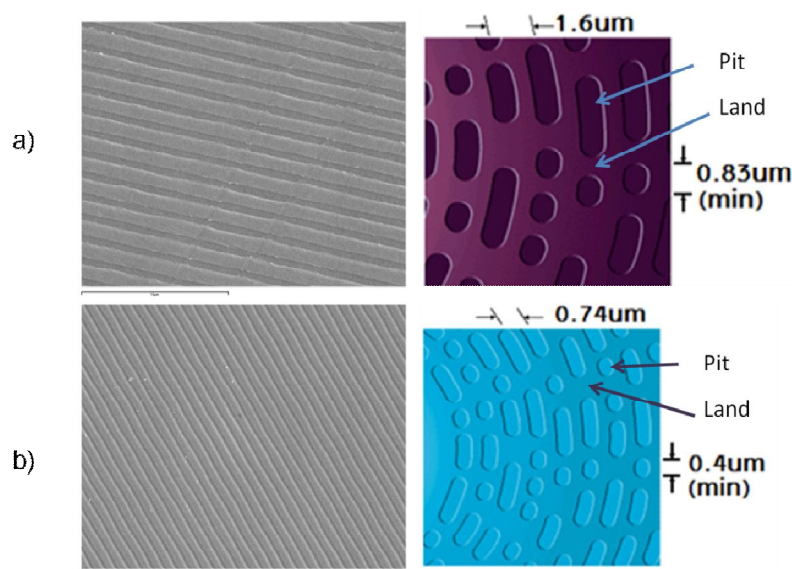


Figura 1.11: a) Superficie pre-ranurada de CD. b) Superficie pre-ranurada de DVD [1.23]

En el caso de la lectura de datos, ver figura 1.12, se tiene como base la interferencia óptica. Se dispara un haz de luz láser enfocado hacia la superficie reflectante del disco, la cual es reflejada y recibida por un fotodetector. Sí existe una diferencia de profundidad en la pista pre-ranurada (de un cuarto a un sexto de la longitud de onda del láser que se utiliza para leer [1.24]) entre los *pits* y *lands* de la superficie reflectante, se genera un desfase de hasta 180 grados lo que provoca interferencia destructiva de la luz láser reflejada sobre el detector. En el caso contrario toda la luz se reflejará en la misma fase. Este hecho provoca una diferencia de intensidad luminosa que es percibido por el fotodetector y posteriormente interpretado como datos digitales gracias a un cambio de voltaje del detector (ver sección posterior 1.6.4).

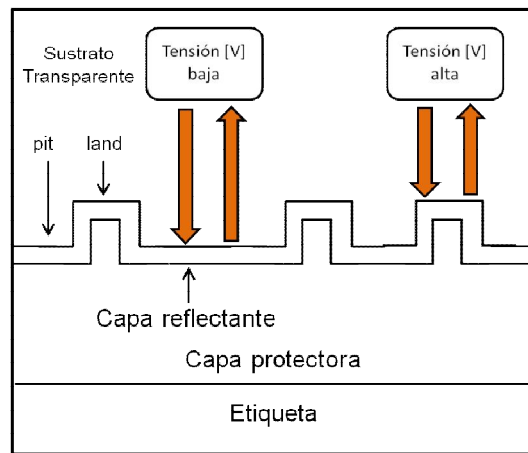


Figura 1.12: Principio de la lectura digital de datos

1.6.3 Arreglo óptico interno

El arreglo óptico está implementado dentro de la unidad de lectura óptica conocida como OPU (Optical Pick-up Unit). Dicha unidad contiene internamente a los elementos ópticos que proporcionan un enfocamiento preciso del haz láser, con un *spot* de escala micrométrica cuando está enfocado. Dichos elementos se describen brevemente a continuación.

- Rejilla de difracción: La rejilla de difracción es el elemento óptico que se encarga de dividir el rayo de luz en varios haces con diferentes potencias cada uno. El rayo láser se difracta en diferentes ángulos, obteniendo así varios haces más finos que el original. De esta manera se obtiene un haz central, junto con otros laterales de menor intensidad.
- Lente colimador: La lente colimadora puede ser ubicada en diferentes posiciones, dependiendo del fabricante de la OPU. Su finalidad es la obtención de rayos paralelos a partir de los rayos divergentes que inciden directamente en ella.

- Divisor de haz: Es el componente encargado de dirigir el haz láser hacia el disco. Cuando regresa, una vez reflejado en la superficie del disco, se desvía hacia el arreglo de fotodetectores. Su construcción consta de dos prismas de 45° con una superficie común en la cual se sitúa una membrana dieléctrica que permite la transferencia de la luz polarizada horizontalmente del láser transmisor y desvía la luz polarizada verticalmente, que corresponde a la reflejada, al los fotodetectores.
- Lámina de cuarto de onda: Esta lámina es responsable de controlar la polarización de la luz. Se trata de un vidrio con la propiedad astigmática de doble refracción que polariza al haz de forma circular.
- Lente objetivo: La lente de enfoque en muchos reproductores de CD/DVD se puede observar a simple vista. Es una lente óptica convexa y se encarga de hacer converger los rayos de luz en un punto focal determinado por la distancia focal intrínseca de la lente, la cual es típicamente de 4mm.

La trayectoria óptica que sigue el haz láser mostrada en la figura 1.13 con flechas de colores, se inicia en la fuente de semiconductor. La luz del láser es polarizada horizontalmente, pasa sin cambios a través del divisor de haz a la lámina de cuarto de onda, que proporciona la polarización circular. La superficie del disco refleja la luz polarizada circularmente como un espejo. Al pasar de nuevo a través de la lámina de cuarto de onda se rectifica la luz, dándole la polarización vertical. Esta polarización, no se puede pasar por el divisor de haz, por lo que se desvía a los sensores optoelectrónicos encargados de generar, por medio de una implementación electrónica externa, las señales FE y TE.

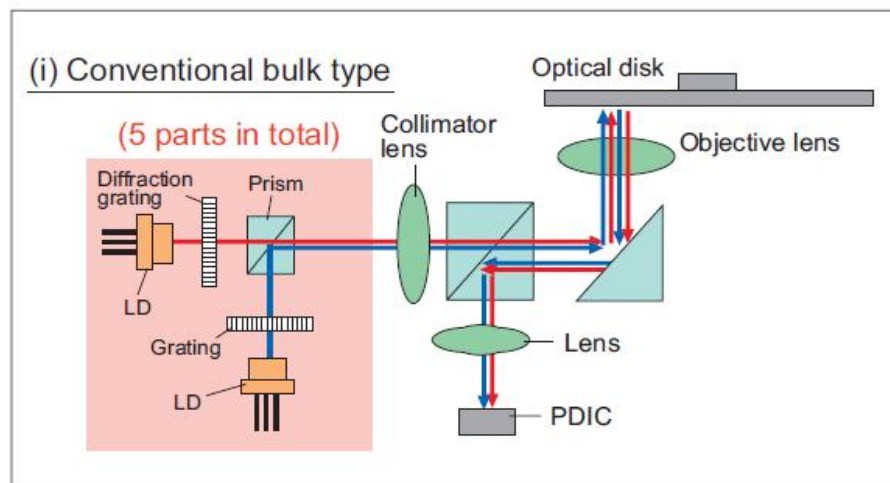


Figura 1.13: Sistema óptico interno y trayectoria óptica del láser [1.25]

Algunos fabricantes integran los elementos ópticos, salvo el láser y la lente objetivo, en un holograma (*Hologram Unit*) para integrar aún más el sistema óptico. Además, el láser, los fotodetectores y la lente objetivo se colocan en la misma carcasa que el holograma [I.25].

1.6.4 El fotodetector y la señal de error de enfocamiento

La OPU además de contener el arreglo óptico, también contiene un arreglo de sensores optoelectrónicos a partir de los cuales se pueden realizar tres funciones: (1) leer la información contenida en el disco, (2) determinar el error de enfocamiento vertical entre la lente y el disco óptico (FE: *Focus error*) y (3) determinar el error de seguimiento de pista (TE: *Tracking Error*) que sirve para sensar el seguimiento del haz de la pista pre-grabada. Estas tres funciones se realizan en conjunto con el arreglo óptico interno (ver sección 1.6.3) y dispositivos electrónicos externos.

El fotodetector está compuesto de cuatro sensores optoelectrónicos (fotodiodos) como se muestra en la figura 1.14. Este arreglo es un transductor de luz que proporciona cuatro señales de voltaje (A, B, C y D) como respuesta a la radiación óptica que incide sobre la superficie del sensor. Será utilizado para determinar la señal de error de enfocamiento FES (*Focus Error Signal*) que permitirá conocer la distancia relativa entre lente y soporte a leer/grabar. Para más información sobre la FES y la señal de error de seguimiento de pista TE, se recomienda revisar la bibliografía ampliamente disponible [I.26-I.28]. A continuación se detalla la parte de interés en el presente proyecto: enfocar el haz a la distancia correcta sobre varias superficies.

El error de enfocamiento FE se determina mediante el uso de una lente astigmática y del fotodetector. Cuando la lente es esférica, la luz reflejada desde la superficie de interés aparece en el fotodetector como un círculo, con un radio mínimo cuando el *pit* está en foco. Un radio grande indica que la lente no está enfocada en la superficie de interés, pero no indica si la lente tiene que acercarse o alejarse para estar enfocada.

Para eliminar la necesidad de un procesamiento complejo de señales y determinar la dirección correcta del desplazamiento, la lente es astigmática diagonalmente, dando así un punto focal diferente a lo largo de cada diagonal. Cuando la superficie a enfocar está entre los dos puntos focales, que es la posición de lectura deseada, el *spot* en el detector es circular. Sin embargo, cuando la lente se aleja de esta posición, es decir, cuando se mueve hacia uno u otro punto focal, se acorta el *spot* a lo largo de un eje y se alarga a lo largo del otro, lo que crea una mancha elíptica [I.26].

Una curva en forma de S (curva-S) describe por medio de la FES el comportamiento del punto focal proyectado en una superficie (figura 1.14). El punto de máximo enfocamiento sobre la superficie es representado por un voltaje idealmente cero. Las variaciones de voltaje alrededor del punto focal, cuando el *spot* es de tamaño mínimo, representan la dirección del desenfoque, ya sea que se aleje o se acerque a la superficie [I.26].

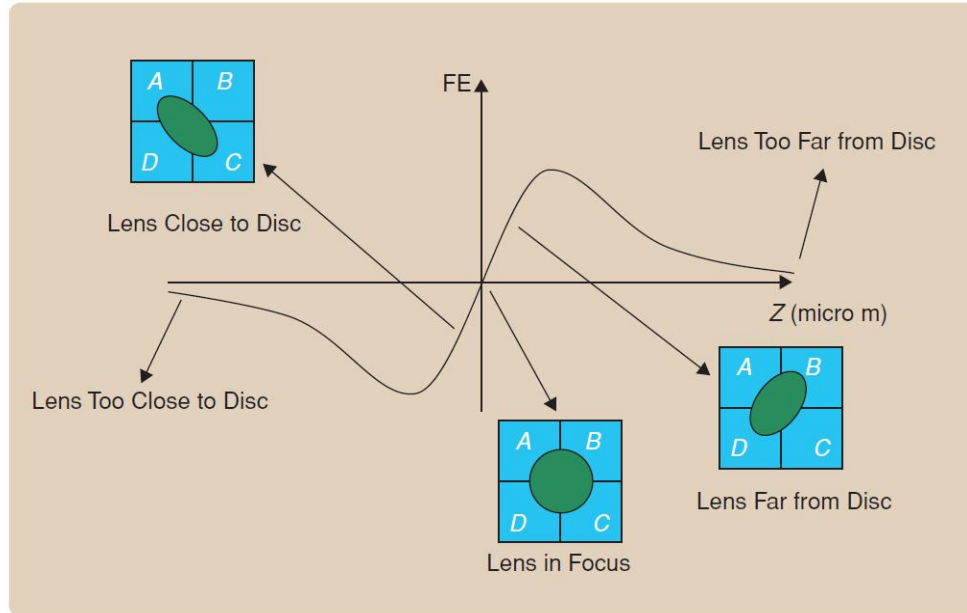


Figura 1.14: Curva-S obtenida a partir de un arreglo típico de cuatro fotodetectores. El spot es circular a la distancia focal y elíptico cuando se aleja del mismo. La FES vuelve a ser pequeña en magnitud cuando se aleja demasiado de la distancia focal. Fuente: [1.26]

El voltaje de la FES es el resultado de un procesamiento analógico de las cuatro señales de voltaje, (A, B, C y D) provenientes del fotodetector y está determinada por la siguiente expresión:

$$FES = (A + C) - (B + D) \quad (1.6)$$

Como puede notarse, el fotodetector únicamente proporciona las señales de voltaje de manera individual, por lo que la FES es obtenida en una etapa posterior por medio de un procesamiento analógico con un arreglo electrónico externo. La operación realizada se justifica porque da como resultado una amplitud de voltaje que corresponde a la distribución geométrica del spot reflejado sobre el fotodetector, considerando que pasa de una forma elíptica a una circular.

1.7 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se principalmente a los procesos de fabricación para MEMS, tal como la fotolitografía y las técnicas de litografía suave, debido a que dichos procesos y técnicas serán usadas hacia la parte final del presente proyecto, y los resultados presentados en el capítulo 4.

También se presentó un panorama general de la microfabricación láser, partiendo de la descripción del funcionamiento de un láser y de las características más representativas del mismo y dando énfasis a los diodos láser, ya que se trabajará experimentalmente con láseres de éste tipo los cuales están disponibles en el módulo óptico de un quemador CD/DVD comercial, la OPU. Como parte de la microfabricación

con láser se presentaron los fundamentos necesarios para la aplicación de dicha tecnología en los procesos de ablación y sinterización, así como los parámetros de mayor relevancia a considerar para llegar a una metodología de fabricación con láser y que será planteada en el capítulo 3.

La base del presente proyecto es la OPU de un sistema comercial de grabación/reproducción que contiene un par de diodos láser, útiles para el objetivo de microfabricación láser y un sistema de enfocamiento preciso. Se presentaron las principales características del funcionamiento de la OPU y se describió el procesamiento de obtención de una señal de enfocamiento a partir del fotodetector incorporado a la OPU. Lo anterior servirá como base para el desarrollo de un prototipo funcional de microfabricación con láser, el cual se describe a detalle en el capítulo 2.

Capítulo 2. Diseño e integración del sistema de microfabricación láser

2.1 Descripción general del sistema de microfabricación

Como se mencionó en el capítulo anterior, la tecnología láser se aprovecha dentro de los procesos de microfabricación. Ya sea de manera directa como herramienta de micromaquinado de diversos materiales o indirectamente en la fabricación de máscaras para el proceso de fotolitografía y de moldes para realización de microestructuras tridimensionales (réplicas). A pesar de la existencia de una gran variedad de equipos comerciales para microfabricación con láser en el mercado actual, sus altos costos y difícil acceso limitan la experimentación a escalas micrométricas.

La meta del presente proyecto es ofrecer una nueva herramienta de fabricación de máscaras y moldes de alta resolución para complementar los procesos actualmente realizados y utilizados en la Facultad de Ingeniería de la UNAM; para desarrollar patrones con dimensiones menores a $50\mu\text{m}$, así como la posibilidad de realizar microestructuras de manera directa considerando materiales o sustratos útiles para el propósito de microfabricación a través de procesos conocidos.

Con base en las consideraciones anteriormente planteadas y conociendo las características intrínsecas de los elementos y dispositivos que son usados, se plantea la integración de un prototipo funcional de microfabricación láser de bajo costo y fácil de realizar y utilizar. El proceso general a seguir se muestra de manera general en la figura 2.1. A partir de un diseño original en 2D digitalizado en formato *bitmap* monocromático, se aspira a programar una plataforma móvil con control de enfocamiento preciso del láser sobre la superficie a grabar y del tiempo de pulsado.

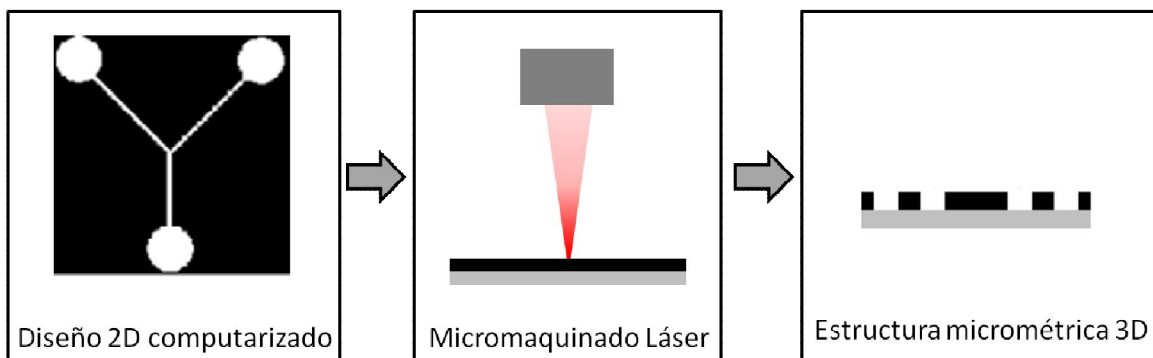


Figura 2.1: Esquema general del proceso de microfabricación con la propuesta planteada.

La idea principal tiene como punto de partida un haz láser enfocado obtenido de la OPU de un grabador/reproductor de discos ópticos. Debido a sus prestaciones de fábrica, dicha unidad cuenta con un sistema óptico de enfocamiento del haz y es de tamaño compacto, lo que le hace relativamente fácil de manipular y utilizar.

Se propuso desarrollar una plataforma de grabado láser que permite el movimiento preciso y controlado en dos ejes (XY) de una muestra. Además de un control del eje vertical (Z) para poder manipular la distancia entre la lente del OPU y la superficie de la muestra a grabar y controlar con precisión la posición del punto focal del haz láser. Dicho recurso se complementa con una unidad de monitoreo electrónico de la distancia Z respecto al sustrato, a partir del fotodetector integrado en la OPU para mayor precisión (ver sección 1.6.4 sobre la señal de FES).

Se propuso agregar también una unidad de visualización en tiempo real para observar la muestra antes y durante del proceso de grabación a partir de un detector tipo CCD (*charge-coupled device*) reciclado de una cámara web comercial con conexión USB, complementado con un objetivo de microscopio con amplificación.

Gracias a una computadora se pueden controlar las señales de encendido del haz así como las señales de control de desplazamiento de la plataforma de trabajo XY. Dicho sistema de cómputo se encarga también de procesar por medio de un programa de propósito específico (desarrollado en paralelo al proyecto por el grupo de trabajo, ver anexo C), la rutina a seguir para realizar los grabados previamente diseñados, imitando a los sistemas de Control Numérico Computarizado (CNC).

La figura 2.2 muestra un diagrama general del sistema propuesto, en él se identifican por colores los bloques principales, y las flechas indican la interconexión que existe entre cada uno de los bloques.

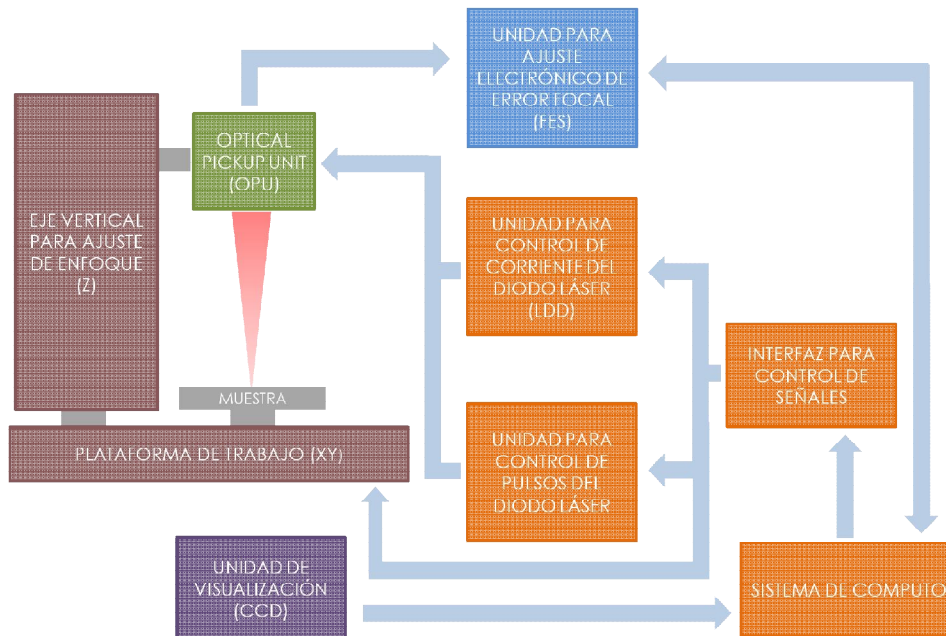


Figura 2.2: Diagrama de bloques general del sistema de microfabricación propuesto.

En color verde se observa al bloque correspondiente a la unidad óptica OPU, en color naranja los bloques correspondientes al sistema electrónico para control del láser y de posicionamiento XY, en color café la parte correspondiente al montaje mecánico. La unidad de ajuste electrónico de error focal se muestra en color azul y el color morado muestra a la unidad de visualización CCD.

2.2 Utilización de la unidad óptica: *Optical Pick-up Unit (OPU)*

Para el presente proyecto se utilizó una OPU obtenida de un dispositivo reproductor/grabador de discos ópticos marca LG modelo GH22LS40 con capacidad para grabar sobre diversos formatos a una velocidad máxima de 22x, además cuenta con la tecnología de impresión láser sobre una resina fotosensible, conocida como *LightScribe™* [II.1]. En principio puede utilizarse cualquier dispositivo comercial grabador de discos, se seleccionó el modelo antes mencionado debido a su disponibilidad en el mercado al empezar el presente proyecto y su costo bajo.

El dispositivo grabador/reproductor contiene la OPU presentada en la figura 2.3, cuyas principales tareas son: leer la información contenida en el disco, determinar el error de distancia focal (FE: Focus Error) y determinar el error de seguimiento de pista (TE: Tracking Error).

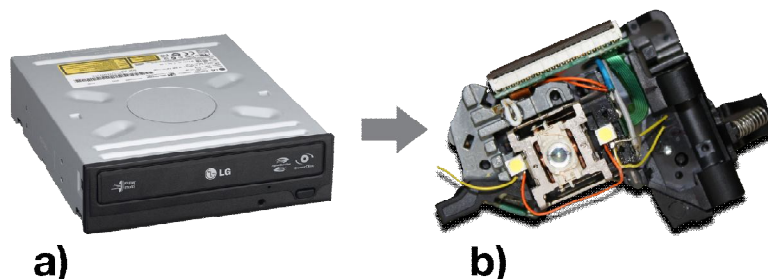


Figura 2.3: Adaptación de la unidad óptica. a) Sistema comercial de grabación/reproducción. b) Unidad óptica OPU montada en el proyecto.

La figura 2.4 permite identificar los elementos básicos de la unidad óptica utilizados en el proyecto. En la parte superior se observa la lente de objetivo o lente focal, de lado lateral la placa de montaje del fotodetector. En la figura aparecen también dos diodos emisores de luz ultra luminiscentes montados para alumbrar la muestra con luz blanca. Son necesarios para visualizar los grabados en tiempo real gracias al sensor CCD colocado debajo de la muestra.

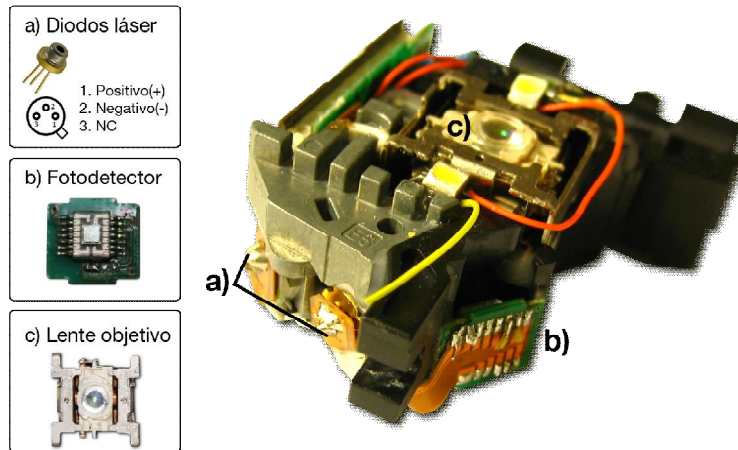


Figura 2.4: Principales componentes de la OPU: a) Diodos láser, b) Fotodetector, c) Lente objetivo.

La OPU en uso, como la mayoría de las existentes, contiene un par de **diodos láser**, un infrarrojo con longitud de onda de 780nm (CD) y un rojo a 650nm (DVD). Físicamente ambos diodos son iguales, por lo que identificar a cada uno de ellos requiere de la identificación de las terminales, figura 2.4a, para la correcta polarización con una fuente externa de voltaje. Es importante controlar la alimentación de esos diodos cuidadosamente para evitar sobrepasar la corriente límite soportada por el dispositivo. Se recomienda usar los valores nominales sugeridos en [II.2] y alimentar los diodos con no más de 2.2V y 50mA. Recordemos que el infrarrojo es invisible al ojo humano y que cualquiera de los dos haces son peligrosos para la vista.

Respecto a la lente de objetivo o lente focal se debe tener cuidado de no manipularla bruscamente o tocarla directamente para evitar mancharla con grasa o polvo ya que es el punto de salida del haz y además se encarga de enfocar al mismo. Efectivamente, para asegurar un buen grabado es importante que el haz salga limpio y bien enfocado, algún daño en la lente repercute directamente sobre la forma y limpieza del punto focal.

El fotodetector es un encapsulado del cual se obtienen, a través de sus terminales, las señales de salida de voltaje correspondientes a los cuatro fotodiodos necesarios para la obtención de la señal de error de enfocamiento FES (ver sección 1.6.4).

Para determinar e identificar a cada uno de los pines de salida, se tiene que realizar la caracterización del fotodetector de la OPU que se desea utilizar, la cual consiste en pruebas de continuidad y deducción de su función de acuerdo a su configuración de montaje. Lamentablemente, no existe mucha información u hoja de datos específica para la mayoría de esos componentes. Sin embargo, aunque la información sea limitada, se basa en algunas referencias existentes como [II.3]. Cabe señalar que la configuración

mostrada en la figura 2.5 corresponde exclusivamente al fotodetector montado en la OPU en uso, del modelo GH22LS40, cualquier otra unidad óptica necesitará de la inspección de dicho dispositivo para determinar su configuración de montaje.

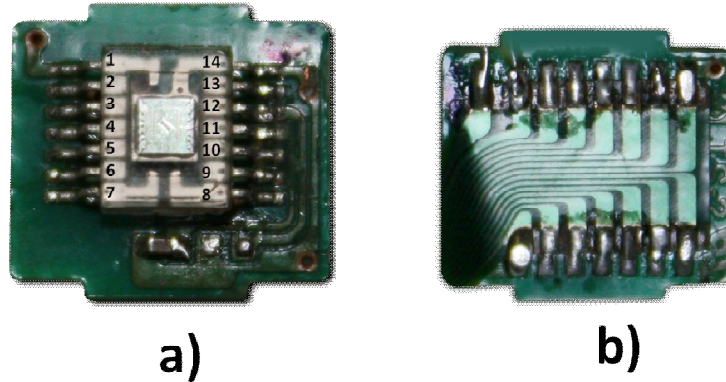


Figura 2.5: Fotodetector integrado en la OPU. a) Frente de la placa de montaje, puede observarse la zona de fotodetección. b) Reverso de la placa de montaje.

Este circuito encapsulado requiere de una polarización externa común de +5V conectada a la terminal de VCC. A las salidas de cada señal de voltaje tiene montado un arreglo resistencia-capacitor (arreglo RC) que tiene la función de filtro paso bajas, tal y como lo muestra la figura 2.6.

