



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES



PLANTEL ARAGÓN

**MANUAL PARA EL DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE
FOTOLITOGRAFÍA DE BAJO COSTO PARA
APLICACIONES BIOMEMS**

MEMORIA DE DESEMPEÑO DE SERVICIO SOCIAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA

ARTURO VARGAS RAMÍREZ

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN: **M. EN C. E I. GERARDO**

GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

TUTOR DE SERVICIO SOCIAL: **DR. OSCAR PILLONI CHOREÑO**

Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, 2023



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.

Índice

Agradecimientos	1
1. Introducción: Fotolitografía para el desarrollo de sistemas microscópicos	2
2. Marco Teórico de la Fotolitografía y los BioMEMS	4
3. Fotolitografía de bajo costo para accesibilizar la Microfabricación	12
3.1. Arreglo Óptico y Fuente de Luz	14
3.1.1. Consideraciones generales.....	14
3.1.2. Fotolitografía Sin Máscara.....	15
3.1.3. Fotolitografía Láser	20
3.2. Arreglo mecánico	25
3.3. Estructura	33
3.4. Control	36
4. Metodología y resultados	40
4.1. Implementación	40
4.2. Costos/Comparación de mercado:	42
5. Conclusiones	57
Referencias	58
Bibliografía	59
Apéndices	I
Apéndice A: Descripción y características de los controladores de los drivers utilizados	I
Apéndice B: Tablas de especificaciones de los diferentes drivers	VI
Apéndice C: Tablas de especificaciones y gráficas velocidad - torque de los diferentes motores	VII
Apéndice D: Datasheets de las resinas, los catalizadores y los fotoiniciadores	IX
Apéndice E: Sistema óptico del proyector	XVI
Apéndice F: Construcción de lámpara LED como reemplazo de la lámpara de mercurio	XIX
Apéndice H: Sistema óptico láser	XXI

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, mi hermano y mi hermana, que con su amor me dieron todo lo que necesité para finalizar mis estudios. Su comprensión y afecto encaminaron a la persona que fui, para convertirse en la persona que soy.

Al Dr. Oscar Pilloni Choreño, quien fuera mi Tutor durante el desempeño del Programa de Servicio Social que dio como fruto al presente trabajo. Su guía y aportaciones fueron de incalculable valor para la realización de este, así como para mi instrucción como ingeniero. Su dedicación, la forma en que trabajó en conjunto con nuestro equipo dentro del Programa, me inspira y me genera una enorme admiración.

Al M. en C. e I. Gerardo González Hernández, a quien conocí primero como colega universitario, después como docente. Su entusiasmo por los biomateriales, y su gran habilidad didáctica, me llevaron a considerarlo como mi primera opción para fungir como Director de mi Trabajo de Titulación. Estoy completamente agradecido por su ayuda y su tiempo.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, siendo este la institución donde realicé el proyecto de Servicio Social que dio como resultado el presente trabajo.

A mis amigos y amigas, que no puedo nombrar en su totalidad dentro de un solo párrafo, pero por mencionar algunos nombres: Lucía, Nayeli, Franz, Melissa, Isaías, Diana, Oliver, Emilio, Daniel, Damián, y las bellas personas en aquel servidor de Discord en el que pasé gran parte de la Pandemia, pero nunca conocí en persona. Todos y todas ustedes me ayudaron en más formas de las que puedo contar. Están conmigo siempre, en mi corazón. Hay muchas personas que no me daría tiempo ni espacio nombrar, pero que igual ocupan un espacio importante en mi vida, así que a todas ellas les digo: "Ningún hombre es una isla".

A los y las docentes de la FES Aragón, así como de todas las demás instituciones e instancias educativas en las que me desempeñé antes y después, que cruzaron caminos conmigo, siendo yo su alumno. Mi respeto va para cada una de las personas que dieron de sí para que yo pueda ser un ingeniero. Tienen todas ellas mi más profundo agradecimiento.

Finalmente, quiero agradecer a la vida, por los momentos vividos que me han convertido en la persona que soy. Lo bueno y lo malo que he vivido me ha permitido crecer, buscar nuevos caminos, nuevos horizontes. Cuando las cosas son difíciles, me ayuda recordar que la experiencia me permite poner un pie delante del otro. No podría estar más agradecido.

Por la promesa de un mundo mejor.

1 Introducción: Fotolitografía para el desarrollo de sistemas microscópicos

Las micro y nanotecnologías son, en general, aquellos desarrollos tecnológicos que ocupan dimensiones en la escala de los micrómetros y los nanómetros. Estas abarcan un enorme rango de dispositivos y sistemas utilizados cada vez más en la medicina, la computación, los materiales, etc.; y parten casi siempre de la misma pregunta: “¿qué tan pequeño podemos construir un sistema?”. A eso sigue, inmediatamente, una pregunta más complicada: “¿Cómo vamos a construir un sistema así?”. Una de las respuestas a esa pregunta es la fotolitografía.

La fotolitografía es un método de microfabricación, que usa luz proyectada sobre una película delgada de material reactivo a la luz (conocido como “fotorresistor”), con el fin de obtener patrones con formas precisas a escala microscópica, de tal manera que se pueda remover con un solvente la parte del fotorresistor que no se necesite para el producto terminado (proceso conocido como “revelado”).

Aunque este tipo de tecnología halla su precedente en la fotografía (inventada en 1820 por Nicéphore Niépce), con la que tiene muchos paralelos, la fotolitografía como tal emergió en la década de 1950, como parte de la investigación de Jay W. Lathrop y James R. Nall, del Departamento de Defensa Estadounidense, para reducir el tamaño de los circuitos integrados, siendo patentada en junio de 1959, y obteniendo diseños con una resolución de 200 μm . Su método consistía en la creación de una “máscara” transparente con el diseño deseado dibujado en su superficie (reducido a la escala deseada fotográficamente), que luego se colocaría directamente sobre el fotorresistor. Dicho método tiene las desventajas de que el contacto de la máscara daña y contamina al fotorresistor, creando aberraciones y defectos al separarlos uno del otro; además de que, aunque permite una resolución muy alta, la máscara requiere tener exactamente el mismo tamaño que el diseño deseado, lo que dificulta la creación de diseños complejos o grandes. Sin embargo, representó un avance significativo para la fabricación de circuitos integrados.

Es digno de mención que en la fotolitografía técnicamente no ocurre una forma de litografía, donde se retiraría material para crear un diseño “maestro” que se aplicaría sobre otro material; sino más bien una forma de grabado (“etching”) donde el material no utilizado se retira para obtener un diseño completo. La razón por la que los investigadores que crearon este proceso lo nombraron así es porque consideraban que sonaba más llamativo e innovador.

El físico Richard Feynman, recipiente del Nobel de Física por sus contribuciones a la electrodinámica cuántica, es conocido por algunos como el Padre de la Nanotecnología porque, aunque no formó parte de la investigación micro y nanotecnológica durante su vida, fue una de las primeras personas que propusieron, de forma científica, la posibilidad de crear sistemas microscópicos con las mismas capacidades que una máquina macroscópica. Durante su conocida conferencia de diciembre de 1959 “There’s plenty of room at the bottom”

(“Hay mucho espacio al fondo”) [1], Feynman mismo propone, de forma independiente a Lathrop y Nall (y aparentemente desconociendo la patente que ellos ya habían registrado ese mismo año), el uso de un haz de luz reducido a la escala deseada mediante un microscopio, una descripción burda del concepto de la fotolitografía, con el único inconveniente de que no se le ocurría cómo hacer que la luz grabara los patrones deseados.

Desde entonces la tecnología a nivel microscópico no ha hecho sino avanzar, ya sea en los medios para desarrollarla, o los desarrollos mismos. Y uno de dichos desarrollos son los Sistemas Micro-ElectroMecánicos, o MEMS por sus siglas en inglés, que son máquinas microscópicas que integran elementos electrónicos y mecánicos. Estos sistemas tienen una gran cantidad de aplicaciones en escalas microscópicas previamente inaccesibles, como medición de variables, recolección de datos, o interacción con objetos microscópicos, entre otras.

La aplicación de este tipo de sistemas en la biomedicina es conocida como “BioMEMS”, e incluye los sistemas Laboratorio-En-Un-Chip, Órgano-En-Un-Chip, los biosensores, y diversos tipos de implantes (neurales, hormonales, cardiacos, etc.). Este tipo de sistemas fueron el enfoque principal en el diseño del presente trabajo. Los BioMEMS permiten nuevas formas de investigación biomédica, diagnóstico, y tratamiento: desde pruebas rápidas para la detección de patógenos, hasta modelos del comportamiento de tejidos vivos. Es por estos potenciales beneficios a la sociedad que es muy importante fomentar la investigación respecto a la manufactura de este tipo de sistemas.

El presente trabajo busca facilitar a futuros investigadores de microtecnologías la labor de diseñar y construir un dispositivo de microfabricación. El diseño propuesto se encuentra definido a grandes rasgos con el fin de permitir a quien busque construirlo tener un rango amplio de opciones a seleccionar, pero busca tener suficientes elementos definidos como para poder ser construido e implementado por un equipo multidisciplinario de ingenieros, diseñadores y programadores, con experiencia previa y conocimientos en la micro y nano manufactura, y con el apoyo y retroalimentación de individuos con experiencia en física, química y materiales.

2 Marco Teórico de la Fotolitografía y los BioMEMS

La fotolitografía implica el uso de una resina fotosensible conocida como “fotorresistor”, que reacciona de una manera específica a la luz debido a sus características químicas y ópticas, de tal forma que se solidifique en patrones predeterminados sobre un sustrato inerte (que usualmente es una oblea de sílice); posteriormente se hace uso de un solvente para remover las partes no deseadas del fotorresistor. Se habla de un fotorresistor positivo si la luz lo degrada, y de un fotorresistor negativo si la luz lo endurece. En cualquier caso, el fotorresistor se usa para grabar el patrón sobre la superficie deseada usando un haz de luz, de manera similar a una fotografía. Es, de hecho, de la fotografía de donde vienen estos términos: el “negativo” de una fotografía se obtiene usando un fotorresistor negativo.

El proceso de fotolitografía se divide en una serie de pasos, presentados en la figura 1 y enumerados a continuación, orientados a obtener la mejor calidad posible en el resultado final.

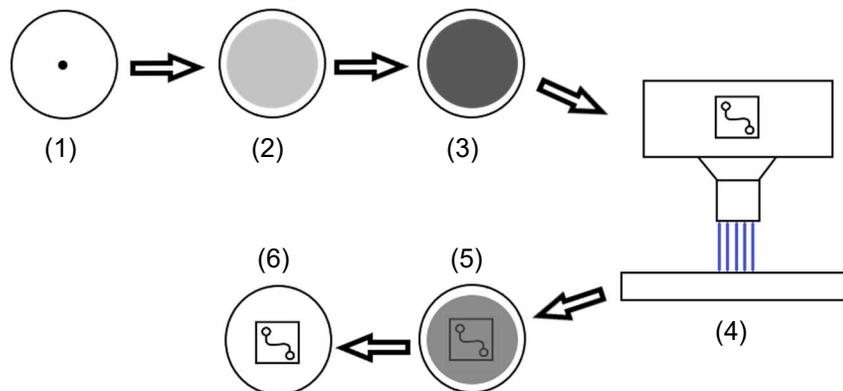


Figura 1: Pasos del proceso de fotolitografía

0. Limpieza del sustrato mediante tratamiento químico, calentamiento, y pulido.
1. Aplicación del fotorresistor sobre el sustrato. Se aplica una sola gota al centro de este, con la cantidad de resina estimada para cubrir su superficie.
2. Centrifugado (“Spin-coating”), con el propósito de esparcir uniformemente el fotorresistor.
3. Horneado pre-exposición, para remover solventes disueltos en el fotorresistor.
4. Exposición al haz de luz. Es en este punto que el patrón deseado es grabado en la superficie del sustrato.
5. Horneado post-exposición, para endurecer el patrón grabado en el sustrato.
6. Revelado mediante solventes químicos. Se retiran del sustrato los rastros sobrantes del fotorresistor, dejando el diseño terminado.

El proceso completo se realiza en un “cuarto limpio”, un área debidamente adecuada y sanitizada, con una esclusa de aire en la entrada, y con su propia

fuentes de ventilación con aire filtrado, de manera que no haya partículas contaminantes que puedan interferir en la creación del patrón deseado. Una sola mota de polvo puede tener un tamaño menor a un milímetro de diámetro, pero si llega a tener tan solo un micrómetro de diámetro puede arruinar por completo el producto final. Es por esto que todas las personas que trabajan en un laboratorio de microfabricación deben atenerse a protocolos de higiene estrictos, y usar equipo de seguridad como gafas, traje con capucha, guantes quirúrgicos, mocasines, y cubrebocas con alto filtrado de partículas (N95 o mayor). Hay por lo menos un diseño que elimina esta necesidad mediante el uso de una cámara de vacío personalizada, con una cara transparente, donde puede colocarse el sustrato bañado en el fotorresistor [2], sin embargo, esto complica de más el sistema debido a los elementos adicionales de los que hace uso, por lo que no se darán recomendaciones para esa clase de diseño, pero es digno de tener en consideración para diseños nuevos en circunstancias inusuales (por ejemplo, la ausencia de presupuesto para un cuarto limpio propiamente dicho).

También debe usarse iluminación especial con filtros UV (reconocible por su tonalidad amarillenta), de manera que se reduzca la posibilidad de que la resina fotorresistiva se esponga antes de tiempo. Esto quiere decir, además, que un cuarto limpio para microfabricación no debe tener ventanas.

Para que el fotorresistor reaccione a la luz, no puede simplemente asumirse que reacciona a cualquier frecuencia lumínica de la misma forma bajo cualquier circunstancia. Deben conocerse ciertas características técnicas principales:

- La Intensidad Lumínica o Irradiancia I (W/cm^2) producida por la fuente de luz usada, contrastada con la Dosis de Exposición F (J/cm^2) necesaria para hacer que una capa del fotorresistor con un grosor dado reaccione.
- La curva absorbancia-longitud de onda, que determina la longitud de onda λ (nm) óptima para que reaccione el fotorresistor a diferentes grosores, y permite decidir qué fuente de luz se usará.
- La viscosidad del fotorresistor, que sirve para controlar el grosor de la capa de fotorresistor sobre el sustrato, y que normalmente no se expresa como una constante de viscosidad, sino como una curva grosor-velocidad angular, con el propósito de facilitar la decisión de qué velocidad de centrifugado se usará para esparcir de forma homogénea al fotorresistor durante el spin-coating. El grosor de la capa de fotorresistor (expresado usualmente en micrones o en Ångstrom) es importante tanto para las dimensiones de la microestructura a fabricar, como para determinar la dosis de energía lumínica a utilizar.

Aunque el fabricante de un fotorresistor declare una longitud de onda recomendada, es importante considerar que un fotorresistor tiene la tendencia a reaccionar a cualquier longitud de onda que se le aproxime, y que de la misma forma es mediante la dosis lumínica que se cataliza el proceso de reacción del fotorresistor. Es por eso que se debe observar también la energía lumínica emitida por la fuente de luz.

La irradiancia de la fuente de luz, para empezar, va definida mediante la ecuación de Óptica de la Ley Inversa del Cuadrado, asumiendo que la luz se emite de la fuente en forma esférica y uniforme:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (\text{Ec. 1})$$

siendo I la irradiancia, P la potencia lumínica emitida por la fuente de luz, y r la distancia entre la fuente de luz y el punto deseado en el espacio. Esto aplica sobre cualquier haz de luz que sale de una fuente.

El arreglo óptico, después, intenta dar coherencia al haz de luz (es decir, hacer que los fotones se muevan paralelos unos a otros) y preservarla hasta que incida con la superficie deseada, con tal de que la imagen tenga la mayor nitidez posible.

La ecuación anterior nos permite tener una aproximación útil sobre la relación que existe entre r y la energía lumínica transmitida a la superficie sobre la que incide: entre más lejos se encuentre la superficie de la fuente de luz, recibirá una cantidad exponencialmente menor energía lumínica.

Sin embargo, el uso de diferentes lentes y espejos para dar coherencia al haz y modificar sus dimensiones, va a causar que existan diferentes relaciones. Por ejemplo, cualquier lente o espejo con curva de sección cónica, como un objetivo microscópico o un reflector parabólico, ocasionará que la energía lumínica se localice en un foco, donde incidirá con óptima resolución y con la mayor dosis posible. Los objetivos microscópicos son los que se utilizan para la miniaturización del haz de luz, por lo que es muy importante hallar la ubicación de ese punto focal. Esto es más sencillo hacerlo empíricamente ajustando la distancia entre la lente y el fotorresistor.

Por todo lo anterior, lo más importante es estimar la potencia que incidirá sobre el área deseada, y el tamaño de esa área, sin necesariamente considerar la distancia, de acuerdo con la siguiente ecuación

$$I = \frac{P}{A} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (\text{Ec. 2})$$

donde A es el área de exposición.

La potencia lumínica usualmente viene declarada por el fabricante en la hoja de datos de la fuente de luz, pero también es posible que sea declarada como una constante de eficiencia respecto al consumo de potencia eléctrica. Además, las fuentes de luz como lámparas de mercurio o lámparas LED vienen acompañadas por un reflector parabólico que busca concentrar toda la luz emitida en el arreglo óptico para asegurar pérdidas mínimas, mientras que las fuentes de luz láser buscan colimar toda la potencia lumínica dentro de un haz coherente. Debe entenderse que la luz abandona la fuente de iluminación conformando un cono (o más precisamente, un sector esférico) con un ángulo dado, y una altura (no necesariamente la distancia entre la fuente y la superficie donde incide).

Si se conoce el ángulo de salida de un haz de luz cónico, asignándole un valor de 2θ , puede estimarse la irradiancia que incide sobre la superficie deseada en términos de ángulo sólido, de la siguiente forma:

$$\Omega = 4\pi \sin^2 \frac{\theta}{2} \text{ [sr]} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \rightarrow A = \Omega r^2 \text{ [sr]} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$I = \frac{P}{4\pi r^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (\text{Ec. 5})$$

siendo Ω el ángulo sólido, cuya unidad son los estereorradianes (sr). Sin embargo, el ángulo θ puede ser tan pequeño como para que se cancele la mayor parte de la ecuación, ya que:

$$\Omega = 4\pi \sin^2 \frac{\theta}{2} = 2\pi (1 - \cos \theta) \text{ [sr]} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\text{Si } \cos \theta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2} \rightarrow \Omega = \pi\theta^2 \text{ [sr]} \quad (\text{Ec. 7})$$

siempre y cuando θ esté expresado en radianes (ya que el estereorradián es su unidad derivada). La ecuación anterior se asemeja a la ecuación de un círculo; se trata, entonces, del punto en el que es posible desprestigiar la curvatura de la esfera. El rango en que esto ocurre es alrededor de los 0.63 rad ($\sim 36^\circ$). Esto significa que, para la mayor parte de las aplicaciones que nos conciernen, esta última fórmula es la que nos sería útil. Sustituyendo:

$$I = \frac{P}{\pi r^2 \theta_{\text{rad}}^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (\text{Ec. 8})$$

El desglose anterior sirve para dar una idea de los requerimientos del sistema óptico. La ecuación final describe la manera general en que la luz incide sobre el arreglo óptico, sobre el modulador del haz, y sobre el objetivo microscópico. Sin embargo, la cantidad de luz proyectada al fotorresistor variará también debido al arreglo óptico que se utilice, así como al sistema de modulación óptica, pues al filtrar, colimar y modular la luz para que se proyecte en la forma deseada, inevitablemente habrá pérdidas. La totalidad de la potencia lumínica emitida por la fuente de luz no llegará al lente objetivo, pero la cantidad que logre llegar se concentrará en el área de impresión. Esto se explorará a profundidad en el capítulo siguiente.

Por otra parte, son de gran importancia la Resolución R, y la Profundidad de Enfoque DOF (por las siglas en inglés "Depth Of Focus"). Éstos van ligados directamente a la longitud de onda de la luz, y delimitan el tamaño de los diseños que podemos crear con el sistema desarrollado. Se encuentran definidos por las siguientes ecuaciones [3]:

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} [\mu\text{m}] \quad (\text{Ec. 9})$$

$$\text{DOF} = k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2} = \frac{k_2 R^2}{k_1^2 \lambda} [\mu\text{m}] \quad (\text{Ec. 10})$$

siendo R la resolución, DOF la profundidad de enfoque del haz, k_1 y k_2 son constantes adimensionales obtenidas experimentalmente que dependen del proceso y las características del fotorresistor (en muchos casos llegan a ser casi idénticas, rondando el 0.5), y NA es un número igual o menor a 1 que indica la apertura numérica de la lente que proyecta el haz, es decir, cuanta luz incide sobre la entrada del objetivo microscópico y puede atravesarlo.

La resolución es la medida de las dimensiones más pequeñas posibles de proyectar con nitidez usando el haz sobre la superficie del fotorresistor; mientras que la profundidad de enfoque indica la distancia entre el foco del haz y la superficie del fotorresistor, es decir, hasta qué profundidad penetra el haz de luz al fotorresistor, el desenfoque tolerable para mantenerse dentro de los parámetros de diseño. Ambas dimensiones nos dan una idea muy clara de cuál es la dimensión final posible de grabar en el material, y si observamos las ecuaciones anteriores logramos ver que, entre mayor es la longitud de onda, más grandes tienen que ser las dimensiones de nuestro producto final. Si, además, definimos el NA con la siguiente ecuación:

$$NA = n \sin\theta_{\text{max}} \quad (\text{Ec. 11})$$

siendo n el índice de refracción del aire (idealmente igual a 1), y θ_{max} el ángulo máximo de proyección del haz de luz. Si asumimos que la coherencia del haz de luz emitido por la fuente es ideal, entonces este ángulo es definido únicamente por la capacidad del objetivo microscópico de recibir luz (es decir, el diámetro de su entrada). Se presenta un diagrama en la figura 2.

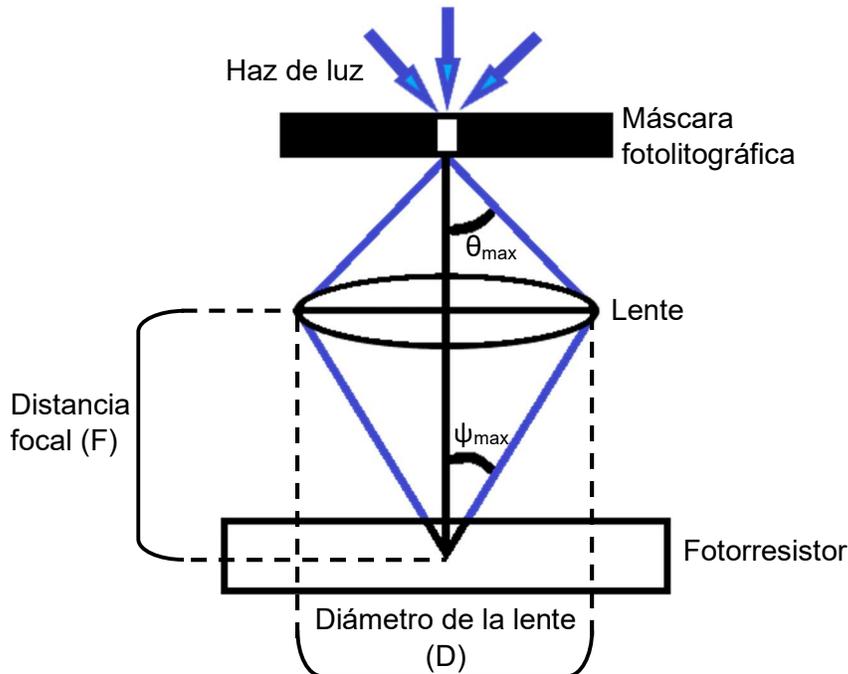


Figura 2: Diagrama de la trayectoria de la luz por el proyector.