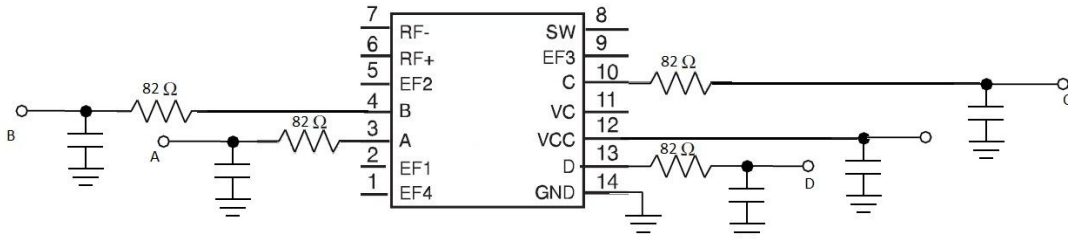


Figura 2.6: Diagrama eléctrico del fotodetector integrado a la OPU. Adaptado de [11.3] a partir de una caracterización específica del fotodiodo de la OPU utilizada.

Finalmente, para evitar problemas con la alineación horizontal de la OPU, se decidió mantener en la medida de lo posible las condiciones de montaje de fábrica, las cuales consisten en un soporte metálico en posición horizontal que a su vez contiene dos barras, ejes de desplazamiento (figura 2.7). Este montaje posteriormente será montado sobre un soporte de microscopio con lo cual se podrá tener un control de posicionamiento vertical.

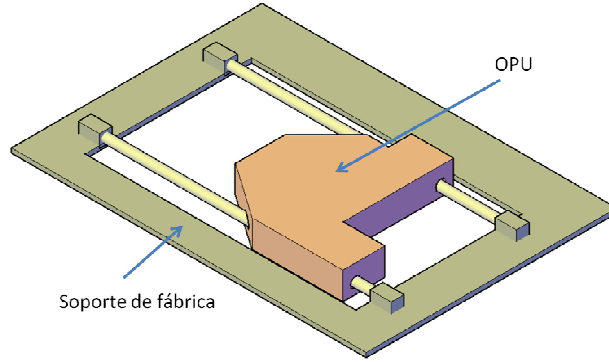


Figura 2.7: Montaje de la OPU en el soporte de fábrica

2.2.1 Obtención de la FES para ajuste de la distancia lente-superficie

Como se mencionó con anterioridad en la sección 1.6.4, se desea aprovechar el arreglo de fotodetectores integrado a la OPU para obtener una señal eléctrica medible que proporciona información correspondiente a la distancia focal de la lente respecto a una superficie determinada. En un sistema de reproducción/grabación de discos ópticos el haz incidente en el fotodetector proviene de la luz reflejada sobre la superficie del disco y genera una señal eléctrica útil para medir el error de enfocamiento (FES).

La FES es obtenida mediante la ecuación 1.6, a partir de las señales de voltaje A, B, C y D provenientes del fotodetector, para lo cual se necesita de un arreglo electrónico externo que nos dé el voltaje de la FES. Los voltajes A, B, C y D son de 1.5V, cuando el haz láser está apagado y únicamente es polarizado el fotodetector. El arreglo electrónico está compuesto por tres amplificadores operacionales, dos de los cuales primeramente se encargan de realizar dos sumas de voltajes A+D y B+C respectivamente, para que posteriormente se realice la diferencia de las sumas previas y obtener $(A+D) - (B+C)$ en la salida.

La implementación presentada en la figura 2.8 se lleva a cabo por medio de amplificadores de bajo ruido de tipo NE5543 [Il.4]. En la primera etapa, $(A+D)$ y $(B+C)$ se implementan con un par de sumadores no inversores con una ganancia determinada por las expresiones 2.1 y 2.2.

$$V_1 = R_3 \left(\frac{A}{R_1} + \frac{D}{R_2} \right) \left(\frac{R_s + R_e}{R_e} \right) \quad (2.1)$$

$$V_2 = R_3 \left(\frac{B}{R_1} + \frac{C}{R_2} \right) \left(\frac{R_s + R_e}{R_e} \right) \quad (2.2)$$

Lo anterior significa que la configuración presentada para ambos sumadores, ofrece una ganancia de voltaje de 1.1 veces la suma de los voltajes de entrada, suficiente para obtener la señal buscada. Posteriormente se implementa un restador, cuyo valor teórico de ganancia de voltaje está determinado por la expresión 2.3.

$$FES = V_o = V_2 \frac{R_7 R_4 + R_7 R_6}{R_4 R_5 + R_4 R_7} - V_1 \frac{R_6}{R_4} \quad (2.3)$$

Y dada la configuración presentada, se obtiene que la ganancia de voltaje del restador está determinada por el cociente R_6/R_4 , por lo cual la diferencia de los voltajes V_1 y V_2 , es amplificada en un factor de 10 veces.

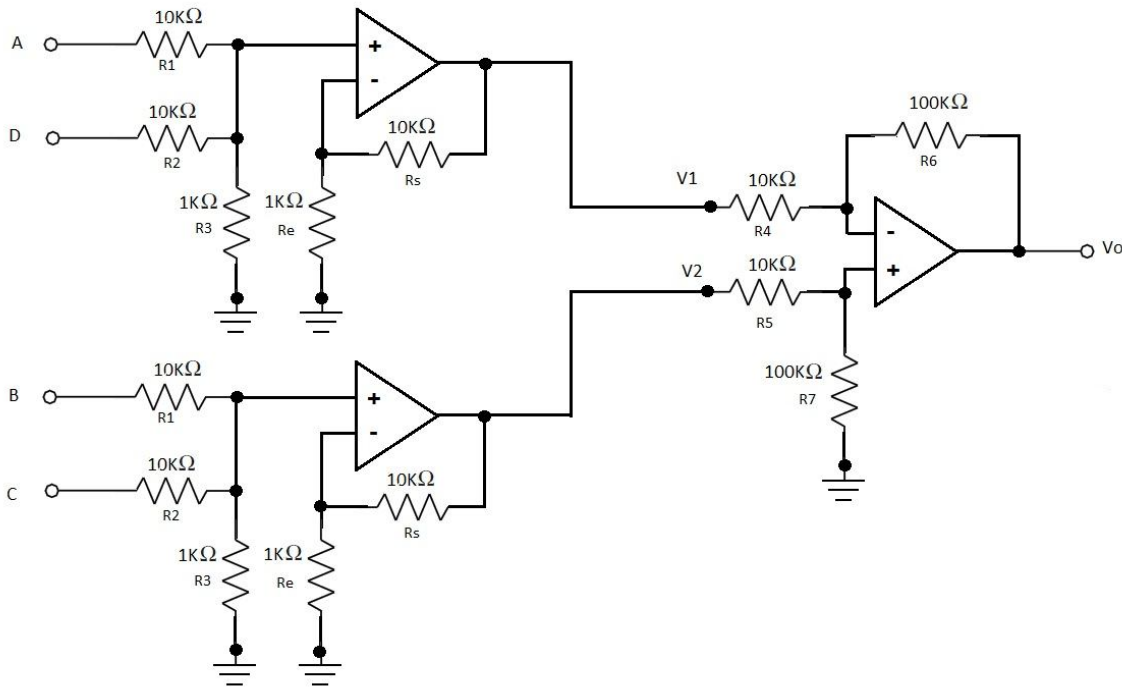


Figura 2.8: Diagrama eléctrico para la obtención de la $FES=(A+D)-(B+C)$.

El arreglo antes mostrado requiere de una polarización bipolar para el arreglo de amplificadores operacionales de +12V y -12V, independiente a la del fotodetector. Esta fuente bipolar puede obtenerse a partir de un par de fuentes simples.

La señal de FES, obtenida por medio del circuito externo, corresponde a un voltaje que es medido respecto a la tierra general del sistema por medio de un voltímetro. Con base en el principio de funcionamiento presentado en 1.6.4, el voltaje leído al realizar los desplazamientos ascendentes y descendentes de la OPU, cerca del punto focal, tendrá un comportamiento que siga la curva-S.

Para verificar lo anterior se caracterizó la curva-S sobre la superficie reflectante del CD-R, a modo de establecer el comportamiento ideal de la curva-S. El comportamiento experimental presentado en la figura 2.9 muestra que cuando la distancia entre la OPU y el sustrato aumenta, es decir la OPU se mueve de manera ascendente con respecto a la muestra, el voltaje de la FES aumenta hasta llegar a un máximo positivo, posteriormente dicho voltaje desciende hasta el cruce por cero y pasa a ser negativo hasta un mínimo antes de volver a cancelarse. El rango vertical en el que se presenta la curva-S es de 50 μ m aproximadamente en este caso. La amplitud de pico, entre máximo y mínimo, se encuentra entre +220mV y -180mV respectivamente.

La repetibilidad de la curva-S permite saber si las curvas de caracterización son consistentes y si el método de obtención es adecuado. Se realizó un barrido ascendente y descendente del haz en un mismo punto de prueba sobre la muestra con una intensidad de corriente menor a la de grabación y en la figura 2.9 se observa que la curva-S es repetible en forma y rango en el 100% de los casos en los que se siguió la metodología correcta presentada en el anexo D.

En dichas pruebas se observa una diferencia de desplazamiento vertical menor a 3 μ m entre curvas de barridos realizados en la misma dirección, en la zona cercana a la zona donde FES=0. También se nota un desplazamiento vertical de la curva entre el barrido ascendente y el descendente no mayor a 5 μ m. Aunque resulta difícil explicar este efecto con certeza, es posiblemente ocasionado por la holgura entre engranes del mecanismo que es utilizado para realizar el movimiento vertical (eje Z) de la OPU. Se puede pensar también que está causado por una posible "histéresis" propia del fotodetector, aunque el lapso de tiempo entre cada medición es del orden de unos segundos.

Se observan variaciones entre curvas de hasta 100mV de amplitud de los picos máximos y mínimos, las cuales no son de mayor importancia para encontrar el punto focal, ya que lo que realmente interesa de la curva-S es el punto, entre los picos máximo y mínimo, en el cual el voltaje FES se hace muy cercano a cero hasta antes de pasar a voltajes negativos.

El nivel que representa el cruce por cero de la FES se encuentra entre 15mV y 25mV, lo que representa un *offset* de voltaje, que es resultado de la descompensación del arreglo de amplificadores operacionales por lo que se encuentra presente en todas las caracterizaciones. Dicho nivel de *offset* puede entonces tomarse como nivel de referencia en el futuro para trazar la señal de FES en valores relativos como se realizó en la figura 2.9.

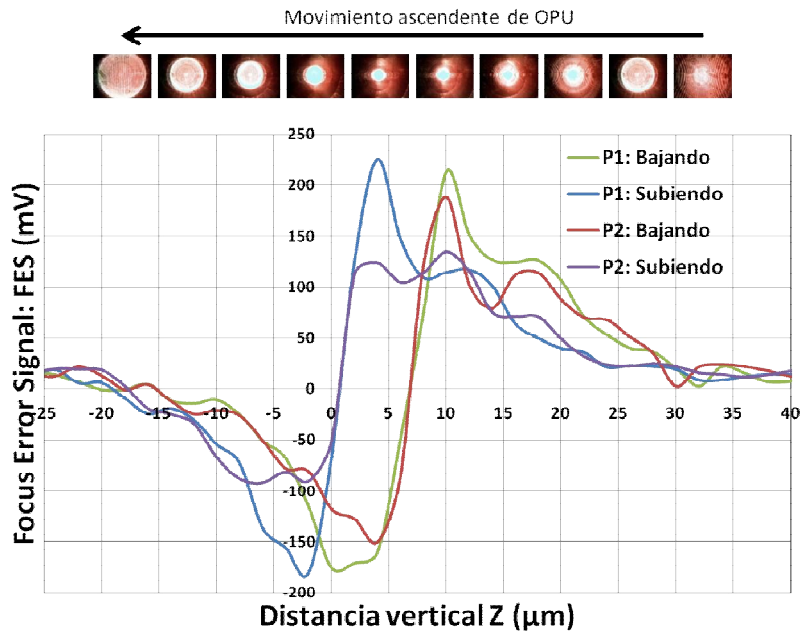


Figura 2.9: Curva-S registrada sobre la superficie de un CD-R con el láser rojo a 34.5mA, se observa el spot a lo largo del movimiento ascendente de la OPU así como la repetibilidad de las curvas ascendente y descendentes.

La dependencia de la amplitud de la FES con la intensidad de corriente eléctrica del diodo láser se presenta en la figura 2.10. En ella se observa que la amplitud pico a pico de la FES aumenta con la corriente eléctrica, mientras que la forma y la distancia total de existencia de la curva-S se mantienen sin cambios. El corrimiento entre las curvas (eje de las abscisas), en el punto donde $FES \approx 0$, es de aproximadamente $5\mu\text{m}$.

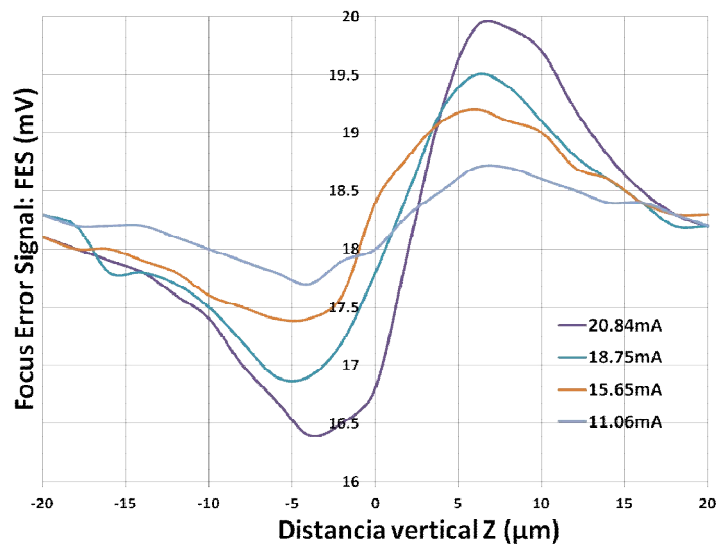


Figura 2.10: Dependencia de la amplitud de la FES respecto a la intensidad de corriente eléctrica al diodo laser.

Una mayor amplitud de voltaje de la FES facilita la adquisición de los datos de la curva-S ya que los picos mínimo y máximo son de mayor magnitud. Sin embargo, es importante no utilizar niveles de corrientes tan altos como para empezar a grabar el material, ya que cambiaría la lectura de reflectividad y, entonces, de posición vertical. Por lo tanto debe tenerse particular consideración en los niveles de corriente usados en la obtención de la curva. Además, cabe mencionar que estos siempre dependerán del material o de la superficie bajo prueba.

2.3 Arreglo mecánico de posicionamiento XYZ

2.3.1 Descripción general del arreglo mecánico

Se desarrolló una plataforma de trabajo totalmente independiente y fácil de repetir. Como se mencionó anteriormente, la resolución espacial en tres dimensiones de nuestro arreglo mecánico para la realización de un equipo CNC depende exclusivamente de la precisión de cada elemento mecánico.

El sistema de posicionamiento está conformado en dos etapas, la primera de ellas consiste en montar una plataforma de trabajo con dos grados de libertad (XY) sobre la cual se coloca el sustrato que será grabado y se controla con dos motores a pasos que proporcionan los desplazamientos lineales. Una segunda etapa proporciona el movimiento vertical (Z) a partir de la utilización una base de microscopio óptico que fue reciclada para manipular la distancia a la cual se encuentra el punto focal del haz láser de manera precisa. La plataforma XYZ junto con el sistema computarizado de control hará la función de una maquina CNC.

2.3.2 Plataforma de posicionamiento XY

La plataforma XY es ensamblada sobre una mesa óptica anti vibratoria (marca Newport modelo RS 4000) a partir de plataformas manuales de desplazamiento lineal marca Newport. Dichos desplazadores son comúnmente utilizados en experimentos dentro de laboratorios de óptica y fueron prestados para el presente proyecto. Se caracterizan por ofrecer desplazamientos longitudinales en una sola dirección, además de tener un retorno automático debido a un resorte interno.

La figura 2.11 muestra un desplazador lineal y su dirección de movimiento a partir de su punto de apoyo. Al montar un par de desplazadores lineales, uno sobre otro, puestos a 90 grados, se logra obtener una plataforma en dos ejes (XY). Posteriormente se agrega una superficie sobre la cual se colocarán los sustratos y contando con un agujero, el cual servirá para el sistema de visualización CCD.

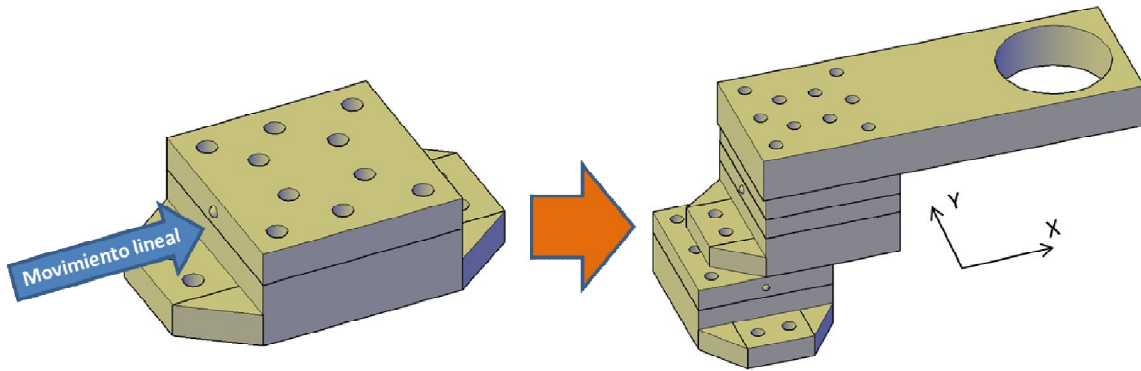


Figura 2.11: Montaje de plataformas para posicionamiento XY

La plataforma por sí sola no proporciona un movimiento controlado en cada uno de sus ejes, por ello se agregan un par de motores a pasos con mecanismo de desplazamiento lineal, figura 2.12. Dichos motores se caracterizan por convertir una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, posteriormente y de manera interna a su carcasa, convierten ese movimiento angular en movimiento lineal por medio de un servomecanismo. Dichos servomecanismos son capaces de ofrecer una resolución lineal de $1\mu\text{m}$. Los motores empleados en el presente proyecto son de tipo unipolar (4 fases: A, B, C, D) de la marca Oriel, modelo *Stepper Mike 18503* y su desempeño fue caracterizado antes de utilizarlos en el proyecto para verificar con exactitud la carrera completa que ofrecen y la precisión de sus pasos unitarios.

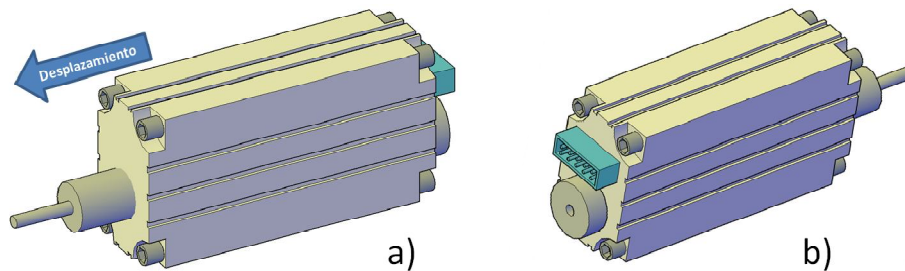


Figura 2.12: Motor Oriel Stepper Mike 18503. a) Vista frontal b) Vista trasera.

Finalmente la plataforma XY con los motores integrados se observa en la figura 2.13. En la implementación final se realizaron una serie de adaptaciones para nivelar y fijar los motores a la mesa anti vibratoria, ya que por su construcción, no ofrecen un modo de sujeción. La plataforma superior consiste de una placa perforada para ofrecer visualización en tiempo real de la muestra desde abajo, colocando una cámara debajo de ella de la cual se hablará en la sección 2.4.

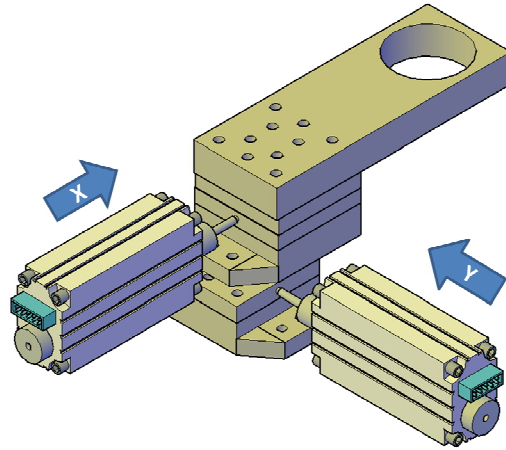


Figura 2.13: Sistema de posicionamiento XY con motores adaptados.

2.3.3 Eje de posicionamiento vertical Z

El eje que proporciona el movimiento vertical Z se implementó a partir de una base de microscopio óptico convencional. A dicho microscopio se le quitaron las partes ópticas correspondientes, para obtener únicamente el sistema de movimiento vertical que sirve para enfocar las muestras. De dicho eje Z se resalta que es operado manualmente por medio de una perilla graduada la cual ofrece una resolución nominal, con base en su graduación impresa, de $2\mu\text{m}$.

Como se observa en el diagrama de la figura 2.14a, a dicho eje vertical se le monta la OPU por medio del soporte de fabrica, tratando de mantener a la unidad óptica lo más horizontal posible y verificándolo con niveladores de burbuja. Esto último no puede garantizarse del todo ya que para ello, se necesitaría fabricar un soporte especial con maquinados rectificados y niveladores de precisión.

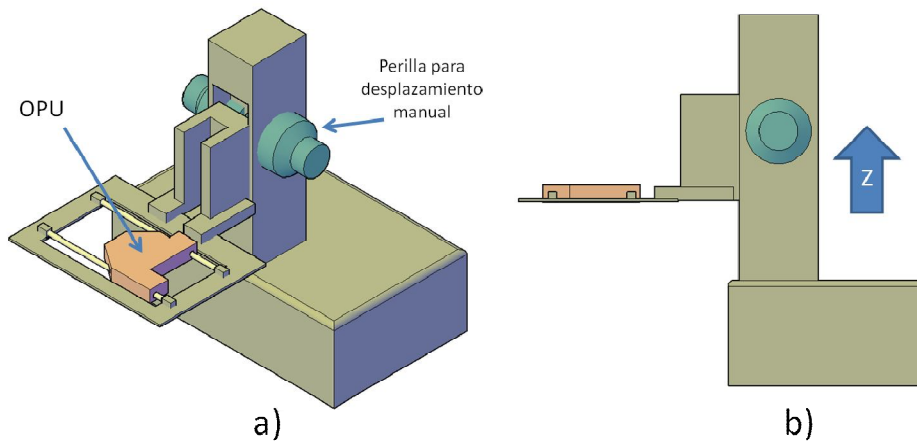


Figura 2.14: Posicionamiento en Z. a) Montaje de OPU sobre la base de microscopio. b) Vista lateral de la base de microscopio utilizada como desplazador en eje Z.

Como nota adicional, cabe mencionar que la resolución puede ser mejorada adaptando al eje rotatorio de la perilla graduada un motor a pasos adicional (marca Vexta, modelo PH265M-31B), el cual proporciona un control más fino. La resolución intrínseca del motor es de 0.9° por paso lo que permite un desplazamiento vertical de $0.5\mu\text{m}$ lineales en cada paso [II.10]. Esto último no está formalmente implementado en la presente propuesta, debido a que se requieren cuatro líneas más de comunicación del puerto paralelo, lo cual no es posible con el presente equipo de cómputo.

2.4 Unidad de visualización CCD

Para apoyo visual en la colocación de la muestra así como en el proceso de grabación, una unidad de visualización óptica ha sido montada debajo de una apertura de la plataforma horizontal XY, sobre la cual se coloca la muestra a grabar. Un sensor de cámara CCD (reciclado de una webcam de bajo costo) ha sido montado mecánicamente a un objetivo de microscopio con un aumento de 20X, como se ilustra en la figura 2.15. Eso entonces permite una supervisión en tiempo real del grabado de las muestras o sustratos, siempre y cuando exista una relativa transparencia (o bien cuando el láser perfora totalmente el material bajo prueba). Por lo tanto, es también una alternativa de “control grueso” del enfocamiento debido a que se puede visualizar el punto focal y aproximar su tamaño. Aunque con dicho sensor CCD se logran visualizar las partes grabadas, siempre es necesario un análisis más fino con otros equipos de medición.

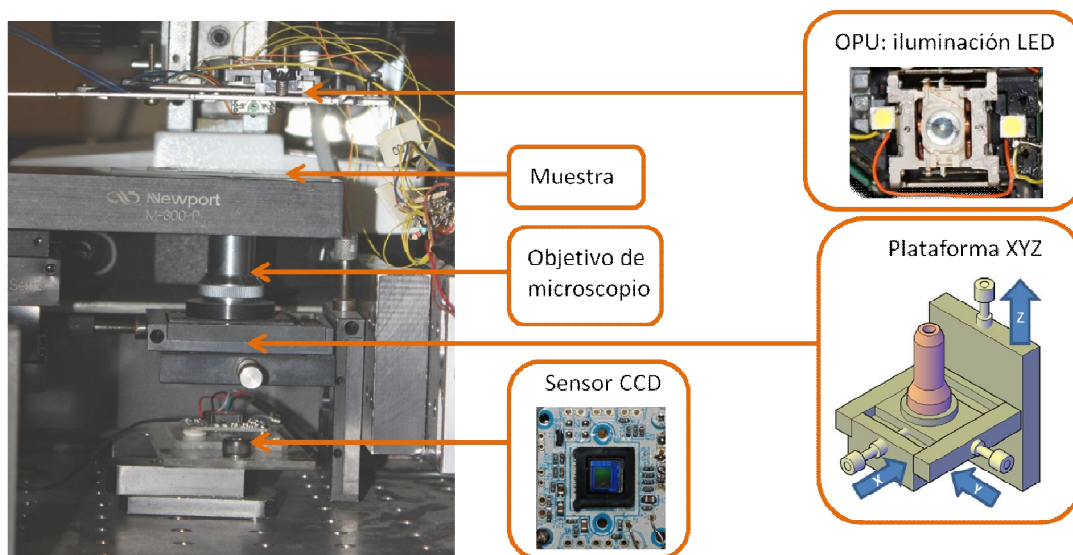


Figura 2.15: Arreglo de visualización a partir de un sensor CCD obtenido de una webcam.

Además la presente unidad de visualización cuenta con un microposicionador manual con tres grados de libertad, con la que se manipula directamente el objetivo de microscopio para que este se alinee con el punto focal del láser o con cualquier zona de la muestra a grabar para poder también visualizar distintos niveles de ella. Como se muestra en la

figura 2.15, el arreglo de posicionamiento únicamente ofrece la manipulación del objetivo de microscopio, el sensor CCD se encuentra fijo e independiente en la parte inferior. Efectivamente, en principio no importa la distancia a la cual se coloque el CCD del objetivo de microscopio ya que la luz que genera la imagen en la lente viaja colimada a través del cuerpo del objetivo.

Finalmente, la unidad de visualización necesita de iluminación externa sin interferir con el haz láser, para lo cual fueron adaptados dos LEDs blancos ultra brillantes sobre ambos lados de la lente focal de la OPU.

2.5 Integración del sistema mecánico

Las unidades antes descritas, son finalmente integradas en una sola. De esta manera se obtiene un equipo como el que se plantea al principio del presente capítulo. La figura 2.16 muestra un diagrama general del prototipo en el cual pueden observarse los distintos elementos que lo integran así como su distribución espacial.

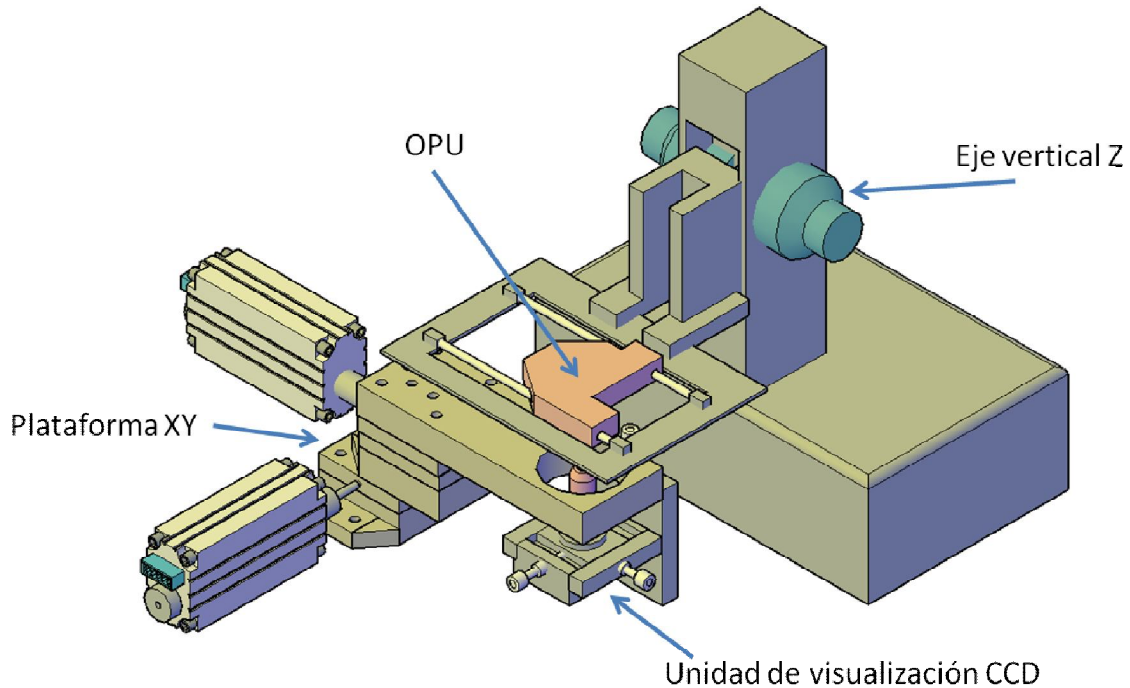


Figura 2.16: Integración del arreglo mecánico y el sistema de visualización CCD.

2.6 Sistema electrónico para el control del diodo láser y de la plataforma de posicionamiento XY

La función principal del sistema electrónico resumido en la figura 2.17 es controlar los principales parámetros del diodo láser claves en este proyecto, en particular el tiempo de encendido y la potencia eléctrica suministrada. Este sistema interactúa de manera implícita con el sistema mecánico de posicionamiento XY para el manejo de los motores eléctricos.

El presente desarrollo intenta imitar la funcionalidad de un sistema de control numérico por computadora (CNC), en el cual por medio de una computadora se controlan y sincronizan las señales hacia la plataforma de trabajo y la señal de control del diodo láser.

La figura 2.17 muestra el diagrama general del sistema electrónico desarrollado en el proyecto, en el cual se administran las señales provenientes de la computadora a través de su puerto paralelo que cuenta con un número limitado de bits útiles. **Un driver de corriente** alimentado de manera externa protege al puerto de salida y a la vez suministra la corriente necesaria para las etapas posteriores, en especial a **los motores de paso en XY**. Es un bloque necesario cuando se utilizan motores de fase, especialmente con corrientes altas, ya que ellos pueden regresar corriente al puerto por la fuerza contra electromotriz que se genera al terminar un movimiento. **Un circuito monoestable** administra por medio de un arreglo resistencia-capacitor (arreglo RC) externo intercambiable la duración del pulso de encendido del láser. La señal de pulso generada por ese circuito controla el bit de “enable” de un **controlador de corriente** (LDD: *Laser Diode Driver*) que en el presente proyecto también limita el suministro de corriente eléctrica al diodo.

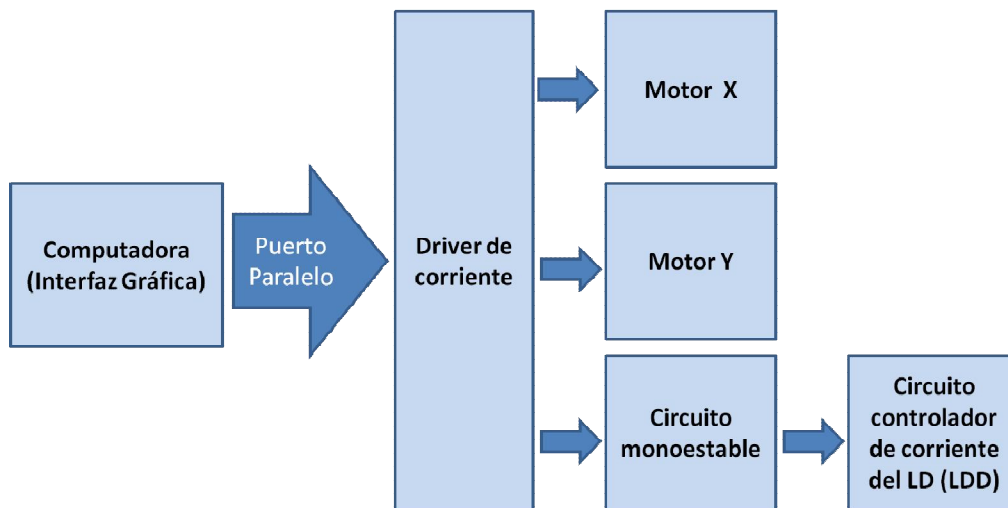


Figura 2.17: Diagrama a bloques del sistema electrónico para el control del láser y la plataforma XY.

2.6.1 Puerto paralelo y *driver* de corriente.

El puerto paralelo, también conocido como LPT (Line Print Terminal), es utilizado para mandar bits de información en un solo paquete a la vez y no de manera secuencial. La figura 2.18 muestra la distribución de los bits en el conector conocido como DB25. En él se identifican 4 bits del registro de control (entrada/salida), 5 bits del registro de estado (entrada) y 8 bits del registro de datos (salida) [II.5].

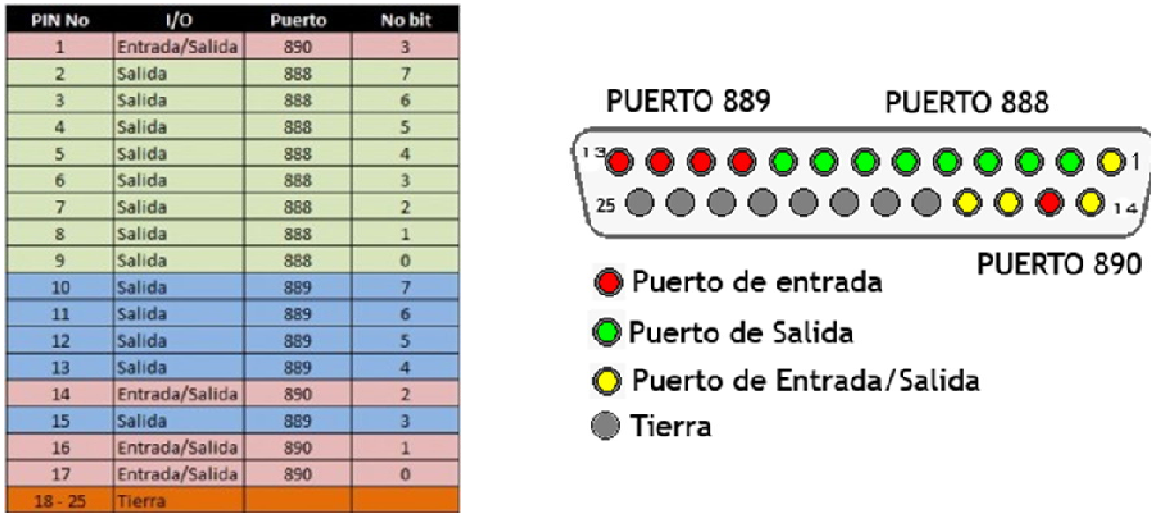


Figura 2.18: Distribución de bits en el puerto paralelo y conector DB25.

Se eligió al puerto paralelo debido a su facilidad de programación y porque además ofrece la posibilidad de controlar varias señales simultáneas con un tiempo de respuesta en la escala de milisegundos. El puerto paralelo de comunicación se adapta a la configuración necesaria en el presente proyecto. Se realiza la asignación de bits de acuerdo a las necesidades de cada uno de los dispositivos a controlar y a la disponibilidad de bits de entrada y salida.

En la figura 2.19 se observa que se usan las ocho líneas de salida del registro de datos para la plataforma de posicionamiento, cuatro líneas por cada uno de los motores (a pasos de cuatro fases). También se observa que se utiliza una línea del registro de control para controlar a la señal de encendido del láser.

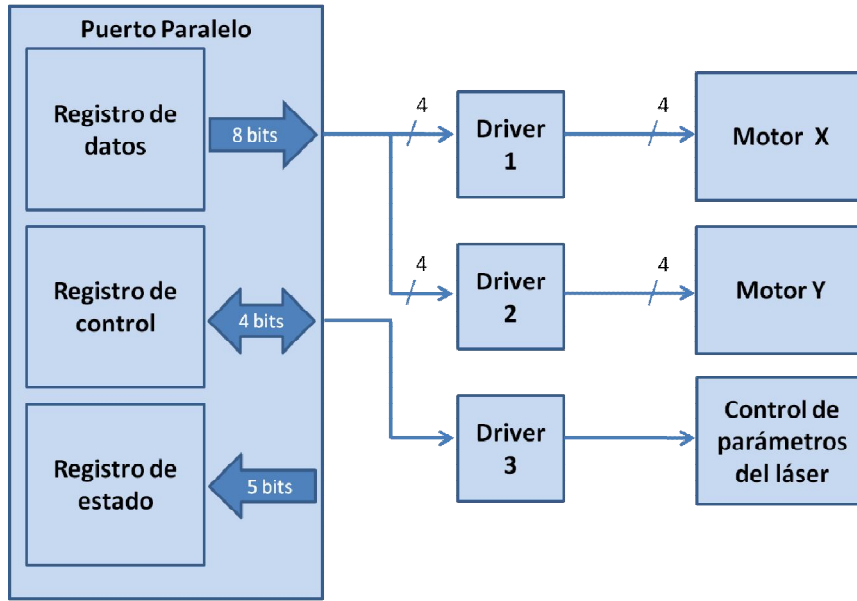


Figura 2.19: Asignación de bits del puerto paralelo. Motores XY y control de encendido del diodo láser y corriente eléctrica.

Como se observa en la figura 2.19, se utiliza una interfaz entre el puerto paralelo y los elementos a controlar, la cual corresponde a un driver de corriente cuya función es proteger al puerto paralelo de posibles retornos de corriente a la computadora.

Los drivers de corriente utilizados son los ULN2803A, que corresponden a un arreglo de 8 transistores tipo Darlington capaces de manejar corrientes de hasta 500mA cada uno [II.6]. Debido a que el consumo de corriente nominal de los motores se encuentra al límite (450mA por fase) al que soporta cada canal, se interconectan dos entradas y dos salidas consiguientes, de esta manera se duplica la corriente de cada canal de salida, ver figuras 2.20 a y b.

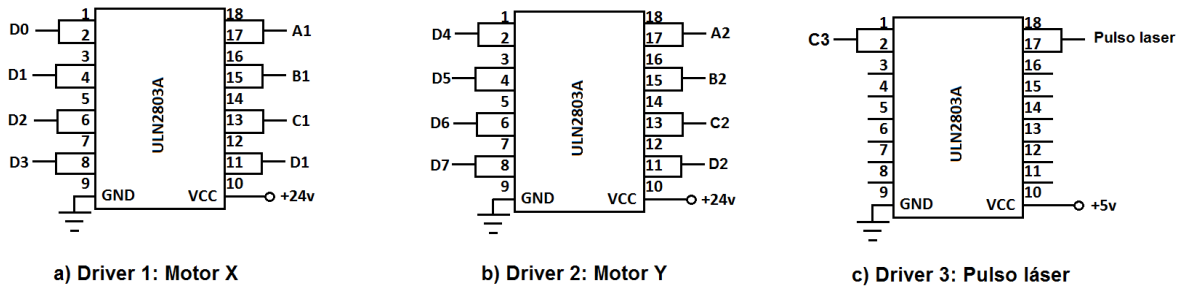


Figura 2.20: Drives de corriente ULN2803A. a) Driver 1 para el motor en X. b) Driver 2 para el motor en Y. c) Driver 3 para la señal de encendido de diodo láser.

Un driver completo es usado para cada motor (fases A, B, C y D) y estos son polarizados con +24V ya que es el voltaje nominal de los motores a pasos. El driver 3 se polariza con +5V ya que la etapa posterior a éste, circuito monoestable, necesita de una señal de tipo TTL (*Transistor–Transistor Logic*).

2.6.2 Unidad de control temporal del pulso de encendido del diodo láser

El circuito multivibrador en configuración monoestable utilizado en el proyecto se caracteriza por tener un ancho de pulso de salida configurable a partir de una excitación externa dada, gracias a una resistencia externa R_{ext} y un capacitor externo C_{ext} , denominado como arreglo RC. La ecuación 2.4 muestra la relación existente entre el tiempo de salida y el arreglo RC.

$$t_{out} = 0.7 C_{ext} R_{ext} \quad (2.4)$$

El control de la duración del pulso se realiza de manera externa por medio del circuito SN74121 y el arreglo RC, con la finalidad de ampliar el rango temporal ofrecido por la computadora a la escala de microsegundos y nanosegundos teniendo como base la ecuación 1.5, donde se expone que la duración temporal del pulso es un parámetro importante en la microfabricación con láser. Dichos tiempos configurables van, según la hoja de especificaciones [11.7], de 40ns a 28 segundos. La implementación de dicho circuito se llevo a cabo con base en la hoja de datos y se muestra en la figura 2.21.

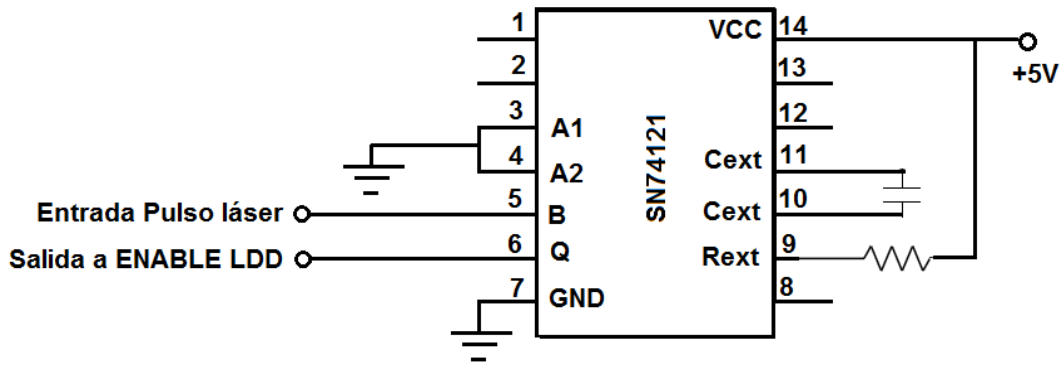


Figura 2.21: Conexiones del monoestable SN74121 para el control de la duración de tiempo de encendido del diodo láser.

La señal de excitación externa (entrada del monoestable) es la señal “pulso láser” la cual proviene de uno de los bits del puerto paralelo después de pasar por el driver de corriente 3, figura 2.20c, El pulso de salida del monoestable, se utiliza después como señal de entrada y excitación (ENABLE) del LDD.

2.6.3 Unidad de control de corriente de diodo láser LDD

Como se expuso en 1.5.1, es necesario tener un control de los parámetros propios de las fuentes láser, para el desarrollo de una técnica de microfabricación, en específico de la potencia luminosa (llamada irradiancia, W/m^2) aplicada a la muestra bajo estudio. Otro parámetro importante de controlar y conocer es la potencia eléctrica consumida por el diodo láser. Los grabadores comerciales de CD/DVD contienen dentro de su sistema un circuito integrado capaz de controlar los niveles de corriente para las diversas funciones del diodo láser: el Laser Diode Driver (LDD).

El Atmel T0806 [II.8, II.9], es un LDD que ofrece la posibilidad de controlar dos diodos láser (no de manera simultánea) a tres distintos niveles de energía (uno de lectura y dos de escritura), cada canal puede aportar hasta 250mA. El controlador presenta tres canales analógicos de suministro de corriente (IN1, IN2 o IN3) y tres señales digitales de control de canal (ENABLE, NE2 o NE3) que se decidió utilizar en este proyecto por su disponibilidad.

La figura 2.22 muestra la implementación utilizada con base en la hoja de datos para asegurar un control más flexible de los niveles de corriente. Como se sugirió en ese documento, se conectan las señales de habilitación NE2 y NE3 en estado activo y con esto se depende únicamente de una señal de habilitación general, ENABLE, como señal de encendido del diodo, la cual proviene de la etapa previa de temporización de encendido dada por el arreglo RC del monoestable y controlada por el operador del prototipo de grabado láser. Las entrada analógicas de corriente IN1, IN2 e IN3 son conectadas a una fuente de voltaje variable (0V a +2V), con lo que se puede ajustar el valor deseado de corriente suministrada al diodo láser, en un rango de 0 a 250mA.

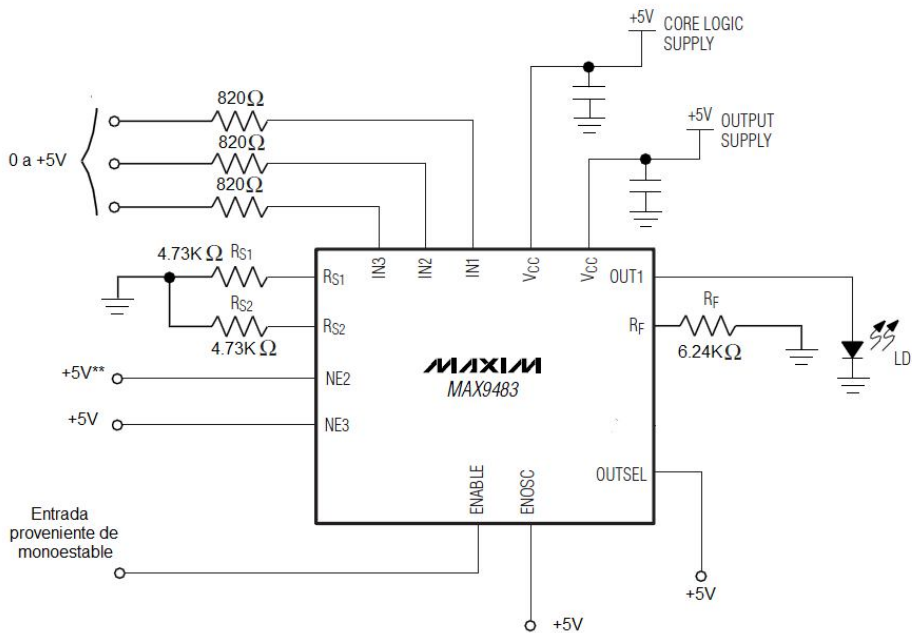


Figura 2.22: Laser Diode Driver LDD MAX9483 para el control de la corriente eléctrica suministrada al diodo láser.

2.6.4 Implementación final del sistema electrónico

Finalmente tras la descripción de cada uno de los componentes electrónicos del sistema, se muestra en la figura 2.23 el diagrama eléctrico final desarrollado en el presente proyecto, en el cual se observa de manera detallada las conexiones físicas.

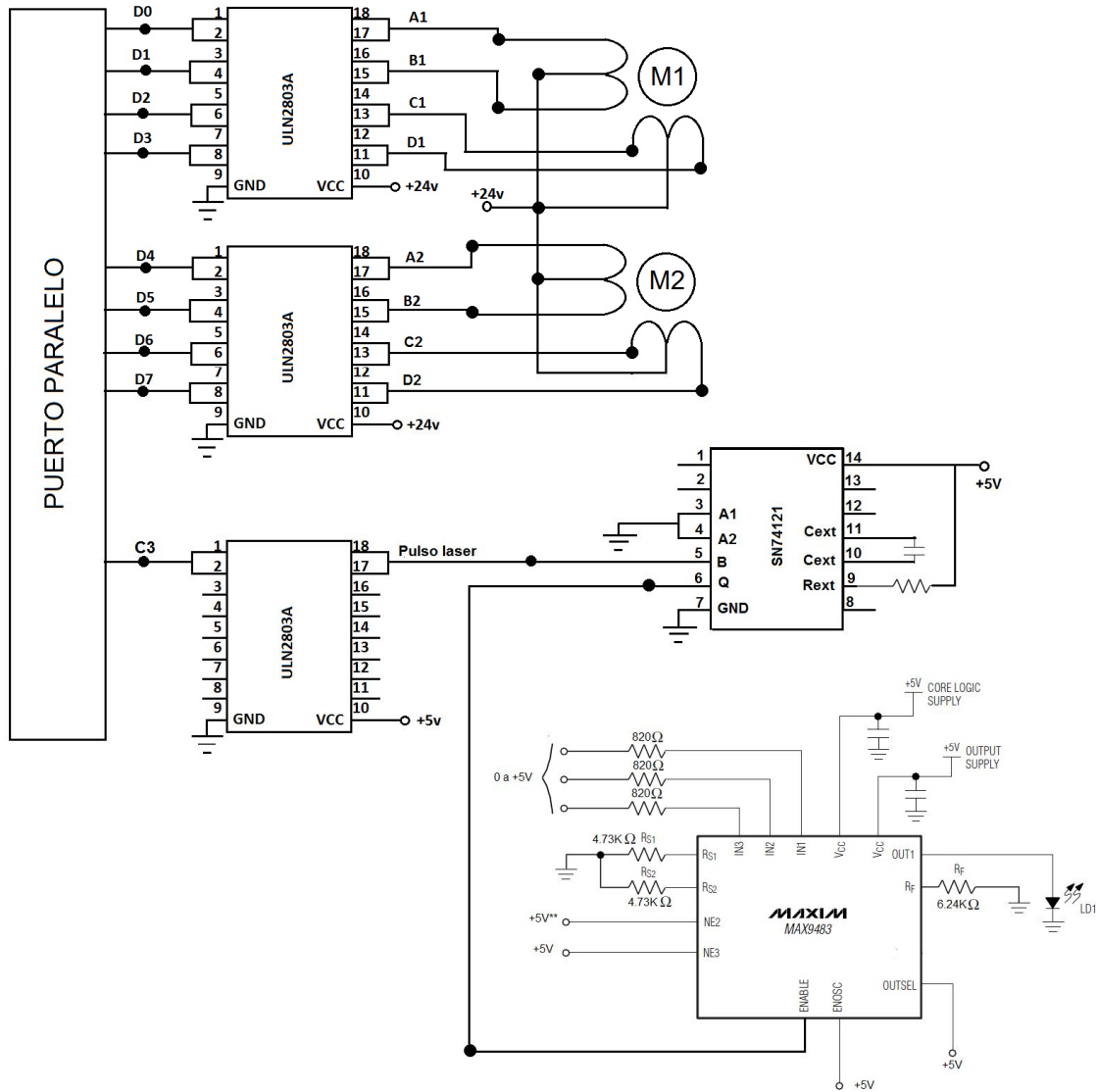


Figura 2.23: Diagrama eléctrico completo desarrollado en el proyecto.

2.8 Conclusiones del capítulo

Se presentó un equipo de microfabricación experimental de bajo costo y fácil realización, basado en el sistema óptico láser de un reproductor/grabador comercial de discos ópticos para la fabricación directa de máscaras y moldes de alta resolución.

Se describen los componentes de interés de la OPU y los circuitos electrónicos externos que se implementaron para determinar la distancia focal de la lente respecto a una superficie determinada, para el control de la potencia eléctrica y del tiempo de encendido del diodo láser y para el control de la plataforma de posicionamiento en el plano XY. Una unidad de visualización en tiempo real ha sido montada debajo de la plataforma de grabado láser y resulta de gran ayuda para ubicar la zona de grabado y el proceso de grabación. A partir del prototipo presentado en el capítulo 2 se facilitó la experimentación sobre tóner impreso, presentada en el capítulo 3, y así se propuso establecer una metodología para la microfabricación con el prototipo planteado.

Capítulo 3. Caracterización para el proceso de microfabricación láser

3.1 Objetivo y metodología empleada

El objetivo de la caracterización es conocer el comportamiento del sustrato de tóner impreso sobre acetato con el cual se trabajará, para observar las características y efectos de la interacción energía-materia que puedan ser útiles para obtener grabados de alta resolución, y así llegar a una metodología de uso del prototipo propuesto que pueda ser generalizada para cualquier sustrato y que conduzca a la microfabricación de prototipos.

Dichas características y efectos se conocerán por medio de experimentos y pruebas controladas, teniendo como base preliminar las pruebas de concepto (ver anexo E) realizadas bajo condiciones óptimas de la unidad óptica del quemador de CD/DVD: diodo láser rojo o infrarrojo utilizado en el rango de potencia para realizar grabados micrométricos sobre un sustrato metálico del disco correspondiente. Además, el presente trabajo se basa sobre el conocimiento teórico expuesto en la sección 1.5 sobre la ablación láser.

Se establece que los factores a considerar porque influyen sobre la resolución del grabado son los siguientes:

- La distancia a la cual se coloca la zona a grabar de la muestra de interés influye directamente en la resolución del grabado porque este parámetro tiene implícito a otros de importancia como la irradiancia, el diámetro del punto focal y el perfil espacial del haz láser, ver sección 1.5.1. Esta distancia se controla y monitorea por medio de la FES como se presenta en la sección 1.6.4 del capítulo 1 y con la implementación mostrada sección 2.2.1 del capítulo 2.
- La energía óptica incidente en la muestra es determinante para la resolución y profundidad del grabado así como en la calidad del mismo lo cual también está relacionado con la absorción de calor del material. La energía óptica se controla directamente con el tiempo de exposición y la intensidad de corriente suministrada al diodo láser de manera externa.

Otro factor importante es el material a grabar y su “compatibilidad” con nuestro prototipo, es decir la posibilidad de grabarlo con los diodos láser disponibles en la OPU en el rango de potencias alcanzables. Sin embargo, un estudio de las propiedades físico-químicas, intrínsecas de los materiales a grabar, está fuera de los objetivos del presente proyecto.

La metodología presentada aquí aspira solamente a establecer los requisitos y reglas de utilización del equipo para un material compatible. Un estudio preciso y completo a futuro de la interacción luz-materia es necesario ya que aportaría información importante para optimizar los grabados si se realizara metódicamente.

3.2 Caracterizaciones preliminares

3.2.1 Características del sustrato de tóner impreso sobre acetato

Un método para generar las máscaras utilizadas en proyectos de microfabricación consiste en depositar tóner sobre hojas de acetato transparente con impresoras láser comerciales de alta resolución. Se utilizan depósitos de este material ya que son una solución accesible para el grabado láser con el prototipo planteado, debido a la absorbancia del material a las longitudes de onda disponibles, su fácil acceso y bajo costo. Pruebas preliminares, exponiendo el material a la luz láser del equipo presentado, comprobaron su compatibilidad.

El espesor de la película de tóner depositada, medido por interferómetro de luz blanca (ILB) es entre $6.7\mu\text{m}$ y $10.9\mu\text{m}$ y la rugosidad promedio inferior a 500nm . En el plano, la uniformidad del depósito observada por microscopía óptica resulta ser aceptable para nuestro propósito, presentando deformaciones y hoyos menores a $8\mu\text{m}$ de diámetro, los cuales no interfieren con los grabados realizados, ver la figura 3.1 (c).

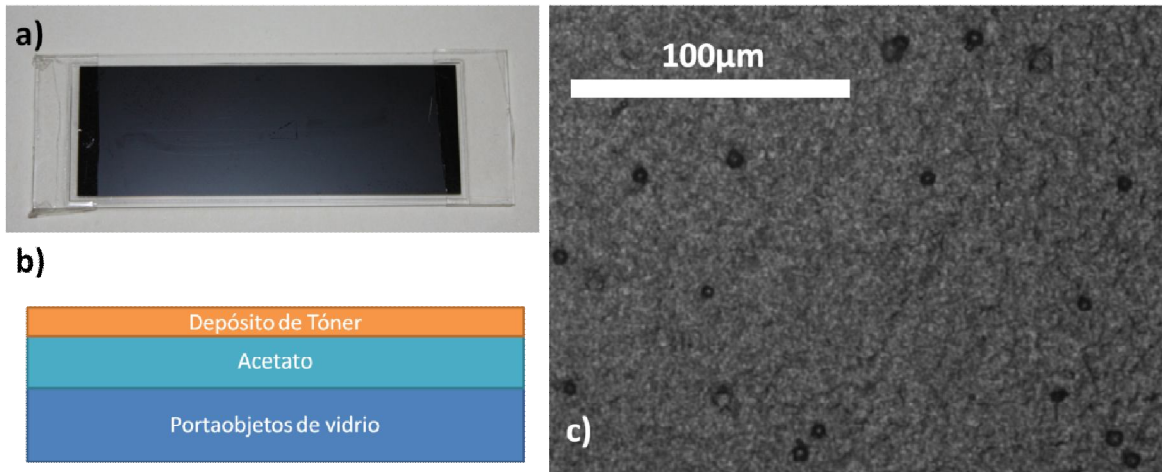


Figura 3.1: Tóner depositado sobre acetato. a) Fotografía de la muestra. b) Estructura de la muestra, el vidrio sirve únicamente como soporte para facilitar la manipulación. c) Imagen de la topografía de un depósito de tóner obtenida con la cámara del equipo de ILB de marca Polytec.