La lente, por sus propias características ópticas, permite pasar a la luz proyectada por el modulador óptico, pero desvía su trayectoria hacia un nuevo punto focal, con un ángulo de incidencia ψ_{max} distinto al anterior. Este proceso de incidencia lumínica coincide tanto con la Ley del Inverso Cuadrado descrita al inicio, como con la necesidad de conocer la distancia focal de la lente: puede entenderse que sobre la lente incide un cono que a su vez desemboca en un casquete esférico de igual radio que su altura, y con un ángulo $2\theta_{max}$, que a su vez describe las pérdidas ópticas esperadas; y que la lente lo desvía y convierte en otro cono con un ángulo aún más pronunciado. Estudiar el comportamiento de estos ángulos de incidencia es de gran importancia, pero es necesario observar la relación entre la amplitud numérica y la distancia de enfoque:

$$F = \frac{f}{D} = \frac{1}{2NA} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$2NA \cdot f = D \quad (\text{Ec. 13})$$

Siendo F la constante efectiva de la lente, f la distancia de enfoque, y D el diámetro de la lente. Como puede observarse, el diámetro de la lente es directamente proporcional a la apertura numérica, y ya que una mayor apertura numérica puede traducirse en una mejor resolución, puede pensarse que tener una lente de mayor diámetro puede mejorar la resolución. El problema es que las propias características ópticas del objetivo microscópico pueden volver muy complicado crear un sistema con una mayor apertura numérica, puesto que requeriría de un diseño especializado, y produciría una profundidad de enfoque exponencialmente menor. Es por ello que el mecanismo requiere una tercera dimensión de control: se debe poder ajustar bajo comando la distancia entre el haz

y el fotorresistor, de manera que no sólo se enfoque correctamente, sino que el enfoque logre penetrar el material de la manera adecuada.

Por otra parte, la dosis de exposición E_0 requerida por el fotorresistor viene declarada en su respectiva hoja de datos por el fabricante, y su ecuación es la siguiente:

$$E_0 = \frac{E}{A} \left[\frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2} \right] \quad (\text{Ec. 14})$$

siendo E la energía lumínica. Las unidades se encuentran usualmente en milijoules sobre centímetro cuadrado, debido a la escala en la que se utilizan.

Si se observa las ecuaciones de la dosis y la irradiancia, puede notarse lo siguiente:

$$\frac{E_0}{I} = \frac{E \cdot A}{P \cdot A} = \frac{E \cdot t}{E} \left[\frac{\text{mJ} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}}{\text{mJ} \cdot \text{cm}^2} \right] \quad (\text{Ec. 15})$$

$$t = \frac{E_0}{I} \text{ [s]} \quad (\text{Ec. 16})$$

Lo que significa que, en base a la relación entre la dosis recomendada de exposición y la irradiancia producida nominalmente, puede conocerse el tiempo recomendado de exposición, lo que permite maximizar la eficiencia del sistema.

Es necesario observar que la luz va a incidir sobre el área de impresión designada sobre el fotorresistor con la misma irradiancia en todas las partes expuestas, excluyendo artefactos de proyección. Es posible que el tiempo recomendado no sea el ideal, por diversas circunstancias, como error de parte del proveedor del fotorresistor, o desconocimiento de las características precisas de la fuente de luz. Puede entonces usarse la siguiente ecuación equivalente para describir la relación anterior:

$$E_0 = \frac{P \cdot t}{A} = I \cdot t \left[\frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2} \right] \quad (\text{Ec. 17})$$

siendo t el tiempo de exposición. La ecuación anterior tiene la utilidad de que permite crear un estimado útil de la potencia incidente en el fotorresistor de forma inversa: aplicando un haz de luz sobre los fotorresistores deseados (de los que se conoce la dosis recomendada), con diferentes tiempos de exposición y diferentes grosores, sobre un área ya conocida, y observando los resultados de impresión obtenidos al microscopio. Aunque este método empírico tiene la desventaja de no ser capaz de producir un estimado preciso de la dosis utilizada, y de requerir el uso de materiales que de otro modo serían utilizados para la impresión en sí, tiene la ventaja de ser, en el momento, más económico que conseguir un medidor de potencia óptica, y proveer un estimado rápido y útil de las características de los materiales de bajo costo utilizados que podrían desconocerse, apto para las circunstancias de uso específicas del dispositivo desarrollado. La información obtenida sería útil para conocer el tiempo de reacción necesario para el propósito

deseado, y por ende, tanto el tiempo de fabricación como, en el caso de una fotolitografía láser, conocer las propiedades mecánicas y ópticas que el sistema requeriría.

Es útil saber también cuánta energía es capaz de transportar un fotón de luz de la frecuencia utilizada. De esta forma es posible hacer estimaciones sobre la cantidad de energía transmitida mediante fotones individuales, lo que permite hacer estimados de reacción molecular más precisos. Para tal efecto, existe la fórmula:

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot f \text{ [eV]} \quad (\text{Ec. 18})$$

siendo h la constante de Planck, c la velocidad de la luz, λ la longitud de onda, y f la frecuencia de la luz. Esta energía se representa usualmente en electronvoltios (eV). Al conocer la energía por fotón, podemos conocer la intensidad de la luz respecto a la cantidad de fotones emitidos por la fuente, lo que nos permite cuantificar la reacción química en el fotorresistor más fácilmente. El efecto de la luz ocurre en una reacción química fotón por fotón, molécula por molécula, y entre más corta sea la longitud de onda, más energía tiene cada fotón.

Asumiendo que tienen la misma irradiancia, una fuente de luz con longitud de onda muy corta puede hacer que el fotorresistor reaccione de forma desigual, puesto que hay menos fotones realizando la reacción, o incluso tener energía suficiente para atravesar al material, siendo entonces el material transparente a la radiación usada, y por lo tanto inerte a ella; mientras que una fuente de luz con longitud de onda muy grande puede “quemar” al fotorresistor, pues aunque los fotones no tienen cada uno la energía necesaria para ocasionar la reacción deseada, la gran cantidad de fotones puede provocar calentamiento, y reacciones adversas en el material conocidas como “sobrecocido”. Toda esta información nos sirve para estimar la cantidad de energía útil que incide sobre el fotorresistor, y al compararla con la curva de exposición dada por el fabricante del fotorresistor, conocer la eficiencia energética de nuestro sistema. En caso necesario, puede ayudarnos a decidir si se requiere añadir algún catalizador a la resina, o aplicar un tinte que refleje radiaciones no deseadas, así como la utilización de filtros o divisores de haz que eliminen dichas radiaciones.

3 Fotolitografía de bajo costo para accesibilizar la Microfabricación

Con las definiciones anteriores, queda claro entonces que tanto el mecanismo requerido para controlar dónde y cómo impacta el haz de luz UV requerido para hacer reaccionar al fotorresistor, el tamaño del haz de luz, así como el control electrónico de todos los elementos del sistema, deben ser de precisión microscópica. El haz de luz debe impactar en el fotorresistor en un área controlable, cercana a los micrómetros de precisión. De la misma forma, debe ser capaz de impactar en la mayor cantidad posible de reactivo al mismo tiempo, o con la mayor rapidez posible. Eso nos deja dos opciones:

- Un mecanismo que exponga al fotorresistor a un haz de luz conformado que proyecte la forma deseada de manera instantánea; conocido como **Fotolitografía sin Máscara**.
- Un mecanismo que exponga al fotorresistor a un haz de luz colimada (como un láser) que se posicione mediante control numérico, iluminando una por una, y de forma gradual, cada parte del diseño en el fotorresistor; conocido como **Fotolitografía Láser**.

Otras opciones de fotolitografía se vuelven prohibitivas respecto a costos, pues requieren, por ejemplo, de elementos externos difícil de producir (por ejemplo, la máscara utilizada en la Fotolitografía con Máscara); mientras que las mencionadas son sistemas robustos que han demostrado su funcionalidad y su versatilidad. Particularmente interesante es que un sistema de Fotolitografía sin Máscara diseñado mediante la ingeniería inversa de un proyector DMD disponible comercialmente ha demostrado permitir a aficionados desarrollar circuitos integrados complejos de forma independiente, con gran precisión y muy buena calidad [2]; y existe también la posibilidad de crear sistemas de fotolitografía láser amateur [4].

Otra ventaja es que los sistemas de posicionamiento para el haz en la Fotolitografía podrían considerarse similares a los de un sistema de impresión 3D, (ya sea por extrusión o por estereolitografía) y, además, a los utilizados para el posicionamiento de muestras microscópicas, respecto a estructura y materiales utilizados; dicho de otra forma, muchos mecanismos de posicionamiento de bajo costo con precisión microscópica se encuentran contruidos con materiales disponibles en el mercado aficionado, que normalmente se usarían en su mayor parte para construir impresoras 3D, lo que facilita reparaciones e incluso aumenta la robustez del sistema.

El control mecánico es otro tema importante. En la Fotolitografía sin Máscara, es imperativo que el haz de luz se encuentre correctamente posicionado y enfocado sobre la muestra fotorresistiva; mientras que, en la Fotolitografía Láser, es necesario que el láser siga trayectorias altamente precisas a nivel microscópico. Los sistemas mecánicos deben tener una respuesta rápida a una escala microscópica, con tal de posicionar la muestra fotorresistiva rápidamente. Este

problema encuentra solución en que, afortunadamente, una gran cantidad de motores a pasos (“Stepper”) disponibles en el mercado son compatibles con programación de microposicionamiento (“microstepping”), es decir, el posicionamiento del motor stepper en posiciones entre pasos, permitiendo posicionar el tornillo de potencia de manera que la muestra se mueva apenas unos micrómetros. La desventaja es que el posicionamiento será más propenso a error, debido a que no se usan los pasos completos del stepper, pero este error puede considerarse fácil de corregir. Si la precisión es finalmente una preocupación mayor, se puede introducir una reducción mecánica, por ejemplo mediante un tren de engranes, con la desventaja de que este tipo de configuraciones están sujetas a pérdidas mecánicas (“pushback”) considerables.

En resumen, el sistema completo puede definirse en base a los siguientes subsistemas:

- Arreglo óptico (incluyendo la fuente de luz).
- Arreglo mecánico
- Estructura
- Control

A continuación se expondrán las alternativas de bajo costo presentadas para cada uno de dichos subsistemas.

3.1 Arreglo Óptico y Fuente de Luz

3.1.1 Consideraciones generales

Las sustancias fotorresistivas usadas son el fotorresistor negativo SU-8 3035, cuyo rango principal de exposición es entre 350 y 400 nm (recomendado: 365 nm); y el fotorresistor positivo SC-1827, que tiene un rango principal de exposición entre 350 y 450 nm (recomendado: 436 nm).

En ambos casos, el material mayormente no reaccionará a un haz de luz o de partículas cargadas con potencias mayores a ese rango, lo que permite que se realice Espectroscopía Fotoeléctrica por Rayos X (XPS) o Microscopía de Haz de Electrones sin preocuparse de que arruine la muestra. Sin embargo, sí reaccionarán a la radiación electromagnética con longitud de onda mayor a los 450 nm (luz visible y rayos IR). Al verse expuestos a este tipo de radiación en dosis grandes, ambos fotorresistores sufrirán sobreexposición o “quemaduras”. Por esta razón, debe integrarse al arreglo óptico un tipo de elemento conocido como “filtro de longitud de onda” que elimine del haz la luz visible e infrarroja, ya sea reflejándola y dejando pasar la luz ultravioleta (“espejo caliente”) o reflejando sólo la luz ultravioleta (“espejo frío”).

El rango de las dosis requeridas en los fotorresistores deseados varía dependiendo del grosor del fotorresistor: El fotorresistor SU8-3035 se suele usar como películas de alrededor de 35 μm de grosor, por lo que el fabricante recomienda una dosis entre los 150 y los 250 mJ/cm^2 (150 - 250 $\text{mW}/\text{s} \cdot \text{cm}^2$). Mientras tanto, el fotorresistor SC-1827 se usa como películas con un grosor de alrededor de 27,000 Å (2.7 μm), pero al ser un fotorresistor positivo, lo más usual es que se considere la interferencia de su propio índice de refracción al reaccionar a la luz, debido a que dicha interferencia varía en una curva bastante compleja respecto al grosor de la capa de fotorresistor y la dosis aplicada, por lo que es normal que se definan los parámetros de Dill, parámetros óptimos para insertar en un modelo matemático específico [5]–[7] para modelar fotorresistores positivos. Sin embargo, tomar eso totalmente en cuenta se escapa de los fines del presente trabajo, que busca simplemente observar si es *factible* realizar un diseño que permita la fotolitografía en el presente fotorresistor. Es por ello que a la dosis del fotorresistor simplemente se le asignará el rango de valor entre 90-140 mJ/cm^2 , que son los valores máximo y mínimo de su curva de interferencia.

En ambos casos es necesario recordar que la película de resina puede ser de distinto grosor, dependiendo de la viscosidad del fotorresistor dada por el fabricante, así como la velocidad de centrifugado que se le aplique.

Con las definiciones anteriores, se observa que es el área final de contacto del fotorresistor con el haz la que nos indica si el fotorresistor está recibiendo la dosis adecuada o no. Para ello tenemos que conocer las fuentes de luz, y cómo interactúa cada una con los fotorresistores.

3.1.2 Fotolitografía Sin Máscara

En la Fotolitografía Sin Máscara, la fuente de luz ilumina al mismo tiempo toda el área de contacto del haz, y siempre se ilumina un área distinta en cada proceso de fotolitografía. La potencia de la fuente de luz no cambia, pero para calcularse la dosis, debe tomarse en cuenta el trayecto que la luz realiza en el sistema óptico entre la fuente de luz, y el modulador de haz. El arreglo óptico que requeriría un diseño como el mencionado es el mostrado en la figura 3.

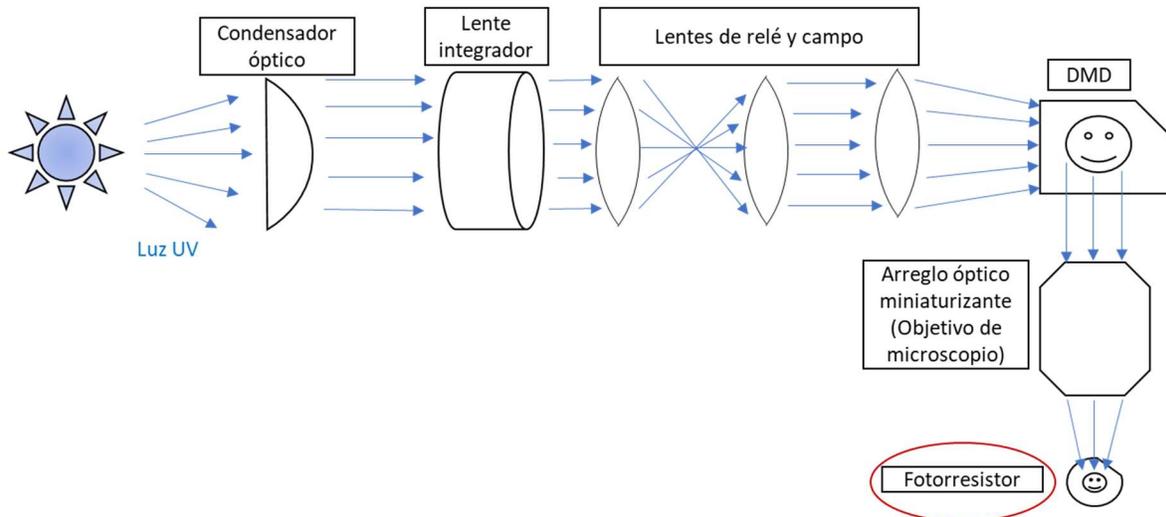


Figura 3: Diagrama del sistema óptico de la fotolitografía sin máscara

El condensador óptico reúne la luz producida por la fuente de luz, y permite que entre de forma casi íntegra al lente integrador, un lente cilíndrico que mantiene al haz de luz paralelo hasta llegar a los lentes de relé y campo, donde el haz adquiere mayor coherencia (es decir, sus rayos de luz son tratados para reducir artefactos y mantenerse paralelos unos a otros). La luz finalmente llega al modulador óptico (en el caso del diagrama un DMD), que procesa la luz y la conforma en el diseño deseado. Un DMD (Digital Mirror Device) refleja la luz en el patrón especificado, mientras que un modulador LCD (Liquid Crystal Display) obstruye el paso de la luz en áreas controladas.

Literatura [8]–[10] ya se ha escrito, y probado empíricamente por amateurs [11], sobre la aplicación de ingeniería inversa en proyectores de uso doméstico, para la modulación óptica de una máscara fotolitográfica digital, con resultados bastante satisfactorios. Esto permite que, mediante la modificación de un dispositivo disponible comercialmente al público general a un precio relativamente accesible, se pueda desarrollar un sistema capaz de producir una escritura fotolitográfica con un buen nivel de calidad.

La fuente de luz más fácil de obtener, al usar un proyector como la base del sistema, es una lámpara de vapor de mercurio, que emite luz ultravioleta en un amplio rango (con picos en los 365 nm, 404 nm, y 435 nm), lo que abre la posibilidad de usarlo con cualquiera de las dos resinas; sin embargo, produce una

cantidad importante de luz visible, roja e infrarroja, que debe ser filtrada; además, el sistema puede ser poco eficiente energéticamente, pues la mayor parte de la energía se disipa en forma de calor, y luz inutilizable.

Esto puede solucionarse al sustituir la fuente de luz mediante LEDs de alta potencia con una longitud de onda deseada (preferiblemente 365 nm, que funciona con ambos fotorresistores). Para eso, hay que reemplazar la lámpara de mercurio del proyector con un LED después de “engañar” al sistema del proyector puenteándolo para que asuma que tiene conectada la lámpara de arco, e instalándolo junto con un reflector (como aquellos que se encuentran en las linternas de mano), y un disipador de calor (con el fin de evitar sobrecalentamiento en el LED), configurando dichos elementos de manera que, fijos unos a otros, ocupen el espacio del módulo de la lámpara, y que el LED sea alimentado por una fuente de poder externa. Los detalles de este tipo de trabajos pueden hallarse en foros DIY y videos de entusiastas [12], [13]. La principal desventaja de un arreglo así es que el haz emitido podría ser muy débil si no se halla un led lo bastante potente (al menos en términos de irradiancia). Sin embargo, esta diferencia de potencia puede valer la pena al requerir el sistema menos energía eléctrica, reducir la potencia dedicada al enfriamiento, eliminar sistemas de filtrado de luz, y al poder dar sólo una frecuencia lumínica, disminuyendo el riesgo de sobrecocido. Esto es completamente opcional, pero vale la pena tenerlo para referencia futura.

Además de todo lo anterior, existe la dificultad de que el sistema estaría, por defecto, diseñado para funcionar adecuadamente en el rango de la luz visible, lo que puede ocasionar que al usarse en el rango de la luz UV ocurran en sus componentes desgaste acelerado, daño permanente, deformación, agrietamiento, cambio de color o de propiedades ópticas, o perjudicación en la realización de sus funciones, especialmente considerando que los moduladores ópticos que utilizan los proyectores son tecnología muy delicada y, por sí solos, pueden ser bastante costosos.

Relacionado con esto está el proceso de adaptación de un proyector como los mencionados, para su uso como dispositivos de fotolitografía. Dentro de un proyector comercial, hay una serie de elementos especializados que lo convierten en un dispositivo audiovisual.

Antes de entrar al sistema óptico, la luz emitida por la fuente atraviesa un filtro fluorescente (similar al recubrimiento interno de las lámparas fluorescentes) que refleja la mayor parte de la luz ultravioleta como luz blanca en el rango visible, con tal de prevenir daños a la visión de los usuarios. Este elemento debe ser reemplazado por un divisor de haz transparente a luz ultravioleta, elemento también conocido como “espejo caliente”, que impida la entrada de luz visible e infrarroja al sistema óptico, previniendo el sobrecocido del fotorresistor, mientras permite el paso de luz ultravioleta. En caso de usar una fuente de luz LED con una longitud de onda específica, no es necesario añadir el espejo caliente, pues la fuente de luz ya está limitada a emitir luz en un rango muy pequeño de longitud de onda.

Otro elemento del proyector es la ruleta de color, una ruleta giratoria con transparencias teñidas con los colores primarios, ubicada justo después del espejo caliente. Esta tiene la función de dividir el haz de luz blanca en colores primarios, que luego puedan recombinarse para dar lugar a una imagen colorida. Este elemento tiene su propio sistema de control, y es completamente inútil para nuestros propósitos, por lo que debe ser eliminado del sistema. Hay variación de fabricante a fabricante, pero es normal que el controlador de la ruleta de color genere una salida, mediante un encoder y un fotodiodo, que regresa al controlador principal del proyector para ajustar su movimiento, por lo que es necesario insertar un circuito que simule la salida del encoder de la ruleta, para “engañar” al controlador del proyector, e impedir que se desactive por lo que percibe como una falla en el sistema. La forma de hacer esto es simplemente introduciendo un circuito contador que entregue una salida similar a la salida digital de la velocidad rotacional de operación de la ruleta. Como esto podría variar de un fabricante a otro, debe realizarse este proceso “caso por caso”.

Una especificación más a considerar es el brillo nominal del proyector. Los proyectores con diseños compactos portátiles (aquellos diseñados para viajes) suelen tener brillos muy bajos, lo que reduce la cantidad de irradiancia producida. Dichos sistemas expresan la cantidad de luz que producen en lúmenes, que sirven únicamente, en nuestro caso, para ilustrar dicho cambio de potencia: un proyector compacto produce un brillo de alrededor de 1000 lm, mientras que proyectores de sobremesa diseñados para exposiciones o proyecciones pueden producir un brillo mayor a los 2000 lm, llegando a los 4000 lm o incluso a los 10,000 lm. Entre mayor sea la potencia lumínica producida, menor será el tiempo de impresión. Es importante observar que lo anterior sólo aplica para proyectores cuya fuente de luz es una lámpara de vapor de mercurio, ya que los proyectores con fuente de luz LED ocupan un sistema óptico que no es apto para nuestros fines, y expresan la cantidad de luz que producen con unidades distintas, como los lúmenes ANSI o los lúmenes LED.

Los moduladores DMD usados tradicionalmente en algunos sistemas de proyectores domésticos tienen un rango recomendado de longitud de onda entre los 420 nm y los 700 nm, lo que los vuelve aptos para el fotorresistor SC-1827. Sin embargo, dichos moduladores pueden, de cualquier manera, utilizar longitudes de onda menores, con la consecuencia de una menor vida útil. Por fortuna, asumiendo que el proyector DMD utilizado sea ampliamente disponible en el mercado, es altamente probable encontrar refacciones compatibles que permitan continuar utilizando el dispositivo de fotolitografía.

Otros sistemas de proyectores usan moduladores de luz LCD. Aunque dichos sistemas tienen usualmente una menor resolución, y menor nitidez de imagen, que los proyectores con DMD, tienen la ventaja de ser aún más económicos. Sistemas de fotolitografía que hacen uso de este tipo de proyectores se han usado ya en aplicaciones biomédicas [10], con una muy buena precisión; sin embargo, los patrones obtenidos en dicha experimentación no pasaban de la escala de los cientos de micrómetros, por lo que se encuentran ligeramente más limitados en sus aplicaciones. De cualquier manera, los patrones obtenidos fueron utilizados

para la creación de dispositivos microfluídicos de PDMS mediante litografía suave, lo cual es de enorme utilidad para los propósitos del presente trabajo.

Un reto más con el que no se contaba durante el desarrollo del presente manual, es que al ser los proyectores tecnología usada con fines audiovisuales, durante el proceso de adquisición es posible que se encuentren sometidos a trámites administrativos como material audiovisual, más que como material para la investigación, y que esperar para obtener aprobación de su adquisición para los fines especificados puede tomar tiempo del que no se dispone en la investigación.

Con todo lo anterior dicho, es necesario observar que es posible conseguir moduladores ópticos diseñados específicamente para micromanufactura y para investigación, pero su precio bruto y disponibilidad geográfica, podría volver prohibitiva la realización del proyecto.

Una ventaja importante respecto a la fotolitografía láser es que, debido al hecho de que toda la superficie del fotorresistor se expone al mismo tiempo al haz lumínico, no es necesario preocuparse por la estabilidad de la potencia del haz respecto al tiempo, siempre y cuando se mantenga una potencia promedio estable, y el haz emita una potencia por unidad de área (dosis) constante a lo largo de toda el área de exposición. Es posible estabilizar la dosis realizando ajustes en la programación del modulador óptico, pero la eficiencia de dichos ajustes depende de la naturaleza de la tecnología utilizada y debe someterse a pruebas experimentales.