Se eligió trabajar con el láser rojo (650nm) ya que en principio ofrece mejor resolución. Como lo demuestra la ecuación 1.2, la resolución del grabado es proporcional a la longitud de onda de la fuente de luz láser. Los cálculos correspondientes muestran efectivamente que el diámetro del punto focal para el haz IR de 780nm es de $1.103\mu\text{m}$ ($\text{NA}=0.45$, $M=1$) y para el láser rojo de 650nm es de $0.689\mu\text{m}$ ($\text{NA}=0.6$, $M=1$). Es decir la resolución obtenida con el láser rojo es 37.5% mejor que la obtenida con el infrarrojo. En las pruebas experimentales se obtiene que el ancho del grabado es 42.3% menor para el realizado con el diodo rojo.

3.2.2 Caracterización de la FES en el sustrato de tóner impreso sobre acetato

La capacidad del sustrato para reflejar cierta cantidad de la luz láser es un parámetro importante para la obtención de la curva-S. Como fue mencionado en 1.6.4 esa característica sirve para encontrar la distancia lente-superficie correcta y colocar la muestra en una posición ideal (la distancia focal permite obtener la mayor resolución, con el tamaño del spot menor) para el grabado láser de alta resolución. La zona de interés en la curva-S corresponde a la región intermedia a los picos mínimo y máximo, donde la $FES \approx 0$.

Al obtener la curva-S sobre el sustrato de tóner impreso sobre acetato, figura 3.2, se obtiene el mismo comportamiento que en la curva-S obtenida sobre el CD-R presentada en la sección 2.2.1: empezando con la lente muy cercana a la muestra y al incrementar la distancia entre la OPU y el sustrato, el voltaje de la FES pasa por un máximo positivo y posterior desciende a un mínimo negativo.

El rango vertical de la curva-S (eje de abscisas) es aproximadamente de $200\mu\text{m}$, 4 veces mayor al de la superficie del CD-R. Sin embargo, la presente curva, en la mayoría de los casos, tiene mayor inestabilidad de voltaje en el intervalo de interés y significativamente en las zonas aledañas a ella.

La forma de la curva no es simétrica respecto al cruce por cero, a comparación de la curva-S obtenida sobre la superficie del CD-R, presentando una amplitud máxima positiva considerablemente más grande respecto a la mínima negativa. Para ambos casos antes mencionados, las causas de tales efectos se pueden atribuir a una gran diferencia de reflectividad entre los dos diferentes sustratos. Sin embargo, el conocimiento de ellas se encuentra fuera de los objetivos del presente proyecto, ya que no afectan la determinación del punto focal.

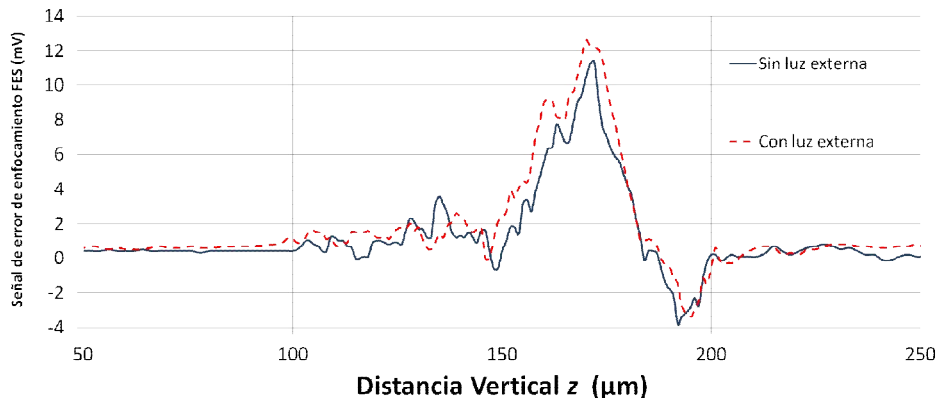


Figura 3.2: Curva-S registrada en el sustrato de tóner sobre acetato y bajo la influencia de la luz externa, línea punteada.

En el presente sustrato se sigue presentando el *offset* de voltaje identificado en la curva-S obtenida sobre el CD-R, el cual no sobrepasa los 30mV. La figura 3.2 muestra también la curva-S registrada bajo las condiciones de exposición a una fuente de luz externa (la iluminación del laboratorio e iluminación LED mostrada en la sección 2.4), con la finalidad de determinar si dicha iluminación afecta la detección realizada por el fotodetector en la obtención de la misma. Efectivamente, dicha luz también es reflejada sobre el sustrato al igual que el láser y puede influir sobre los resultados. El resultado experimental presentado en la figura 3.2 demuestra que la luz externa no afecta de manera significativa ni la forma de la curva-S ni los valores de voltajes obtenidos desde el fotodetector de cuadrantes, teniendo una diferencia promedio de 1mV entre lecturas, por lo cual sus efectos son despreciables.

Finalmente, como se mencionó con anterioridad la intensidad de corriente del diodo al momento de la prueba de obtención de la curva-S es un factor importante a controlar para determinar precisamente el punto focal. Efectivamente, valores bajos no permiten visualizar bien la forma en S pero no se puede utilizar cualquier valor alto ya que existe un valor mínimo a partir del cual se empieza a grabar el material y por ende cambia la lectura de reflectividad y de posición vertical. Para el sustrato bajo estudio se determinó que el uso de una corriente presente en el intervalo de 40mA a 45mA es el óptimo para la obtención de la curva-S. De la curva-S se obtiene que la condición mínima de intensidad de corriente en la cual se garantiza el grabado se da en $I_{\text{láser}}=50\text{mA}$ para el láser en modo continuo.

3.3 Experimentación en sustrato de tóner impreso sobre acetato

3.3.1 Topografías características del grabado láser en tóner impreso sobre acetato

Primeramente es necesario definir y explicar las topografías características obtenidas durante la experimentación, ya que facilitará la comprensión de las secciones posteriores a ésta. Se identifican y definen tres clases de grabados característicos, clases A, B y C, definidas con base en la experimentación sobre el sustrato y de la observación general del mismo. Se basa en el diámetro exterior del cráter de ablación, el diámetro interno y el borde ablación.

Tomando como referencia lo expuesto en la sección 1.5.3 sobre la ablación láser, se definen los elementos típicos que componen al grabado sobre tóner por medio de ablación láser. En la figura 3.3 (a) se muestran tres diámetros característicos del cráter de ablación. El diámetro de cráter está contenido entre los bordes de ablación y es la dimensión característica del grabado, o cráter de ablación. El diámetro externo se caracteriza por incluir al borde de ablación y el interno por ser el diámetro de menor dimensión interno al cráter, basándose únicamente en la observación. En la figura 3.3 (b), (c) y (d), se presentan las tres topografías comunes de los puntos grabados.

Definiremos como grabados de Clase A a los mostrados en la figura 3.3 (b) los cuales se caracterizan por tener un diámetro exterior perfectamente definido y por no tener borde de

ablación ni diámetro interno visibles. Por lo que en esta clase el diámetro de cráter es igual al diámetro exterior.

Los grabados de Clase B, figura 3.3 (c), muestran un diámetro externo bien definido sin borde de ablación aparente pero con un diámetro interno visible. Dicho diámetro interno (equivalente al punto blanco en el centro de la figura), corresponde a la zona de mayor profundidad del grabado.

Finalmente en los grabados de Clase C, figura 3.3 (d), se observa una considerable zona afectada por el calor; el diámetro externo está bien definido y contempla un borde de ablación bien formado. El diámetro interno es mucho mayor en dimensiones a los de la clase B y en ocasiones es comparable con el diámetro de cráter de ablación.

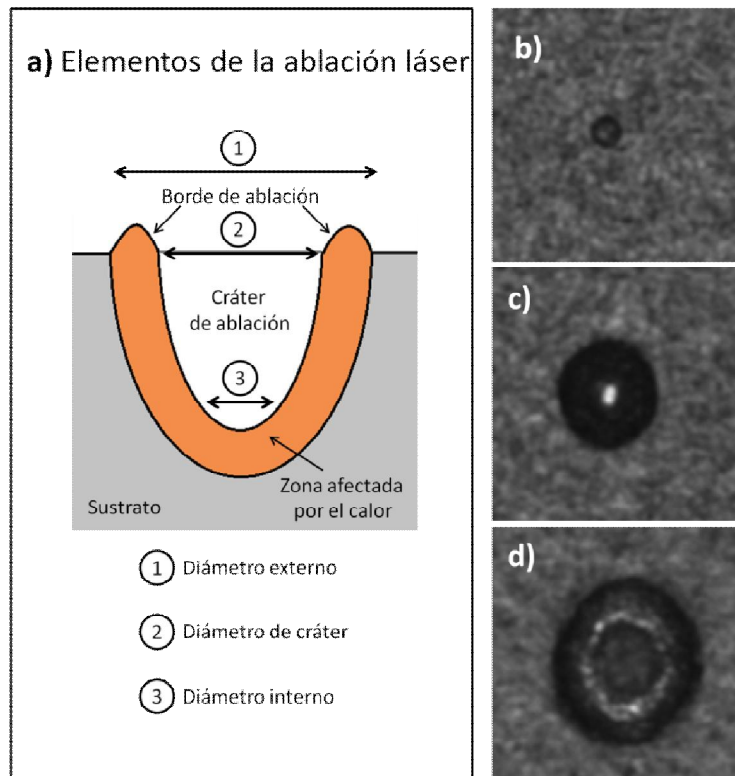


Figura 3.3: a) Topografía característica del grabado láser en tóner depositado sobre acetato. b) Grabado clase A. c) Grabado clase B. d) Grabado clase C.

Los grabados con dimensiones externas superiores a $30\mu\text{m}$ presentan una forma de elipse en lugar de círculos. Esto es ocasionado por la forma del *spot* del haz del sistema óptico implementado en la OPU. La dimensión lateral característica a considerar de los grabados realizados en la superficie de nuestro material es el eje de menor dimensión de la elipse.

3.3.2 Distancia lente objetivo - superficie del sustrato: intervalo de confianza

La prueba experimental de grabado en tóner depositado sobre acetato mostrada en la figura 3.4 denota el efecto que causa un desenfocamiento controlado sobre la forma y las dimensiones de los grabados resultantes. En dicha prueba se realizaron 42 grabados de líneas paralelas con $40\mu\text{m}$ de separación entre cada una, lo cual corresponde a un barrido ascendente de la OPU de $84\mu\text{m}$ debido a que cada línea grabada es desenfocada $2\mu\text{m}$ en dirección ascendente. Se observa como el desplazamiento ascendente del punto focal a lo largo de la curva-S, pasando por $FES=0$, afecta la calidad del grabado por ablación. Por lo cual es necesario determinar un intervalo de confianza de desenfocamiento en el cual las variaciones de tamaño de grabado respecto a $FES=0$ no sobrepasen un límite establecido del 15%.

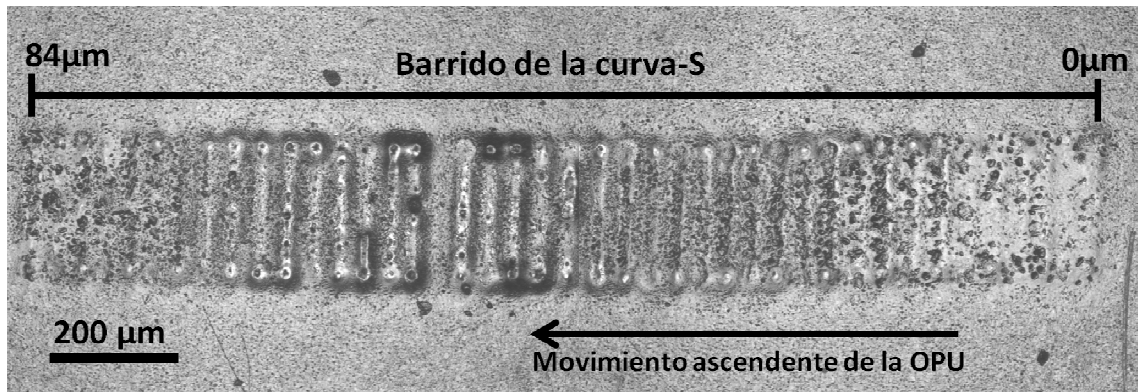


Figura 3.4: Influencia del desenfocamiento controlado en la calidad del grabado por ablación.

Tomando como base la curva-S obtenida del voltaje de error de enfocamiento (FES), se designan negativos (-) a los desplazamientos descendentes de la OPU con respecto a la zona denominada E_0 , que corresponde al punto donde $FES \approx 0$, cuando el haz láser se encuentra enfocado en la superficie de la muestra. Se denominan positivos (+) a los correspondientes desplazamientos ascendentes (figura 3.5).

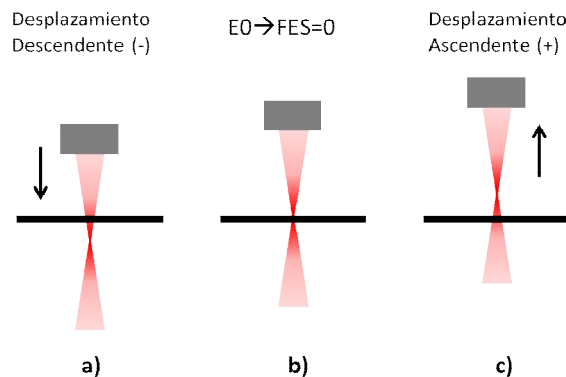


Figura 3.5: Nomenclatura usada para definir los movimientos ascendentes y descendentes de la OPU respecto a la zona E_0 . a) *spot* por debajo de la muestra b) *spot* sobre la superficie de la muestra c) *spot* por arriba de la muestra.

Para determinar el intervalo de confianza se realizó una prueba en la cual se grabaron puntos con distintos tiempos de exposición en cinco zonas de enfocamiento distintas (E0-5 μ m, E0-10 μ m, E0, E0+5 μ m y E0+10 μ m) y a un nivel fijo de intensidad de corriente eléctrica igual a 100mA. Para cada zona se realizaron dos pruebas repetitivas con los tiempos de exposición (24 μ s, 270 μ s, 620 μ s y 800 μ s) mostrados en la figura 3.6. Se realiza la prueba con distintos tiempos de exposición ya que es necesario conocer si es posible extender el intervalo de confianza bajo distintas condiciones.

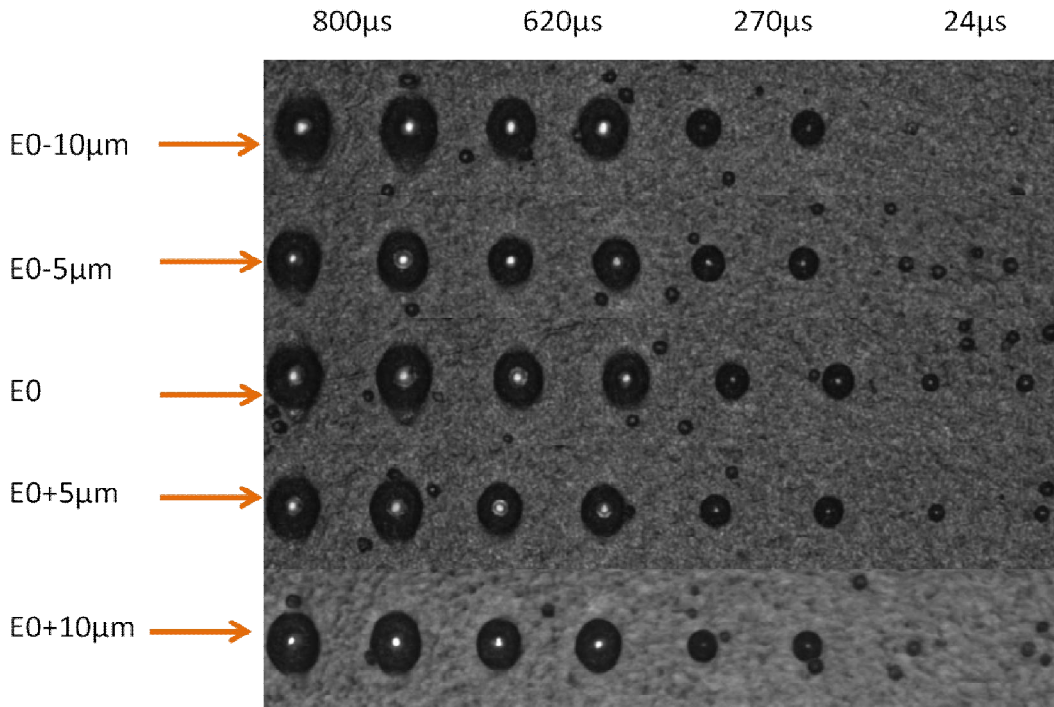


Figura 3.6: Prueba de desenfocamiento para determinar el intervalo de confianza

Se midieron los diámetros exteriores a partir de las fotografías tomadas con el equipo de ILB y procesadas en el programa *ImageJ* [III.1], posteriormente se obtiene el promedio de cada pareja de puntos. El error promedio de tamaño es calculado tomando como valores de referencia las mediciones de los puntos grabados en la zona E0.

Los resultados muestran, figura 3.7, que existe una tendencia de crecimiento del porcentaje de error con la distancia, positiva o negativa, respecto a E0. Según la forma del haz láser utilizado, esto parece lógico. Aunque el tamaño del punto crece conforme aumenta el tiempo de exposición, el error de tamaño relativo tiende a reducirse; debido a que conforme el grabado aumenta de tamaño las variaciones de dimensión respecto al punto tomado como base en la zona E0 son menores, es decir que es menos sensible a variaciones ya que únicamente se comparan las variaciones entre grabados realizados con el mismo tiempo.

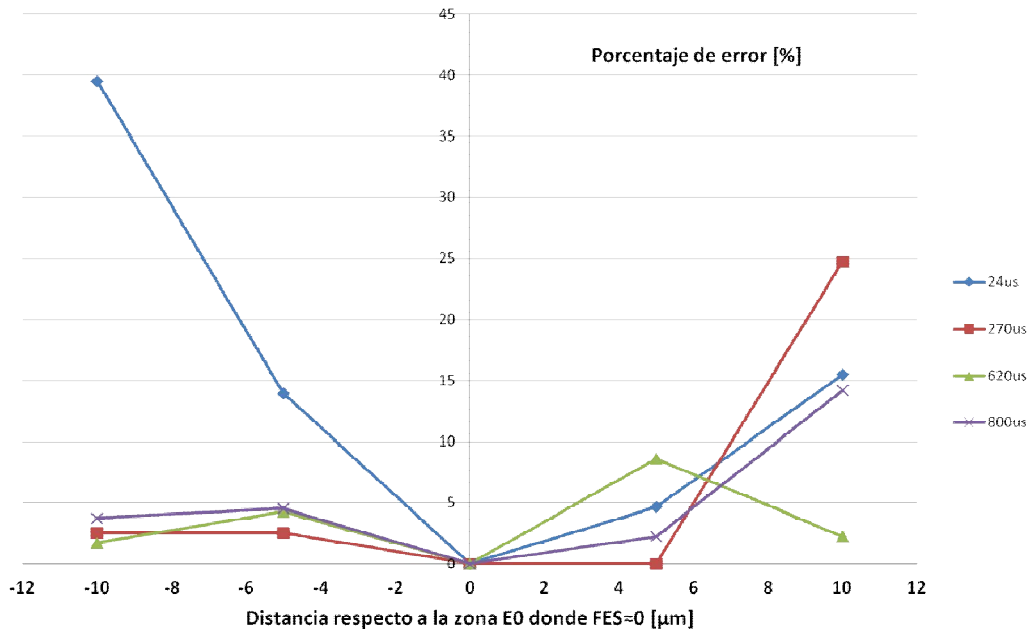


Figura 3.7: Porcentaje de error de tamaño del grabado respecto a los desenfoCAMientos positivos y negativos, para cuatro tiempos de exposición y a intensidad de corriente eléctrica de 100mA.

Estos resultados muestran que existe un intervalo de $-5\mu\text{m}$ a $+5\mu\text{m}$ en el que se presenta a un porcentaje de error promedio menor al 15%, este intervalo será considerado nuestro “intervalo de confianza” ($E0\pm 5\mu\text{m}$). En un intervalo más amplio, de $-10\mu\text{m}$ a $+10\mu\text{m}$, el porcentaje de error crece asimétricamente respecto a E0 hasta un máximo que no sobrepasa el 40%, superior a esta distancia de desenfoCAMiento es probable que el valor de error relativo siga creciendo hasta un valor a partir del cual ya no se graba el material, dependiendo del valor de intensidad de corriente eléctrica fijada. Los resultados representan una buena aproximación del comportamiento respecto a las variaciones positivas y negativas de la distancia entre OPU y sustrato.

3.3.3 Intensidad de corriente eléctrica y tiempos de exposición al láser

Como se mencionó con anterioridad, un segundo parámetro que determina el tamaño del grabado, aparte de la distancia focal, es la energía óptica incidente sobre el material que está absorbida por él. Esta energía es función de la corriente eléctrica suministrada al diodo láser y del tiempo de exposición al material ($I_{\text{láser}}, t_{\text{exp}}$), como se vio en la sección 1.5.

El diodo láser puede efectivamente ser pulsado mediante pulsos eléctricos por medio de la unidad de control de pulso, descrita en la sección 2.6.2. Sin embargo, es necesario conocer la duración real de encendido del haz (llamada tiempo de pulso óptico) ya que puede ser diferente a la de los pulsos eléctricos medidos con un osciloscopio, según la respuesta del diodo utilizado. Se midió la duración real del pulso óptico con un tubo fotomultiplicador Hamamatsu R928 capaz de detectar hasta fotones individuales y con un

tiempo de respuesta muy corto de 2.2ns [III.2]. La caracterización de varios tiempos dentro del rango útil de pulsos permitió conocer con precisión el tiempo de encendido real y se logro concluir que el tiempo óptico se aproxima generalmente al tiempo eléctrico. Sin embargo, en algunos casos, una diferencia no mayor al 30% ha sido medida.

Se realizaron una serie de pruebas para determinar la influencia de los parámetros ($I_{\text{láser}}$, t_{exp}) para la técnica de ablación láser sobre el tamaño del grabado de los puntos individuales en tóner impreso sobre acetato. Dichas pruebas consistieron en realizar diez puntos horizontales, dos puntos por cada tiempo de exposición seleccionado, comenzando en el extremo derecho de la muestra con el menor disponible ($8\mu\text{s}$) y aumentando el tiempo para finalizar en el extremo izquierdo en $800\mu\text{s}$. Al finalizar el grabado de puntos, y para dividir bien las zonas grabadas, se retorna a la posición inicial realizando la grabación de una línea pulsada, con separación entre pulsos de $1\mu\text{m}$, bajo las condiciones ($I_{\text{láser}}$, t_{exp}) del último punto grabado en el extremo izquierdo. En la figura 3.8 se puede observar como ejemplo la prueba realizada cuando el haz está bien enfocado (zona E0).

Esta prueba se repite para cinco niveles de corriente eléctrica en el rango comprendido entre 100mA a 200mA y los tiempos de exposición son los siguientes: $800\mu\text{s}$, $620\mu\text{s}$, $270\mu\text{s}$, $24\mu\text{s}$, $8\mu\text{s}$. Los rangos antes mencionados fueron seleccionados con la intención de obtener curvas representativas que permitan generalizar el comportamiento del tamaño de los grabados respecto los parámetros bajo estudio. Estas pruebas fueron realizadas, al igual que los presentados en la sección anterior (3.3.2), en las zonas E0- $10\mu\text{m}$, E0- $5\mu\text{m}$, E0, E0+ $5\mu\text{m}$ y E0+ $10\mu\text{m}$.

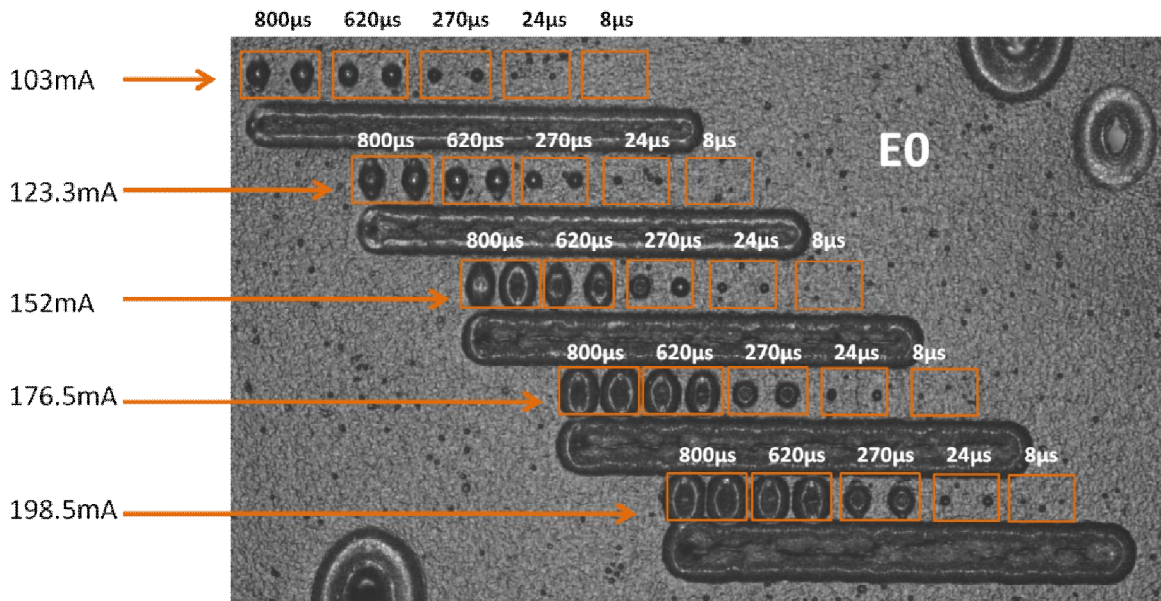


Figura 3.8: Prueba para determinar el efecto de los parámetros corriente eléctrica y tiempo de exposición. Se muestra la zona E0 donde FES \approx 0.

A los grabados se les midió el diámetro exterior así como el de cráter de ablación por medio del programa de análisis de imágenes *ImageJ*, a partir de las fotografías obtenidas por el equipo de ILB. A continuación se presenta en la tabla 3.1 un resumen de las dimensiones sobresalientes de los grabados y catalogados por clases (A, B y C), únicamente se consideran las dimensiones de los puntos con un diámetro externo menor a $30\mu\text{m}$ debido al interés planteado para el presente proyecto y no se considera la profundidad de los puntos, la cual se discutirá en la sección 3.3.5.

Clase	Diámetro externo [μm]	Diámetro promedio externo [μm]	Diámetro promedio interno [μm]
A	2.88 a 6.7	3.69	---
B	4.17 a 13.29	6.14	1.62
C	19 a 31	>19	>10

Tabla 3.1: Resumen de las dimensiones obtenidas en la experimentación

De lo antes planteado se concluye que es posible obtener grabados con un diámetro mínimo promedio exterior de $3.69\mu\text{m}$ sin borde de ablación (5.67 veces la longitud de onda del láser usado, rojo 650nm , posiblemente por la absorbancia del material). Además no se pudo obtener un diámetro externo menor a $2.88\mu\text{m}$ en los grabados clase A. El mejor diámetro interior obtenido es $1.62\mu\text{m}$. Las condiciones mínimas que garantizan el grabado con láser pulsado son $I_{\text{láser}}=150\text{mA}$ y $t_{\text{exp}}=8\mu\text{s}$.