Respecto a la miniaturización de la imagen, se recomienda usar un estereomicroscopio con puerto para cámaras como parte final del sistema óptico; para la entrada del haz de luz al microscopio, hay tres recomendaciones principales:

- Se puede remover todo el sistema óptico de amplificación presente en el proyector, y transmitir el haz directamente sobre el sistema óptico del microscopio; esto produciría una imagen demasiado grande que requeriría del uso de objetivos microscópicos complejos desde el principio, pero generaría una imagen nítida;
- Otra posibilidad es dar la vuelta al lente amplificador del proyector, de tal manera que quede invertido y por lo tanto reduzca la imagen para que entre al microscopio, con la ventaja de una imagen miniaturizada antes de entrar al sistema óptico, pero con una ligera (incluso insignificante) pérdida de potencia y nitidez ocasionada por la propia lente, además de tener un punto focal completamente fijo que puede volver difícil configurar el sistema entre iteraciones;
- Otra opción, para ofrecer un mejor control sobre la resolución, es instalar un sistema óptico adicional que controle, caso por caso, la distancia focal del sistema, ofreciendo un mejor control sobre la nitidez de la imagen, pero con mayores pérdidas ópticas, y la necesidad de una etapa mecánica adicional

La mejor opción, ante la necesidad de reducir costos, es simplemente invertir el lente amplificador, y hacer fijo el sistema óptico. Esto también trae la ventaja de

que reduce vibraciones en el sistema, por ende reduciendo la posibilidad de desprendimiento de partículas sobre el fotorresistor, o deformidades en el producto final. Sin embargo, un sistema óptico modular con su propio sistema de posicionamiento mecánico debe considerarse tan pronto como sea posible, pues una imagen nítida permite la creación de sistemas microscópicos (como BioMEMS o sistemas microfluídicos) de calidad considerablemente mayor.

El haz producido por el proyector es entonces proyectado en el puerto para cámaras del microscopio. De esta forma, el haz puede atravesar el sistema óptico del microscopio, sin necesitar aplicarle modificaciones mayores, y sin aberraciones considerables, permitiendo además instalar una cámara en uno de los visores, o supervisar el producto obtenido a simple vista. Es importante poder ver el producto obtenido durante el proceso de fotolitografía, pues esto permite observar cualquier posible fallo en el proceso antes de que sea demasiado tarde para realizar correcciones. Para poder hacer esto de forma segura, es necesario insertar filtros UV en la trayectoria del haz, que permitan observar el patrón como una proyección de luz visible inerte en la superficie reactiva sin desencadenar la reacción fotolitográfica, y al mismo tiempo que no dañen la visión del usuario.

Otra parte importante es el ángulo del proyector: Debido a que el proyector usualmente se coloca sobre una mesa u otra superficie a una altura cómoda para su uso, su sistema está inclinado de manera que toda la luz emitida tenga cierto ángulo (alrededor de 30°); es entonces necesario ajustar el proyector de tal forma que el haz sea perfectamente perpendicular al sistema óptico del microscopio. Esto puede lograrse construyendo un armazón metálico que sostenga el proyector en su lugar, en un ángulo que anule su ángulo original.

3.1.3 Fotolitografía Láser

Los láseres utilizados para la fotolitografía deben tener una potencia lumínica en el haz tal que sea afín a la dosis lumínica requerida por el fotorresistor. En el caso de la dosis emitida por un láser, idealmente sólo debe emitir una potencia específica, y producir un haz con un ancho dado, que luego se miniaturiza con un objetivo, por lo que el área de contacto no cambia, sino que se mueve.

En la industria es muy común que se usen láseres de gases nobles ionizados como el Láser Ar+, debido a la gran estabilidad y coherencia del haz de luz emitido. Sin embargo, este tipo de láseres tienen una muy baja eficiencia energética, ocasionando un gasto eléctrico considerable que en su mayor parte se desperdicia como calor. Además, tienen un tamaño considerable.

Un diodo láser de alta potencia tiene la ventaja de ocupar un espacio menor, y de tener una mayor eficiencia energética, no requiriendo tampoco un sistema de refrigeración especializado, aunque sí requiere de enfriamiento constante para evitar sobrecalentamiento en la pieza. La principal desventaja es que el haz es menos coherente que en el láser gaseoso, lo que lleva a que no sea recomendable usarlo en distancias muy largas; además, sufren de una considerable divergencia en el haz, pues este sale del diodo con una forma ovalada e irregular que reduce la calidad de la impresión considerablemente, cuando la forma ideal del haz sería un círculo. Esto sin mencionar que el haz, en ambos casos, se ve afectado por fluctuaciones en su potencia lumínica ocasionadas por factores como variaciones en la corriente eléctrica, cambios de temperatura en el gas iónico o en el semiconductor, y partículas presentes en el medio donde se realiza la escritura; todo esto puede impedir que el haz llegue a la superficie del fotorresistor con una potencia estable, ocasionando defectos en el resultado final en áreas específicas del área a desarrollar.

Por esta razón, es altamente recomendable construir un sistema óptico, de tal manera que se pueda revisar la potencia del haz en un momento dado, e inmediatamente corregirla de forma automática, en un sistema de lazo cerrado. En Lithography [14] se muestra la construcción de un arreglo típico para fotolitografía, presentado en la figura 4.

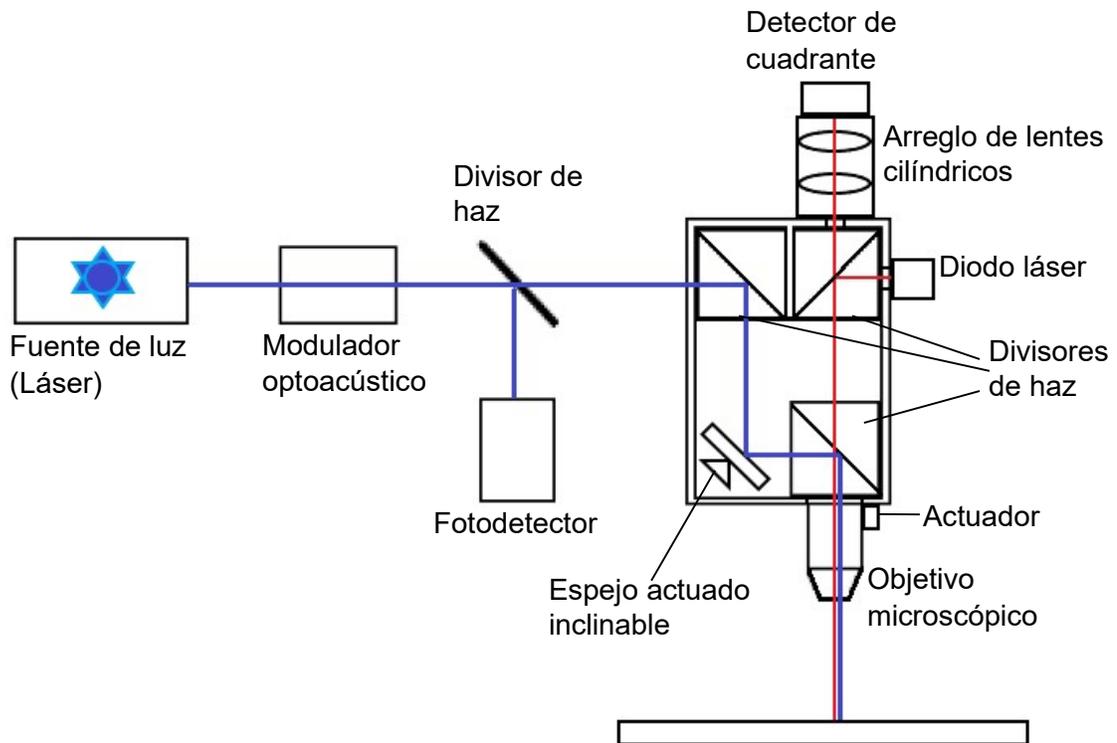


Figura 4: Arreglo de fotolitografía láser con mecanismo de enfoque automático del haz. Reproducido de Lithography (2010, Wang *et al*)

Dicho arreglo incluye un filtro de longitud de onda para impedir el paso de luz de frecuencias no deseadas, como rayos infrarrojos; una serie de divisores de haz con el propósito de poder observar en tiempo real, mediante un fotodetector, las fluctuaciones de potencia del haz; un modulador optoacústico con el fin de corregirlas inmediatamente en cuanto se producen; un espejo inclinable capaz de modificar la trayectoria del haz y reenfocarlo; un objetivo de microscopio (que contiene en su interior un sistema de lentes astigmáticas) para enfocar el haz en el lugar deseado; un actuador que reposiciona el objetivo para corregir el enfoque; y un detector de cuadrante que, en dupla con un láser de baja potencia con una longitud de onda fuera del rango reactivo del fotorresistor, permita realizar el ajuste automático de los lentes astigmáticos para enfocar el haz y maximizar la resolución. Este arreglo completo es conocido como “cabeza escritora” (“writing head”).

Aunque varios de los elementos mencionados se encuentran relativamente accesibles como productos para sistemas ópticos en el rango de la luz visible, podría hallarse un reto en encontrarlos, a precios accesibles, en variantes compatibles con luz UV o cercana a la misma. Debido a la carga energética de la luz en estas frecuencias, los productos ópticos convencionales, diseñados para la luz visible, podrían sufrir desgaste acelerado, daño permanente, deformación, agrietamiento, cambio de color o de propiedades ópticas, perjuicio en la realización de sus funciones, o podrían simplemente no ser útiles para el diseño de sistemas como el planteado. Esto, combinado con la especial demanda a la que se encuentran sujetos, puede incrementar significativamente sus precios. Es por esto que, dependiendo de las necesidades del diseño y de los recursos a los

que se tenga acceso, el diseñador de este tipo de sistemas debe tener especial cuidado sobre qué elementos se eligen como sus componentes.

Considerando lo anterior, Rothenbach y Gupta [15] proponen el uso de la cabeza óptica de un quemador de discos compactos Blu-Ray, como cabeza escritora en un dispositivo de fotolitografía, con excelentes resultados: una resolución de 450 nm en fotorresistor SU-8, perfecta para la creación de estructuras micrométricas. Una cabeza escritora de este tipo puede fácilmente encontrarse en un mercado de refacciones para DVD y Blu-Ray. La cabeza óptica del quemador de Blu-Ray fue elegida debido al hecho de que utiliza un láser en un rango de longitud de onda cercano al necesario para hacer reaccionar a la resina SU-8 (~400 nm) con una potencia de ~90 mJ/s. La potencia lumínica emitida por un arreglo de este tipo está sujeta a un estándar ya existente, necesario para poder escribir (coloquialmente “quemar”) sobre la superficie de un disco Blu-Ray, por lo que puede asumirse que en cualquier quemador de Blu-Ray funcional puede hallarse un arreglo útil.

Asumiendo que el haz conformado tiene un área de contacto circular con el fotorresistor, con un tamaño de punto (diámetro) de 480 nm, como el descrito en el diseño consultado, y despreciando pérdidas de potencia en el arreglo óptico, el arreglo propuesto tendría una irradiancia de hasta 497×10^8 mW/cm²; sin embargo, esta cantidad es considerablemente mayor a la obtenida experimentalmente tras cruzar la cabeza escritora, de 44×10^8 mW/cm². Incluso considerando las pérdidas, dicha potencia significaría que un segundo de exposición continua aplicaría una dosis mucho mayor a la deseada, por varios órdenes de magnitud. Aunque habría que comprobar los efectos de esto en la resina, el arreglo está diseñado para poder configurar la potencia lumínica emitida: una fuente de poder regula, de forma constante, el voltaje y la intensidad de corriente que atraviesan al diodo, y puede controlarse la salida de potencia mediante la intensidad de corriente eléctrica. En el caso del experimento documentado en el artículo citado, se usó un driver para diodos láser especializado; esto es útil para proteger al diodo y evitar que se dañe por un cambio de corriente. La razón por la que se usan drivers en los diodos láser es para evitar que un cambio en la resistencia del diodo lo dañe y deje inutilizado.

La principal desventaja es que la resina SU-8 requirió la adición de tres fotoiniciadores (HNU-470 0.2% + OPPI 2.5% + N DMMA 2% por unidad de masa del fotorresistor) para poder percibir la longitud de onda emitida; sin embargo, la resina SC-1827 es perfectamente capaz de reaccionar a dicha longitud de onda sin necesidad de aditivos.

El arreglo de una cabeza láser de ese tipo es similar al presentado en la figura 5.

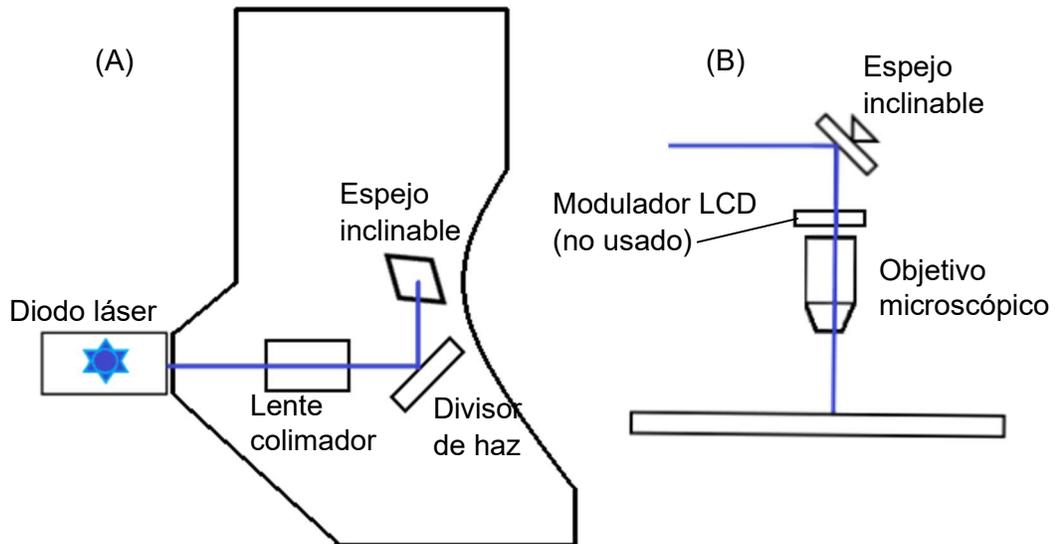


Figura 5: Arreglo óptico dentro de una cabeza escritora láser de quemador Blu-Ray. (A) Vista superior de la trayectoria del haz de luz hacia el espejo inclinable. (B) Vista lateral de la trayectoria del haz de luz hacia la superficie de escritura.

El sistema es relativamente simple, más aún debido al hecho de que hay una gran cantidad de elementos de los que no hace uso: aunque la cabeza escritora de un quemador de discos Blu-Ray tiene distintos elementos de corrección de haz, como una rejilla de difracción, fotodetectores, divisores de haz, y moduladores ópticos, estos no se consideraron necesarios para la misión principal de emitir un haz láser; sin embargo, reaprovecharlos puede resultar útil, aunque disminuiría drásticamente la potencia del haz generado (aún así, de acuerdo a los cálculos ya realizados, la irradiancia obtenida podría ser perfectamente útil para nuestros propósitos).

Es muy importante, además, recalcar que hay una enorme diferencia entre usar la cabeza láser de un quemador de discos Blu-Ray, y la de un lector de discos Blu-Ray. Esto es debido a que mientras el diodo láser del quemador tiene una potencia máxima de ~ 300 mW, el diodo del lector tiene una potencia de ~ 5 mW. De cualquier manera, si asumimos que las pérdidas de irradiancia son perfectamente proporcionales dentro del sistema óptico, un diodo láser con una salida neta de 5 mW produciría un haz que, al atravesar la cabeza escritora, tendría 0.44 mW de potencia, con una irradiancia de 2.45×10^8 mW/cm². Dicha irradiancia es también enorme, así que es necesario comprobar experimentalmente los efectos de esto en el fotorresistor, ya que puede ayudar a reducir costos de producción aún más, considerando que los lectores de Blu-Ray son considerablemente más económicos que los quemadores.

El arreglo ya presente en la cabeza escritora no requeriría un lente objetivo que miniaturice el haz, pues este ya viene integrado en el sistema óptico de la cabeza láser. Esta es una posible ventaja, pues podría reducir más aún los costos. Sin embargo, otra consideración importante es la incapacidad del sistema propuesto para proveer una imagen en tiempo real del diseño obtenido.

Debido a que no habría un microscopio en el sistema que funja como arreglo óptico miniaturizante, no existiría un sistema que permita observar el fotorresistor más allá de la simple vista.

Una alternativa podría ser integrar un microscopio al arreglo óptico y remover el objetivo microscópico preexistente del sistema, con la desventaja de que el sistema se volvería considerablemente más voluminoso, y podría haber dificultades a la hora de enfocar de nuevo el haz, además de que sería necesario remover el objetivo de forma muy cuidadosa para evitar dañarlo, y evitar dañar a otros componentes.

Otra opción es corroborar el correcto enfoque del sistema óptico, y la calidad de nuestro sistema de control, mediante el uso de un fotorresistor de prueba, de tal manera que podamos confiar en que el producto final será apropiado. Sin embargo, esta última opción padece de un consumo innecesario de recursos valiosos.

Es por esto que será necesario experimentar con un arreglo óptico que involucre un microscopio estereoscópico como el mencionado en la fotolitografía sin máscara.

3.2 Arreglo mecánico

El arreglo mecánico es prácticamente el mismo para cualquiera de los dos sistemas. Ambos requieren que el sustrato se mueva respecto a la fuente de luz, con el propósito de posicionar correctamente el fotorresistor debajo del haz de luz. Sin embargo, se debe mencionar que en el sistema de fotolitografía láser es necesario que la mesa mecánica que sostiene al sustrato se posicione rápidamente para permitir una impresión rápida y lo más libre de artefactos posible. Debido a la escala microscópica del sistema de fotolitografía, no habría mayor problema con que el sistema de posicionamiento se use de forma intercambiable entre ambos sistemas, siempre y cuando el sistema de control se fabrique con eso en consideración; aun así, sería conveniente tomar en cuenta cuál de los dos sistemas se está creando a la hora de seleccionar los materiales a utilizar: el sistema de fotolitografía sin máscara, al no necesitar de movimiento constante para realizar la impresión, puede permitirse utilizar elementos mecánicos con menor resistencia a los esfuerzos mecánicos, pues no se verían tan sometidos a éstos.

Otra consideración que es importante observar, es que la mesa que sostiene al sustrato es la que se mueve respecto al haz, y no al revés, tanto en la Fotolitografía Sin Máscara como en la Fotolitografía Láser. Esto es principalmente por conveniencia: la fuente de luz requiere de un posicionamiento muy preciso de sus elementos internos, que puede verse comprometido al someterse a movimientos o vibraciones considerables; además, requiere de un suministro constante de energía eléctrica mediante cables, que al verse sometidos a movimiento constante pueden sufrir daños. Otra razón es la necesidad de eliminar fuentes de contaminación: si la cabeza escritora o el arreglo óptico del dispositivo acumulara polvo en su superficie por cualquier motivo, al moverse ocasionaría que este caiga sobre el fotorresistor, ocasionando daños considerables a la impresión. Pero la razón más importante de todas es que el peso y el volumen de la fuente de luz, así como del arreglo óptico, en cualquiera de los dos sistemas son muy grandes en comparación con el sustrato y con la mesa que lo sostendría, por lo que requerirían considerablemente más potencia, además de un sistema mecánico aún más grande para desplazarse.

Con las consideraciones anteriores podemos diseñar un stage de bajo costo, similar a aquellos usados en la microscopía de precisión. El stage se trabajaría en tres dimensiones (X, Y, Z): los diseños fotolitográficos a nivel microscópico usualmente se imprimen en base a diseños bidimensionales, pero como se menciona en el marco teórico, es imperativo poder controlar no sólo el movimiento del sustrato en los ejes X y Y, sino además controlar la distancia entre la fuente de luz y el fotorresistor. Sin embargo, vale la pena mencionar que existen sistemas que permiten hacer ajustes focales del haz desde el arreglo óptico o la cabeza escritora. Existen además sistemas que realizan impresiones tridimensionales (microestereolitografía), el movimiento en el eje Z funcionando para depositar nuevas capas de resina [16]. El sistema que proponemos no está diseñado para fotolitografía tridimensional, pero la información mencionada es una buena

consideración en el caso de que se desee implementar en un futuro, debido a que hay precedente teórico.

El stage que usaremos para el desarrollo del presente trabajo se encuentra inspirado en el diseño “Openstage” de Campbell *et al* [17], y en el diseño de sistema de posicionamiento de bajo costo impreso en 3D propuesto por Schneidereit *et al* [18]. Openstage hace uso, por cada grado de libertad necesitado, de un eje de traslación lineal Newport con cabeza de calibrador micrométrico. Dentro de dicho eje de traslado existe un arreglo compuesto por un micrómetro lineal que introduce una barra extensible con un rodamiento en su extremo, con el fin de empujar directamente la mesa deslizante a la posición deseada, con un par de rieles cilíndricos que la guían, y a lo largo de éstos un par de resortes que oponen resistencia al movimiento de la barra extensible. Estos sistemas suelen comprarse ya contruidos.

Mientras tanto, Schneidereit *et al* proponen un sistema impreso en 3D, en el que cada eje lineal emplea un tornillo de potencia miniatura, con su respectiva tuerca, dispuesto entre dos o más barras guía cilíndricas, y la mesa se mueve mediante la tuerca del tornillo de potencia. Las piezas de este sistema se imprimen en 3D o se obtienen independientemente.

Se muestra ambos sistemas en la figura 6.

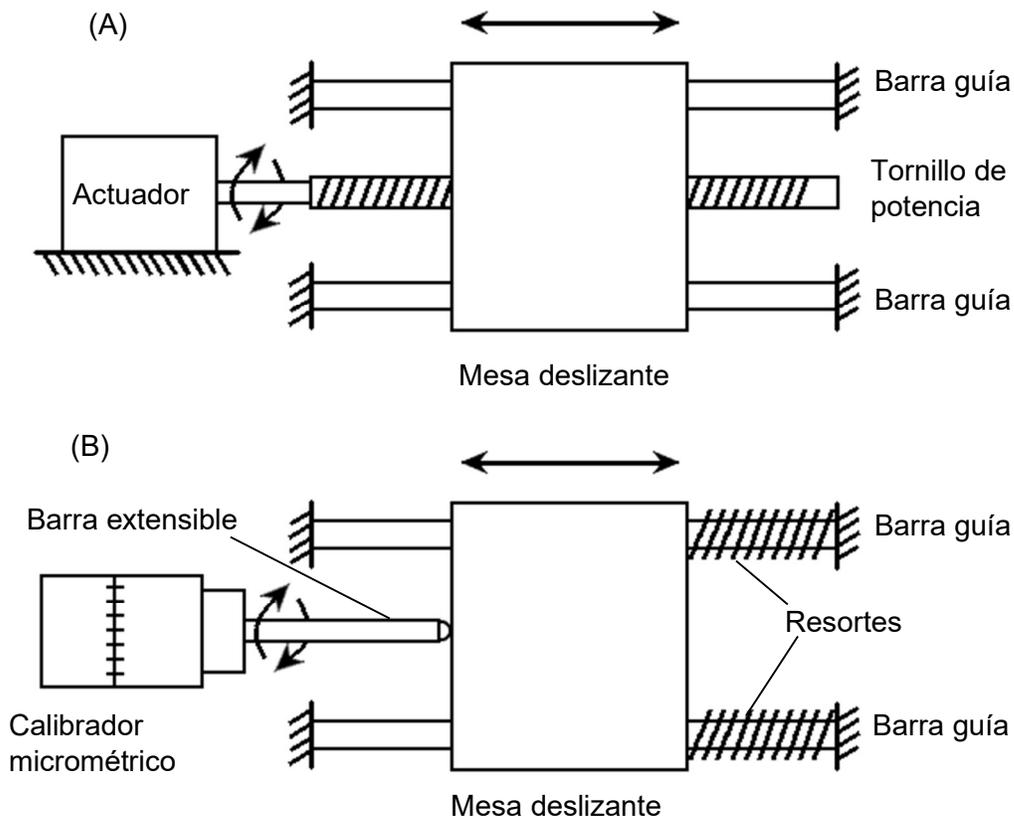


Figura 6: Diagrama de posibles diseños del eje de traslación lineal. (A) Diseño impreso en 3D de bajo costo. (B) Diseño Newport, usado en el sistema Openstage.