La aplicación de cada clase de grabados (A, B o C) dependerá de las características topográficas deseadas o no deseadas del grabado (resolución interna o externa del cráter, borde de ablación y zona afectada por el calor), por lo cual no se puede decir que una clase es mejor que otra.

Para obtener una resolución determinada, es entonces necesario encontrar un punto de equilibrio entre tiempo de exposición e intensidad de corriente eléctrica. Como es demostrado por el resumen de todos esos resultados en la figura 3.9, a una mayor intensidad de corriente eléctrica será necesario un menor tiempo de exposición o a un mayor tiempo de exposición implicará una menor intensidad de corriente eléctrica. De la representación gráfica se concluye también que el tamaño de los puntos grabados parece más sensible a variaciones del parámetro tiempo de exposición t_{exp} que a variaciones de la intensidad de corriente eléctrica para este material.

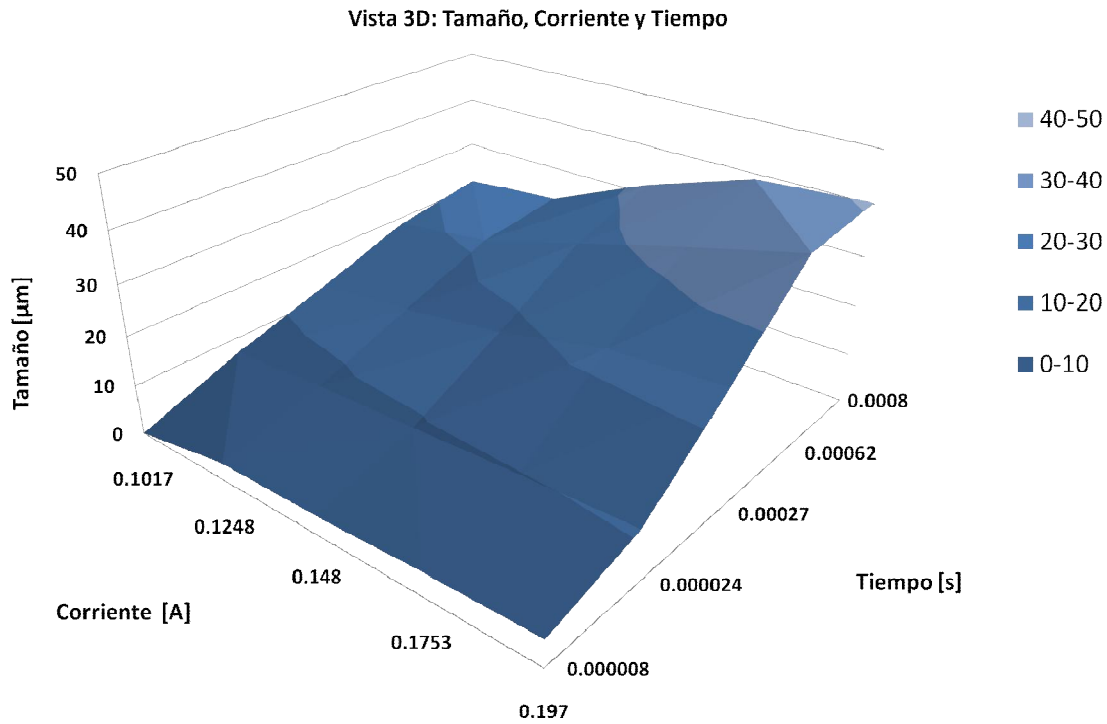


Figura 3.9: Gráfica del comportamiento del tamaño del grabado respecto a los parámetros intensidad de corriente y tiempo de exposición para el tóner negro impreso sobre acetato. Resumen de las pruebas de caracterización.

Finalmente, se puede concluir que para cada uno de los tiempos de exposición existirá una intensidad de corriente eléctrica que proporcione la energía óptica necesaria para una resolución determinada o viceversa. Por ejemplo, los resultados de la prueba antes explicada pueden obtenerse bajo otras condiciones ($I_{\text{láser}}$, t_{exp}) y la condición ideal correspondiente a una resolución dada no es única.

Esto resulta importante a la hora de grabar diseños más complejos con diversas dimensiones laterales, ya que es el objetivo final del presente prototipo. Efectivamente, se puede optimizar el grabado láser directo modificando un solo parámetro, por ejemplo si lo que se desea realizar grabados a una mayor velocidad, se fija el parámetro t_{exp} a un valor relativamente bajo y esto conduce automáticamente a buscar un valor de $I_{\text{láser}}$.

3.3.4 Efecto en la resolución: distancia entre puntos y superposición de pulsos

Una opción de grabado, es grabar punto por punto, como lo hacen los sistemas de grabación actuales. Por lo tanto, una vez completada la caracterización de puntos individuales y la variación de su tamaño respecto a los parámetros ($I_{\text{láser}}$, t_{exp}), es preciso mostrar la importancia de determinar la resolución mínima, considerando distintos espaciamientos entre los centros de puntos individuales. Para ello se realizó una serie de pruebas de grabación de puntos con características topográficas similares a las

mostradas en la sección 3.3.1, en las cuales se da un espaciado entre centros del cráter de ablación que va de $1\mu\text{m}$ a $6\mu\text{m}$ y se compara la diferencia en dimensión entre los dos extremos de la prueba.

La Figura 3.10 muestra los resultados obtenidos para esa prueba y en la tabla 3.2 se resumen las variaciones obtenidas respecto al ancho del canal. La separación (en micrómetros) entre centros aparece en los incisos del lado izquierdo de cada imagen. El efecto de la superposición entre puntos depende del tipo de topografía de los puntos individuales.

Clase	Aumento de ancho de canal externo	Aumento de ancho de canal interno
A	40%	hasta de $2.3\mu\text{m}$
B	5%	45%
C	37%	200%

Tabla 3.2: Aumento de las dimensiones del canal respecto a la separación entre grabados

En todos los casos existe un incremento del borde de ablación es decir que la zona afectada por el calor se hace más grande. El canal interno aumenta respecto al tamaño de los diámetros internos en los puntos individuales.

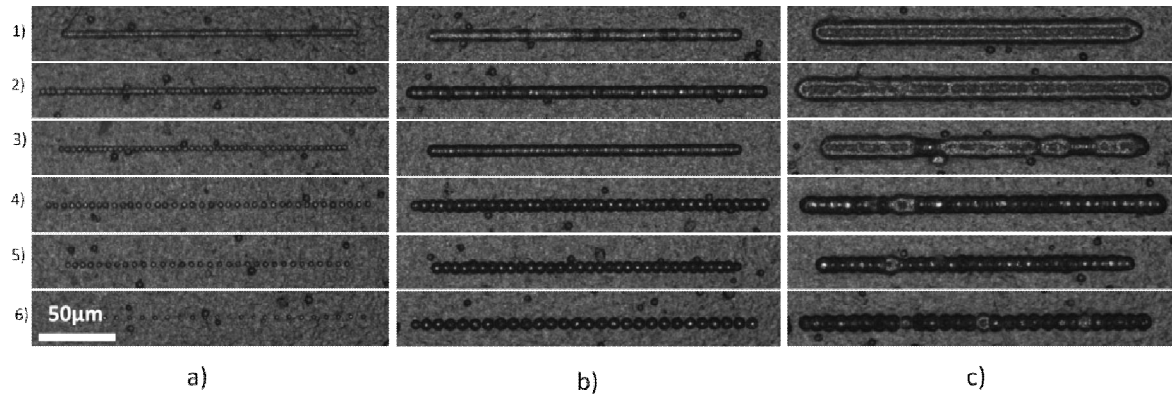


Figura 3.10: Efecto de la distancia y superposición de pulsos láser. a) Clase A, 175mA y $8\mu\text{s}$
 b) Clase B, 175mA y $24\mu\text{s}$ c) Clase C, 100mA y $272\mu\text{s}$

3.3.5 Caracterización de profundidad de penetración

Los resultados hasta ahora presentados en el depósito de tóner sobre acetato se limitan a conocer el ancho de canal o el diámetro de los puntos, así como a la variación respecto a los parámetros ($I_{\text{láser}}$, t_{exp}) y a la distancia entre OPU y superficie del material. Los análisis topográficos obtenidos con el equipo ILB permiten tener una aproximación sobre las variaciones de profundidad de los grabados, pero lamentablemente no conducen a datos concluyentes que permitan una caracterización precisa debido a las limitantes propias del

sistema, posiblemente a que la resolución de los grabados se encuentra en el límite de medición del mismo.

La técnica de ablación permite eliminar el material de la superficie del sustrato, y la experimentación nos ha permitido comprobar que es posible controlar la cantidad de energía absorbida y de este modo la cantidad de material que es eliminado.

Un ejemplo de lo mencionado se observa en la figura 3.11, es un grabado realizado al obtener la curva-S con una corriente de 80mA (a la cual fue comprobado que se graba el material). En la figura 3.11 a) se observan varias elipses concéntricas que se generan a partir de la variación de la distancia OPU-material y al centro la zona de mayor profundidad, que parece corresponder al acetato sobre lo cual estaba depositado el tóner. En la figura 3.11 (b) se aprecia el análisis topográfico de dicho punto usando el equipo ILB. El equipo mide una profundidad aproximada de $15\mu\text{m}$ en la parte central. Cabe recalcar que dicho grabado tiene una dimensión exterior cercana a los $70\mu\text{m}$ y tiene una considerable zona afectada por el calor.

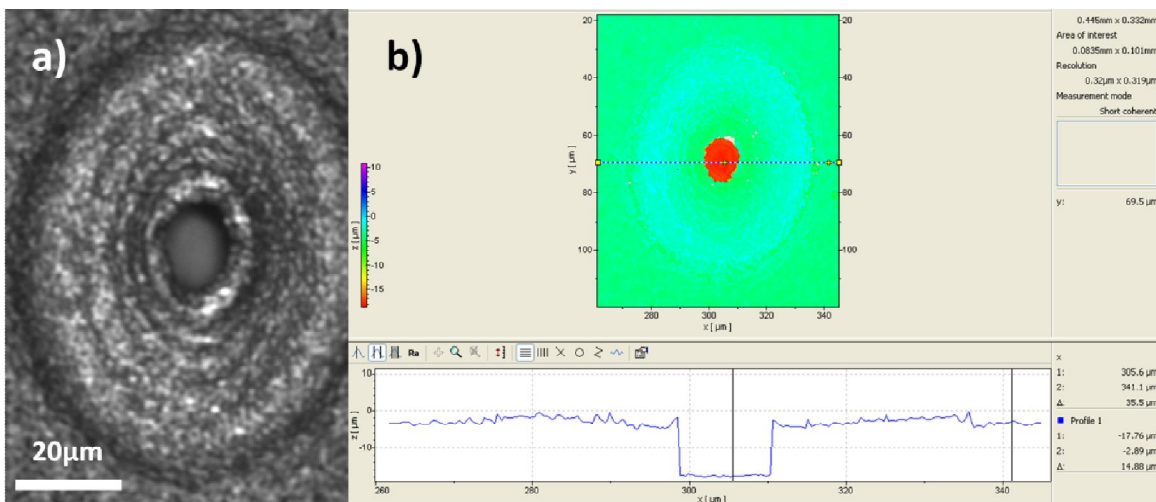


Figura 3.11: Grabado que muestra la eliminación total del tóner obtenido en la caracterización de la curva-S, se observa que el material fue eliminado por capas.

Lo anterior demuestra que la eliminación total del tóner es factible y lleva a la posibilidad de tener un proceso de control sobre la profundidad de grabado en el cual se propone quitar todo el material poco a poco en una eliminación por capas, bajando la posición del punto focal dentro del material y no solamente en su superficie.

Para ello se realizó una prueba en la cual se expone el material a una potencia óptica determinada varias veces, cada una de estas veces se desplaza la OPU de tal manera que se modifica la distancia entre ella y el material para que el punto focal penetre $3\mu\text{m}$ más adentro del material, se escoge dicho desplazamiento para visualizar los efectos en

un amplio rango. Este proceso se ha realizado hasta siete veces (7x) con una penetración total de $21\mu\text{m}$ dentro del material y se ha realizado con una intensidad de corriente de 128mA y un tiempo de exposición del pulso de $24\mu\text{s}$. Los resultados para esta prueba se visualizan en la figura 3.12 para 7 muestras diferentes.

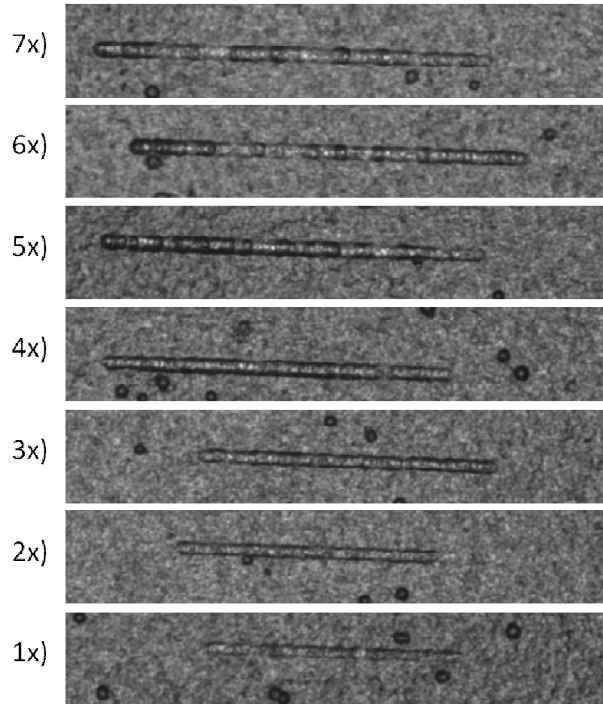


Figura 3.12: Caracterización controlada de la profundidad de penetración

De esta prueba se obtiene que el ancho de canal crece linealmente, figura 3.13, hasta un 49% de la prueba 1x) a la 7x) y a simple vista se observa un oscurecimiento gradual debido a la degradación del material en las líneas.

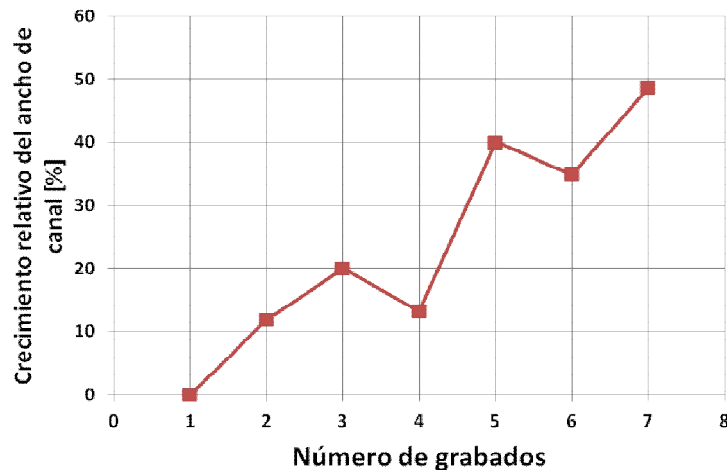


Figura 3.13: Variación del ancho de canal respecto al grabado repetitivo y en profundidad.

Al ser sometido a un análisis más exhaustivo con el interferómetro de luz blanca resultó imposible obtener información suficiente para concluir con certeza si dicha técnica ofrece un control sobre la profundidad de penetración ya que la resolución está en el límite del equipo en su configuración actual con un objetivo de microscopio de magnificación 20X. Sin embargo, con otro microscopio, se aprecia claramente por transparencia que la luz atraviesa mejor los canales grabados un mayor número de veces.

Durante todo el proceso de experimentación y caracterización del sustrato de interés se obtuvieron diversos puntos y líneas en las cuales parecía que el material (tónor) era completamente eliminado del acetato sin realizar grabados repetitivos, esto debido a que la luz del mismo haz o del arreglo de iluminación externa con el CCD era visualizada en el monitor durante las pruebas, figura 3.14. Conocer si el material ha sido completamente eliminado por medio de la transparencia no es la forma más efectiva ya que implica una inversión de tiempo considerablemente grande si se piensa en realizar estructuras de mayor complejidad a canales o puntos.

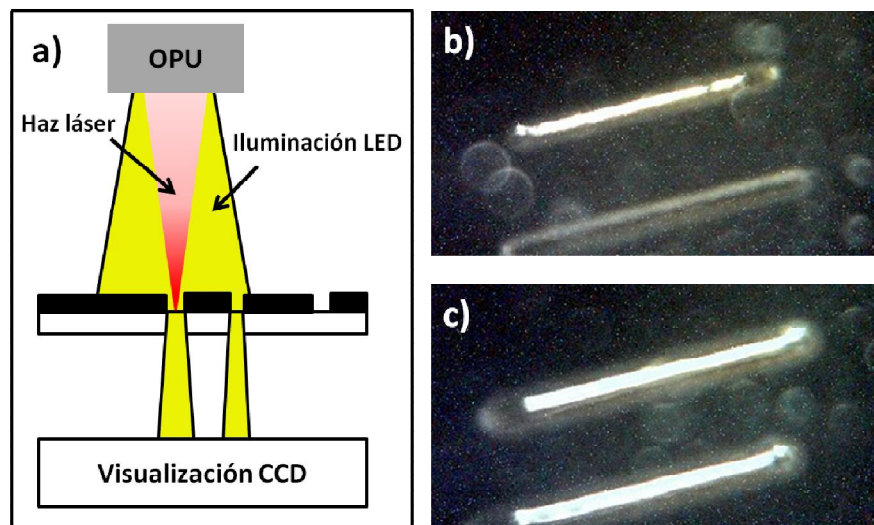


Figura 3.14: Observación de la transparencia de los grabados desde el sistema de visualización CCD. a) Relación de transparencias entre dos líneas, línea superior atraviesa la luz a 75mA y velocidad de avance 100ms/paso c) Ambas transparentes a 100mA y velocidad de avance 50ms/paso.

Con base en lo anterior se realizaron pruebas que consistieron en observar bajo qué condiciones ($I_{\text{láser}}$, t_{exp}) la luz atraviesa el material grabado. La observación se realizó en tiempo real, durante el grabado o inmediatamente después, por transparencia gracias al sistema de visualización con el sensor CCD, presentado en la sección 2.4. Un ejemplo de dichas pruebas se muestra en la figura 3.15 considerando la velocidad de avance de los motores como modo implícito de tiempo de exposición. Aunque se comprobó que es factible quitar el material del sustrato para utilizar el grabado como máscara de

fotolitografía, el hecho de obtener una mayor profundidad de penetración obliga sacrificar el ancho del punto o del canal debido a que crece la zona afectada por el calor.

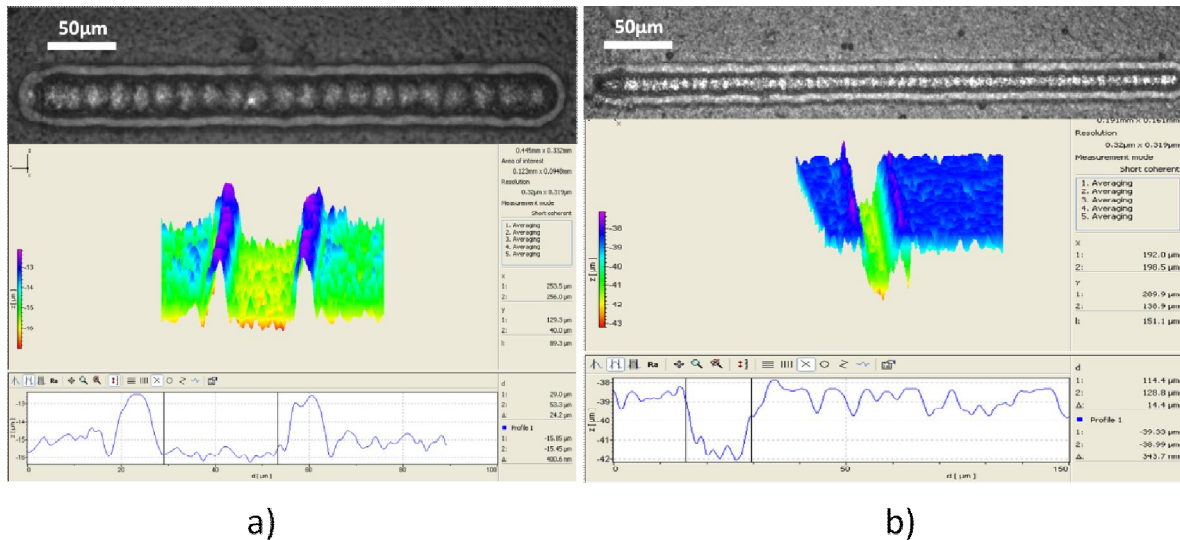


Figura 3.15: a) Ancho externo de 46.49 μ m e interno de 18.82 con 85mA y velocidad de avance de 75ms/paso b) Ancho externo de 31.34 e interno de 8.62 μ m con 70mA y velocidad de avance de 150ms/paso

Debido a que lo que realmente importa es el ancho donde atraviesa la luz y no el diámetro externo del borde del cráter, es necesario que a futuro se realice un análisis detallado respecto a la profundidad de cada una de las caracterizaciones anteriores, establecer límites mínimos de potencia para eliminar el tóner completamente del acetato y comprobar si la resolución correspondiente del grabado es aceptable para la aplicación que se requiere. Lamentablemente esa caracterización no se ha realizado por falta de acceso a un equipo de medición preciso de topografía capaz de resolver esas dimensiones. En el futuro, se espera poder acceder a un microscopio de fuerza atómica (AFM por sus siglas en inglés) para realizar las mediciones de profundidad precisas.

3.4 Metodología planteada

Con base en lo planteado se propone una metodología de uso del prototipo propuesto, figura 3.16, y generalizada para cualquier sustrato, tomando como consideración principal a la resolución o a la profundidad de grabado de acuerdo a la aplicación del mismo.

Se observa que las pruebas de concepto son la primera aproximación que se debe tener con el sustrato a usar, en ellas se determinaran las características físicas del sustrato y con base en la absorbancia del material se determinará cuál de los dos haz láser disponibles es que se usará. Posteriormente es necesario obtener y caracterizar la curva-

S, ya que ésta es la base de un enfocamiento preciso y por ende de un mejor control en la resolución del grabado láser.

Determinar al parámetro resolución del grabado o profundidad de penetración, conlleva a seguir los pasos descritos en la figura 3.16 y dependerá de la aplicación que tenga el grabado láser así como el tipo de material o sustrato bajo prueba.

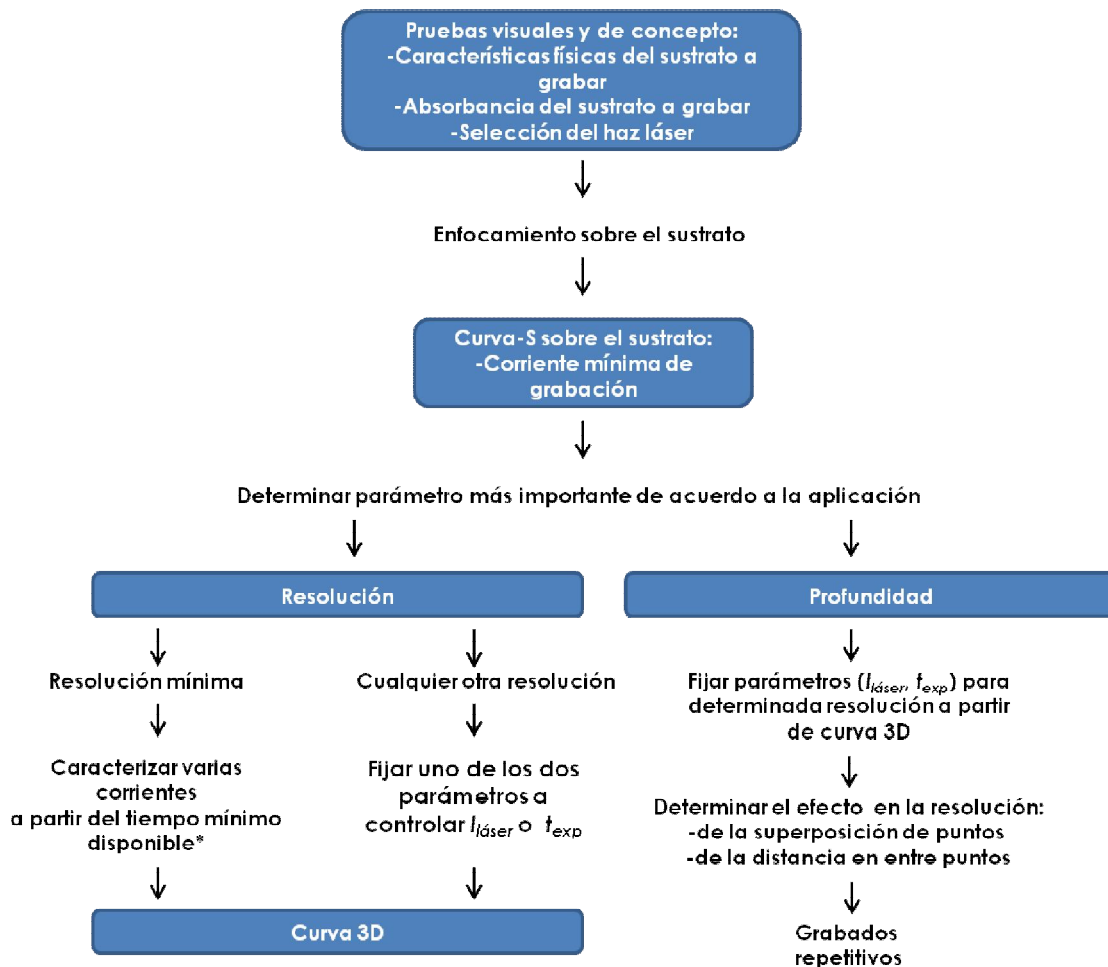


Figura 3.16: Metodología propuesta para el prototipo de microfabricación.

La obtención de una gráfica “tamaño, corriente, tiempo” o gráfica 3D, ver figura 3.9, es uno de los objetivos principales de la presente metodología ya que permite determinar la resolución de los grabados a partir de un parámetro conocido, ya sea $I_{láser}$ o t_{exp} o viceversa.

3.5 Conclusiones del capítulo

Se presentó una serie de experimentos, partiendo de las pruebas de concepto realizadas sobre un CD-R para posteriormente realizarlas sobre el sustrato de tóner impreso sobre acetato. Se determinó que la resolución de los grabados depende directamente de la distancia lente objetivo-superficie de la muestra y de la energía óptica incidente que a su vez es determinada por el tiempo de exposición y la intensidad de corriente eléctrica.

Los experimentos determinaron que a una distancia de desenfocamiento de $5\mu\text{m}$, positivos o negativos, respecto a la distancia focal el porcentaje de error relativo de tamaño del grabado es menor al 15%. Respecto al efecto de la intensidad de corriente eléctrica y el tiempo de exposición sobre la resolución del grabado, se observa que es posible encontrar distintos puntos de equilibrio de ambos parámetros, y obtener una resolución determinada, teniendo en cuenta que para una mayor intensidad de corriente eléctrica será necesario un menor tiempo de exposición o a un mayor tiempo de exposición implicará una menor intensidad de corriente eléctrica. Además se concluye también que el tamaño de los puntos grabados parece mucho más sensible a variaciones del parámetro tiempo de exposición t_{exp} que a variaciones de la intensidad de corriente eléctrica para este material en específico.

También, se analizó el efecto provocado de la superposición entre puntos individuales de grabado y el efecto de la separación entre los centros de puntos consecutivos mostrando que el diámetro exterior e interior del grabado es la característica principal que aumenta de tamaño.

El análisis de la profundidad de penetración se limita a las pruebas realizadas por medio de la eliminación de capas del sustrato y a las observadas por medio de la transparencia, que lamentablemente no conducen a datos concluyentes que permitan una caracterización precisa debido a las limitantes propias del IBL para la obtención de los análisis topográficos. Aunque se comprobó que es factible quitar el material del sustrato para utilizar el grabado como máscara de fotolitografía, el hecho de obtener una mayor profundidad de penetración obliga sacrificar el ancho del punto o del canal debido a que crece la zona afectada por el calor. Es necesario que a futuro se realice un análisis detallado respecto a la profundidad de cada una de las caracterizaciones anteriores, con un microscopio de fuerza atómica por ejemplo, para determinar los límites mínimos de potencia para eliminar el tóner completamente del acetato y comprobar si la resolución correspondiente del grabado es aceptable para la aplicación que se requiere.