Aunque podría ser útil corroborar experimentalmente la variación entre el posicionamiento de un calibrador de alta precisión y un tornillo de potencia miniatura con su tuerca, se sabe que el tornillo de potencia miniatura produce un posicionamiento sorprendentemente preciso para ser un sistema con motores a pasos de 200 pasos que no hace uso de microstepping (con una repetibilidad de medición entre los 4 y los 6 μm). Por esto se admite que debe darse preferencia al tornillo de potencia para una mejor relación costo-beneficio. Puede mejorarse su precisión al usar tornillos de potencia con un paso más reducido, usar microstepping, y cerrar el lazo de posicionamiento.

El arreglo propuesto es similar al presente en la figura 7.

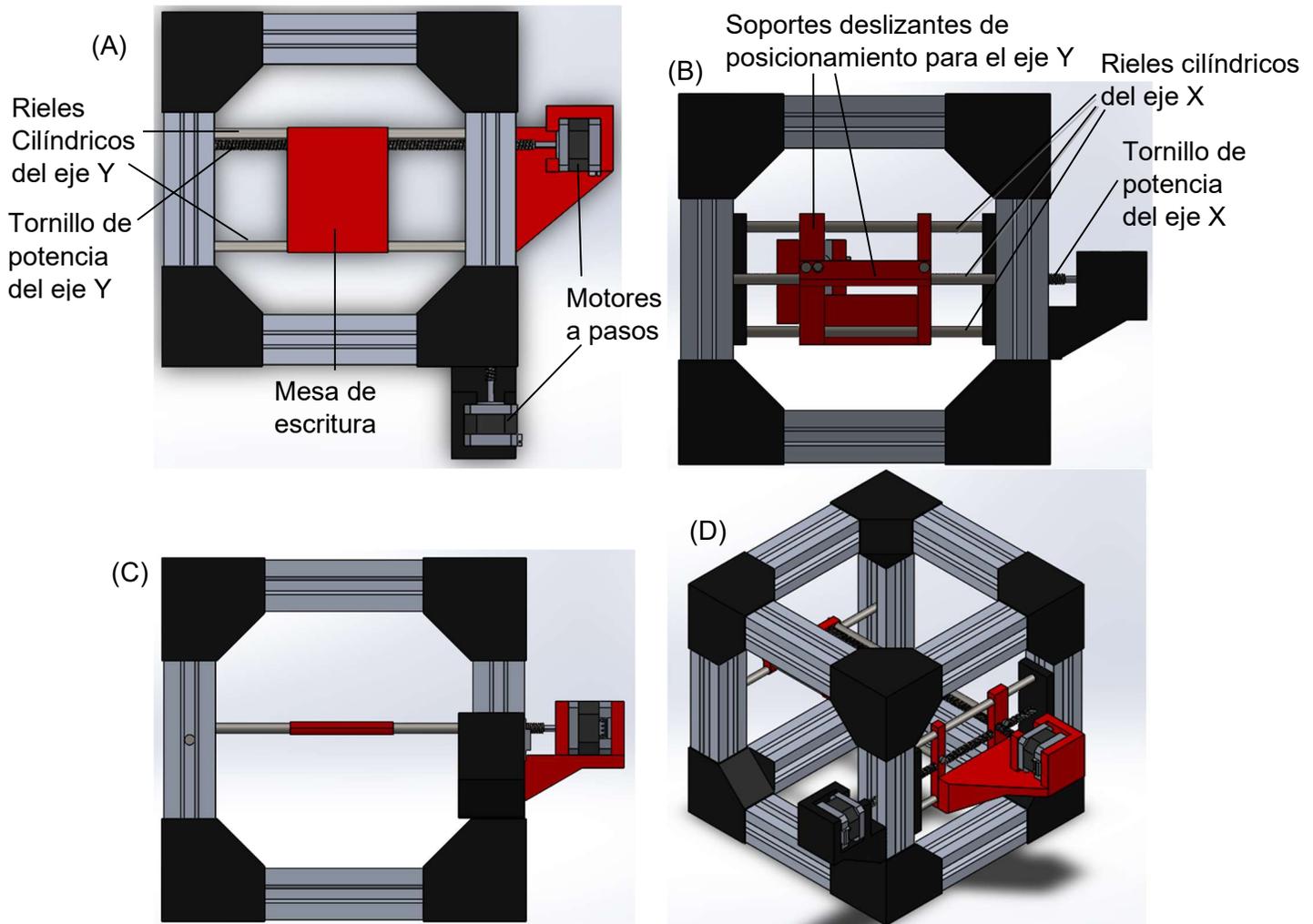


Figura 7: Diagrama ilustrativo del sistema de posicionamiento (No se encuentra a escala). (A) Vista superior. (B) Vista lateral. (C) Vista frontal. (D) Vista isométrica.

El sistema propuesto posee tres grados de libertad: dos motores deslizando la mesa en los ejes X y Y, que forman un plano paralelo al suelo, y un motor

deslizando la mesa de forma vertical, en el eje Z. En el diseño propuesto se siguen las recomendaciones de Schneiderei *et al*, y se hace uso de dos rieles cilíndricos de acero en cada eje, con rodamientos lineales, para asegurar que el movimiento ocurra con la mesa en una posición horizontal y con la menor cantidad de vibraciones posible. La figura presenta solamente los grados de libertad X y Y. El eje Z se tratará por separado más adelante. La figura se presenta únicamente con fines ilustrativos: no se encuentra diseñada en base a dimensiones especificadas, ni tiene todos los componentes que tendría el dispositivo final, o las formas exactas que estos tendrían. Esto es intencional, para dar una idea clara de donde va cada componente, y cuál es su función. Cada tornillo de potencia (las barras metálicas cilíndricas estriadas) se presenta conectado directamente al eje de su respectivo motor a pasos (en el caso de la ilustración, un NEMA 14), pero también debe ir acoplado a este mediante un adaptador; de la misma forma, los tornillos de potencia necesitan rodamientos rotacionales en cada extremo, para reducir la fricción durante la rotación, así como una tuerca en cada elemento con el que interactúan, pues este es el elemento con el que transmiten la potencia lineal. Esto es sin contar, por ejemplo, el acoplamiento de elementos de retroalimentación para el control, como encoders o calibradores micrométricos, además de elementos de transmisión como ejes flexibles o reducciones de engranes. La estructura está construida con perfiles de aluminio T Slot de 40 x 40 mm, acoplados mediante coples impresos en 3D, que permiten una construcción modular y fácil de reparar, pero al mismo tiempo firme y resiliente; además, tienen la ventaja de que se puede integrar elementos como correderas lineales que aprovechan sus ranuras como rieles, y facilita el atornillado de elementos adicionales, lo que puede mejorar la robustez del sistema. También es posible diseñar el sistema usando perfiles de aluminio V Slot de 20 x 20 mm para reducir el volumen de la estructura.

Es muy importante recalcar que la figura presentada no está a escala. Sus dimensiones se encuentran exageradas para mostrar claramente cada uno de sus componentes. En el sistema real, es posible que el rango de posicionamiento no supere los 50 mm, o incluso los 100 mm, lo que lo convertiría en un sistema de dimensiones demasiado reducidas para ilustrarse claramente. El sistema debe diseñarse en base a las necesidades que se busquen cubrir, así como del presupuesto y del equipo disponible.

Los motores a pasos que se utilizarán dependen de la aplicación y las necesidades del diseño. En la bibliografía consultada es común el uso de motores a pasos NEMA 8 y NEMA 14 de 200 pasos [18], [19]; sin embargo, el sistema Openstage descrito hace uso de los motores a pasos NEMA 17 de 400 pasos. Lo más importante es que sean capaces de realizar microstepping, y que al realizarlo, puedan producir una gran cantidad de pasos muy reducidos. El motor mencionado puede, por ejemplo, realizar alrededor de 6400 pasos mediante microstepping con un driver Sparkfun compatible. Hay incluso motores a pasos capaces de efectuar 32, 64, o hasta 256 micropasos (aunque entre más pequeño sea el micropaso, tiende a ser menos preciso el posicionamiento). Para seleccionar un driver, es necesario observar el voltaje y amperaje de trabajo del motor seleccionado.

Los motores en la bibliografía consultada suelen ser de corriente directa, aunque no se recomienda usar éstos durante periodos prolongados, por lo que se consideró implementar motores a pasos de corriente alterna en la fotolitografía láser. Sin embargo, éstos requieren de un control especializado, y además están diseñados para velocidades y torques mucho mayores a los requeridos, y a la salida que el propio sistema de control podría producir en todo caso.

Diversos modelos de motores a pasos actualmente disponibles en el mercado pueden programarse, mediante un driver, para realizar microstepping, es decir, avanzar una fracción microscópica de los pasos que normalmente realizan mediante un control electrónico preciso. Normalmente esto se realiza para suavizar el avance entre un paso y otro en movimientos macroscópicos, dando la impresión de un avance gradual sin vibraciones. Para nuestros propósitos, sin embargo, nos dan la posibilidad de un control preciso del posicionamiento del fotorresistor. Es importante elegir motores aptos para la aplicación en mente.

Los diseñadores de Openstage hacen una serie de recomendaciones para seleccionar un motor óptimo para la función utilizada. Primero que nada, debe compararse el paso completo del sistema de traslación lineal (la distancia recorrida en una revolución, o $\mu\text{m}/\text{rev}$) con el tamaño del avance del motor a pasos deseado, para lograr encontrar un balance entre el tamaño del paso del motor y la velocidad máxima. Se comienza obteniendo la distancia recorrida teórica, de la siguiente forma:

$$d_{\max} = \frac{P}{n} [\mu\text{m}] \quad (\text{Ec. 19})$$

$$d_{\min} = \frac{P}{n \cdot n_{\text{micro}}} [\mu\text{m}] \quad (\text{Ec. 20})$$

siendo d_{\max} la distancia lineal recorrida por un paso completo del motor a pasos, d_{\min} la distancia lineal recorrida por un micropaso, P el tamaño del paso completo del tornillo de potencia en μm , n el número de pasos completos por revolución del motor a pasos, y n_{micro} la cantidad de micropasos en las que puede dividirse cada paso completo.

La cantidad de pasos de un motor stepper se encuentra usualmente estandarizada, y lo normal es encontrar motores de 200, 400, 500, y 1000 pasos, aunque también es posible hallar cantidades distintas. La cantidad de micropasos depende del driver a utilizar.

Para obtener las velocidades lineales máxima y mínima, debe multiplicarse d_{\max} y d_{\min} por la frecuencia a la que se desea que opere el motor a pasos, de la forma:

$$v_{\max} = d_{\max} \cdot f \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \quad (\text{Ec. 21})$$

$$v_{\min} = d_{\min} \cdot f \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \quad (\text{Ec. 22})$$

siendo v_{\max} la velocidad lineal máxima, v_{\min} la velocidad lineal mínima, y f la frecuencia de trabajo del motor (4 kHz en el diseño Openstage, pero puede incrementarse mediante la optimización de la programación en el microcontrolador, y depende de las especificaciones del motor).

Como puede observarse, entre mayor sea la cantidad de pasos, menor será la velocidad lineal del posicionamiento. Esto crea la necesidad de negociar velocidad por precisión a la hora de seleccionar un motor a pasos, y de optimizar la programación de manera que la salida sea de la mayor frecuencia posible (los creadores de Openstage calculan que su programa puede optimizarse hasta obtener salidas de 30 kHz).

Una vez elegida la cantidad de pasos del motor stepper, debe observarse su curva de velocidad/torque (disponible en su datasheet), para lo que debe conocerse la velocidad angular máxima a utilizar, que se obtiene de la siguiente forma:

$$\omega = \frac{v_{\max}}{P} \left[\frac{\text{rev}}{\text{s}} \right] = \frac{360}{n} \cdot f \left[\frac{\text{deg}}{\text{s}} \right] \quad (\text{Ec. 23})$$

siendo ω la velocidad rotacional deseada. Al comparar valores en la curva, se debe observar que el torque producido sea, como mínimo, $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ al alcanzar la velocidad rotacional deseada. Esta consideración es con el propósito de eliminar pérdidas mecánicas internas en el motor.

Otras consideraciones a tomar son siempre operar dentro del rango recomendado de amperaje, torque, velocidad y aceleración angular del motor a pasos, así como corregir resonancias con un suavizador si se presentan, asegurando que la señal de control llegue correctamente al motor. Los motores seleccionados funcionan con un amperaje nominal de 1.5 A, pero se recomienda variar el amperaje empíricamente para reducir pérdidas mecánicas internas. Los motores suelen tener un voltaje nominal de entre 2.5 - 5 V, dependiendo de el torque de salida. Entre mayor sea la velocidad deseada, mayor debe ser el torque de salida nominal, y por ende mayor debe ser el voltaje de entrada. Esto es importante también a la hora de seleccionar un driver.

En el caso del diseño del dispositivo de fotolitografía láser, se recomienda favorecer la precisión, y por ende la mayor cantidad de pasos posible, para producir impresiones de alta resolución, pero la velocidad es de enorme importancia también, para reducir tiempos de escritura y evitar sobrecocido. Por esto, lo que se recomienda son modelos de motores a pasos que nos ofrezcan un buen punto medio, y un sistema de control altamente optimizado. Así mismo, las piezas deben ser capaces de soportar las vibraciones, por lo que se recomienda obtener piezas de un material resiliente: si sólo se busca hacer un prototipo rápido, piezas impresas en 3D a partir de PET o ABS pueden ser la solución, si bien temporal, debido a la resiliencia de estos materiales en comparación con otros plásticos para impresión 3D. Fabricar las piezas con un infill alto también puede ayudar a dar mayor resistencia.

En el caso de los dispositivos de fotolitografía sin máscara, no es necesario que el dispositivo sea particularmente veloz. El diseño de stage de este tipo de sistema

requeriría únicamente posicionarse en un punto fijo para aplicar el haz de luz en la superficie deseada, por lo que pueden elegirse materiales menos resistentes para el prototipado rápido (como PLA). Sin embargo, la selección del motor puede variar dependiendo de si se requiere un posicionamiento con alta repetibilidad (más pasos), o si sólo se busca posicionar el haz sobre el fotorresistor (menos pasos, mayor velocidad).

Las piezas para imprimir en 3D del diseño de Schneiderei *et al* se encuentran disponibles para descargarse de forma gratuita en los anexos de la versión web de su artículo [18] junto con un breve manual de ensamblaje. En caso necesario, pueden modificarse mediante el uso de software CAD.

En el sistema Openstage se usó como transmisión, en cada eje, calibradores micrométricos lineales, que a la vez hacían de elemento de retroalimentación, acoplados cada cual a un eje flexible. Este último se consideró necesario debido al movimiento realizado por el calibrador al girar, y por el desplazamiento de los ejes mecánicos, ya que los motores no están montados en la misma estructura que los tornillos guía, con el propósito de que el sistema de traslado no tenga que cargar con su peso para reducir el consumo de energía y el desgaste en el mecanismo; esto hace que la distancia entre motor y eje cambie constantemente.

Durante la experimentación, los diseñadores de Openstage comprobaron que los ejes flexibles, a pesar de sus pérdidas mecánicas inherentes, mantienen una repetibilidad muy deseable en el posicionamiento lineal (entre $0.1 \mu\text{m}$ y $1 \mu\text{m}$), con el potencial de mejorar mediante el uso de un sistema de control de lazo cerrado, por ejemplo, mediante el uso de encoders. Por lo tanto, se decidió hacer uso de ejes flexibles en la presente propuesta. Sin embargo, uno de los ejes de posicionamiento siempre se mantendrá fijo respecto al sistema de posicionamiento, por lo que es viable usar en él un eje de transmisión rígido o un acoplamiento directo en ese caso.

Otra consideración importante es el uso de reducciones de engranes planetarios con backlash cercano a cero. Éstos podrían ser útiles para posicionar los ejes con mayor precisión, y facilitar el control, con la desventaja de que incurrirían en una pequeña cantidad de pérdidas mecánicas, e incrementarían el costo del sistema de posicionamiento en cada eje.

Tanto los motores a pasos con sus drivers, como las reducciones de engranes, y los calibradores micrométricos, volverán a tratarse en mayor detalle en el apartado de Control.

Para acoplar el tornillo de potencia al eje flexible, y este al eje del motor, deben maquinarse coples personalizados basados en las medidas de cada elemento. El tornillo debe quedar sujeto firmemente al cuerpo del sistema, de manera que el eje en su interior gire respecto a él.

Como se mencionó antes, los sistemas de traslación lineal Newport se venden completos, con precios bastante considerables de 323 USD (~6460 MXN) por eje, pero fabricarlos a partir del diseño de Schneiderei *et al* podría ayudar a reducir

costos, dado que el sistema de posicionamiento completo (dos ejes, incluyendo motores) les costó ~250 EUR (~5000 MXN).

Respecto al eje de movimiento Z (perpendicular al plano de escritura representado por el fotorresistor), es complicado intentar colocar un tercer grado de libertad exactamente igual al descrito por el sistema Openstage, puesto que está diseñado para mover un objetivo de microscopio de forma independiente para enfocar una imagen, mientras que el presente diseño busca hacer uso de un microscopio para poder derivar una imagen visible, lo que dificulta mucho mover de manera totalmente independiente el objetivo. De la misma forma, es impráctico trasladar el sistema de la cabeza impresora por completo, pues contiene sistemas ópticos que pueden desacomodarse al haber vibraciones mecánicas, además de que requeriría una gran cantidad de potencia para tal efecto, por apenas unos micrómetros de movimiento.

Sin embargo, otra opción consiste en colocar una pequeña etapa lineal accionada por un tercer stepper, justo en el deslizante donde descansa el sustrato. La propuesta es la siguiente: colocar un mecanismo de tijera (o pantógrafo) de cada lado del deslizante, de manera que eleve el fotorresistor o lo baje, según cambie la distancia entre los extremos inferiores del mecanismo, como se muestra en la figura 8.

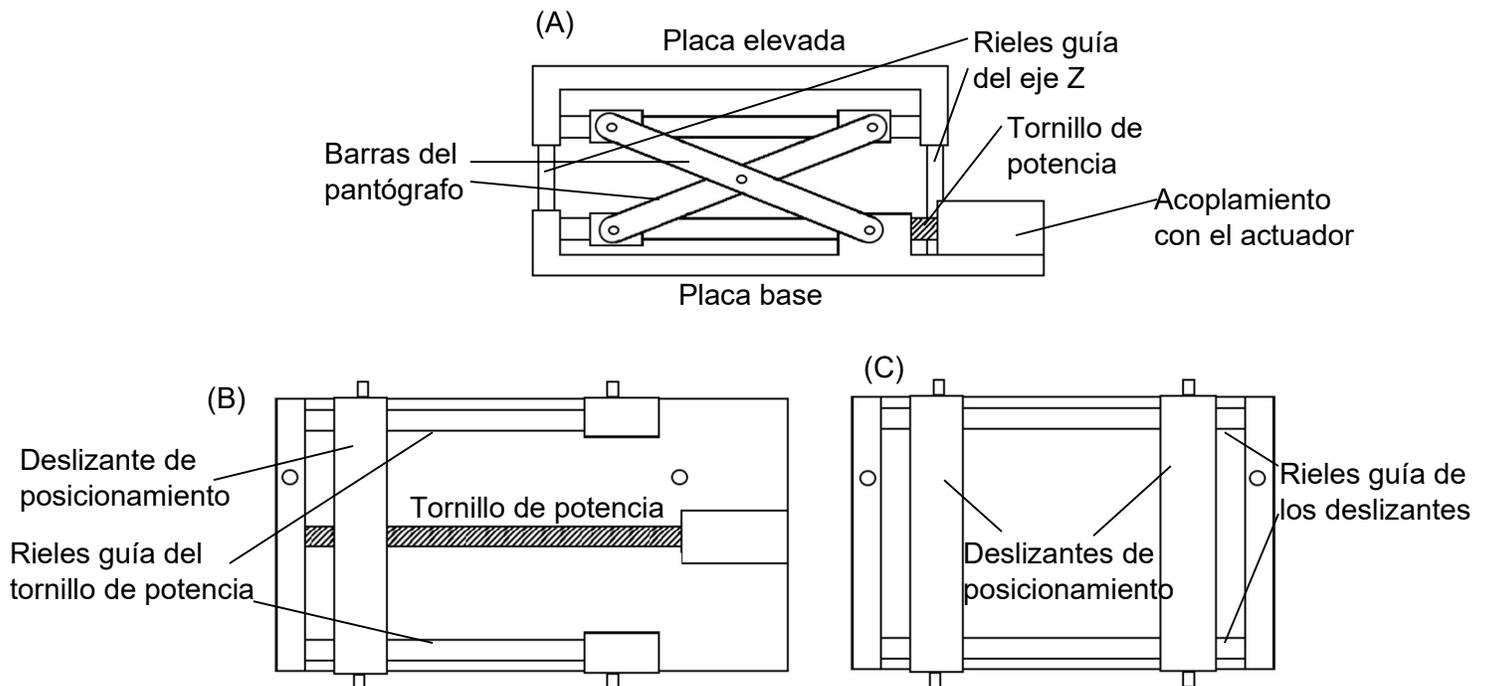


Figura 8: Propuesta de sistema de posicionamiento para el eje Z mediante pantógrafos. (A) Vista lateral, mostrando los pantógrafos y los rieles guía del eje Z. (B) Vista superior de la placa base, mostrando el tornillo de potencia y sus rieles guía. (C) Vista inferior de la placa elevada, mostrando los deslizantes de los pantógrafos y sus rieles guía.

Dicha propuesta de diseño intenta aprovechar al máximo las capacidades presentadas por el sistema Openstage, en un espacio menor, con el fin de tener

un control completo sobre la distancia focal del haz. Dicha propuesta difiere de otras presentes en este manual, en que no ha sido puesta a prueba su robustez en artículos académicos arbitrados, experimentación, o en literatura previa, de la que nosotros sepamos. Sin embargo, está basado en mecanismos simples cuyo funcionamiento se conoce, por lo tanto se cree que puede representar un desarrollo útil y fácil de implementar, aunque se alienta al lector a desarrollar algo por cuenta propia.

Para la sujeción del sustrato, el problema más grande es no contaminarlo. Si la oblea de silicio es tocada por materiales porosos y quebradizos, electrónicamente cargados, o con impurezas químicas, como objetos impresos en 3D, papel, madera, o metal, puede resultar gravemente contaminado, y la impresión puede arruinarse antes de ocurrir. Es por ello que se usan dispositivos de sujeción especializados para estas aplicaciones. Sin embargo, para reducir costos, y tomando en cuenta la aplicación que se dará a los diseños impresos, podría considerarse la posibilidad de experimentar con métodos alternos de sujeción, como pueden ser ventosas, pegamentos inertes, pinzas de presión modificadas, pinzas con resorte de bajo costo debidamente aseadas, sujetadores atornillables, etc. Es importante ser creativo.

Respecto a alternativas en el sistema de posicionamiento, existen amateurs que han hecho uso de un espejo inclinable actuado como mecanismo principal de posicionamiento del haz láser [4]. Aunque es factible, esta opción tiene la desventaja de ser notablemente costosa, con un espejo inclinable actuado por galvanómetros, llegando a costar más de 4000 USD (~80,000 MXN). Existen también proyectos de bajo costo de escaneo láser mediante motores a pasos [20], [21], con la principal desventaja de que no poseen un posicionamiento tan rápido como un galvanómetro, y requerirían un sistema mecánico más complejo para aumentar la resolución del sistema. Aunque por ahora esa opción se descarta, puede ser de gran utilidad a la hora de reducir vibraciones para obtener un sistema de fotolitografía aún más simple de usar, siempre y cuando se cuente con el presupuesto.

3.3 Estructura

El armazón en el que se sostiene el sistema debe construirse de materiales económicos, versátiles, y fáciles de obtener, pero al mismo tiempo firmes y resistentes. Es por ello que en el presente trabajo se propone construirlo mediante perfiles de aluminio estructural ranurados. Dichos perfiles permiten la integración de diversas piezas, ya sea móviles o fijas, facilitando la reparación y realización de mejoras.

En cuanto a las piezas mecánicas, las barras guía, los rodamientos rotacionales y lineales, pueden conseguirse con relativa facilidad en cualquier lugar donde vendan repuestos para impresoras 3D, al igual que los motores a pasos. Algunas piezas específicas, sin embargo, deben ordenarse a proveedores especializados,

como es el caso del tornillo de potencia miniatura. Otros elementos tendrían que fabricarse de forma personalizada. Diversas piezas del sistema mecánico usado por el stage [18] pueden construirse mediante impresión 3D como parte de un diseño de prototipo rápido; sin embargo, se recomienda encarecidamente que en cuanto se pueda realizar un diseño final permanente, se sustituyan dichas piezas con otras de algún material más sólido, pues los materiales impresos en 3D son altamente propensos a fallas mecánicas. En caso de ya poseer elementos como sistemas de traslación lineal con micrómetro, no se considera necesario construir desde cero el sistema de posicionamiento, siempre y cuando el trayecto recorrido por dichos sistemas sea el adecuado para la aplicación deseada.

Piezas como el proyector y el láser deben ir montadas de forma fija, de manera que no se muevan o vibren durante el proceso de fotolitografía; además, el proyector tiene necesidades de diseño específicas, como el ángulo de inclinación que se menciona previamente, el espacio que ocupa, o su peso, que puede rondar entre los 3 y los 7 kg, dependiendo del fabricante. Es por esto que el soporte debe ser fabricado con materiales más resilientes, como acero, y debe ser fabricado específicamente para cada proyector, pues todas las dimensiones pueden cambiar drásticamente de un modelo a otro. En la figura 9 se presenta un diagrama de un soporte para proyector.

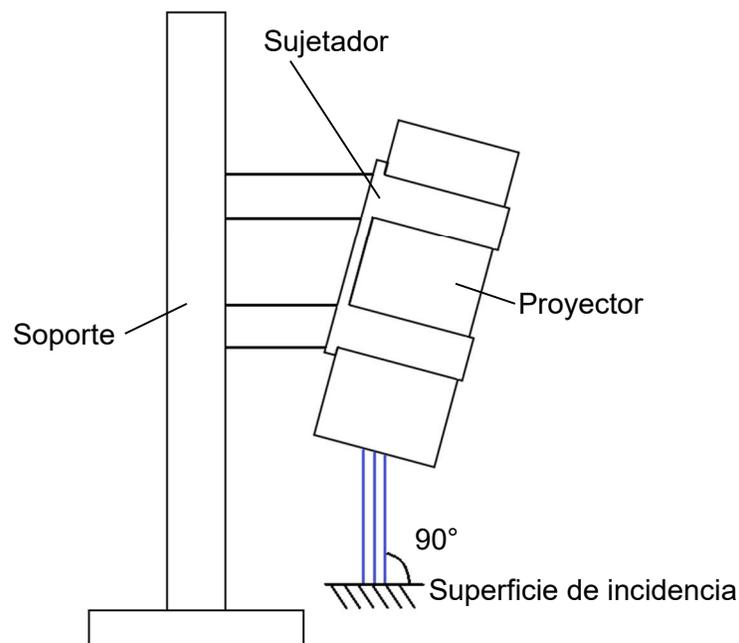


Figura 9: Bosquejo de propuesta de soporte para proyector. Nótese la inclinación presente en el proyector, comparada con la incidencia perpendicular del haz de luz.

El láser es considerablemente más simple de colocar. No requiere un soporte que cargue con una gran cantidad de peso, sino que simplemente lo sostenga en su lugar. Se trata de una tarjeta PCB que contiene los sistemas ópticos y electrónicos necesarios, se encuentra perforado de antemano para facilitar el mantenimiento

del sistema Blu-Ray. Nuestra propuesta es hacer una estructura de perfil de aluminio ranurado que permita atornillar los diferentes componentes del láser para fijarlos. En el artículo original, el láser es montado en un soporte sobre una breadboard óptica. En nuestro caso, sólo necesitamos posicionar el láser por encima del microscopio, por lo que un arreglo en forma de arco, mesa o trípode puede ser más que suficiente. La figura 10 puede ayudar a ilustrarlo.

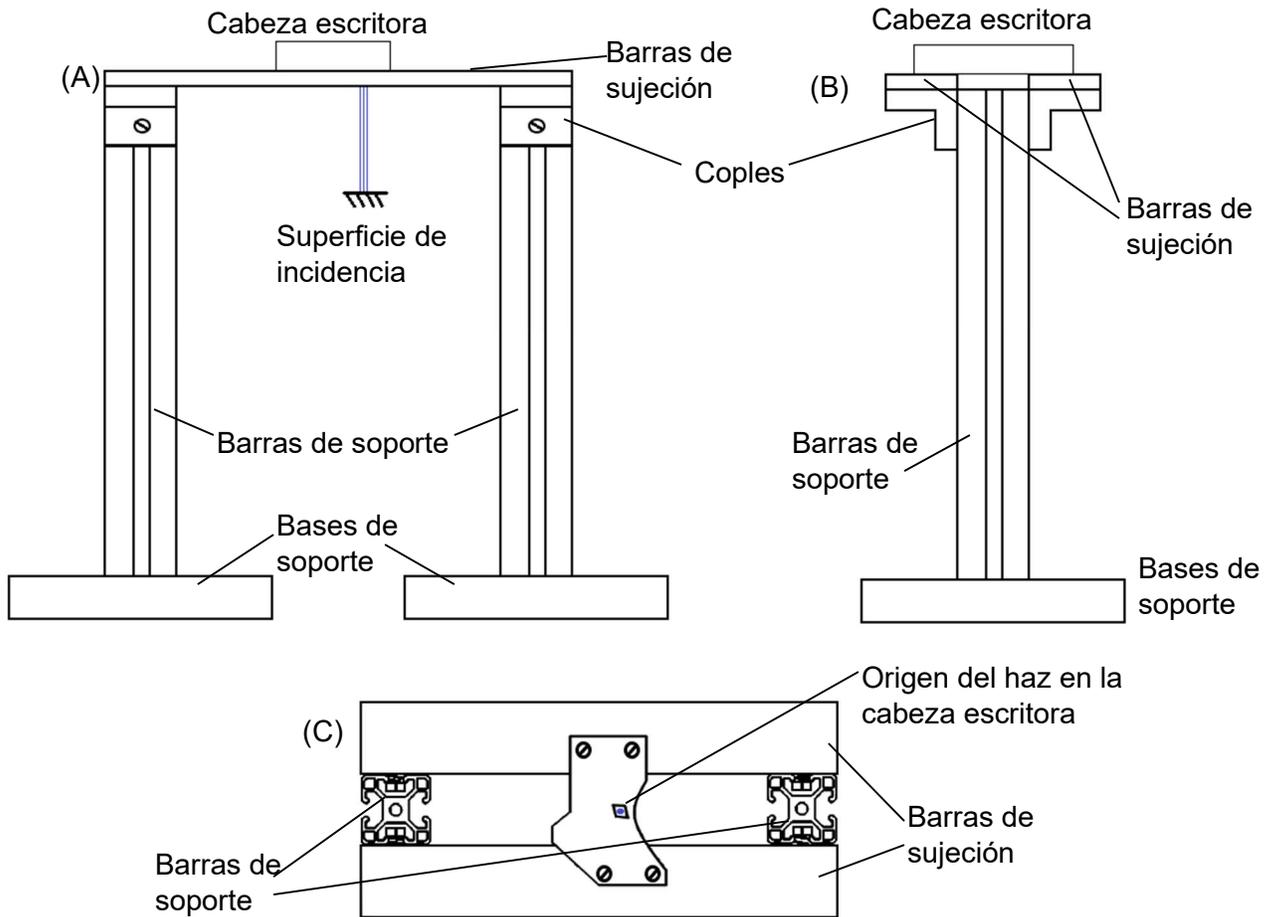


Figura 10: Bosquejo de propuesta de soporte para cabeza escritora láser. (A) Vista frontal, mostrando la incidencia del haz. (B) Vista lateral. (C) Vista superior, mostrando el origen del haz láser.

Las dimensiones exactas de la cabeza, así como las posiciones correctas para atornillar, o los tamaños de tornillos necesarios, no son conocidos, ya que varían de un fabricante a otro, y no se declaran en el artículo consultado. Sin embargo, en base a las fotografías presentes en el artículo, así como a documentación consultada por sus autores [22], se estima que una cabeza escritora para Blu-Ray puede tener un tamaño de ~6 x 4 cm, con un grosor de alrededor de 1 - 2 cm; sin embargo, esto sirve solamente para hacer un estimado. En cuanto se obtenga una cabeza escritora para Blu-Ray, deben tomarse sus dimensiones y acoplarla lo mejor posible al soporte. El microscopio es un tema similar al proyector. Primero debe removerse su cabeza de la base. Esto es posible hacerlo en la mayor parte de los microscopios

estereoscópicos, y es necesario para poder posicionar el objetivo sobre el sustrato. Debe entonces construirse un soporte especial para el microscopio, y asegurar que se el sistema óptico se encuentre correctamente alineado al sistema de posicionamiento. Dicho soporte puede improvisarse en acero, e incluso se propone que esté fijo al soporte del proyector, en el caso de la fotolitografía sin máscara. Sin embargo, los detalles de su construcción inevitablemente variarán dependiendo del modelo del microscopio.

3.4 Control

El control del stage se realiza mediante un sistema conformado por una interfaz de usuario programable especializada, un dispositivo microcontrolador con control que puede ser de lazo abierto o cerrado dependiendo del caso, y una etapa de potencia, en un arreglo similar al de la figura 11.

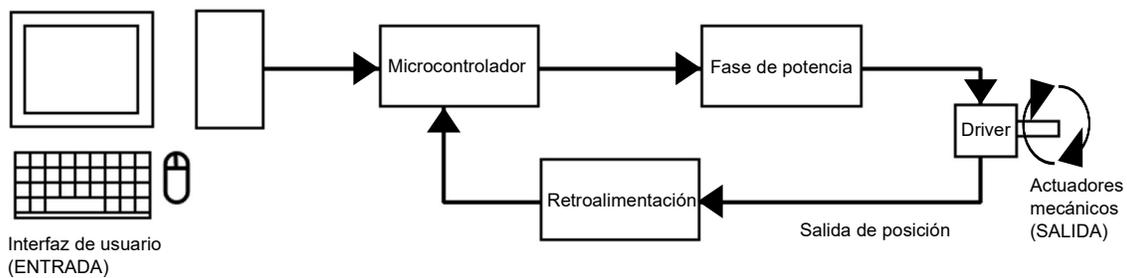


Figura 11: Diagrama de la configuración de control del sistema.

Obsérvese que el actuador y su driver se consideran una unidad

En la interfaz de usuario se encuentra una computadora personal, con teclado, ratón y monitor, donde puede insertarse el diseño deseado para la impresión, y realizarse los ajustes previos necesarios para esta. No se trata de una computadora personal común y corriente, sino de un procesador especializado que funciona como interfaz de comunicación entre el usuario y el dispositivo. Su función es convertir las indicaciones en código que el microprocesador pueda entender. Para esta interfaz, la propuesta es usar como procesador una tarjeta Raspberry Pi con un sistema operativo base Linux en la fase de prototipo, para observar su comportamiento preliminar; dicha interfaz se conectaría al proyector, en el caso de la fotolitografía sin máscara, mediante una salida VGA o HDMI; mientras que en el caso de la fotolitografía láser, de manera similar a una impresora 3D, se generaría una salida en G-code de la impresión deseada para el posicionamiento del láser mediante CNC, y se entregaría como indicación al microprocesador del sistema. Una vez puesta a prueba la confiabilidad de la programación, se propone cambiar el procesador por una tarjeta Nvidia Jetson Nano, más robusta y de mayor capacidad, de forma permanente. Si dicha tarjeta no está disponible, se recomienda usar un kit de desarrollo compacto con características similares.

El microcontrolador tiene el propósito de transmitir las indicaciones entregadas por la interfaz a la fase de potencia, en forma de señales que indiquen a los motores

cuándo y cómo encenderse y apagarse; de la misma forma, recibe la entrada de los sistemas de medición, para corregir la salida que llega a los actuadores, y así obtener un posicionamiento preciso; podría decirse que traduce las órdenes para realizar el control de las máquinas. En nuestro caso, el microcontrolador convierte las órdenes en forma de comandos en G-code para CNC, en salidas que ordenan a los motores posicionar la mesa con el sustrato. En la fase prototipo se propone usar una tarjeta Arduino MEGA, debido a que, aunque no son las más robustas del mercado, pueden programarse fácilmente para realizar las labores de un sistema de control CNC, mediante firmware especializado. En el diseño final, es importante que un microcontrolador robusto, con un circuito PCB personalizado, se diseñe e implemente para reemplazar a la tarjeta Arduino como controlador; de otro modo, el sistema puede sufrir fallas, pues las tarjetas Arduino, debido a que su diseño es para fines didácticos, no son aptas para su implementación en la industria o la investigación, y de mediano a largo plazo pueden cometer errores, dañarse permanentemente, o tener mal desempeño en general, en comparación con un circuito especializado.

La propuesta original del sistema Openstage es de lazo abierto, así que, para calibrar adecuadamente el posicionamiento del sistema, utilizaron como transmisión calibradores micrométricos de mano acoplados a un eje flexible, y controlaron el movimiento para la corrección de errores de forma manual mediante un control para consola de videojuegos, conectado al microprocesador a través de una tarjeta adaptadora USB, que tenía instalado el programa controlador adecuado para dicho control de videojuegos. Esta solución es perfecta para utilizarse en un sistema de fotolitografía sin máscara, ya que este sólo requiere del posicionamiento adecuado de la imagen en el lugar deseado, y puede modificarse para usar una interfaz distinta, como recibir sus órdenes directamente de la interfaz, o usar un tablero personalizado, sin necesidad de un control de consola de videojuegos.

Sin embargo, dicha solución es completamente inútil para el sistema de fotolitografía láser, ya que este necesita de un posicionamiento automatizado rápido y preciso para poder realizar la impresión de forma fiable. La fotolitografía láser requiere, obligatoriamente, tener control de posicionamiento de lazo cerrado.

No es imposible cerrar el lazo en el sistema Openstage: es posible instalar algún sistema de medición como un encoder que permita posicionar adecuadamente el actuador; mientras que se puede reemplazar el driver del control manual por una suite de código abierto para control numérico (como Marlin o grbl). Tanto la programación de Openstage como Marlin y grbl pueden encontrarse en GitHub para descargarse de forma gratuita [23]–[25], y los tres están basados en Arduino.

Respecto a la retroalimentación para el control automatizado del posicionamiento, el artículo original de Openstage propone el uso de encoders de 10,000 pasos como los usados para telescopios de aficionados; sin embargo, esta clase de encoders pueden tener un costo de entre 75 y 100 USD (~1500 - 2000 MXN) por pieza, lo que los vuelve bastante costosos. Podría considerarse, para reducir costos, cerrar únicamente el lazo del sistema en los ejes X y Y, al observar que

podría prescindirse del control automatizado del eje Z asumiendo como constante la distancia entre la fuente de luz y el material reactivo después de ajustarla manualmente, con la desventaja de que, en la fotolitografía láser, podría ocasionar artefactos o cambios notables en la calidad de la impresión a lo largo de la superficie, debido principalmente a accidentes topológicos microscópicos presentes en ella.

Otra opción propuesta, más bien de forma complementaria, es el uso de motores a pasos de 1000 pasos a 5 fases, que según su fabricante podrían prácticamente eliminar el error de microposicionamiento, con la desventaja de que por sí solos sus controladores especializados tendrían un costo de 383 USD (~7660 MXN) por eje, aunque los motores por sí solos tendrían un costo similar al de cualquier otro motor a pasos.

Aunque el artículo considera innecesario el uso de este tipo de optimizaciones para la precisión del sistema, al menos para la aplicación que propone (considerándolos deseables únicamente para el control del eje Z), en el caso de la fotolitografía láser es inevitable desear un posicionamiento altamente preciso, pues este es el que da a la impresión la resolución deseada.

El mismo artículo no descarta el uso de reducciones de engranes, para implementar encoders menos costosos con menor cantidad de pasos, con la desventaja de las pérdidas mecánicas (backlash) inherentes al sistema, condicionando su uso a únicamente reducciones con backlash cero o cercano al cero, que naturalmente tienen un precio mayor. Es importante observar que no es posible calcular las pérdidas mecánicas y diseñar un algoritmo para compensarlas de forma precisa sin hacer uso de un elemento observador (como un encoder) con la resolución deseada [26], por lo que no se puede escapar a la necesidad de usar encoders de alta resolución si se busca cerrar el lazo.

Respecto al eje Z, aunque el diseño aquí propuesto no busca un control de ciclo cerrado, este puede implementarse. Se alienta al lector a buscar una forma eficiente de hacerlo, aunque finalmente, ya que el sistema posee un microscopio que permite ver la impresión en tiempo real, el usuario puede realizar ajustes de distancia focal mientras observa la proyección del haz, lo que es especialmente útil en la fotolitografía sin máscara. Ni siquiera es necesario en este caso un micrómetro: Schneiderei *et al* reportaron una precisión muy alta en su sistema de bajo costo, sin que este fuera de lazo cerrado en ninguna forma. Aunque no es ideal, puede extrapolarse que el sistema será capaz de entregar un posicionamiento preciso en Z mediante el uso de microstepping.

Finalmente, la fase de potencia es aquella que transforma las señales producidas por el microcontrolador, de simples señales electrónicas de control, a señales de potencia que accionen los mecanismos dentro del sistema, como los motores. Cumplen además con la función doble de proteger al microcontrolador de las posibles fluctuaciones del voltaje que puedan originarse dentro del sistema de potencia, efectivamente manteniendo alejada la fase de control de potencias eléctricas demasiado altas. Es a través de la fase de potencia que la carga eléctrica de mayor voltaje es introducida a los motores.

Para los circuitos de la fase de potencia, se propone un sistema CNC Shield como el normalmente usado en impresoras 3D de fabricación casera. Estos circuitos son convenientes por su accesibilidad en el mercado y su versatilidad; al final de cuentas, sólo se usarán para mover motores a pasos. En base a la literatura disponible, no se cree que estos sistemas ocasionen problemas a la larga en la implementación del sistema, pero es necesario someterlos a pruebas empíricas para conocer esto. En base a lo que se descubra, podría ser necesario obtener o crear una fase de potencia especializada para su configuración permanente en el producto final.

Una consideración adicional es el uso de drivers para los motores a pasos, que ya se mencionaron en el control de un motor a pasos de 5 fases. Los drivers son necesarios para controlar cada motor a pasos, y en nuestro caso particular, para permitirle realizar microstepping. Es obligatorio que el driver permita hacer uso de microstepping. En el diseño Openstage se hace uso de un driver Quadstepper, con capacidad de controlar hasta 4 motores a pasos de forma independiente, con micropasos de hasta 1/16 del paso original. Sin embargo, ese tipo de driver hace uso de drivers más pequeños, en un arreglo centralizado, y hoy en día la mayor parte de los diseños parecidos se encuentran descontinuados. Lo más común es encontrar drivers individuales para cada motor a pasos, debido a que en muchos casos sólo se hace uso de un motor a pasos por sí solo, o a que puede preferirse un diseño en el que los motores no dependen todos de un solo elemento de control, e incluso a que algunos motores a pasos pueden tener características especiales o diseños sujetos a propiedad intelectual. Esto último es, de hecho, el caso del motor de 1000 pasos mencionado anteriormente. Lo anterior puede restringirnos en ciertos casos, pero nos da la posibilidad de buscar drivers distintos, con la capacidad incluso de producir pasos considerablemente más pequeños, y con un rango diferente de precios. Por esto siempre debe observarse el presupuesto al seleccionar drivers.

4 Metodología y resultados

4.1 Implementación

Aunque no se ha realizado la implementación física del sistema, se sabe que los elementos que lo componen están probados experimentalmente. La presente guía busca facilitar en el futuro la implementación de un sistema similar a equipos multidisciplinarios con conocimientos sobre micromanufactura, en base a un enfoque amplio que sea aplicable en la mayor cantidad de entornos de investigación posibles, pero también abierto a las diferentes necesidades que puedan existir entre un entorno y otro. Dicho en otros términos, el diseño puede realizarse de forma personalizada con el equipo que se tenga a la mano, y con las consideraciones que cada equipo de desarrollo tenga, ya sea limitaciones económicas, restricciones geográficas, disponibilidad de materiales y equipo, etc. El diseño propuesto tiene espacio para muchos cambios y optimizaciones, pero es por sí mismo un diseño completo.

El sistema mecánico tiene la ventaja de que sus componentes se encuentran ampliamente disponibles. Usualmente, se utilizan para la construcción de impresoras 3D de uso doméstico. Esto ha sido explotado por otros diseñadores de dispositivos de fotolitografía, y otros mecanismos relacionados.

La figura 12 muestra un esquema de la disposición general del sistema, tanto en la configuración para fotolitografía sin máscara, como en la fotolitografía láser.

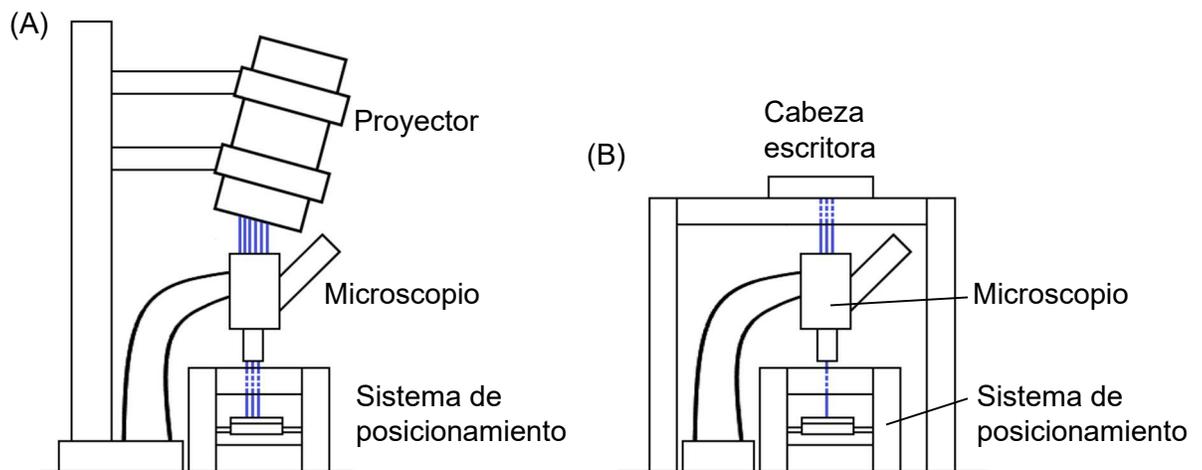


Figura 12: Diagrama de implementación de los sistemas de fotolitografía sin máscara y láser. (A) Sistema de fotolitografía sin máscara. (B) Sistema de fotolitografía láser.

Al ser una de sus partes más importantes un microscopio óptico, además de que tiene una mesa de posicionamiento, y una fuente de luz, tiene la enorme ventaja de que muchos sistemas utilizados para microscopios pueden ser integrados al

mecanismo. El diseño mismo del stage de posicionamiento está basado en uno pensado originalmente para microscopía.

El sistema tiene la ventaja de ser modular, pudiendo modificarse y actualizarse en base a cambios que ocurran durante el desarrollo o la implementación. Incluso las partes más propensas a sufrir daños irreparables, como el sistema láser del quemador Blu-Ray o los componentes internos del proyector, pueden ser reemplazadas rápidamente debido a la amplia disponibilidad de refacciones.

El microscopio es relativamente fácil de obtener a precio accesible, al disponer de modelos ya usados que se encuentren en buen estado. La parte más importante es el sistema óptico, y como se menciona en el aparato de Estructura, deberá construirse un pedestal improvisado que formaría parte de la estructura del sistema. Aún así, si faltan partes no triviales al microscopio (como los visores, o el revólver), pueden conseguirse partes separadas usadas, y con ellas se puede armar lo que haga falta. Es posible, además, instalar una cámara digital de bajo costo (como una webcam) en uno de los visores del microscopio estereoscópico, para facilitar el posicionamiento a través de la interfaz digital, pero esto es opcional.