Todo lo antes planteado sirve como base para plantear una metodología de uso del prototipo propuesto y que sea generalizada para cualquier sustrato y que conduzca a la microfabricación de prototipos, tomando como consideración principal a la resolución o a la profundidad de grabado de acuerdo a la aplicación del mismo.

Capítulo 4: Manufactura de microestructuras con el equipo láser

4.1 Descripción general del proceso de microfabricación.

A partir de la experimentación presentada en el capítulo 3 con el prototipo presentado en el capítulo 2, se definieron los parámetros importantes (control de distancia OPU-sustrato, tiempo de exposición e intensidad de corriente) para el proceso de fabricación de microestructuras. Como consecuencia de dicha experimentación se propone un proceso de microfabricación láser basado en el diagrama de flujo presentado en la figura 4.1.

El proceso planteado consiste básicamente en las tres siguientes etapas:

1. Diseño 2D del patrón a grabar y conversión del mismo a mapa de bits.
2. Primera etapa mediante el grabado directo, ya sea por ablación o sinterización láser por medio de la metodología planteada en 3.4.
3. Segunda etapa a través de la aplicación de los grabados realizados en la primera etapa, para la obtención de moldes para procesos de litografía suave o máscaras para procesos fotolitográficos.

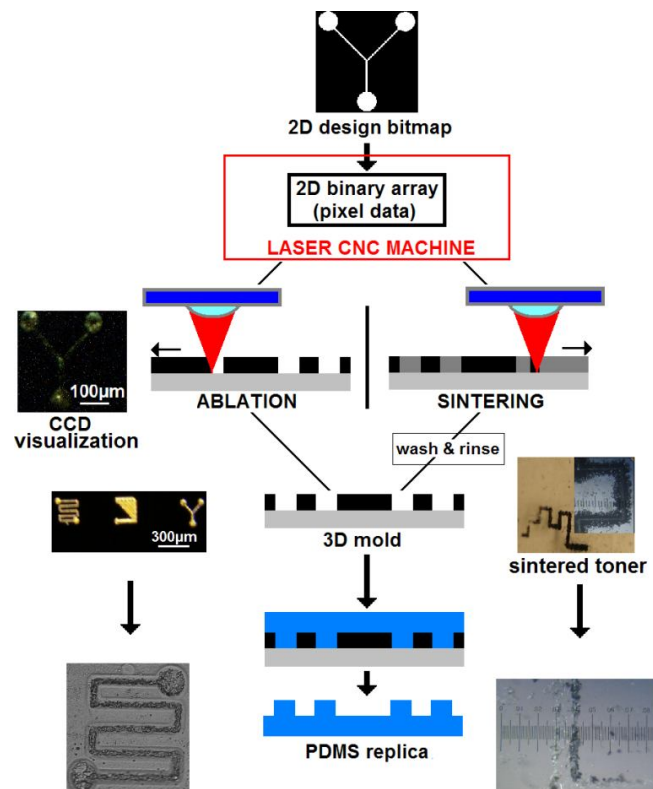


Figura 4.1: Diagrama de flujo para el proceso de microfabricación.

El proceso propuesto ha sido probado sobre el sustrato de tóner impreso sobre acetato para el caso de la ablación y con partículas de tóner en polvo sobre vidrio y poli-dimetilsiloxano (PDMS) para la sinterización. Esos materiales fueron elegidos por su disponibilidad, pero se deja abierta la posibilidad de experimentar con otros materiales a futuro, bajo el mismo proceso y metodología planteados.

4.2 Técnicas directas de microfabricación

4.2.1 Grabado directo sobre tóner impreso sobre acetato

En el capítulo anterior se determinaron las condiciones ($I_{\text{láser}}$, t_{exp}) mínimas para propiciar el grabado en el sustrato de tóner sobre acetato, así también se mostró la influencia de cada uno de ellos en la resolución del grabado. El control de dichos parámetros a la distancia focal representa una técnica de grabación directa que resulta ser la opción más viable de acuerdo a las prestaciones del prototipo de microfabricación.

Se pueden grabar patrones tridimensionales más elaborados que los puntos y líneas. Esto es posible debido a las diversas combinaciones de las condiciones ($I_{\text{láser}}$, t_{exp}), en las que se puede optar por una mínima utilización de la potencia óptica o una mayor rapidez en el grabado.

El uso de la interfaz de control para el prototipaje rápido a partir de imágenes de mapa de bits permite el grabado de estructuras de mayor complejidad en el diseño, ofreciendo la flexibilidad de realizar el grabado de cualquier estructura 2D de un área de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ en un tiempo aproximado de 1 hora. La figura 4.2 muestra un ejemplo de unos grabados utilizables en microfluidos (izquierda) o para máscaras ópticas de difracción (derecha) mediante la interfaz de control, en ella puede observarse ciertas irregularidades en la zona de grabado, donde las posibles causas son la variación no controlada de los parámetros críticos ($I_{\text{láser}}$, t_{exp}), además de las irregularidades propias del sustrato. Para los grabados presentado en las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se utilizó una $I_{\text{láser}}=70\text{mA}$ y un $t_{\text{exp}}=2.8\text{ms}$.

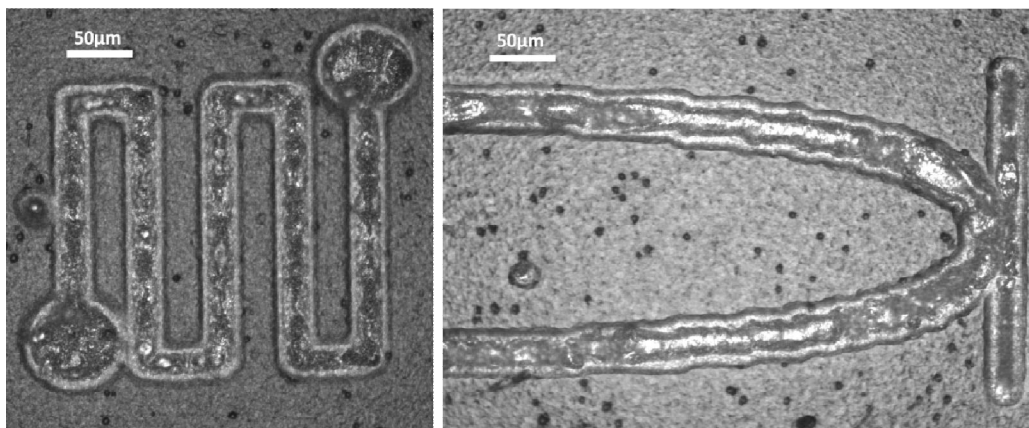


Figura 4.2: Grabados realizados a partir de una imagen en mapa de bits, muestran la facilidad para el prototipaje rápido.

Los grabados realizados con el prototipo propuesto sobre toner depositado en acetato, al ser sometidos a la prueba de transparencia, figura 4.3, para verificar si el material había sido removido en su totalidad del sustrato, demuestran que la luz atraviesa la zona de grabación lo cual hace factible la utilización de dichos grabados como máscara para procesos fotolitográficos. Aunque será requerido el perfeccionamiento de la técnica de depósito del material así como la de grabado del mismo para lograr la uniformidad de la zona grabada y en la transparencia, pues actualmente el grabado presenta irregularidades en la topografía del grabado debido a los posibles residuos de material, aunque lo que se busca únicamente para su uso como máscaras es que pase la luz.

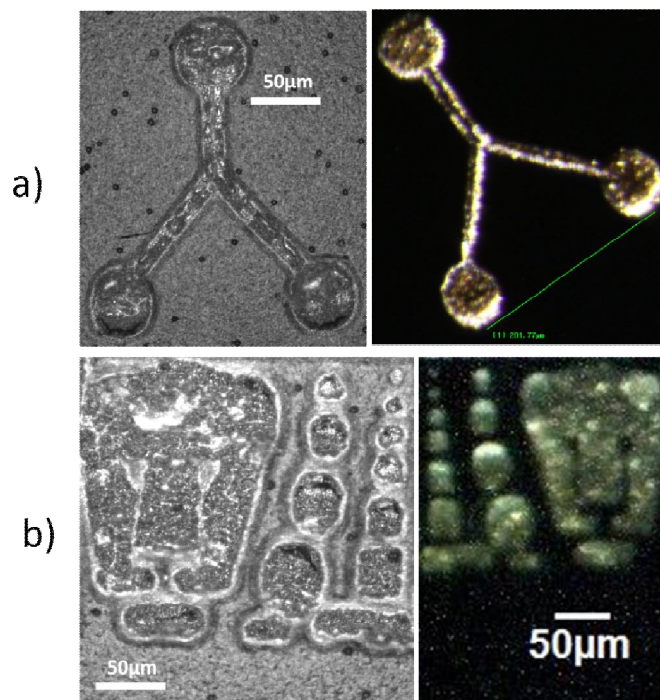


Figura 4.3: Grabados sometidos a la prueba de transparencia, se observa que la luz atraviesa la zona grabada.

La técnica de grabación directa puede ser utilizada también con un desenfocamiento controlado: en ésta se controla y varía la distancia de la lente a la superficie de la muestra, con lo cual se obtienen profundidades y dimensiones laterales diferentes. Un ejemplo de un microcanal con forma de aguja se observa en la figura 4.4.

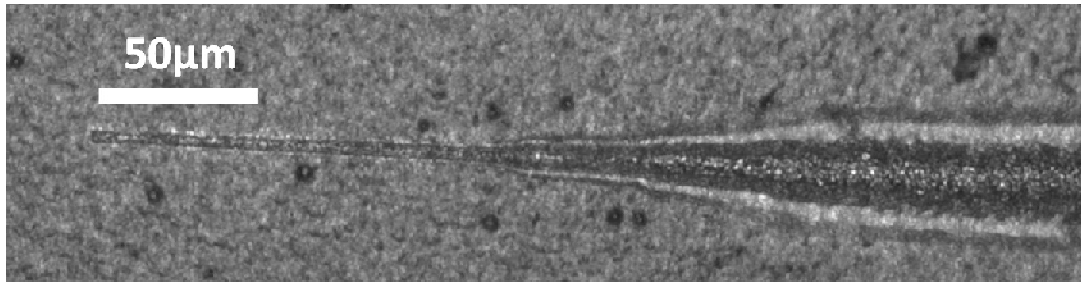


Figura 4.4: Grabado directo realizado mediante desenfoque controlado, se observan variaciones en el ancho de canal y en la profundidad del mismo.

La manipulación de la distancia lente-superficie de la muestra se realiza manualmente en el prototipo propuesto, pero existe la posibilidad de perfeccionar y automatizar esta técnica mediante un control en lazo cerrado y una caracterización mucho más precisa de la variación de la resolución respecto a la distancia focal [ver II.10].

4.2.2 Sinterización de tóner

Se realizó otro tipo de pruebas con partículas depositadas en polvo por medio del cual se da un tratamiento térmico al material haciéndolo compacto y con distintas características mecánicas, este proceso ya no corresponde a ablación sino a el proceso conocido como sinterización. Se probó con los siguientes parámetros: distancia OPU-sustrato, tiempo de exposición del haz e intensidad de corriente eléctrica idénticos a los que son críticos en el grabado directo de los depósitos de tóner sobre acetato.

Las partículas utilizadas fueron de un tóner comercial negro de fotocopiadora disponible en el laboratorio de marca Xerox (Xerox Dry Ink Plus 1050, partículas de 20µm de diámetro en promedio). Se aplicó una capa homogénea de aproximadamente 40µm con una rugosidad promedio de 4.7µm sobre vidrio y sobre polidimetilsiloxano (PDMS). Gracias a la metodología presentada en el capítulo anterior, se encontró la corriente ideal (65mA) para empezar a sinterizar el tóner sobre vidrio pulsando el láser a 2.8ms. En la figura 4.5 se observan algunos resultados obtenidos con las partículas de tóner sobre una superficie de vidrio.

El tiempo de exposición parece no afectar mucho la resolución de la zona sinterizada, obteniendo resoluciones entre 70µm y 100µm, y dicha resolución parece más bien ser función del tamaño mínimo de las partículas usadas.

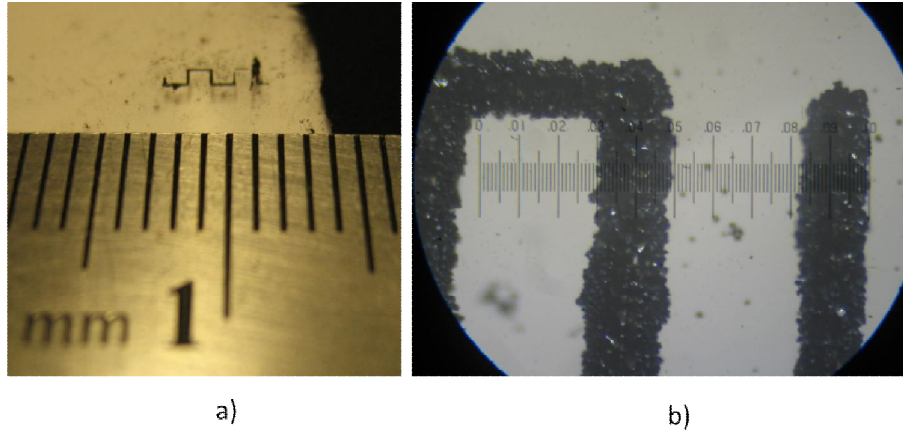


Figura 4.5: Resultados obtenidos con la técnica de sinterización. La escala completa a la derecha mide 1 de mm.

Sin embargo, el tiempo de exposición parece afectar la adhesión del material sinterizado al sustrato sobre el que es depositado. En la figura 4.6 b) se observa la muestra realizada sobre PDMS que a diferencia de la realizada sobre vidrio, figura 4.5 b), las partículas de tóner han sido completamente fundidas. Efectivamente, el espesor de las pistas resultantes sobre PDMS es aproximadamente 30% menor al de las mismas pistas escritas sobre vidrio. Además, al centro de la zona de incidencia del haz láser se forma un canal, el cual es resultado de enfocamiento preciso.

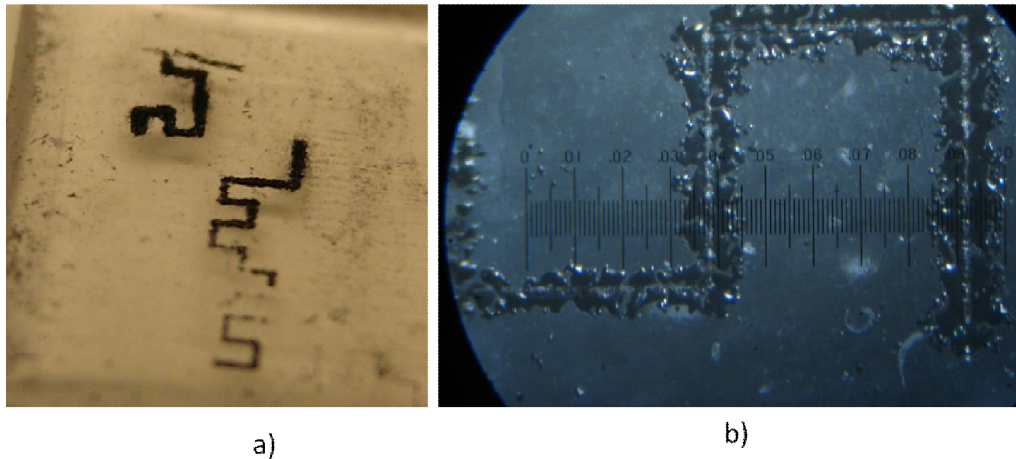


Figura 4.6: Sinterización de tóner sobre PDMS, misma escala que figura 4.5.

Finalmente, para el caso de los sustratos de vidrio, a la hora de revelar el grabado en agua destilada, el patrón grabado se despegó lentamente del sustrato de vidrio. Es solamente a partir de una corriente de láser de 78mA pulsado a 2.8ms que se quedó totalmente adherido al sustrato. Para potencias del láser inferiores a 80mA, los patrones formados se pueden despegar del sustrato. Esto los hizo fáciles de manipular con pinzas

como ilustrado en la figura 4.7. En este caso, cabe mencionar que la uniformidad de la capa de tóner depositada en el sustrato antes de sinterizar el material es crítica, ya que el espacio entre las partículas de tóner puede afectar la cohesión final del grabado.

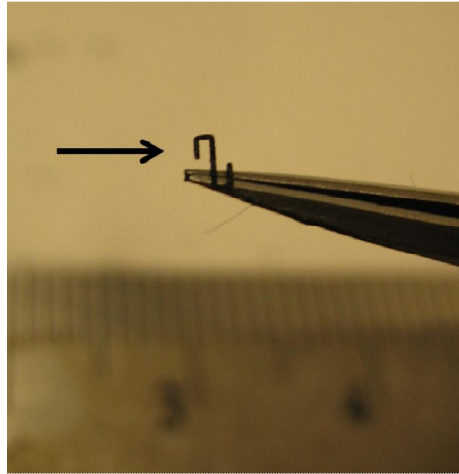


Figura 4.7: Grabado desprendido del vidrio posterior al revelado.

Sin embargo, ninguno de los patrones sinterizados sobre sustratos PDMS se ha podido despegar del sustrato. Este efecto puede presentar una alternativa interesante, rápida y de bajo costo a la deposición clásica de material por *fused deposition modeling* (FDM) que permite la escritura directa de patrones 3D sobre PDMS.

Lo antes presentado únicamente corresponde, como se mencionó anteriormente, a la prueba de concepto realizada con lo que se demuestra una vez más la versatilidad del equipo de microfabricación. Se requiere una caracterización profunda para el proceso de sinterizado con el prototipo propuesto para que en un futuro se pueda optimizar la técnica. Las técnicas de caracterización antes descritas para el grabado de tóner impreso sobre acetato se pueden aplicar perfectamente a la sinterización.

4.3 Ejemplos de aplicaciones de los grabados directos

4.3.1 Utilización de grabados directos como molde para réplicas

Las técnicas comunes de litografía suave permiten la fabricación de réplicas a partir de un micromolde antes fabricado y se caracterizan por su fácil implementación y su costo relativamente bajo. Los micrograbados realizados a partir del grabado directo de un sustrato o material específico representan también una alternativa para ser usados como micromolde.

Las réplicas se realizaron con un polímero comúnmente utilizado en litografía suave, el *poli-dimetilsiloxano* o PDMS. Los moldes utilizados aquí fueron moldes de líneas y de estructuras complejas grabadas por ablación láser. En las figuras 4.8 y 4.9 se observan algunos resultados obtenidos de los moldes de distintos tipos de líneas grabadas sobre el tóner depositado en acetato. En ellas se observa que todos los relieves del molde, incluso las imperfecciones superficiales, están transferidos a la réplica de PDMS sin que ningún material sea separado del molde original. En la figura 4.8 a) y b) puede observarse que la zona correspondiente al cráter de canal está perfectamente definida al igual que la correspondiente al canal mismo. Ambas muestras (molde maestro y réplica) fueron caracterizadas por el interferómetro de luz blanca para comparar sus dimensiones y ninguna diferencia ha sido detectada.

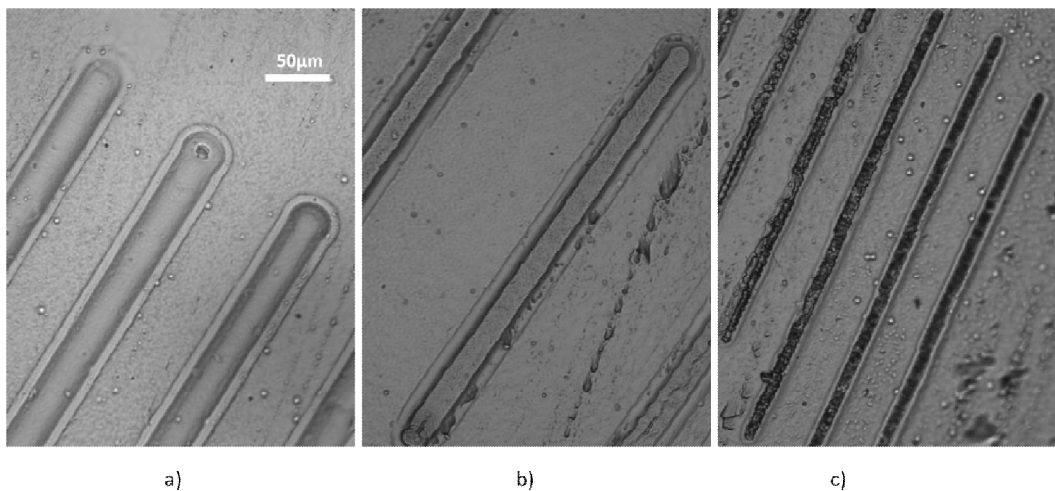
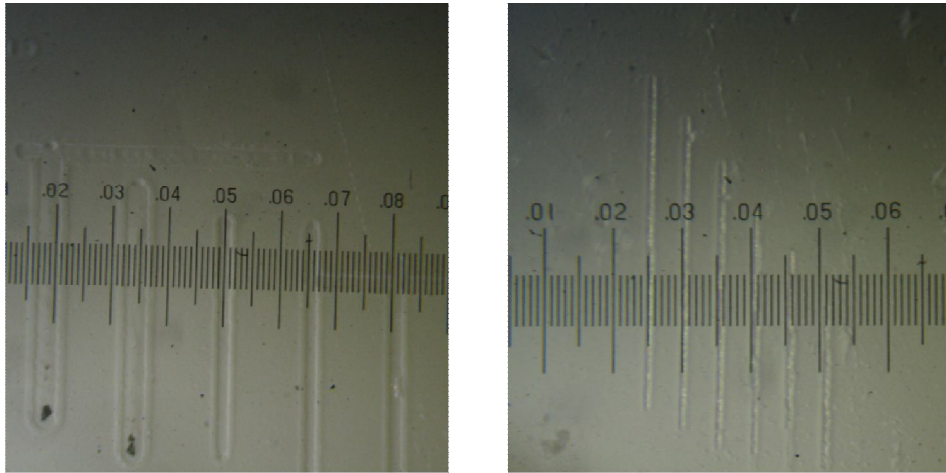


Figura 4.8: Réplicas obtenidas con PDMS a partir de los moldes grabados con el equipo de microfabricación láser.

La profundidad de dichas réplicas no pudo verificarse debido a que la técnica de interferometría de luz blanca está muy limitada para poder medir la topografía de microestructuras tridimensionales transparentes.



a)

b)

Figura 4.9: Réplicas en PDMS vistas por medio de un microscopio óptico, escala completa 0.1", cada división numérica mide 0.01".

Al igual que las líneas, se obtuvieron réplicas de estructuras complejas fabricadas con grabado láser directo por CNC, las cuales se observan en las figuras 4.10 a) y d). En las figuras 4.10 b) y c) se observa la diferencia de resoluciones que pueden obtenerse en los moldes grabados y que tales pueden ser transferidas directamente a la réplica de PDMS.

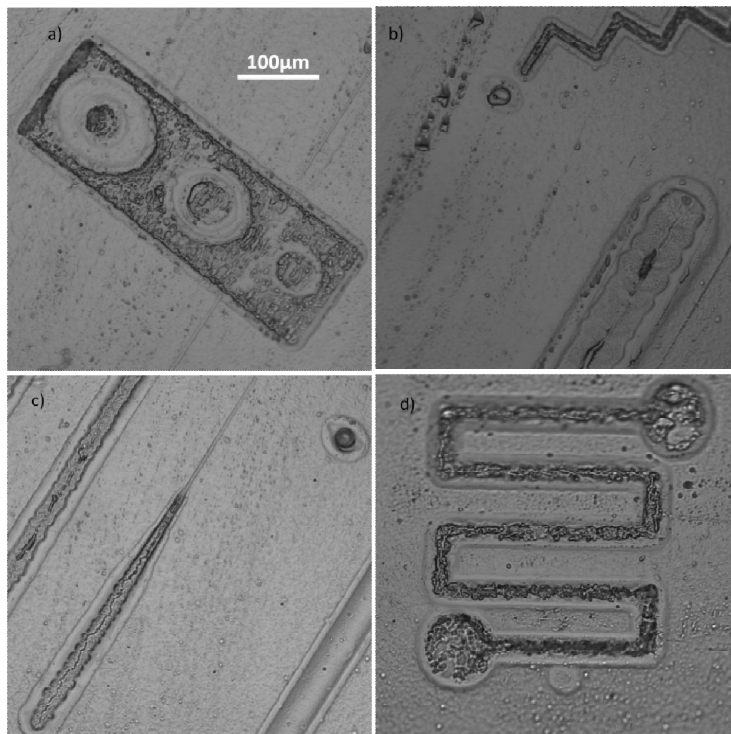


Figura 4.10: Réplicas de estructuras complejas en PDMS.

Como complemento se replicaron las muestras sinterizadas de tóner, con la finalidad de comprobar la factibilidad del proceso de molde/réplica en dichas muestras y verificar si el tóner sinterizado se desprende de su sustrato. En la figura 4.11 se observa que las partículas de tóner de la periferia de la línea grabada sobre vidrio llegan a transferirse a la réplica. Este efecto indeseable se puede explicar por una exposición a una energía luminosa menor, ya que el haz estaba enfocado en el medio de la línea. Efectivamente, por la forma de salida del haz láser a partir de la lente objetivo de la OPU utilizada, la energía de grabado va decreciendo con la distancia al spot central. Sin embargo, las muestras de tóner sinterizado sobre PDMS no presentaron desprendimiento ninguno, lo que nos permite concluir que el polímero ofrece una mejor solución como sustrato para sinterizar patrones utilizables para fabricar réplicas.

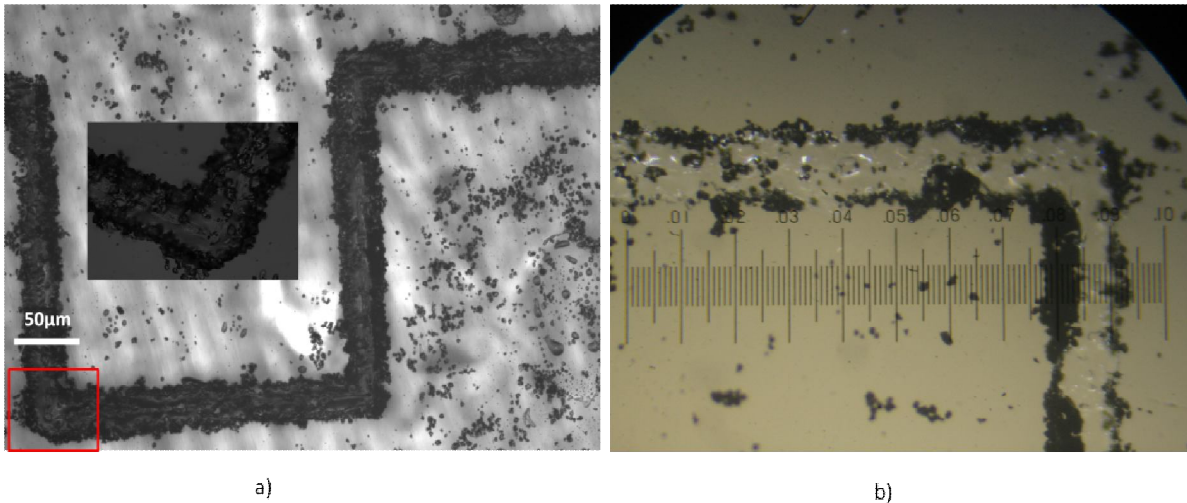


Figura 4.11: a) Réplica de la muestra de tóner sinterizada vista con el interferómetro de luz blanca. b) vista desde el microscopio óptico.