Se propone usar el sistema presentado como prototipo, para la investigación en la optimización de métodos de micromanufactura de bajo costo; habiendo alcanzado un estado "estable" en el dispositivo, puede usarse para la manufactura de BioMEMS, dependiendo de las características deseadas, y de cómo se compara con sistemas de micromanufactura a los que ya se tenga acceso, si los hay. Otra propuesta es también hacer uso de un sistema como este con fines puramente didácticos. Incluso si no se logra obtener impresiones de alta calidad utilizables para la fabricación de BioMEMS, el mero acto de imprimir patrones microscópicos en un entorno controlado puede ser altamente educativo para personas introduciéndose a la micromanufactura, y podría servir para la capacitación en micromanufactura de individuos que no tengan acceso a espacios especializados como un cuarto limpio correctamente acondicionado.

4.2 Costos/Comparación de mercado:

Los dispositivos de fotolitografía profesionales existen en un amplio rango de costos, dependiendo de si son equipos de segunda mano o equipos nuevos. Aunque las compañías proveedoras de este tipo de productos no listan sus precios de forma pública, sino que informan del costo al cliente cuando existe cierta certeza de que habrá una compra, puede asumirse con cierta seguridad que un sistema de este tipo, de segunda mano, tendrá un costo que supera los 100,000 USD (~2,000,000 MXN).

Siendo el objetivo del presente trabajo que el sistema sea de bajo costo, es importante comparar los gastos proyectados con dicha cantidad, como límite máximo, y asegurarnos de que el ahorro sea significativo.

La presente comparación de costos no toma en cuenta posibles gastos de envío, ni toma en cuenta si los proveedores se encuentran afiliados a la UNAM, pero podría asumirse que todos los materiales y equipo que se listan a continuación pueden conseguirse mediante proveedores e importadores afiliados, o a través de proveedores externos para posteriormente justificar el gasto a la institución.

No se listan precios de elementos de bajo costo como tornillos estructurales o cables jumper, ni componentes de acoplamiento que tengan que maquinarse de forma personalizada, o partes estructurales que tengan que fabricarse desde cero.

Los precios y la disponibilidad están sujetos a cambios. Notas respecto a algunos costos o características se distinguirán con asteriscos. El presente es sólo un listado con fines informativos, para conformar un estimado.

Fuente de poder

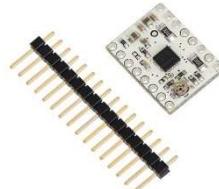
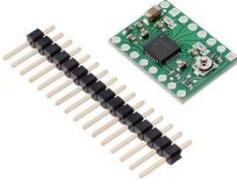
Producto	Precio		Sitio web del vendedor
Fuente de poder MEAN WELL XLG-100-24-A, 24 V, 4A	46 USD (~920 MXN)		https://www.mouser.mx/ProductDetail/MEAN-WELL/XLG-100-24-A?qs=unwgFEO1A6t6VkoChE%2FrUA%3D%3D
Fuente De Poder 9V 1 A	112 MXN		https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-779105084-fuente-de-poder-arduino-uno-mega-9v-1amp-9-v-1-a-cargador-JM

Motores a pasos

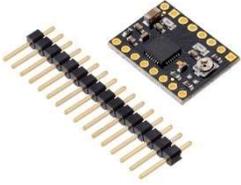
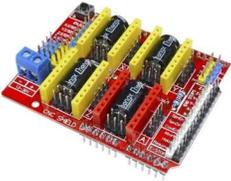
Motor NEMA 17 OrientalMotor PKP243MD15B2, 400 pasos, DC, 2 fases, doble eje	61 USD (~1220 MXN)		https://catalog.orientalmotor.com/item/2-phase-bipolar-stepper-motors/42mm-pkp-series-2-phase-bipolar-stepper-motors/pkp243md15b2
Motor NEMA 17 OrientalMotor PKP544N18B2, 500 pasos, DC, 5 fases, doble eje	66 USD (~1720 MXN)		https://catalog.orientalmotor.com/item/pkp-series-5-phase-stepper-motors/pk-series-42mm-5-phase-stepper-motors/pkp544n18b2
Motor NEMA 17 OrientalMotor PKP544MN18A, 1000 pasos, 5 fases, doble eje (requiere controlador especial)	60 USD (~1200 MXN)		https://catalog.orientalmotor.com/item/pkp-series-5-phase-stepper-motors/shop-pkp-series-5-phase-stepper-motors/pkp544mn18a

Elementos de control

Arduino MEGA 2560 Rev3	878 MXN		https://uelectronics.com/producto/arduino-mega-2560-rev3/
---------------------------	---------	---	---

Raspberry Pi 4 Modelo B, Quad Core	4150 MXN		https://www.amazon.com.mx/Raspberry-Modelo-2019-Quad-Bluetooth/dp/B07TC2BK1X
Kit de desarrollo Nvidia Jetson Nano	9600 MXN		https://www.amazon.com.mx/NVIDIA-Jetson-Nano-Developer-Kit/dp/B07PZHBDKT
USB Host Shield para Arduino MEGA	355 MXN		https://uelectronics.com/product/usb-host-shield-para-arduino-uno-mega-due/
Control USB compatible con Xbox 360*	359 MXN		https://www.amazon.com.mx/Control-Alambrico-Compatible-Windows-Gamepad/dp/B09QH7BG42
Driver de bajo voltaje para motores a pasos de 2 fases Pololu STSPIN220 256 micropasos 1.1 A (1.3 A max.)	8 USD (~160 MXN)		https://www.pololu.com/product/2876
Driver de bajo voltaje para motores a pasos de 2 fases Pololu DRV8834 32 micropasos 1.5 A (2 A max.)	10 USD (~200 MXN)		https://www.pololu.com/product/2134
Driver para motores a pasos de 2 fases Pololu A4988 16 micropasos 1 A (2 A max.)	14 USD (~280 MXN)		https://www.pololu.com/product/1182

* Otros controles manuales pueden elegirse

<p>Driver para motores a pasos de 2 fases Pololu A4988 Black 16 micropasos 1.2 A (2 A max.)</p>	<p>14 USD (~280 MXN)</p>		<p>https://www.pololu.com/product/2128/specs</p>
<p>Driver para motores a pasos de 2 fases Sparkfun ROB-12859 "Big Easy Driver" 16 micropasos 2 A</p>	<p>21 USD (~420 MXN)</p>		<p>https://www.sparkfun.com/products/12859</p>
<p>Driver universal para motores a pasos de 5 fases Oriental Motor CVD518BR-K</p>	<p>383 USD (~7660 MXN)</p>		<p>https://catalog.orientalmotor.com/item/cvd-5-phase-stepper-drivers/cvd-5-phase-stepper-motor-drivers/cvd518br-k</p>
<p>CNC Shield V3, fase de potencia para drivers de motores a pasos. Compatible con todos los drivers mostrados.</p>	<p>70 MXN</p>		<p>https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-683729646-tarjeta-shield-cnc-para-arduino-uno-a4988-o-drv8825- JM</p>
<p>Encoder Astro Devices 10,000 pasos</p>	<p>85 USD (~1700 MXN)</p>		<p>https://telescopes.net/astro-devices-us-digital-s6-encoders-10-000-steps.html</p>
<p>Encoder Wildcard Innovations 10,000 pasos</p>	<p>150 AUD (~1900 MXN)</p>		<p>http://www.wildcard-innovations.com.au/encoder_10000_describe.html</p>

Encoder Webster Telescopes 10,000 pasos	75 USD (~1500 MXN)		http://www.webstertelescopes.com/TELESCOPE_ENCODERS.htm
Encoder Rotatorio Óptico Incremental OVW6-10-2HC, 1000 pasos	954 MXN		https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-949051333-encoder-rotatorio-optico-incremental-1000-pr-2-fases-5-24- JM
Encoder Rotatorio Óptico Incremental E6B2-CWZ6C, 1000 pasos	1499 MXN		https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-931498014-e6b2-cwz6c-encoder-1000ppr-compatible-con-omron-plc-npn- JM
Encoder Rotatorio Óptico Incremental E6B2-CWZ6C, 2500 pasos	1699 MXN		https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-931008349-e6b2-cwz6c-encoder-canal-2500ppr-compatible-con-omron-npn- JM

Elementos mecánicos

Eje Flexible, 12 in (30 cm) Diámetro: 0.188 in (3 mm)	77 USD (~1540 MXN)		http://shop.sdp-si.com/catalog/product/?id=A%207C12-12633
Rodamiento lineal, 4 mm, LMUF4	16 USD (~320 MXN)		https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/110300026540/?HissuCode=LMUF4

Rodamiento rotacional, 3 x 6 x 25 mm, MR63ZZ	5 USD (~100 MXN)		https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/221000528976/?PNSearch=MR63ZZ&HissuCode=MR63ZZ&searchFlow=suggest2products&Keyword=MR63ZZ
Varilla redonda sólida de acero inoxidable 304 Uxcell, 4 x 150 mm (10 unidades)*	373 MXN		https://www.amazon.com.mx/uxcell-Varilla-redonda-inoxidable-unidades/dp/B082ZNLHMN
Eje lineal de precisión de acero PPSFJ4-150, Misumi, 4 x 150 mm	6 USD (~120 MXN)		https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/110302634310/?PNSearch=PSFJ4-150&HissuCode=PSFJ4-150&searchFlow=suggest2products&Keyword=PSFJ4-150
Tornillo de precisión MSSRW401-150-F6-V2.5-S6-Q2.5, Misumi, 4 x 150 mm, paso: 1 mm, ambos extremos maquinados	81 USD (~1620 MXN)		https://us.misumi-ec.com/vona2/detail/110302642530/?PNSearch=MSSRW401-150-F6-V2.5-S6-Q2.5&HissuCode=MSSRW401-150-F6-V2.5-S6-Q2.5&searchFlow=suggest2products&Keyword=MSSRW401-150-F6-V2.5-S6-Q2.5
Tornillo de potencia miniatura TNK Sanwa Precision (varios modelos), Diámetro: <4 mm, Paso: <1 mm	1500 - 3000 USD (30,000 - 60,000 MXN)		https://www.directindustry.com/prod/tnk-sanwa-precision-co-ltd/product-242525-2487539.html
Eje de traslación Newport con calibrador micrométrico PT1, Trayecto: 25 mm	323 USD (~6460 MXN)		https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=706&pn=PT1#2937
Reducción de engranes planetaria WANSHIN WAB060-100-K-P1 60 mm Radio de reducción: 100 Backlash: ≤ 5 arcmin	232 USD (~4640 MXN)		https://www.directindustry.com/prod/wanshin-seikou-hunan-co-ltd/product-232091-2323657.html

* Podría ser preferible seleccionar ejes lineales de precisión para eliminar artefactos, pero las barras de acero genéricas pueden servir para reducir costos.

Reducción de engranes planetaria WANSHIN WAB060-100-K-P0 60 mm Radio de reducción 100 Backlash \leq 3 arcmin	278 USD (~5560 MXN)		https://www.directindustry.com/prod/wanshsin-seikou-hunan-co-ltd/product-232091-2323657.html
Reductor armónico WANSHIN, diversos modelos (WCSG y WSHG) 42 mm Radio de reducción 100 Backlash \leq 15 arcsec	350 USD (~7000 MXN)		https://www.directindustry.com/prod/wanshsin-seikou-hunan-co-ltd/product-232091-2447859.html https://www.directindustry.com/prod/wanshsin-seikou-hunan-co-ltd/product-232091-2447865.html

Elementos Estructurales

Perfil de 20 x 20 mm, ranura V Slot de 6 mm, 1 m	148 MXN		https://www.moasperfiles.com.mx/Stock%20perfiles.htm
Perfil de 40 x 40 mm, ranura T Slot de 8 mm, 1 m	321 MXN		https://www.moasperfiles.com.mx/Stock%20perfiles.htm

Insumos para impresión 3D

Filamento para impresión 3D PETG Esun, 1.75 mm (1 kg)	599 MXN		https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-543196314-filamento-petg-premium-175mm-para-impresora-3d-envio-gratis- JM
Filamento para impresión 3D ABS+ Esun, 1.75 mm (1 kg)	599 MXN		https://www.mercadolibre.com.mx/filamento-3d-abs-esun-de-175mm-y-1kg-peak-green/p/MLM15458240/?pdp_filters=seller_id:199615699

Filamento para impresión 3D PLA Steren, 1.75mm (1kg)	499 MXN		https://www.mercadolibre.com.mx/filamento-3d-fil3d-020-steren-de-175mm-y-1kg-amarillo/p/MLM10846824
--	---------	---	---

Arreglos ópticos*

Microscopio estereoscópico triocular American Optical serie 10, usado	495 USD (~9900 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/american-optical-series-10-microscope-with-dic-epi-illumination-triocular-tube/
Cabezal de microscopio Leica Stereozoom 6 Plus, usado, sin acceso para cámara	189 USD (~3780 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/leica-stereozoom-6-plus-microscope-head/
Cabezal de microscopio Bausch & Lomb Stereozoom 3, usado, sin visores	75 USD (~1500 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/bausch-lomb-stereozoom-3-pod-1x-to-3/
Cabezal de microscopio Bausch & Lomb Stereozoom 4, usado, sin visores	90 USD (~1800 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/bausch-lomb-stereozoom-4-pod-0-7x-3x/
Microscopio Scienscope ELZ-B1, usado, sin acceso para cámara	290 USD (~5800 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/scienscope-elz-b1-stereo-zoom-binocular-microscope/
Microscopio Bausch & Lomb Stereozoom 7, usado	300 USD (~6000 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/bausch-lomb-stereozoom-7-microscope-2/
Visores Bausch & Lomb para microscopio estereoscópico, usados	56 USD (~1120 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/bausch-lomb-stereo-microscope-eyepiece-top-lens-31-15-71-lot-of-2/

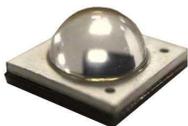
* Al comprar en sitios de reventa de equipo científico, existe el compromiso de comprar el producto “como se presenta”, y no hay devoluciones ni reclamaciones.

Revólver para microscopio Olympus, usado	110 USD (~2200 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/olympus-nose-piece-bh-microscopes-bf-df-metallurgical/
Revólver motorizado para microscopio Olympus, usado	85 USD (~1700 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/olympus-objective-changer-motorized-cy-2rem/
Objetivo Olympus Plan N 10x/0.25, usado	90 USD (~1800 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/olympus-plan-n-10x-0-25-objective/
Objetivo Reichert Plan Fluor 50x/0.80, usado	395 USD (~7900 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/reichert-plan-fluor-50x-0-80-epi-microscope/
Objetivo Leitz NPL 5x/0.09, usado	180 USD (~3600 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/leitz-npl-5x-0-09-metallurgical-microscope-objective/
Objetivo Leitz 20x/0.35, usado	110 USD (~2200 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/leitz-20x-infinity-corrected-metallurgical-microscope/
Objetivo Leitz Plan 16x/0.30 D, usado	325 USD (~6500 MXN)		https://www.bmisurplus.com/product/leitz-569-115-plan-16x-0-30-d-metallurgical/

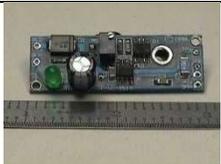
* Al comprar en sitios de reventa de equipo científico, existe el compromiso de comprar el producto "como se presenta", y no hay devoluciones ni reclamaciones.

Fuentes de luz y modulación óptica

Proyector Sony VPL-CH375 LCD Resolución 1920x1200 Usado	17,000 MXN		https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1572138459-proyector-sony-vpl-xh375-3lcd-wuxga-de-5000-lumenes- JM
---	------------	---	---

Proyector Panasonic PT-LB403U LCD Resolución 1024x768 Usado	9860 MXN		https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-828368029-proyector-panasonic-pt-lb303u-3000-lumens-xga-3lcd- JM
Proyector Optoma HD146X DMD Resolución 1920x1080	24,499 MXN		https://www.amazon.com.mx/Optoma-HD146X-Videoprojector/dp/B0842QPR1Z/
Proyector Viewsonic PA503W DMD Resolución 1920x1080	9403 MXN		https://www.amazon.com.mx/Viewsonic-PA503S-Proyector-1%C3%BAmenes-800x600/dp/B0749NTSCD/
Proyector BenQ MX550 DMD Resolución 1024x768	11,038 MXN		https://www.amazon.com.mx/BenQ-Proyector-MX550-Brillantez-Contraste/dp/B07QHMJBCX/
Lámpara de vapor de mercurio de repuesto (varios modelos)*	~40-70 USD (~800-1400 MXN)		https://www.prolampsales.com/collections/bare-projector-bulbs
Reflector de plástico para lámpara LED Diámetro: 50 mm Altura: 25 mm	186 MXN		https://www.amazon.com.mx/IIVVE-RR-Plastic-Reflector-Linterna-Flashlight/dp/B08L1N9CNC
LED de alta potencia de 365 nm Inolux IN-C68QABTMU2, 0.7 – 1.2 A, 14 V Flujo luminoso: 3 W	41 USD (~820 MXN)		https://www.mouser.mx/ProductDetail/Inolux/IN-C68QABTMU2?qs=mAH9sUMRCtuyNwq%2FqAsTA%3D%3D
Disipador de calor de aluminio 50 x 50 x 20 mm	258 MXN		https://www.amazon.com.mx/disipadores-aluminio-pulgadas-refrigeraci%C3%B3n-plateado/dp/B089Q1QNLJ/
Espejo dicróico transparente a onda corta (380 - 410 nm) DMSP425L Diámetro: 50 mm	653 USD (~13600 MXN)		https://www.thorlabs.com/newgroup_page9.cfm?objectgroup_id=9240

* Dependiendo del modelo de proyector, la lámpara se encuentra guardada dentro de un módulo de plástico que se puede desarmar, permitiendo reemplazar la lámpara comprándola individualmente.

Espejo caliente de vidrio de sosa y cal transparente a UV (400 - 550 nm) Diámetro: 50 mm	107 USD (~2140 MXN)		https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=897
Grabador de discos Blu-Ray LG WH14NS40	1917 MXN		https://www.amazon.com.mx/LG-Electronics-WH14NS40-Reescritor-software/dp/B007VPGL5U/
Grabador de discos Blu-Ray Bewinner	1586 MXN		https://www.amazon.com.mx/Bewinner-Grabadora-Reproducci%C3%B3n-Grabaci%C3%B3n-Velocidad/dp/B07Z566LTS/
Grabador de discos Blu-Ray ASUS BW-16D1X-U	3778 MXN		https://www.amazon.com.mx/Asus-quemador-BW-16D1X-U-Velocidad-escritura/dp/B071VP89X1/
Driver láser de alto amperaje LDD-40 0.02 - 1.55 A	25 USD (~500 MXN)		https://www.milasers.com/product/high-current-acc-laser-diode-driver-2/#

Estimación de sistema de fotolitografía

Como puede observarse, hay numerosos elementos que, si se añaden al sistema sin un análisis previo, pueden ocasionar un incremento exponencial en los precios. En base a esto, se propone un diseño que busca tener un costo moderado, con características óptimas para la microfabricación. Sin embargo, en base al contexto presentado, se alienta al lector a hacer los cambios que desee.

Hay que comenzar por el sistema mecánico. Es necesario fabricar los ejes de posicionamiento desde cero, puesto que los ejes Newport son demasiado costosos.

Precios del sistema mecánico:

ELEMENTO	CANTIDAD	PRECIO
Eje Flexible	3	1540
Rodamiento lineal	9	320
Rodamiento rotacional	6	100
Eje lineal de precisión	9	120
Tornillo de precisión	3	1620
Elementos impresos en 3D (ABS)	~300 g	179
Reducción de engranes 100:1	1	4640
Perfiles T Slot 40 x 40 (1 m)	2	321
TOTAL (MXN)		19,501

Aunque no sería conveniente añadir una reducción de engranes a cada eje, agregar una al eje Z puede ayudar a tener un posicionamiento de gran precisión ahí sin necesidad de usar lazo cerrado, o un micrómetro, permitiendo colocar la superficie reactiva a simple vista en el punto focal, guiándose por la nitidez de la imagen proyectada. Un sistema de autoenfoco sería lo ideal, pero este se omitió debido a que los elementos que lo componen son todavía más costosos.

Respecto al motor, lo más conveniente es que se haga uso de motores con la mayor cantidad de pasos posibles. Esto es inescapable en la fotolitografía láser. Debido a las consideraciones que ya se tomaron con el eje Z, sólo se usarán motores con pasos más pequeños en los ejes X y Y, y se usará un motor de 400 pasos de dos fases en el eje Z. También se utilizará en cada eje un driver que pueda producir micropasos muy pequeños: para el motor a pasos de 2 fases, se seleccionó el driver de bajo voltaje DRV-8834, que no sólo es parecido en su interfaz a los ya probados en la literatura consultada, sino que es de menor costo y produce hasta 32 micropasos. Mientras tanto, las especificaciones del driver universal para motores a pasos de 5 fases indican que puede producir hasta 250 micropasos, con una precisión mayor a un sistema de 2 fases.

Precios de los motores:

ELEMENTO	CANTIDAD	PRECIO
Motor a pasos de 500 pasos, 5 fases	2	1560
Driver universal para motores a pasos de 5 fases	2	7660
Motor a pasos de 400 pasos, 2 fases, DC	1	1220
Driver de bajo voltaje	1	200
TOTAL (MXN)		19,860

Para asegurar un posicionamiento correcto, es necesario cerrar el lazo en por lo menos los ejes X y Y. Para tal efecto, se precisa integrar encoders al sistema de control. Debido a que los precios de los encoders de 1000 pasos hallados en el mercado son muy cercanos a los costos de los encoders de 10,000 pasos, se tomó la decisión de usar el encoder Webster Telescopes para los ejes X y Y, mientras que se usa una opción de bajo precio del encoder de 1000 pasos en el eje Z. Esta decisión, junto con el uso de motores de alta resolución, y la optimización de la programación, permitiría obtener un desplazamiento mucho más preciso que el reportado en la bibliografía consultada.

Precios del sistema de control:

ELEMENTO	CANTIDAD	PRECIO
Raspberry Pi 4 Modelo B, Quad Core	1	4150
Arduino MEGA 2560 Rev3	1	878
USB Host Shield para Arduino MEGA	1	355
Control USB compatible con Xbox 360*	1	359
CNC Shield V3	1	70
Encoder Webster Telescopes 10,000 pasos	2	1500
Encoder Rotatorio Óptico OVW6-10-2HC, 1000 pasos	1	954
Fuente de poder XLG-100-24-A, 24 V, 4 A	1	920
Fuente De Poder 9V 1 A	2	112
	TOTAL (MXN)	10,910

La selección del arreglo óptico es bastante simple. Se escoge el modelo, o las piezas, del microscopio estereoscópico que más accesible resulte, y que se encuentre en mejor estado. La mayor parte de las piezas mostradas en la lista de precios están ahí para dar un contexto. La decisión que se tomó fue elegir un modelo de microscopio que esté completo, y a precio accesible, que además tenga un espacio para conectar una cámara. Por esta razón se eligió el Bausch & Lomb Stereozoom 7. Los objetivos seleccionados eran los que se encontraban disponibles a precio accesible; sin embargo, es importante recalcar que la mayoría de los seleccionados tienen una amplitud numérica muy baja, pero eran los más accesibles. Siempre que se pueda, debe escogerse lentes con una amplitud numérica tan alta como se pueda, pues como se explica al comienzo del presente trabajo, una baja amplitud numérica genera dificultades a la hora de obtener una impresión con alta resolución. Usualmente, esta se graba en el microscopio junto a la amplificación, separadas por una diagonal o una coma. Los objetivos permiten controlar la miniaturización de la impresión.

Precios del sistema óptico:

ELEMENTO	CANTIDAD	PRECIO
Microscopio Bausch & Lomb Stereozoom 7, usado	1	6000
Objetivo Olympus Plan N 10x/0.25, usado	1	1800
Objetivo Leitz NPL 5x/0.09, usado	1	3600
Objetivo Leitz 20x/0.35, usado	1	2200
	TOTAL (MXN)	13,600

Finalmente, nos encontramos en la parte más importante: la selección de un sistema de modulación de luz, con su respectiva fuente lumínica. Esto puede ser sencillo, asumiendo que el lector tiene a su disposición los productos requeridos. Aunque cada vez se encuentra más ampliamente accesible la tecnología a lo largo del mundo, algunos productos están viendo una lenta retirada del mercado, como son los proyectores con lámpara de mercurio (reemplazados por proyectores LED), y los discos Blu-Ray (ante la constante digitalización en línea de los medios de entretenimiento). Sin embargo, esto no significa que esos dispositivos no puedan utilizarse más para este propósito, o que no se vaya a encontrar un reemplazo de bajo costo al que hacerle ingeniería inversa. Hay que ser creativos.

Los proyectores DLP (alternativamente, DMD) son conocidos por ser el estándar de oro de la proyección doméstica. Tienen una excelente nitidez de imagen en una gran cantidad de circunstancias. Aunque se integraron proyectores LCD a la lista de precios del segmento anterior, cabe recalcar que esos proyectores tienen una cantidad más limitada de aplicaciones sin importar su resolución, pero eso no significa que no las tengan.

Con lo anterior dicho, por lo menos en este caso, se seleccionó un proyector DLP de bajo costo y alta resolución.

Precio del proyector:

ELEMENTO	CANTIDAD	PRECIO
Proyector Viewsonic PA503W DMD Resolución 1920x1080	1	9403
Espejo caliente de vidrio de sosa y cal transparente a UV	1	2140
	TOTAL (MXN)	11,543

Podría ser útil revisar la lista de precios completa, y observar el costo de la construcción de una fuente de luz LED para proyector de lámpara de mercurio UHF. Aunque oscilan dentro del mismo precio, el uso de una fuente de luz

especializada de una sola frecuencia puede ser útil en ciertas aplicaciones de microfabricación, y ayudar a circunventar problemas como falta de disponibilidad de lámparas de mercurio.

En cuanto al láser, debido a que no se hallaron refacciones sueltas, también se tendrá que recurrir al mercado del entretenimiento doméstico. Por fortuna, se encontró un quemador de Blu-Ray a un excelente precio, así como un driver que lo controle.

Precio de la cabeza escritora láser:

ELEMENTO	CANTIDAD	PRECIO
Grabador de discos Blu-Ray Bewinner	1	1586
Driver láser de alto amperaje LDD-40	1	500
TOTAL (MXN)		2086

Precio del sistema general:

ELEMENTO	PRECIO
Sistema mecánico	19,501
Motores	19,860
Sistema de control	10,910
Sistema óptico	13,600
TOTAL (MXN)	63,871

Precio del sistema sin máscara:

ELEMENTO	PRECIO
Sistema general	63,871
Proyector	11,543
TOTAL (MXN)	75,414

Precio del sistema láser

ELEMENTO	PRECIO
Sistema general	63,871
Proyector	2086
TOTAL (MXN)	65,957

Obviamente, el anterior es un estimado muy optimista, que como se menciona, no toma en cuenta cambios de precio o disponibilidad, gastos de envío, convenios, ni piezas o elementos de bajo costo como tuercas y tornillos de sujeción. Al seleccionar equipo para adquirir e implementar, hay muchos factores que no están bajo el control de los investigadores.

El propósito de este estimado es guiar al lector en el proceso de selección de los elementos a utilizar. Con toda la información provista, un equipo multidisciplinario de ingenieros y científicos puede conseguir crear un dispositivo de microfabricación con aplicaciones desde lo didáctico hasta lo experimental, y hacerlo a un precio bastante versátil. Los costos totales obtenidos son apenas una fracción de la cantidad mencionada inicialmente, y puede construirse a precios aún menores o, si el presupuesto lo permite, con características aún más avanzadas.

5 Conclusiones

Aunque existe una gran cantidad de limitaciones económicas a la hora de desarrollar sistemas de micromanufactura, rutas alternas pueden crearse para tener acceso a los avances que estas tecnologías proveen. En el pasado, la micromanufactura se usó casi exclusivamente para el desarrollo de circuitos integrados, pero hoy en día son una herramienta crucial para la creación de tecnología biomédica con un enorme impacto social.

El presente trabajo no logró construir de forma física un dispositivo de micromanufactura; sin embargo, los conocimientos técnicos que compiló son suficientes como para inspirar su construcción, de manera que pueden facilitar el trabajo futuro de equipos multidisciplinarios encargados del desarrollo de microtecnología. Es necesario aún realizar un acercamiento empírico, pero se puede considerar que el presente trabajo es suficiente como para utilizarlo como manual para el desarrollo a grandes rasgos de un sistema de fotolitografía, con un costo más accesible que el de la mayoría de los existentes en el mercado, y una enorme flexibilidad en su implementación.

Además, se observó durante la investigación que existen propuestas con acercamientos totalmente diferentes a los expuestos en el presente trabajo. Por ejemplo, existe la propuesta de usar espejos móviles en un dispositivo de fotolitografía láser, en lugar de usar un stage motorizado, con el fin de disminuir la cantidad de partes móviles y las vibraciones en el mecanismo; de la misma forma, hay quien propone el uso de una cápsula de vacío transparente del tamaño de la muestra de fotorresistor a exponer, como reemplazo para el cuarto limpio, reduciendo en gran medida los costos respecto a espacio y medidas de seguridad. Dichas propuestas son dignas de ser exploradas con el fin de continuar reduciendo costos y maximizar la eficiencia del sistema. Todo eso puede ser explorado por diferentes grupos de investigación con diferentes necesidades para encontrar el enfoque adecuado a ellas.

El presente trabajo muestra también la enorme importancia del intercambio de información entre instancias académicas. El cuerpo de conocimientos que cita el presente trabajo está compuesto de una buena cantidad de investigaciones a lo largo del mundo, todas con un propósito afín al nuestro: facilitar la investigación y el desarrollo de herramientas microtecnológicas con un bajo presupuesto, ya sea por circunstancias económicas desfavorables, o por la necesidad de optimizar gastos. El presente trabajo logró poner en perspectiva los requerimientos de un sistema de fotolitografía; así mismo, tiene el potencial de ser explorado más allá del final del presente texto, e inspirar a otros a hacer lo mismo.

De esa misma manera, existe el potencial de usar sistemas de micromanufactura de bajo costo con propósitos didácticos, para promover el aprendizaje a nivel licenciatura sobre fotolitografía, microfabricación, y sistemas BioMEMS.

Referencias

- [1] R. Feynman, «There's Plenty of Room at the Bottom», *Eng. Sci.*, vol. 23, n.º 5, pp. 22-36, feb. 1960.
- [2] *Maskless Photolithography Stepper for Homemade Chips*, (18 de junio de 2020). Accedido: 15 de agosto de 2022. [En línea Video]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=Nxz_ENnmgI
- [3] «Lithography», en *Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization*, 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2002, pp. 1-76.
- [4] *DIY Laser Lithography: Micron resolution*, (19 de marzo de 2022). Accedido: 15 de agosto de 2022. [En línea Video]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=XJ9w7DjI_Bc
- [5] F. H. Dill, «Optical lithography», *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 22, n.º 7, pp. 440-444, jul. 1975, doi: 10.1109/T-ED.1975.18158.
- [6] F. H. Dill, A. R. Neureuther, J. A. Tuttle, y E. J. Walker, «Modeling projection printing of positive photoresists», *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 22, n.º 7, pp. 456-464, jul. 1975, doi: 10.1109/T-ED.1975.18161.
- [7] F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge, y J. M. Shaw, «Characterization of positive photoresist», *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 22, n.º 7, pp. 445-452, jul. 1975, doi: 10.1109/T-ED.1975.18159.
- [8] D. Kattipparambil Rajan y J. Lekkala, «A maskless exposure device for rapid photolithographic prototyping of sensor and microstructure layouts», *Procedia Eng.*, vol. 5, pp. 331-334, 2010, doi: 10.1016/j.proeng.2010.09.115.
- [9] J. D. Musgraves, B. T. Close, y D. M. Tanenbaum, «A maskless photolithographic prototyping system using a low-cost consumer projector and a microscope», *Am. J. Phys.*, vol. 73, n.º 10, pp. 980-984, oct. 2005, doi: 10.1119/1.1924491.
- [10] J. Kobayashi, M. Yamato, K. Itoga, A. Kikuchi, y T. Okano, «Preparation of Microfluidic Devices Using Micropatterning of a Photosensitive Material by a Maskless, Liquid-Crystal-Display Projection Method», *Adv. Mater.*, vol. 16, n.º 22, pp. 1997-2001, nov. 2004, doi: 10.1002/adma.200400312.
- [11] S. Zeloof, «Maskless Photolithography – Sam Zeloof». <http://sam.zeloof.xyz/maskless-photolithography/> (accedido 16 de agosto de 2022).
- [12] claudiopolis, «LED Projector Lamp V.1.0», *Instructables*. <https://www.instructables.com/LED-Projector-Lamp-v10/> (accedido 15 de noviembre de 2022).
- [13] *Replacing 50 Watt LED Lamp And Making LED Reflector For Diy Projector || Part - 3*, (13 de enero de 2021). Accedido: 15 de noviembre de 2022. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=V7AcqQZ6NRw>
- [14] H.-G. Rhee, «Direct Laser Lithography and Its Applications», en *Lithography.*, M. Wang, Ed. London: InTech., 2010, pp. 1-16. Accedido: 25 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/3195>
- [15] C. A. Rothenbach y M. C. Gupta, «High resolution, low cost laser lithography using a Blu-ray optical head assembly», *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50, n.º 6, pp. 900-904, jun. 2012, doi: 10.1016/j.optlaseng.2011.12.004.
- [16] Y. Kajihara, T. Takeuchi, S. Takahashi, y K. Takamasu, «Development of a nano-stereolithography system using evanescent light for submicron fabrication», p. 4, 2006.
- [17] R. A. A. Campbell, R. W. Eifert, y G. C. Turner, «Openstage: A Low-Cost Motorized Microscope Stage with Sub-Micron Positioning Accuracy», *PLoS ONE*, vol. 9, n.º 2, p. e88977, feb. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0088977.

- [18]D. Schneidereit, L. Kraus, J. C. Meier, O. Friedrich, y D. F. Gilbert, «Step-by-step guide to building an inexpensive 3D printed motorized positioning stage for automated high-content screening microscopy», *Biosens. Bioelectron.*, vol. 92, pp. 472-481, jun. 2017, doi: 10.1016/j.bios.2016.10.078.
- [19]M. J. Zult y J. W. Spronck, «Robust Low-Cost Planar Positioning Stage», p. 14.
- [20]ThingEngineer, «3D Printed Laser XY Scanner - Draw, Cut, Engrave, or Scan», *Instructables*. <https://www.instructables.com/Low-Cost-DIY-Stepper-Motor-Laser-XY-Scanner-Cutter/> (accedido 24 de noviembre de 2022).
- [21]J. Campbell, «Laser XY Scanner». 10 de julio de 2022. Accedido: 24 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/ThingEngineer/Laser-XY-Scanner>
- [22]«sf-aw210.jpg (JPEG Imagen, 801 × 1499 píxeles)». <https://www.repairfaq.org/sam/sf-aw210.jpg> (accedido 23 de septiembre de 2022).
- [23]R. Campbell, «OpenStage». 15 de mayo de 2022. Accedido: 15 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/raacampbell/openstage>
- [24]«Marlin 3D Printer Firmware». Marlin, 14 de septiembre de 2022. Accedido: 15 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin>
- [25]«gnea/grbl». gnea, 15 de septiembre de 2022. Accedido: 15 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/gnea/grbl>
- [26]D. K. Prasanga, E. Sariyildiz, y K. Ohnishi, «Compensation of Backlash for Geared Drive Systems and Thrust Wires Used in Teleoperation», *IEEJ J. Ind. Appl.*, vol. 4, n.º 5, pp. 514-525, 2015, doi: 10.1541/ieejia.4.514.
- [27]J. Pollmann-Retsch *et al.*, «Invited Paper: UHP-lamp systems for projection applications», *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 15, n.º 10, p. 789, 2007, doi: 10.1889/1.2798817.

Bibliografía

M. J. Madou, *Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2002.

M. Wang, Ed., *Lithography*. London: InTech., 2010. Accedido: 25 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/3195>

Nanolithography: the art of fabricating nanoelectronic and nanophotonic devices and systems. Philadelphia, PA: Woodhead Pub, 2013.

M. Théry y M. Piel, *Micropatterning in cell biology*, 1st. edition. Amsterdam: Academic Press, 2014.

Apéndices

Apéndice A: Descripción y características de los controladores de los drivers utilizados

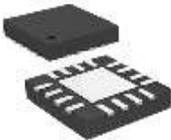
Documento A1: Datasheet con descripción y características del controlador del driver para motores a pasos STSPIN220

life.augmented

STSPIN220

Low voltage stepper motor driver

Datasheet - production data



QFN3X3 (16 pin)

Applications

Battery-powered stepper motor applications such as:

- Toys
- Portable printers
- Robotics
- Point of sale (POS) devices

Description

The STSPIN220 is a stepper motor driver which integrates, in a small QFN 8 x 8 mm package, both control logic and a low $R_{DS(on)}$ power stage.

The integrated controller implements PWM current control with fixed OFF time and a microstepping resolution up to 1/256th of a step.

The device is designed to operate in battery-powered scenarios and can be forced into a zero-consumption state, allowing a significant increase in battery life.

The device offers a complete set of protection features including overcurrent, overtemperature and short-circuit protection.

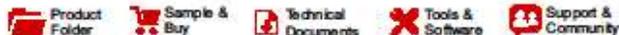
Features

- Operating voltage: from 1.8 to 10 V
- Maximum output current: 1.8 A_{max}
- $R_{DS(on)}$ HS + LS = 0.4 Ω typ.
- Microstepping up to 1/256th of a step
- Current control with programmable off-time
- Full protection set
 - Non-dissipative overcurrent protection
 - Short-circuit protection
 - Thermal shutdown
- Energy saving and long battery life with standby consumption less than 80 nA

November 2016DocID029296 Rev 81/30This is information on a product in full production.www.st.com

Apéndice A (cont.)

Documento A2: Datasheet con descripción y características del controlador del driver para motores a pasos DRV8834



DRV8834

SLV8819D – FEBRUARY 2012 – REVISED MARCH 2015

DRV8834 Dual-Bridge Stepper or DC Motor Driver

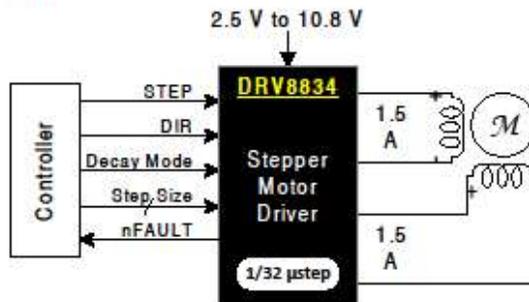
1 Features

- Dual-H-Bridge Current-Control Motor Driver
 - Capable of Driving Two DC Motors or One Stepper Motor
- Two Control Modes:
 - Built-In Indexer Logic With Simple STEP/DIRECTION Control and Up to 1/32-Step Microstepping
 - PHASE/ENABLE Control, With the Ability to Drive External References for > 1/32-Step Microstepping
- Output Current 1.5-A Continuous, 2.2-A Peak per H-Bridge (at $V_M = 5\text{ V}$, 25°C)
- Low $R_{DS(ON)}$: 305-m Ω HS + LS (at $V_M = 5\text{ V}$, 25°C)
- Wide Power Supply Voltage Range: 2.5 V to 10.8 V
- Dynamic t_{BLANK} and Mixed Decay Modes for Smooth Microstepping
- PWM Winding Current Regulation and Limiting
- Thermally Enhanced Surface-Mount Package

2 Applications

- Battery-Powered Toys
- POS Printers
- Video Security Cameras
- Office Automation Machines
- Gaming Machines
- Robotics

4 Simplified Schematic



3 Description

The DRV8834 provides a flexible motor driver solution for toys, printers, cameras, and other mechatronic applications. The device has two H-bridge drivers, and is intended to drive a bipolar stepper motor or two DC motors.

The output driver block of each H-bridge consists of N-channel power MOSFETs configured as an H-bridge to drive the motor windings. Each H-bridge includes circuitry to regulate or limit the winding current.

With proper PCB design, each H-bridge of the DRV8834 can driving up to 1.5-A RMS (or DC) continuously, at 25°C with a V_M supply of 5 V. The device can support peak currents of up to 2.2 A per bridge. Current capability is reduced slightly at lower V_M voltages.

Internal shutdown functions with a fault output pin are provided for overcurrent protection, short-circuit protection, undervoltage lockout and overtemperature. A low-power sleep mode is also provided.

The DRV8834 is packaged in a 24-pin HTSSOP or VQFN package with PowerPAD™ (Eco-friendly: RoHS & no Sb/Br).

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
DRV8834	HTSSOP (24)	7.80 mm x 4.40 mm
	VQFN (24)	4.00 mm x 4.00 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Apéndice A (cont.)

Documento A3: Datasheet con descripción y características del controlador del driver para motores a pasos A4988 (también describe al driver Sparkfun ROB-12859 “Big Easy Driver”)



A4988

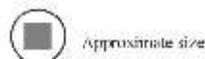
DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

Features and Benefits

- Low $R_{DS(on)}$ outputs
- Automatic current decay mode detection/selection
- Mixed and Slow current decay modes
- Synchronous rectification for low power dissipation
- Internal UVLO
- Crossover-current protection
- 3.3 and 5 V compatible logic supply
- Thermal shutdown circuitry
- Short-to-ground protection
- Shorted load protection
- Five selectable step modes: full, $1/2$, $1/4$, $1/8$, and $1/16$

Package:

28-contact QFN
with exposed thermal pad
5 mm × 5 mm × 0.90 mm
(HT package)



Approximate size

Description

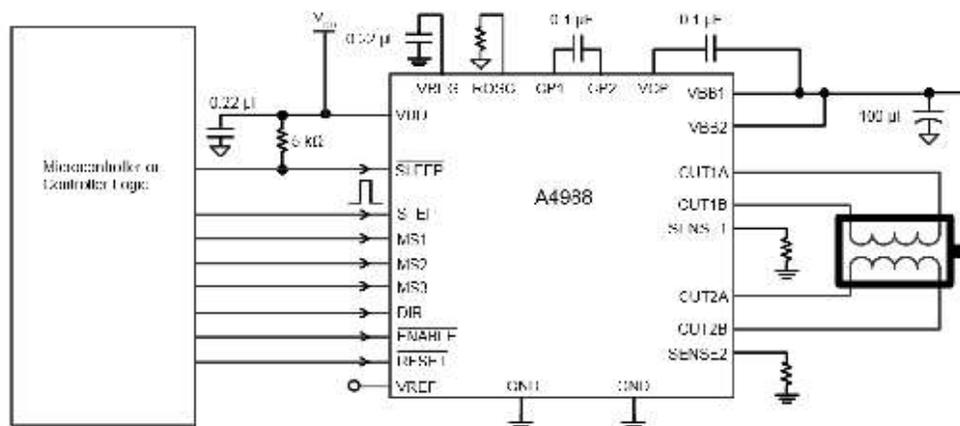
The A4988 is a complete microstepping motor driver with built-in translator for easy operation. It is designed to operate bipolar stepper motors in full-, half-, quarter-, eighth-, and sixteenth-step modes, with an output drive capacity of up to 35 V and +2 A. The A4988 includes a fixed off-time current regulator which has the ability to operate in Slow or Mixed decay modes.

The translator is the key to the easy implementation of the A4988. Simply inputting one pulse on the STEP input drives the motor one microstep. There are no phase sequence tables, high frequency control lines, or complex interfaces to program. The A4988 interface is an ideal fit for applications where a complex microprocessor is unavailable or is overburdened.

During stepping operation, the chopping control in the A4988 automatically selects the current decay mode, Slow or Mixed. In Mixed decay mode, the device is set initially to a fast decay for a proportion of the fixed off-time, then to a slow decay for the remainder of the off-time. Mixed decay current control results in reduced audible motor noise, increased step accuracy, and reduced power dissipation.

(Continued on the next page)

Typical Application Diagram



4988 DS, Rev 5

Apéndice A (cont.)

Documento A4: Datasheet con tabla de configuración y operación de la serie de drivers para motores a pasos CVD (describe al driver CVD518BR-K)

Stepper Motors

A-443

Connection and Operation (Bipolar Driver for 1.8°/0.9° Stepper Motor and Driver for 0.72°/0.36° Stepper Motor)

Names and Functions of Driver Parts

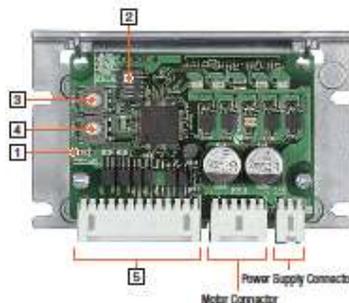
Signal Monitor Indicators

LED Indicator

Indication	Color	Function	Lighting Condition
PWR/ALM	Green	Power supply indication	When power is applied
	Red	Alarm indication	When a protective function is activated (blinking)

Alarm Contents

Stink Count	Function	Operating Condition
2	Overheat Protection	When the temperature of the driver board reaches 85°C
3	Overvoltage Protection	When the power supply voltage exceeds its permissible value
		When a large inertial load is stopped suddenly When a large load is hoisted
5	Overcurrent Protection	When an excessive current flows to the motor's output circuit
9	EEPROM error	When data of the driver is damaged
Lighting	CPU error	When the CPU driver malfunctions



Overview, Product Series

AC Input Motor & Driver

1.8°/Geared
AZ

1.8°/Geared
AR

0.72°/Geared
RBK

DC Input Motor & Driver

1.8°/Geared
AZ

1.8°/Geared
AR

1.8°/0.72°/0.36°
CVK

0.72°/0.36°/Geared
CBK

1.8°/Geared
RBK

Motor Only (Driver Only)

1.8°/0.9°
PKP/PK

Geared
PKP/PK

0.72°/0.36°
PKP/PK

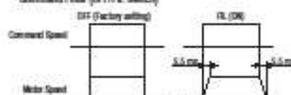
Driver

Accessories

Function Setting Switch

Indication	No.	Function
1/2P	1	Switches the pulse input mode between 1-pulse input mode and 2-pulse input mode.
OFF/SD	2	Switches the smooth drive function between enabled and disabled.
R2/R1	3	Use in combination with the step angle setting switch to set the step angle.
STOP	4	Switches the standstill current of motor to 25% or 50%.
OFF/FL	5	Switches the command filter between enabled and disabled.
-	6	Not used.

① Difference in the Motor Responsiveness Depending on the Command Filter (OFF/FL switch)



Step Angle Setting Switch

Indication	Function
STEP	Use in combination with the R2/R1 switch to set the step angle.

Step Angle Setting Switch (STEP) Scale	R2/R1 Switch: When Set to ON (R1)		R2/R1 Switch: When Set to OFF (R2)	
	Resolution (P/R)	Step Angle	Resolution (P/R)	Step Angle
0	500	0.72°	200	1.8°
1	1000	0.36°	400	0.9°
2	1250	0.288°	800	0.45°
3	2000	0.18°	1000	0.36°
4	2500	0.144°	1600	0.225°
5	4000	0.09°	2000	0.18°
6	5000	0.072°	3000	0.1125°
7	10000	0.036°	5000	0.072°
8	12500	0.0288°	6400	0.05625°
9	20000	0.018°	10000	0.036°
A	25000	0.0144°	12800	0.028125°
B	40000	0.009°	20000	0.018°
C	50000	0.0072°	25000	0.0144°
D	62500	0.00576°	25000	0.0140625°
E	100000	0.0036°	50000	0.0072°
F	125000	0.00288°	51200	0.0070125°

② Compared to the standard type, the high-resolution type has 2 times the resolution and 1/2 the step angle.

Example: When the R2/R1 switch is set to ON (R1) and the STEP switch is set to "1"
Resolution of High-Resolution Type: 500 × 2 = 1000
Step Angle of High-Resolution Type: 0.72° ÷ 2 = 0.36°

Running Current Setting Switch

Indication	Function
RUN	Sets the motor running current.