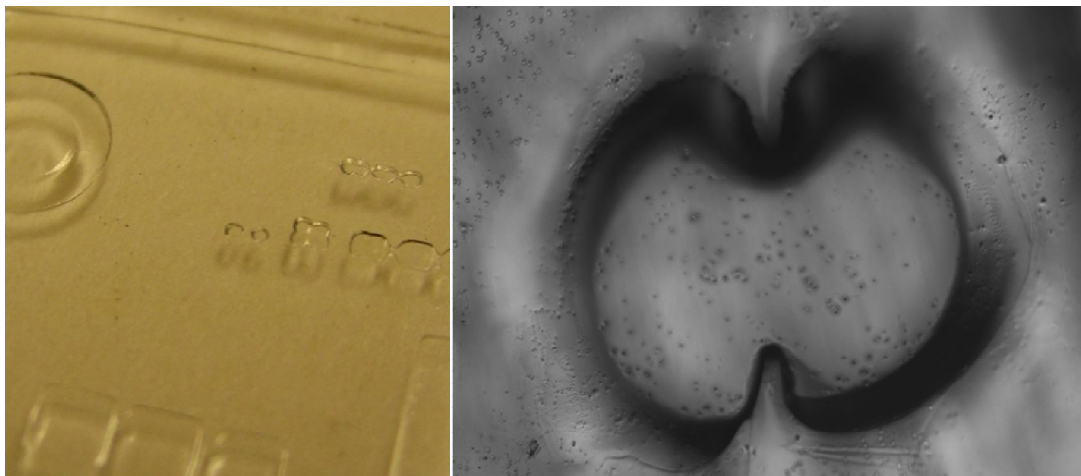
Lo antes mostrado demuestra que los micrograbados realizados sobre tóner impreso y tóner en polvo realizados con el prototipo por ablación o sinterización, representan una alternativa viable para fabricar moldes de microfabricación por litografía suave.

4.3.2 Utilización de los grabados directos como máscaras para fotolitografía

La fotolitografía es una etapa primordial en el proceso de fabricación de microestructuras ya sea para el desarrollo de microcircuitos o para la elaboración de MEMS. Ella se basa en una exposición localizada y controlada de una resina fotosensible, para forzar o impedir una polimerización dependiendo del tipo de resina, seguida de un proceso de revelado. Máscaras de alta resolución se utilizan para delimitar las zonas de exposición de la resina a la radiación de interés.

Se decidió utilizar los micrograbados realizados en el depósito de tóner impreso sobre acetato como máscaras para fotolitografía mediante el proceso planteado en la sección 1.3. La resina utilizada es un pegamento fotosensible al UV de marca Loctite, modelo 3525 actualmente investigada como alternativa de bajo costo a la resina de tipo epoxi comúnmente utilizada en microelectrónica y en fabricación de MEMS, el SU8. Además de su bajo costo, el pegamento fotosensible Loctite 3525 ofrece las otras ventajas de no presentar peligros para la salud ni de requerir de solventes nocivos para revelarlo, ya que el acetona sirve de solvente revelador.

Para la realización del proceso fotolitográfico se tomó como referencia el trabajo previo realizado en el grupo de trabajo y en [IV.1], con lo cual encontraron los parámetros y condiciones que optimizan el proceso. En la figura 4.12 a) se muestra el resultado del proceso de fotolitografía aplicado a un sustrato de Loctite 3525 utilizando una máscara fabricada por impresión de tóner con una resolución igual o mayor a $50\mu\text{m}$. Bajo las mismas condiciones y metodología del proceso se utilizaron máscaras fabricadas por grabado láser directo del depósito de tóner impreso sobre acetato previamente grabado y en la figura 4.12 b) se muestran los resultados vistos con el ILB.



a)

b)

Figura 4.12: a) Resultados de la fotolitografía. a) Resultado previo con máscaras de resolución mayor a $100\mu\text{m}$. b) Resultado obtenido con las máscaras grabadas con el equipo de microfabricación.

Como puede observarse en la figura 4.12 b) los resultados no fueron satisfactorios con las máscaras fabricadas con el prototipo láser, ya que todos los patrones grabados demuestran una sobreexposición de la resina debido a que no se pudo adaptar el método disponible a las nuevas máscaras. Eso se puede explicar por la alta resolución de esas últimas muestras, mayor a las usadas en trabajos previos. Por lo tanto, se hace necesario una nueva caracterización del tiempo de exposición y de la potencia de la luz UV con el

objetivo de encontrar el equilibrio de dichas condiciones. Sin embargo, es posible que no se logre obtener resultados satisfactorios con una resolución mayor a $10\mu\text{m}$, ya que nunca se ha reportado en la literatura.

Finalmente, a la fecha, no es posible concluir si la utilización de los micrograbados como máscaras para fotolitografía ofrece resultados favorables a escala menor a $10\mu\text{m}$, será necesario establecer y realizar un proceso de caracterización de las condiciones de tiempo de exposición y potencia de la lámpara UV para las nuevas máscaras.

4.4 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se presentó la propuesta del proceso general para la manufactura de microestructuras tomando como punto de partida la metodología propuesta en la sección 3.4. El proceso planteado está dividido en tres etapas: el diseño 2D del patrón a grabar, el grabado tridimensional directo por ablación láser o por sinterización y finalmente la utilización de los grabados para la obtención de moldes para procesos de litografía suave y/o máscaras de procesos fotolitográficos. La aplicación de la metodología de uso del prototipo y del proceso de manufactura de microestructuras condujo a la obtención de grabados de patrones complejos en el diseño sobre tóner impreso y las respectivas réplicas sobre PDMS. Del mismo modo se obtuvieron resultados para la prueba de concepto de la sinterización de tóner en polvo demostrando la versatilidad del prototipo y la validez de la metodología propuesta.

Como se presentó, la utilización de los grabados directos como máscaras para fotolitografía, fabricadas con el prototipo láser, arrojó resultados no satisfactorios, ya que todos los patrones grabados demuestran una sobreexposición de la resina debido a que no se pudo adaptar el método disponible a las nuevas máscaras por lo cual será necesario establecer y realizar un proceso de caracterización de las condiciones de tiempo de exposición y potencia de la lámpara UV para las nuevas máscaras. Este defecto se espera corregir en el futuro, optimizando el proceso con la resina utilizada o utilizando otra resina.

Análisis de resultados y conclusiones

Resumen de resultados

En el presente trabajo de tesis se presentó (1) la propuesta y desarrollo de un prototipo de equipo para microfabricación láser de bajo costo y fácil realización, basado en el sistema óptico láser de un reproductor/grabador comercial de discos ópticos (OPU) para la fabricación directa de máscaras y moldes de alta resolución. También se realizó (2) una serie de experimentos usando el sustrato de tóner impreso sobre acetato, que sirven como base para establecer una metodología que pretende ser generalizada a cualquier sustrato y que conduzca a la microfabricación de estructuras y prototipos.

A pesar de la existencia de otros equipos comerciales para microfabricación láser en el mercado actual, sus altos costos y difícil acceso limitan la experimentación a escalas micrométricas y el acceso a ellos. El presente proyecto presentó en el capítulo 2 una nueva herramienta de fabricación que ofrece las siguientes cualidades:

- Dos diodos láseres con longitud de onda determinada, infrarrojo de 780nm y rojo de 650nm, con un enfocamiento preciso de los haces, para el infrarrojo el tamaño mínimo del *spot* es de 1.103 μm y de 0.689 μm para el láser rojo.
- Control preciso del tiempo de encendido electrónico del diodo láser con un tiempo mínimo de 6 μs .
- Control preciso de la intensidad de corriente eléctrica suministrada al diodo láser con un máximo de 250mA (lo que corresponde a 500mW de potencia eléctrica).
- Control micrométrico del eje vertical Z para manipular la distancia entre la lente del OPU y la superficie de la muestra a grabar y así controlar con precisión la posición del punto focal del haz láser, dicho control es complementado con una unidad de monitoreo electrónico de esta distancia respecto al sustrato, a partir del fotodetector integrado en la OPU y la obtención de una señal de control de enfocamiento (FES).
- Una plataforma de trabajo que permite el movimiento preciso y controlado en dos ejes (XY) con desplazamientos lineales con resolución de 1 μm .
- Una unidad de visualización en tiempo real para observar la muestra antes y durante del proceso de grabación a partir de un detector tipo CCD (*charge-coupled device*) reciclado de una cámara web comercial con conexión USB, sobre lo cual se monta un objetivo de microscopio con amplificación.
- Una interface de control, desarrollada en *Visual Basic* por medio de *Excel* para su fácil uso, que permite el control de los desplazamientos lineales de la plataforma XY y de la señal de encendido del diodo láser, imitando a los sistemas de Control Numérico Computarizado (CNC) que pueden grabar diseños complejos a partir de una imagen.

Se caracteriza además por su fácil manejo y su bajo costo ya que los reemplazos y refacciones pueden ser conseguidos fácilmente. También se distingue por su versatilidad para adaptarse a varios tipos de muestra y no necesita de las condiciones de un cuarto limpio para asegurar una alta resolución. El prototipo de equipo para microfabricación ofrece finalmente la posibilidad de realizar micrograbados con un bajo tiempo de realización y sin requerir de una preparación técnica particular.

El equipo desarrollado facilitó la experimentación sobre tóner impreso sobre acetato, y por medio de los resultados obtenidos, se propuso una metodología para la microfabricación con el prototipo planteado.

Se presentó en el capítulo 3 una serie de experimentos, partiendo de las pruebas de concepto realizadas sobre un CD-R para posteriormente realizarlas sobre el sustrato de tóner impreso sobre acetato con el diodo láser rojo (650nm) ya que ofrece una mejor resolución de grabado.

Se determinó que la resolución de los grabados depende directamente de la distancia lente objetivo-superficie de la muestra y de la energía óptica incidente que a su vez es determinada por el tiempo de exposición y la intensidad de corriente eléctrica.

Los experimentos determinaron que a una distancia de desenfocamiento de $5\mu\text{m}$, positivos o negativos, respecto a la distancia focal el porcentaje de error relativo del tamaño de los grabados es menor al 15%. Respecto al efecto de la intensidad de corriente eléctrica y el tiempo de exposición sobre la resolución del grabado, se observa que es posible encontrar distintos puntos de equilibrio de ambos parámetros, y obtener una resolución determinada, teniendo en cuenta que para una mayor intensidad de corriente eléctrica será necesario un menor tiempo de exposición o a un mayor tiempo de exposición implicará una menor intensidad de corriente eléctrica. Además se concluye también que el tamaño de los puntos grabados parece mucho más sensible a variaciones del parámetro tiempo de exposición t_{exp} que a variaciones de la intensidad de corriente eléctrica para este material en específico.

Se clasificó a los grabados con base en las topografías características observadas durante la experimentación sobre el tóner impreso, basados en el diámetro exterior del cráter de ablación, el diámetro interno y el borde de ablación; como resultado se identificaron tres clases que fueron definidas como A, B y C. La experimentación determinó que se pueden alcanzar grabados sobre el tóner depositado en acetato con un diámetro exterior de hasta $3\mu\text{m}$ sin cráter de ablación y de hasta $2\mu\text{m}$ en el punto mínimo central en el caso de los puntos con cráter de ablación. En líneas se pueden obtener resoluciones con un ancho de canal de hasta $4\mu\text{m}$ externos y $2\mu\text{m}$ al interior del mismo.

También se analizó el efecto provocado de la superposición entre puntos individuales de grabado y el efecto de la separación entre los centros de puntos consecutivos con base en la resolución de grabado de los mismos, mostrando que el diámetro exterior e interior

del grabado es la característica principal que aumenta de tamaño con un máximo de 40%, 45% y 200% para los grabados clase A, B y C respectivamente.

El análisis de la profundidad de penetración se limita a las pruebas realizadas por medio de la eliminación de capas del sustrato y a las observadas por medio de la transparencia, que lamentablemente no conducen a datos concluyentes que permitan obtener una caracterización precisa debido a las limitantes propias del IBL para la obtención de los análisis topográficos. Aunque se comprobó que es factible quitar el material del sustrato para utilizar el grabado como máscara de fotolitografía, el hecho de obtener una mayor profundidad de penetración obliga a sacrificar el ancho del punto o del canal debido a que crece la zona afectada por el calor.

En el capítulo 4 se presentó la propuesta del proceso general para la manufactura de microestructuras tomando como punto de partida la metodología propuesta. El proceso planteado está dividido en tres etapas: el diseño 2D del patrón a grabar, el grabado tridimensional directo por ablación láser o por sinterización y finalmente la utilización de los grabados para la obtención de moldes para procesos de litografía suave y/o máscaras de procesos fotolitográficos.

La aplicación de la metodología de uso del prototipo y del proceso de manufactura de microestructuras condujo a la obtención de grabados de patrones complejos en el diseño sobre tóner impreso y las respectivas réplicas sobre PDMS. Del mismo modo se obtuvieron resultados para la prueba de concepto de la sinterización de tóner en polvo demostrando la versatilidad del prototipo y la validez de la metodología propuesta.

La utilización de los grabados directos como máscaras para fotolitografía, fabricadas con el prototipo láser, arrojó resultados no satisfactorios, ya que todos los patrones grabados demuestran una sobreexposición de la resina debido a que no se pudo adaptar el método disponible a las nuevas máscaras por lo cual será necesario establecer y realizar un proceso de caracterización de las condiciones de tiempo de exposición y potencia de la lámpara UV para las nuevas máscaras. Este defecto se espera corregir en el futuro, optimizando el proceso con la resina utilizada o utilizando otra resina.

La fabricación del prototipo actual así como las pruebas de concepto fueron sometidas para su publicación en una revista científica internacional con arbitraje de fuerte impacto y el artículo resultante fue aceptado para su publicación con revisiones menores el 29 de noviembre por los editores de la revista *Applied Optics*. Cabe mencionar que al terminar este proyecto de tesis se empezó a utilizar el prototipo con otros materiales con los cuales ya se lograron buenos resultados a la fecha actual.

Conclusiones y propuestas a futuro

El **prototipo de microfabricación** planteado es susceptible de ser mejorado, comenzando por el arreglo mecánico ya que bajo las condiciones actuales no se puede garantizar que la horizontalidad del plano XY se mantenga debido a la tolerancia y holgura de las piezas mecánicas, por lo cual se propone diseñar y fabricar una plataforma de uso específico para éste propósito y de esta manera evitar errores en los desplazamientos lineales. El diseño puede incluir al eje vertical Z, para que la plataforma de trabajo quede implementada en una sola pieza. Actualmente la resolución del eje Z puede ser mejorada adaptando al eje rotatorio de la perilla graduada un motor a pasos adicional, el cual proporciona un control mucho más fino, tal como ya se ha hecho en [II.10]. La resolución intrínseca del motor es de 0.9° por paso lo que permite un desplazamiento vertical de $0.5\mu\text{m}$ lineales en cada paso.

La mejora mecánica del eje Z permitirá manipular con mayor precisión la distancia entre la lente del OPU y la superficie de la muestra a grabar y mejorará la obtención de la curva-S, aunado con la resolución del instrumento de medición de voltaje o en su caso una adquisición digitalizada de los datos. Además se deberá mejorar el arreglo sumador con operacionales implementado un circuito amplificador debidamente compensado en *offset*.

Se deberán desarrollar tarjetas de circuitos impresos (*printed circuit board*, o PCB) para cada uno de los diseños electrónicos para evitar fallas posibles en las conexiones eléctricas, además la unidad de visualización sensor CCD podrá ser sustituida por alguna otra de alta calidad de imagen (alta definición) y de mayor velocidad en cuadros por segundo e implementar el filtrado de las longitudes de onda en cuestión para no saturar la visualización a altas intensidades luminosas. También se deberán implementar otros modos y puntos de visualización, para no limitarla únicamente a la parte inferior de la muestra.

Respecto a las **pruebas de ablación**, se presentan las bases para que en un futuro se perfeccione la técnica y la metodología. En específico se deberá trabajar en el perfeccionamiento de la técnica de depósito del material pues actualmente el sustrato presenta irregularidades en la topografía que para algunas aplicación podrá tomar mayor importancia.

Todas las mediciones realizadas pueden ser sujeto de un error sistemático es decir al método o forma en que realiza la medición por lo cual en futuros experimentos deberán realizarse mediciones con equipos que permitan obtener análisis detallados, por ejemplo un AFM (*Atomic force microscopy*).

Las resoluciones alcanzadas sobre el tóner impreso están directamente relacionadas con la absorbancia del material y pueden mejoradas en otros sustratos. Será necesario un estudio de las propiedades físico-químicas intrínsecas de los materiales a grabar y de la

interacción luz-materia ya que aportaría información importante para optimizar los grabados y la técnica de grabado láser.

Se establecieron los factores que influyen sobre la resolución del grabado pero es necesario que a futuro se realice un análisis detallado respecto a la profundidad de cada una de los grabados y experimentos realizados, para determinar los límites mínimos de potencia para eliminar el tóner completamente del acetato y comprobar si la resolución correspondiente del grabado es aceptable para la aplicación que se requiere.

Se espera poder repetir la misma caracterización con otros materiales típicamente utilizados en microfabricación, para optimizar el equipo y darle más flexibilidad y además se sigue haciendo una caracterización más completa en el rango temporal y de intensidad de corriente y también expandirla al diodo infrarrojo.

Se requiere una caracterización profunda para el **proceso de sinterizado** con el prototipo propuesto para que en un futuro se pueda optimizar la técnica y quizá probar otras técnicas como *fused deposition modeling* (FDM) que permitan la escritura directa de patrones 3D sobre PDMS para usos en la bioingeniería de tejidos.

Será necesario también establecer y realizar un proceso de caracterización de las condiciones de tiempo de exposición y potencia de la lámpara UV para la utilización de los grabados directos como máscaras para fotolitografía, ya sea para la resina utilizada o utilizando otra resina.

Se espera que la aplicación de la metodología planteada y el proceso general para la manufactura de microestructuras arroje resultados positivos en la experimentación y en la fabricación de estructuras funcionales ya que actualmente se sigue trabajando con el prototipo desarrollado.

Anexo A: Tecnología láser y láser de semiconductor

Descripción de la tecnología láser

La palabra LASER es el acrónimo del inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación). Dicho proceso físico se basa en la radiación emitida por ciertos átomos cuando ocurren transiciones entre niveles discretos de energía, $E_0 < E_1 < E_2 < E_3 \dots$ donde E_0 corresponde al estado cuántico de menor energía o estado fundamental. Algunos átomos emiten radiación cuando pasan de un nivel energético a otro más bajo. Puede estimularse la emisión someténdolos a un campo de radiación de la misma frecuencia a la que emitirían normalmente, la técnica es conocida como bombeo y se logra por una luz brillante con frecuencia f_{ij} sobre átomos excitados [I.10].

La absorción de energía externa se produce sólo si la cantidad de energía suministrada coincide con la diferencia energética entre dos estados E_i y E_j , es decir $\Delta E_{ij} = E_i - E_j$ donde $E_i < E_j$. La ecuación (A.1) relaciona los parámetros antes mencionados, en función de la constante de Planck, la velocidad de la luz y la longitud de onda de la luz incidente y emitida [I.10].

$$\Delta E_{ij} = hf_{ij} = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{A.1})$$

La amplificación es posible si el número de átomos que abandonan el nivel superior es mayor que los que absorben energía en el nivel inferior. Los materiales más apropiados son aquellos en que los átomos del nivel energético superior tienen una vida más larga que los del nivel inferior, dichos materiales pueden ser gases, líquidos o sólidos [I.10].

Un sistema láser básico, ver figura A.1, consta de un *medio activo*, el cual corresponde al material que será sometido al proceso de estimulación, un *mecanismo de excitación o bombeo* que proporciona la fuente de energía externa para estimular al medio activo, la cual puede ser eléctrica u óptica. Finalmente una *retroalimentación óptica* a través de espejos, ya que la emisión espontánea es un proceso sin control y la luz emitida se propaga en direcciones arbitrarias [I.10].

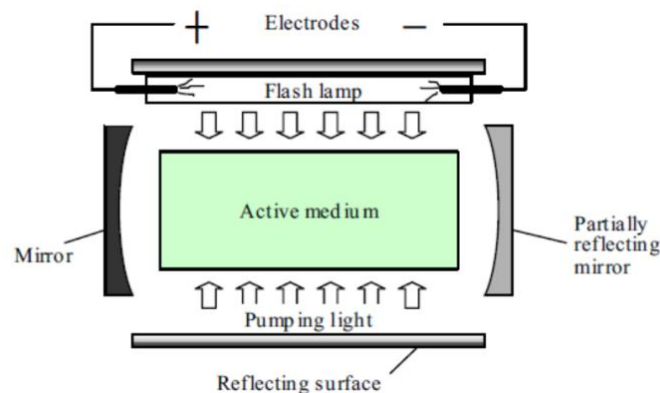


Figura A.1: Diagrama de un sistema láser básico. Fuente: [I.10]

El haz láser presenta características únicas para diferentes aplicaciones, entre las principales podemos mencionar la monocromaticidad, la direccionalidad y la coherencia.

Una *luz monocromática* significa que todos los fotones tienen la misma frecuencia, es decir la luz corresponde a una sola longitud de onda. Puede ser roja, amarilla, azul o infrarroja pero dentro de cada gama solo tiene una longitud de onda concreta y precisa.

El haz láser se propaga en línea recta con muy poca divergencia, es decir que presenta una excelente *direccionalidad*. Esto significa que la energía no se pierde durante la propagación y es fácil enfocarla en un área pequeña con una lente simple.

Una *radiación coherente* indica que todas sus ondas están en fase, es decir, que todas ellas presentan en el mismo momento sus crestas y sus valles, o dicho de otra manera, que la fase relativa de todos los fotones es la misma. Esta propiedad sólo se consigue cuando la radiación es monocromática. La consecuencia práctica de ser radiación coherente es la enorme potencia que puede desarrollar la onda láser en su impacto, produciendo considerables efectos térmicos o mecánicos.

El perfil espacial, ver figura A.2, define cómo la energía del láser se distribuye sobre la sección transversal del haz. El principal perfil es de la forma Gaussiana. Un haz Gaussiano presenta simetría axial y se representa por la ecuación (A.2).

$$I = I_0 e^{\frac{-2r^2}{w_0^2}} \quad (\text{A. 2})$$

Donde, I es la irradiancia (W/cm^2), I_0 es la irradiancia en el centro del haz, r es la coordenada radial, w_0 es el radio del haz cuando $I=I_0/e^2$ [I.10].

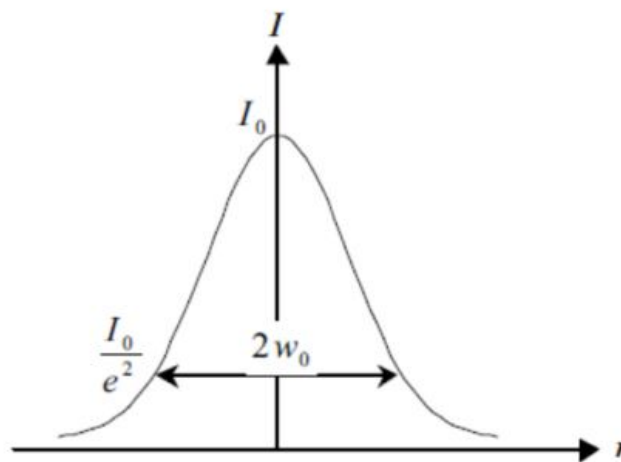


Figura A.2: Perfil espacial de un láser gaussiano. Fuente: [I.10]

Láser de semiconductor

El láser de semiconductor o diodo láser se obtiene de un material semiconductor que funciona como medio activo y es capaz de emitir luz coherente.

El principio de funcionamiento está basado en la teoría de semiconductores y básicamente consiste en una delgada capa de material semiconductor que contiene una unión p-n, en donde las regiones p y n están densamente dopadas. Como consecuencia se genera una región de agotamiento en la cual los electrones y los huecos colisionan para crear fotones de luz cuando el diodo está polarizado, debido a esto se genera un efecto láser. En dicha unión los pares electrón-hueco representan los estados. La región donde la inversión de portadores se desarrolla es una capa a lo largo de la unión, llamada capa de inversión o región activa, dentro del entorno de la región de agotamiento. Los extremos de esta región activa son altamente pulidos, o recubiertos con varias capas de reflexión para actuar como espejos, por lo que forma una cavidad óptica resonante. La estructura básica de un láser de semiconductor puede observarse en la figura A.3.

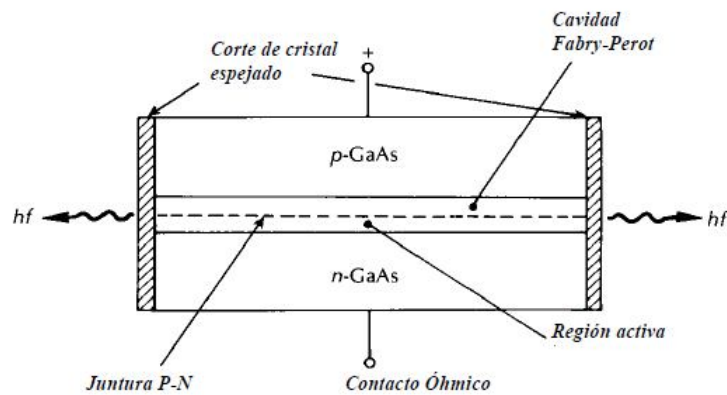


Figura A.3: Estructura básica de un láser semiconductor. Fuente: [1.11 p.14]

Existen diversos tipos de cavidades, los primeros diodos láser fueron hechos a base de Arseniuro de Galio (GaAs) y utilizaban la cavidad Fabry-Perot. Esta cavidad tiene una longitud igual a un múltiplo de λ con la finalidad de obtener una realimentación coherente. La longitud de la cavidad está relacionada de acuerdo a la expresión A.3.

$$L = \frac{q\lambda}{2} \quad (A.3)$$

Donde L es la longitud de la cavidad, q es un número entero relacionado con el número de modos resonantes y λ es la longitud de onda de los fotones emitidos.

La estructura básica antes mencionada de un diodo de unión p-n como laser semiconductor resulta demasiado ineficiente, por ello se han desarrollado

heteroestructuras que contienen varias capas de semiconductores de distintas composiciones, capaces de funcionar a temperatura ambiente en modo continuo. A continuación se presentan los principales tipos de láseres semiconductores.

- Láser de doble heteroestructura (Double Heterostructure Laser o *DH* Laser)
- Láser de estructura de pozo cuántico (Quantum Well Lasers)
- Láser de estructura de cascada cuántica (Quantum Cascade Lasers)
- Láser de realimentación distribuida (Distributed feedback lasers)
- Láser de cavidad externa (External-cavity diode lasers)
- Laser de emisión superficial (surface-emitting lasers o SEL)
 - Láser de emisión superficial con cavidad vertical (Vertical-cavity surface-emitting lasers VCSELs)
 - Láser de emisión superficial con cavidad vertical externa (Vertical external-cavity surface-emitting lasers o VECSELs)

Si se aumenta la intensidad de la corriente aplicada a la unión pn, se alcanza el umbral de corriente necesario para conseguir la inversión de portadores y por consecuencia la emisión estimulada. Si la condición requerida para la acción láser de inversión de portadores no existe, los fotones serán emitidos por emisión espontánea y aleatoriamente en todas las direcciones, siendo ésta la base de los LED's.

Uno de los problemas básicos de los diodos láser es el aumento del umbral de corriente con la temperatura, figura A.4, a medida que la corriente fluye por el diodo se genera calor. Si la disipación no es la adecuada, la temperatura aumenta, con lo que aumenta también el umbral de corriente.

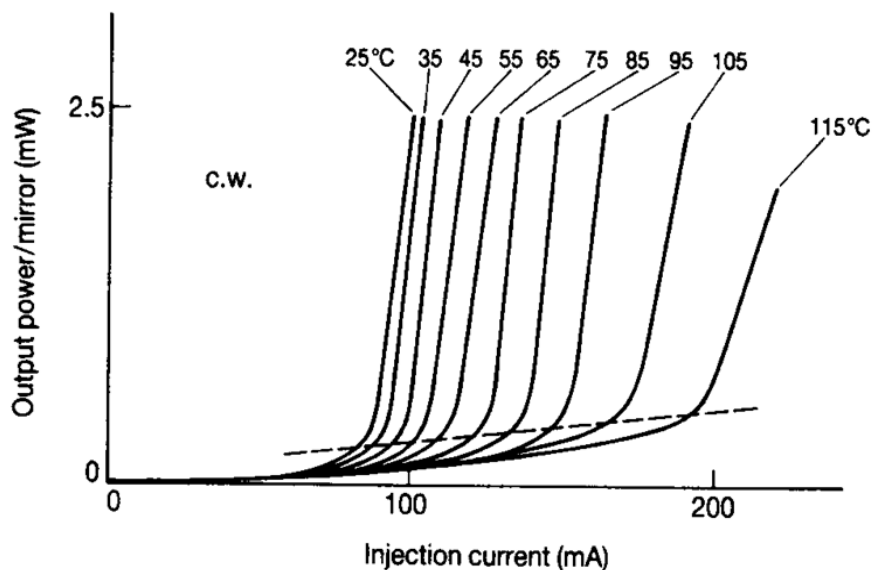


Figura A.4: Aumento del umbral de corriente eléctrica con la temperatura en un diodo láser.

Anexo B: El disco óptico

Los dos tipos de discos ópticos, CD (CD-ROM, CD-R, CD-RW) y DVD (DVD-ROM, DVD-R, DVD-RW, DVD+R, DVD+RW). En la actualidad los dos tipos de discos ópticos se graban con el mismo dispositivo comercial ya que parten del mismo principio [I.18]. Esto hace que dicha tecnología tenga diversas variaciones a lo largo de su evolución, entre ellas la composición física de los discos ópticos.

Se presenta en la tabla B.1 algunas características físicas de los dos discos ópticos más conocidos, es decir para CD y DVD [I.19, I.20]. La bibliografía no ofrece información abierta y suficiente para conocer el espesor de cada una de las capas de material que componen a los discos ópticos.

	CD	DVD
Diámetro del disco [mm]	120	120
Espesor del disco [mm]	1.2	1.2
Espesor del sustrato transparente [mm]	1.17	0.6
Índice de refracción del sustrato transparente	1.55	1.55
Espesor de la superficie reflectante [nm]	50-125	50-125
Capacidad de almacenamiento [GB]	0.65 o 0.7	4.7-17.0

Tabla B.1: Características de los formatos de discos ópticos CD y DVD

En esta sección nos limitaremos a hablar de la composición física de los discos CD-ROM (Compact Disc Read-only memory) y CD-R (Compact Disc-Recordable).

El CD-ROM, es una pieza moldeada por inyección de plástico transparente de policarbonato fabricada por estampado. Este plástico es moldeado con protuberancias microscópicas (“pits” y “lands” correspondientes a los datos) arregladas en forma de espiral, ver figura B.1b. Al sustrato transparente de policarbonato, se le añade una capa reflectante compuesta de aluminio, oro o aleación de plata, la cual se amolda a las protuberancias del molde de policarbonato, posteriormente se le añade una capa protectora de barniz o policarbonato utilizada como protector de la capa reflectante y opcionalmente una etiqueta en la parte superior [I.18-I.21].

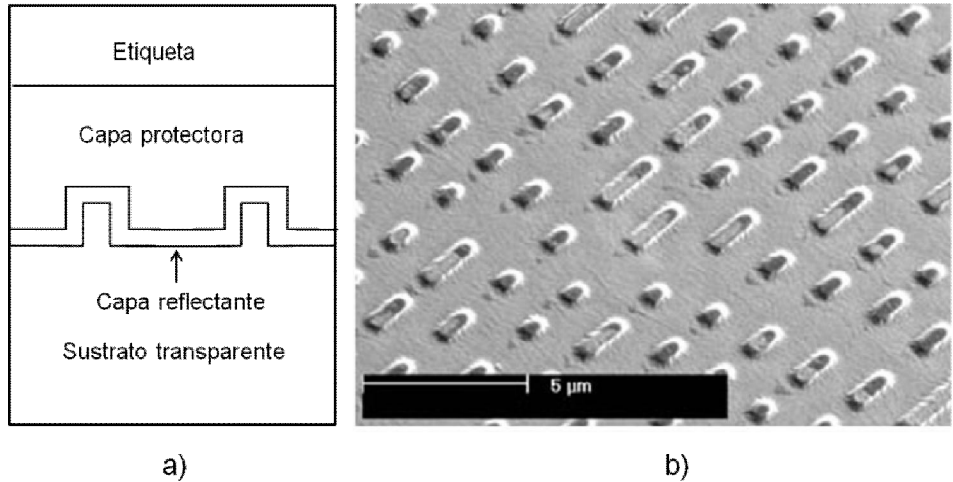


Figura B.5: Sustrato de CD-ROM. a) Composición por capas. b) Fotografía de los datos grabados en la capa reflectante, fuente [I.22].

En los discos grabables, CD-R, el sustrato de policarbonato está moldeado con una pista pre-ranurada (*pre-groove*) en forma de espiral continua que parte del centro del disco, ver figura B.2b, al cual añaden una capa de tinte orgánico diseñado para ser cambiado físicamente por el calor [I.18-I.21]. Luego, en la parte superior del tinte está recubierto de la capa reflectante. Por último, se agrega la capa protectora y la etiqueta, ver figura B.2a.

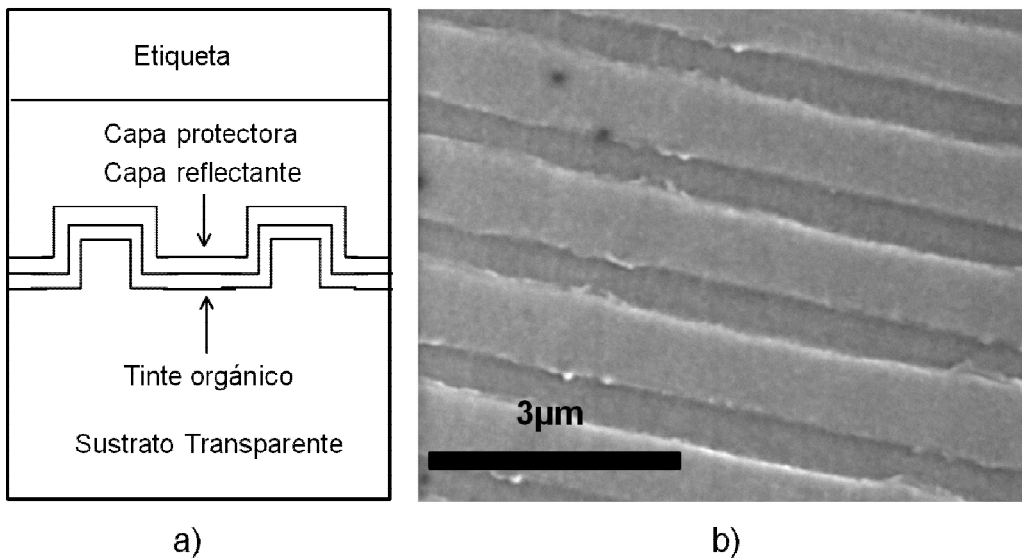


Figura B.6: Sustrato de CD-R. a) Composición por capas. b) Zoom de la pista pre-ranurada [I.23]

Anexo C: Diseño y desarrollo del software de control

Para controlar la plataforma, una interfaz de control ha sido desarrollada en *Visual Basic* vía *Excel*. Con ella se controlan efectivamente todos los bits del puerto paralelo, es decir los dos motores a pasos y la señal de encendido del diodo láser. Dicha interfaz se desarrolló en dos etapas, la primera de ellas tiene como objetivo la caracterización de un nuevo material y la segunda permite la realización rápida de prototipos por medio de la utilización directa de tablas de bits convertidas a partir de diagramas de diseño asistido por computadora (DAO).

La primera interfaz, figura C.1, únicamente envía las señales de control de los motores a pasos para que estos recorran una distancia específica proporcionada por el operador, en ambos sentidos y a velocidad controlada, es decir para avanzar o retroceder. Así también ofrece la opción de enviar la señal de encendido del diodo láser recordando que el tiempo de duración de encendido se determina externamente con el circuito monoestable.

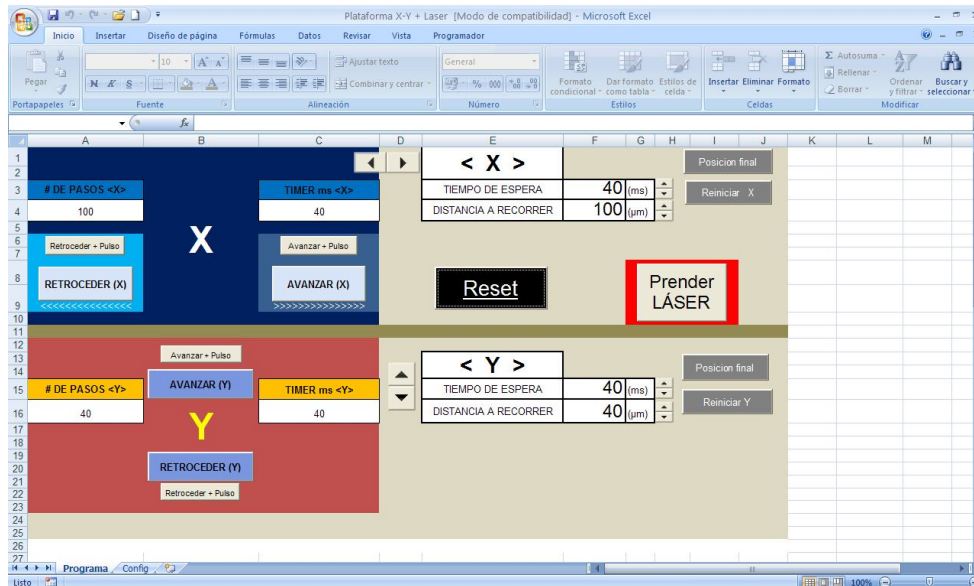


Figura C.7: Interfaz de caracterización con manejo manual.

La segunda interfaz desarrollada en el proyecto tiene el objetivo de automatizar el proceso a partir de imágenes o diseños específicos realizados en mapa de bits, figura C.2. Estos diseños o imágenes son cargados por medio de un archivo, al cual denominaremos archivo objeto, que contiene toda la información necesaria para la realización del grabado: coordenadas de los puntos a grabar en el plano y tamaño total del diseño (en número de píxeles).

Para imitar a un sistema CNC, un dibujo a la escala adecuada se tiene que desarrollar previamente bajo el formato de mapa de bits (*bitmap*) monocromático en el cual los patrones están dibujados en dos dimensiones. Luego, ese dibujo se convierte en una

tabla, de ceros y unos, escrita en el archivo objeto. La interfaz es la encargada de leer dicha tabla que contiene la información necesaria para realizar la grabación, ya que 0 quiere decir “no grabar” y 1 quiere decir “prender láser”.

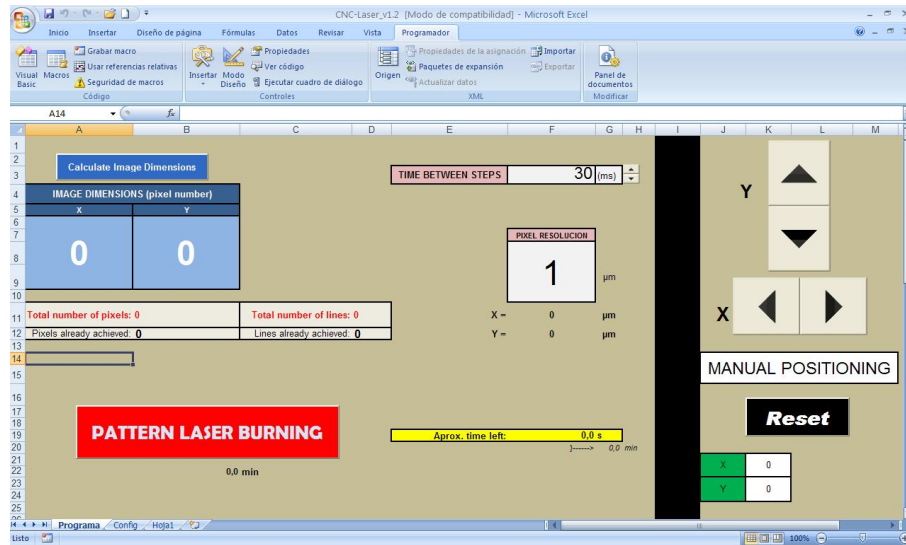


Figura C.8: Interfaz para la realización rápida de prototipos

Para convertir la imagen bitmap generada en blanco y negro, un programa sencillo ha sido desarrollado en *Matlab*. La figura C.3 da un ejemplo de un diseño sencillo de micro canales y su conversión en tabla de 0 y 1 abierta como hoja de cálculo con Excel. Una vez cargado el archivo objeto, el programa de CNC calcula el tiempo que va a tardar para informar el usuario y una vez colocado y enfocado el láser, el programa de CNC graba todo el diseño punto por punto.

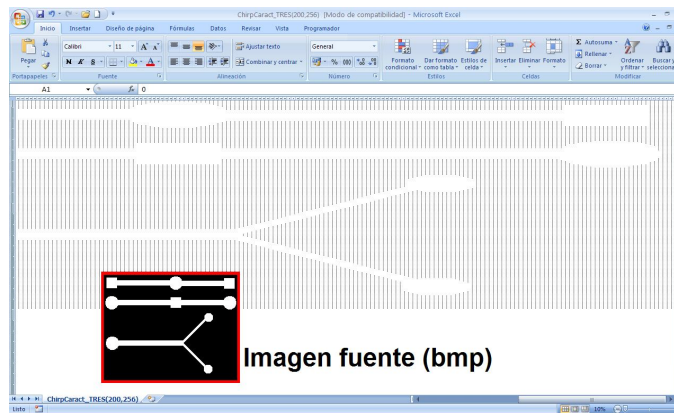


Figura C.9: Muestra de una imagen convertida en datos binarios.

Debe hacerse notar que este sistema corresponde a un prototipo funcional, el cual puede ser mejorado y modificado en distintos aspectos, pero para los objetivos del presente, cumple con los requerimientos.

Anexo D: Metodología para la obtención de la Señal de Error de Enfocamiento (FES) sobre cualquier muestra

1. Alejar la OPU de la superficie de la plataforma de posicionamiento XY, con la finalidad de que no interfiera o pueda resultar dañada la lente de la OPU.
2. Colocar la muestra sobre la plataforma de posicionamiento cuidando no tocar a la OPU e intentando centrar la muestra en la zona de interés.
3. Enfocar la unidad de visualización (sensor CCD) al nivel adecuado dentro del espesor de la muestra en cuestión, por medio del mecanismo de posicionamiento XYZ sobre el cual está montado el objetivo de microscopio.
4. Posicionar la muestra en la zona de interés mediante los motores micrométricos de la plataforma de posicionamiento XY del equipo.
5. Acercar la OPU lo más posible a la superficie de la muestra, cuidando no hacer contacto con ella.
6. Polarizar el arreglo de amplificadores operacionales para la obtención de la FES con la fuente bipolar de +12V y -12V y registrar la lectura inicial del voltímetro.
7. Fijar la intensidad de corriente eléctrica en un valor con el cual no se grabe la muestra bajo estudio. En caso de no conocer el valor de la intensidad de corriente mínima, establecer éste de manera temporal como 20mA. Tener cuidado en no sobrepasar el valor de corriente ya que podría grabar el material, en caso de no estar seguro de si el material ha sido grabado en éste paso, fijar el valor de corriente y re-posicionar la muestra a otra zona.
8. Encender el diodo láser.
9. Alinear la unidad de visualización con el haz láser, moviendo únicamente el posicionador XY de la unidad de visualización. Éste paso es únicamente si se encuentran desalineados.
10. Fijar la intensidad de corriente eléctrica en el valor óptimo para la obtención de la curva-S. Si no se conoce dicho valor, mantener como corriente inicial 20mA.
11. Realizar el barrido ascendente de la OPU estableciendo un avance no menor a $2\mu\text{m/s}$, para que la FES pueda ser procesada y visualizada en el voltímetro. Entre

cada paso, se sugiere registrar las lecturas de voltaje, medidas respecto a la tierra del sistema, en una hoja de cálculo.

12. Si la forma de la curva-S no es detectada en un intervalo igual o mayor al espesor de la muestra, regresar al paso 10 con una intensidad de corriente mayor, previamente regresando a la OPU lo más cercana a la superficie de la muestra. Se sugiere intervalos de 5mA.

Anexo E: Pruebas de concepto preliminares

En una primera etapa se realizaron pruebas de concepto para verificar que la idea y teoría en cuestión fuesen susceptibles a ser explotadas para cumplir nuestro objetivo, y así determinar las condiciones de operación y los requerimientos necesarios para llegar a una metodología que conduzca a la microfabricación de prototipos con el presente equipo.

Con base en el conocimiento adquirido respecto al funcionamiento y principio de operación de la OPU en condiciones de fábrica, condiciones óptimas de fábrica, se realizaron una serie de pruebas en las que se imitó el proceso de grabación comercial aprovechando las cualidades del prototipo planteado, para posteriormente extrapolar el experimento a condiciones diferentes.

La figura E.1(a) muestra grabados realizados por un sistema comercial, similar al utilizado en éste proyecto, en sus condiciones típicas de trabajo, es decir sobre la superficie de un CD-R, con el montaje de la OPU de fábrica y controlado por una computadora.

En la figura E.1 (b) se muestra una línea grabada con el prototipo de micrograbación planteado, sobre el mismo sustrato pero con la OPU montada sobre la plataforma desarrollada para el prototipo en cuestión. Dicha línea se grabó con el diodo rojo a una intensidad de corriente de 57.6mA y enfocado sobre la superficie reflectante. En ella se nota que el tamaño del grabado se encuentra en el mismo orden de magnitud que los obtenidos con el sistema comercial. Además se observan manchas oscuras y de mayor tamaño en los extremos de la línea, las cuales corresponden a los puntos donde se realizó el enfocamiento por medio de la curva-S. Cabe recalcar que en este tipo de sustratos existen dos niveles de enfocamiento en los cuales puede obtenerse la curva-S, el primero de ellos corresponde a la superficie externa de la capa protectora de policarbonato y el segundo a la superficie reflectante; el de interés corresponde a la segunda mencionada.

Las imágenes mostradas fueron obtenidas a partir de un interferómetro de luz blanca (ILB) que permite la medición de topografía de superficie, de espesor y de rugosidad (de marca *Polytec*), disponible en el laboratorio de caracterización del Centro UNAMems de la Facultad de Ingeniería.

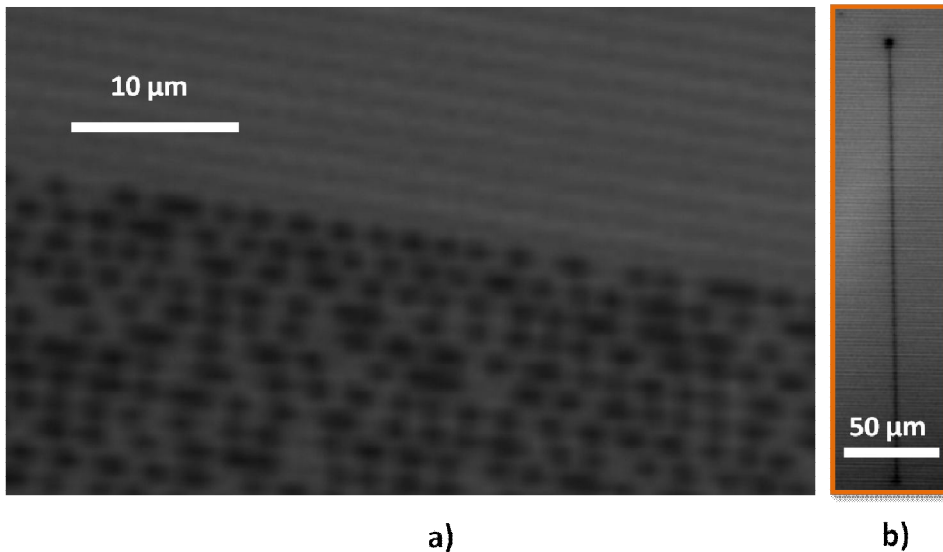


Figura E.10: Pruebas de concepto realizadas sobre un CD-R. a) Grabado realizado por un sistema comercial de grabación b) Grabado realizado con el prototipo de micrograbación, se muestra una línea con una longitud de 200 μ m y las extremidades más anchas (6 μ m) se deben al enfocamiento realizado con base en la curva-S.

Sin embargo, la superficie del CD-R no cumple con los requerimientos necesarios para ser usada como micromolde debido a que la capa metálica correspondiente a la superficie reflectante donde se realiza el grabado ya está previamente grabada (pre-groove) en relieve y en forma de espiral en todo el soporte.

Al principio del proyecto, se intentaron depositar películas delgadas metálicas de aluminio del mismo espesor (50-125nm para los CD y DVD) sobre vidrio, con el equipo de *sputtering* (chisporroteo en alto vacío) disponible en el centro UNAMems. Lamentablemente, aquellas resultaron ser del orden de 200nm de espesor y no se pudieron grabar con los diodos láser disponibles, ni aumentando la potencia del haz enfocado en la superficie del material. Parece necesario depositar películas más delgadas, posiblemente para que el calor generado por el haz enfocado para grabar el aluminio no se disipe tan fácilmente en el material. Hasta la fecha, el control de los depósitos de metal no ha permitido lograr fabricar películas homogéneas de aluminio con un espesor menor a 200nm.

Bibliografía

Capítulo 1

[I.1] Endika Gandarias. Arrasate; Mondragon Goi Eskola Politeknikoa, Mondragon Unibertsitatea (2007) MICROTECNOLOGÍAS: Pasado, Presente y Futuro, extracto de tesis doctoral "MICROM: a revolutionary monitoring system to detect tool breakages and collisions, enhance machine cycles and introduce a new probing concept in micromilling". http://www.micromanufacturing.net/didactico/didactico/didactico/Desarollo/microtechnologies_es.

[I.2] A. Hierlemann, O. Brand, C. Hagleitner, H. Baltes (2003) Microfabrication Techniques for Chemical/Biosensors. Proceedings of the IEEE 10.1109/JPROC.2003.813583.

[I.3] Rabih Zaouk, Benjamin Y. Park, and Marc J. Madou (2006) Introduction to Microfabrication Techniques. PubMed: 16508060.

[I.4] Babak Ziaiea,b, Antonio Baldia, Ming Leia, Yuandong Guc, Ronald A. Siegel (2003) Hard and soft micromachining for BioMEMS: review of techniques and examples of applications in microfluidics and drug delivery. Advanced Drug Delivery Reviews DOI:10.1016/j.addr.2003.09.001.

[I.5] MEMS Thin Film Deposition Processes (2011) <http://www.memsnet.org/mems/processes/deposition.html>.

[I.6] Madou, M. J. (2002) Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL.

[I.7] Kazuyoshi Itoga, Jun Kobayashi, Yukiko Tsuda, Masayuki Yamato, Teruo Okano (2007) Second-Generation Maskless Photolithography Device for Surface Micropatterning and Microfluidic Channel Fabrication. Analytical Chemistry DOI: 10.1021/ac702208d.

[I.8] Dong Qin, Younan Xia, George M Whitesides (2010) Soft lithography for micro and nanoscale patterning. Nature Protocols DOI:10.1038/nprot.2009.234.

[I.9] Dong Qin, Younan Xia, John A. Rogers, Rebecca J. Jackman, Xiao-Mei Zhao, George M. Whitesides (1998) Microfabrication, Microstructures and Microsystems. Topics in Current Chemistry DOI: 10.1007/3-540-69544-3_1.

[I.10] N. P. Mahalik- Sungho Jeong (2006) Micromanufacturing and Nanotechnology, Chapter 3: Laser Technology in Micromanufacturing, Springer.

[I.11] Hugo Mata Néstor (1999) Control de frecuencia en láser semiconductor, Cátedra de comunicaciones con Fibras Ópticas, Universidad Tecnológica Nacional.

[I.12] Tow C. Chong, Minghui H. Hong, Luping P. Shi (2009) Laser precision engineering: from microfabrication to nanoprocessing. Laser & Photonics DOI: 10.1002/lpor.200810057.

[I.13] Piscitelli Vincent, Fernández Alberto, González Jhanis; Russo Richard (2009) Influencia de la longitud de onda en la espectroscopia de plasma inducido por láser
Revista de la facultad de Ciencias básicas, Vol. 7 Núm. 1.

[I.14] A. G.-Coedo, M.T. Dorado (2010) Resolución espacial en la ablación láser acoplada a la espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo. Revista de Metalurgia DOI: 10.3989/revmetalm.0915.

[I.15] Koji Sugioka, Michel Meunier, Alberto Piqué (2010) Laser Precision Microfabrication, Springer series in materials science, Springer DOI 10.1007/978-3-642-10523-4.

[I.16] Wikipedia (2011) Laser Ablation. http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_ablation.

[I.17] Ming-Tsang Lee, Daeho Lee, Alexander Sherry, Costas P Grigoropoulos (2011) Rapid selective metal patterning on polydimethylsiloxane (PDMS) fabricated by capillarity-assisted laser direct write. IOPscience J. Micromech. Microeng DOI:10.1088/0960-1317/21/9/095018.

[I.18] Fred R. Byers (2003) Care and Handling of CDs and DVDs: A Guide for Librarians and Archivists Section 3: Disc Structure. <http://www.clir.org/pubs/reports/pub121/sec3.html>

[I.19] Marshall Brain(2011) How CD's work?
<http://electronics.howstuffworks.com/cd.htm/printable>.

[I.20] International Association of Sound and Audiovisual Archives (2011) Recordable CD and DVD Description. <http://www.iasa-web.org/tc04/recordable-cd-and-dvd-description>.

[I.21] Optical Storage Technology Association (2011) Understanding CD-R & CD-RW: Disc construction and manufacturing. <http://www.osta.org/technology/cdqa15.htm>.

[I.22] Maquinas y Música (2011) EL origen del CD. <http://www.maquinas-musica.com/soportes/cd.htm>.

[I.23] Oficina de Transparencia de Resultados de Investigación (2011) Experimentando con la ciencia: Difracción. <http://www.otri.uniovi.es/Experimentos/luzycolor/experimentos/E5.html>.

[I.24] Wikipedia (2011) CD-ROM. <http://en.wikipedia.org/wiki/CD-ROM>.

[I.25] Panasonic Corporation (2008) Laser Diode/Hologram Unit for Optical Disk. 6th Edition Pub. No.A00035FE.

[I.26] AMIR H. CHAGHAJERD (2008) Sensing and Control in Optical Drives: How to Read Data from a Clear Disc. IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE DOI: 10.1109/MCS.2008.920436 .

[I.27] Peter Fogh Odgaard (2004) Feature Based Control of Compact Disc Players. Ph.D. Thesis, Department of Control Engineering, Aalborg University, Denmark. ISBN 87-90664-19-1.

[I.28] B. Hnilicka, A. Vodaa, H.-J. Schröderb (2005) Modelling the characteristics of a photodetector in a DVD player. Sensors and Actuators A: Physical DOI:10.1016/j.sna.2005.02.008.

Capítulo 2

[II.1] LightScribe (2011) Descripción general de LightScribe <http://www.lightscribe.com/gslanding/es/>.

[II.2] Toshiba Corporation (2005) Product guide: Visible Laser Diodes Product Guide, BCE0026C.

[II.3] LG Electronics Inc. (2006) DVD RECORDER SERVICE MANUAL MODEL DR1F9H .

[II.4] Hoja de especificaciones del NE5543.

[II.5] Wikipedia (2011) Puerto paralelo, http://es.wikipedia.org/wiki/Puerto_paralelo.

[II.6] Hoja de especificaciones del ULN2803A.

[II.7] Hoja de especificaciones del circuito monoestable SN74121.

[II.8] Hoja de especificaciones del Atmel T0806.

[II.9] Hoja de especificaciones del MAX9483.

[II.10] M. Hautefeuille, J.G. Lopez Cortes, M.C. Ortega Alfaro, M.P. Carreon Castro, V.Velazquez (2011) Fabrication of a simple versatile micro-positioning setup for automated soft lithography. Review of Scientific Instruments DOI:10.1063/1.3659951.

Capítulo 3

[III.1] Programa para procesamiento de imagen *ImageJ*. <http://rsbweb.nih.gov/ij/index.html>.

[III.2] Hoja de especificaciones del tubo fotomultiplicador Hamamatsu R928.

Capítulo 4

[IV.1] Elisabeth Smela: Laboratory for microtechnologies (2011) Bench-Top MEMS. <http://www.smela.umd.edu/polymer-mems/benchttop.html>.