I/O Signal Connector

Indication	Pin No.	I/O	Signal Name	Function
CNS	1	Input	PUL+ (CW+)	Operation command pulse signal
	2		PUL- (CW-)	(Rotates the motor in the CW direction when in 2-pulse input mode.)
	3		DIR+ (CCW+)	Rotation direction signal
	4		DIR- (CCW-)	(Rotates the motor in the CCW direction when in 2-pulse input mode.)
	5		AWD+	Stop motor excitation.
	6	AWD-		
	7	CS+	Switches the step angle.	
	8	CS-		
	9	ALM+	Output	Outputs the alarm status for the driver (normally closed).
	10	ALM-		
	11	TIM+		Output when the state of excitation of the motor is the excitation home position.
	12	TIM-		

CAD Data Manuals

www.orientalmotor.eu

Contact TEL.

Germany/Others: 00800 22 55 86 22 | UK/Ireland: 01256-347090
France: 01 47 86 97 50 | Italy: 02-93906346 | Switzerland: 056 580 5045

A-443

Apéndice A (cont.)

Documento A5: Datasheet con descripción y características de la serie de drivers para diodo láser LDD (describe al componente de control del driver LDD-40)

DATASHEET AND OPERATING GUIDE

LDD P Series

Low Noise Laser Diode Drivers



VERSATILITY

The LDD P Series of laser diode drivers come in two compact models to work with all laser diode/photodiode configurations. Each model is available in 200 mA and 400 mA versions to best fit your laser diode requirements.

PRECISION & HIGH PERFORMANCE

When it is essential to have high performance in your application, these low noise drivers offer excellent current stability in Constant Current mode.

Precisely control the laser diode setpoint current with the on-board Output Current Adjust trimpot or via a remote voltage to the modulation input. The modulation input's small signal 3 dB bandwidth is DC to 2 MHz.

FEATURES AND BENEFITS

- Up to 400 mA current drive capacity
- +5 to +12 V single supply operation
- 12-turn trimpots control Current Setpoint and Limit Setpoint
- Operates all low power laser diodes
- Modulation up to 2MHz
- Slow start circuitry
- Buffered measurement output
- Small size
- 8-pin DIP package
- Low noise operation
- Constant Current mode operation

EASY INTEGRATION

Measure laser diode current from a buffered monitor output. Optional evaluation boards are available to assist with operating any LDD P series module.

LASER SAFETY FEATURES

In order to protect laser diodes, all LDD P series drivers are equipped with current limit protection, as well as slow start circuitry. Current limit protection ensures that the diode will not be overdriven, and the slow start circuitry protects the diode from thermal shock that can damage the laser at turn on.

ORDERING INFORMATION

PART NO	DESCRIPTION
LDD200: 200 mA Laser Diode Drivers	
LDD200 1P	Type A & B lasers
LDD200 2P	Type C lasers
LDD400: 400 mA Laser Diode Drivers	
LDD400 1P	Type A & B lasers
LDD400 2P	Type C lasers
Accessories	
LDDEVALP	Evaluation Board
WCB201	3 pin laser diode connection cable (for 9 mm laser diodes)

CONTENTS

	PAGE
QUICK CONNECT GUIDE	2
PIN DESCRIPTIONS	4
ELECTRICAL SPECIFICATIONS	5
SAFETY INFORMATION	7
OPERATING INSTRUCTIONS	8
WIRING INSTRUCTIONS: LDD EVALUATION BOARD	14
ADDITIONAL TECHNICAL INFORMATION	19
TROUBLESHOOTING	25
MECHANICAL SPECIFICATIONS	26
CERTIFICATION AND WARRANTY	27



406-587-4910

www.teamWavelength.com

© April 2018

WAVELENGTH
ELECTRONICS

Apéndice B: Tablas de especificaciones de los diferentes drivers

Tabla F1: Especificaciones del driver para motores a pasos STSPIN220	
Voltaje de entrada:	1.8 - 10 V DC
Corriente de salida por fase:	<1.1 A (1.3 A max.)
Número de fases:	2
Entrada lógica:	1.6 - 5.5 V
Micropasos	1/256

Tabla F2: Especificaciones del driver para motores a pasos DRV8834	
Voltaje de entrada:	2.5 - 10.8 V DC
Corriente de salida por fase:	<1.5 A (2 A max.)
Número de fases:	2
Entrada lógica:	2.5 - 5.5 V
Micropasos	1/32

Tabla F3: Especificaciones del driver para motores a pasos A4988	
Voltaje de entrada:	8 - 35 V DC
Corriente de salida por fase:	<1 A (2 A max.)
Número de fases:	2
Entrada lógica:	3 - 5.5 V
Micropasos	1/16

Tabla F4: Especificaciones del driver para motores a pasos A4988 Black	
Voltaje de entrada:	8 - 35 V DC
Corriente de salida por fase:	<1.2 A (2 A max.)
Número de fases:	2
Entrada lógica:	50 x 18 mm
Micropasos	1/16

Tabla F5: Especificaciones del driver para motores a pasos Sparkfun ROB-12859	
Voltaje de entrada:	8 - 35 V DC
Corriente de salida por fase:	1.4 - 1.7 A (2 A max.)
Número de fases:	2
Entrada lógica:	3.3 - 5 V
Micropasos	1/16

Tabla F6: Especificaciones del driver para motores a pasos CVD518BR-K	
Voltaje de entrada:	24 V DC
Corriente de entrada:	2.8 A
Corriente de salida por fase:	1.8 A
Número de fases:	5
Entrada lógica:	5 V
Micropasos:	1/254

Tabla F7: Especificaciones del driver para diodo láser LDD-40	
Voltaje de entrada:	4.5 - 6 V DC
Corriente de entrada:	20 - 1550 mA, en base a la configuración de salida
Corriente de salida:	10 - 1500 mA, ajustable
Regulación:	Control automático de corriente

Apéndice C: Tablas de especificaciones y gráficas velocidad - torque de los diferentes motores

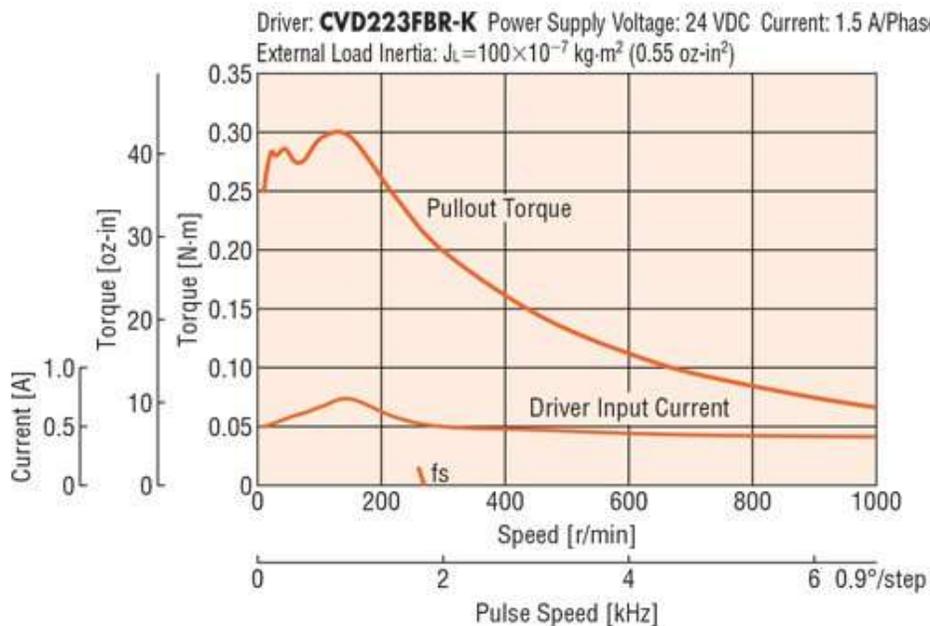
Tabla C1: Especificaciones del motor a pasos PKP243MD15B2	
Torque máximo	0.32 N·m
Corriente por fase	1.5 A
Fases	2
Pasos	400
Tamaño	NEMA 17

Tabla C2: Especificaciones del motor a pasos PKP544N18B2	
Torque máximo	0.3 N·m
Corriente por fase	1.8 A
Fases	5
Pasos	500
Tamaño	NEMA 17

Tabla C3: Especificaciones del motor a pasos PKP544MN18A	
Torque máximo	0.26 N·m
Corriente por fase	1.8 A
Fases	5
Pasos	1000
Tamaño	NEMA 17

■ Speed - Torque Characteristics (Reference Values) fs: Max. Starting Frequency

PKP243MD15A2/PKP243MD15B2

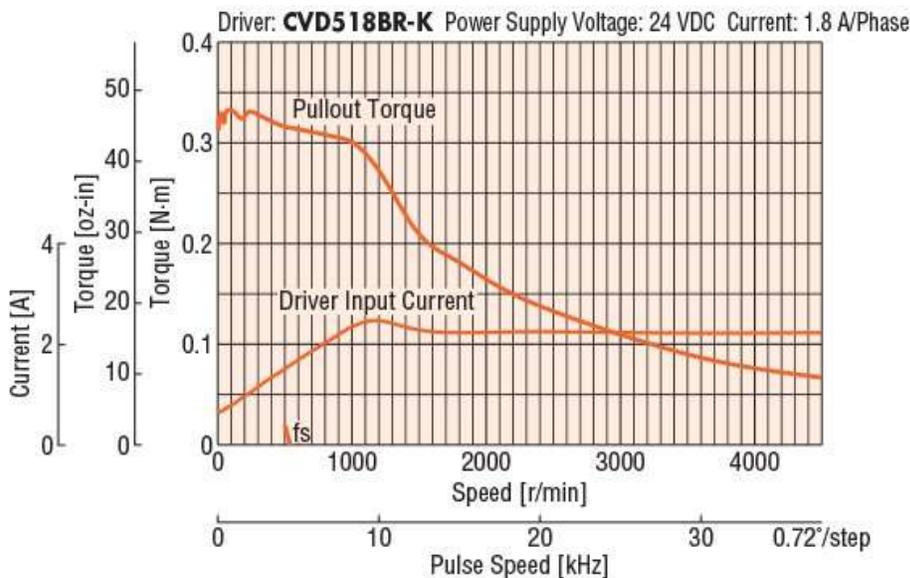


Gráfica C1: Gráfica velocidad - torque del motor a pasos PKP243MD15B2

Apéndice C (cont.)

Speed - Torque Characteristics (Reference value) fs: Max. Starting frequency

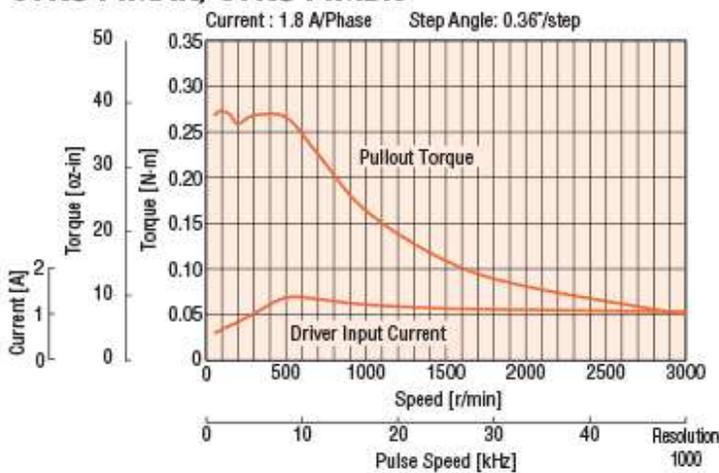
PKP544N18A2/PKP544N18B2



Gráfica C2: Gráfica velocidad - torque del motor a pasos
PKP243MD15B2

Speed - Torque Characteristics

CVK544MAK/CVK544MBK



- The pulse input circuit responds up to 1 MHz with a pulse duty of 50%.

Gráfica C3: Gráfica velocidad - torque del motor a pasos
PKP243MD15B2

Apéndice D: Datasheets de las resinas, los catalizadores y los fotoiniciadores

Documento D1: Datasheet del catalizador N-DMMA

SIGMA-ALDRICH

sigmaaldrich.com

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: www.sigmaaldrich.com

Email USA: techserv@sigmaaldrich.com

Outside USA: eurtechserv@sigmaaldrich.com

Product Specification

Product Name:

N,N-Dimethylacrylamide - 99%, contains 500 ppm monomethyl ether hydroquinone as inhibitor

Product Number:

274135

CAS Number:

2680-03-7

MDL:

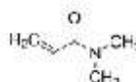
MFCD00008626

Formula:

C₅H₉NO

Formula Weight:

99.13 g/mol



TEST

Specification

Appearance (Color)

Colorless

Appearance (Form)

Liquid

Infrared spectrum

Conforms to Structure

Purity (GC)

≥ 98.5 %

Stabilizer

MeHQ, Approximately 500ppm

Specification: PRD.1.ZQS.1000006931

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

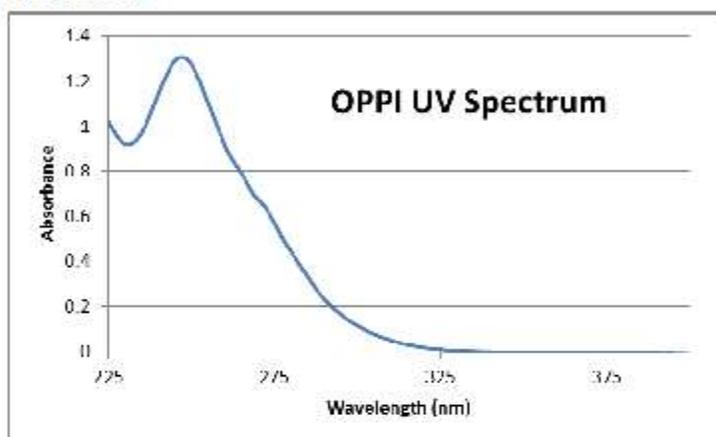
Apéndice D (cont.)

Documento D2: Datasheet del fotoiniciador OPPI con gráfica de absorbancia de luz

Typical specifications

APPEARANCE: Off White Powder
MELTING POINT: 56-58 C

Absorption Spectrum



Suggested starting formulation

OPPI should be added between 1-3% for use with broad spectra mercury lamps. For LED applications, equal amounts of sensitizer (i.e. ITX or 9,10 DEA) should be used to help facilitate surface cure.

Safety and Handling

OPPI should be handled in accordance with good industrial practice. Detailed information is provided in the SDS.

OPPI is sensitive to visible light and any exposure to sunlight should be avoided.

Note: OPPI is also available with PF₆ and TPB counter ions

Hampford Research, Inc. disclaims any liability incurred in connection with the use of the data contained in this bulletin. Furthermore, nothing contained in this bulletin shall be construed as a recommendation to use any product in conflict with existing patents.

Phone: (203) 375-1137

Hampford Research, Inc.
54 Veterans Boulevard
Stratford, CT 06615

Fax: (203) 386-9754

Apéndice D (cont.)

Documento D3: Datasheet del fotoiniciador H-Un 470 con gráfica de absorbancia de luz

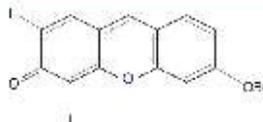


Technical Data Sheet
H-Nu 470

Visible/UV-Visible
Light Photoinitiator

Product Description

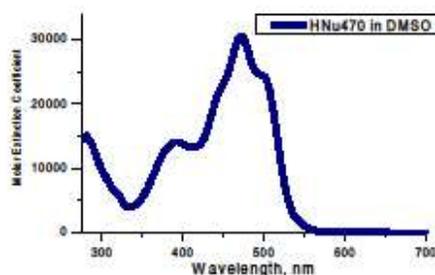
Name: 5,7-diiodo-3-butoxy-6-fluorone
CAS # 161728-47-8
Formula: C₁₇H₁₄I₂O₃
Synonyms: DIBF, H-Nu 470



- Initiates both free-radical and cationic photopolymerization, using a different set of co-initiators depending on the polymerization process
- Type II photoinitiator: H-Nu 470 acts as a light harvester, followed by energy or electron transfer to a co-initiator molecule; produced reactive species activate photopolymerization
- Commercial photoinitiator (TSCA status: LVE), non-toxic (LD50>5000 mg/kg)

Advantages

- ✓ High absorptivity, low concentrations are needed (0.01-0.15% by weight)
- ✓ Capable of significant depth of cure > 1 inch
- ✓ Time and energy savings when one-pass thick cure can replace thin multilayered coatings
- ✓ Initiator bleaching (bright red to pale orange/no color) upon light interaction can act as cure indicator



Typical Properties

Property	Test Method	Typical Value
Absorbance Maximum	UV Visible spectroscopy	470 nm
Appearance	Visual	Orange Powder
Melting point	Melting point Analysis	>270 °C
Molar Extinction Coefficient	UV Visible spectroscopy	30,200 (at 470nm)

Applications Recommendations

- ✓ Direct solubility of H-Nu 470 in resins can be difficult, pre-dissolution in one of the following resins/solvents before adding resin is recommended:

Free-Radical Diluents					Cationic Diluents					
DMAA	VMOX	THFA	HDDA	HPMA	I BOA	Heloxyl61	Heloxyl62	EOXA ¹	ECC ²	Eponex1510
S	S, T*	S, T*	I	P, T*	I	I	S	S, T*	S, T*	S, T*

% of H-Nu 470 in diluent is: S-soluble T*-requires heat (60°C for several hours) P-partially soluble I-insoluble
1 = 3-ethyl-3-hydroxymethylacetone
2 = 3,4-epoxycyclohexylmethyl-3,4

Note: DMAA is an excellent solvent for H-Nu 470, but it **cannot** be used in cationic polymerization as it inhibits process.

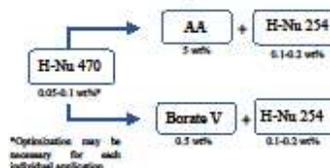
- ✓ The presence of any undissolved red particles is an indication of incomplete solubility. More heating (60°C) or stirring may help with incorporation, or pre-dissolution using different diluents is recommended.

Polymerization mechanisms

Free-Radical Cure (Acrylates)

- ✓ H-Nu 470 concentration range spans from 0.05 to 0.2 wt%, depending on a cure thickness. 0.05 wt% is recommended starting point for thick cure (>1mm) and 0.1wt% for thin cure.
- ✓ Amine acrylates (AA) are needed as co-initiators at 5-10 wt%. If amine use is counterindicated (acidic adhesion promoter, outgassing), as an alternative, another co-initiator, Borate V (0.5 wt%) may provide similar cure response as typical amine co-initiators
- ✓ H-Nu 254 iodonium salt is recommended for acceleration.

Recommended starting concentrations:



Spectra Photopolymers 27800 Lemayne Rd, Ste. J Millbury, Ohio 43447
Phone: (419)837-9783 Fax: (419)837-6816 info@sglinc.com

Apéndice D (cont.)

Documento D4: Datasheet del fotorresistor SU-8 con descripción y características



NANO™ SU-8

Negative Tone Photoresist Formulations 2-25

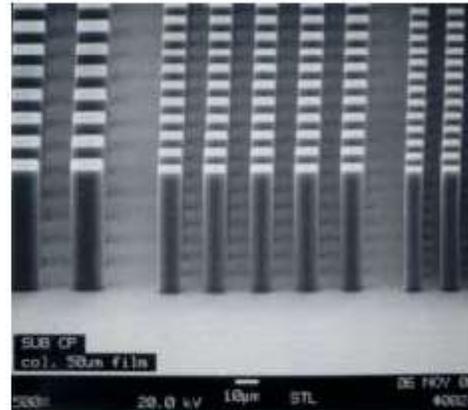
- High aspect ratio imaging with near vertical side walls
- Near UV (350–400nm) processing
- Film thicknesses from 1 to >200µm with single spin coat processes
- Superb chemical and temperature resistance

SU-8 is a high contrast, epoxy based photoresist designed for micromachining and other microelectronic applications, where a thick chemically and thermally stable image is desired. The exposed and subsequently cross-linked portions of the film are rendered insoluble to liquid developers. SU-8 has very high optical transparency above 360nm, which makes it ideally suited for imaging near vertical sidewalls in very thick films. SU-8 is best suited for permanent applications where it is imaged, cured and left in place.

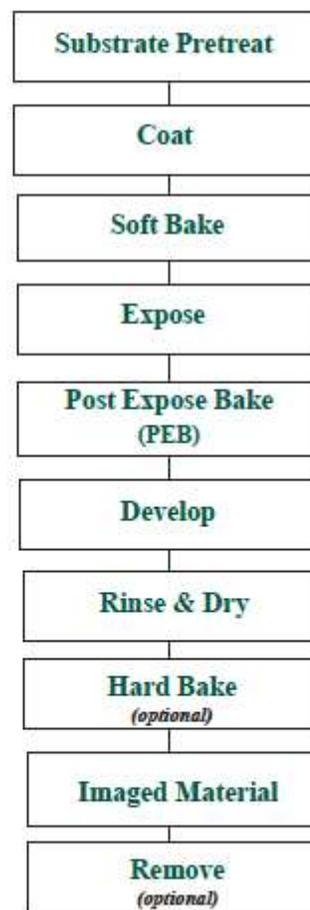
Process Guidelines

SU-8 is most commonly processed with conventional near UV (350–400nm) radiation, although it may be imaged with e-beam or x-ray. i-line (365nm) is recommended. Upon exposure, cross-linking proceeds in-two-steps (1) formation of a strong acid during the exposure process, followed by (2) acid-initiated, thermally driven epoxy cross-linking during the post exposure bake (PEB) step.

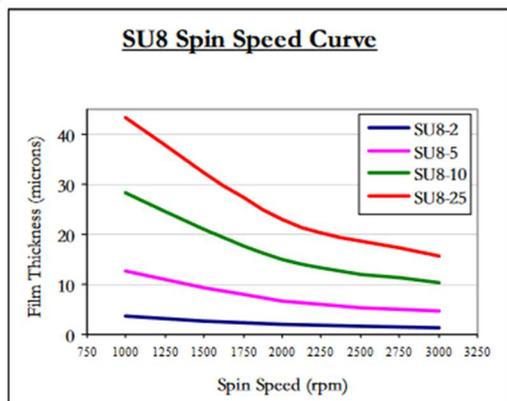
A normal process is: spin coat, soft bake, expose, post expose bake (PEB) and develop. A controlled hard bake is recommended to further cross-link the imaged SU-8 structures when they it will remain as part of the device. The entire process should be optimized for the specific application. A baseline process is given here to be used as a starting point.



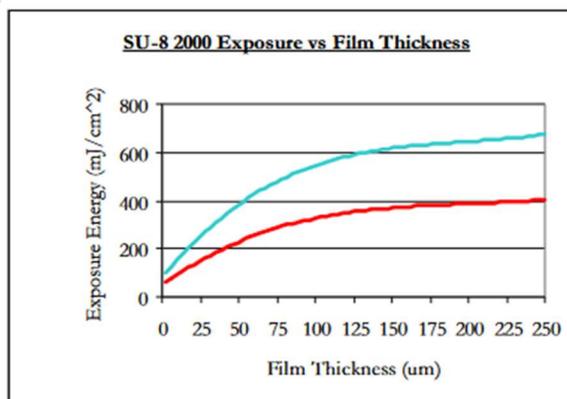
5µm, 10µm and 20µm post arrays in a 50µm thick film.



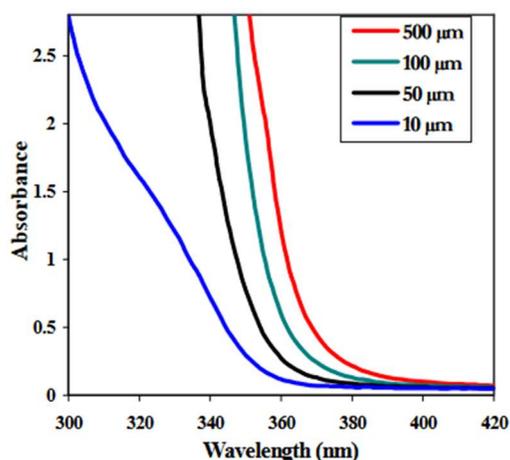
Apéndice D (cont.)



Gráfica D1: Curvas del grosor de película respecto a velocidad de centrifugado de diferentes resinas SU-8



Gráfica D2: Procesos recomendados de exposición a la dosis de acuerdo al grosor de la película de SU-8



Gráfica D3: Curvas de absorbancia en el espectro lumínico de acuerdo al grosor de la película de SU-8

Apéndice D (cont.)

Documento D5: Datasheet del fotorresistor SC1800 con descripción y características



ELECTRONIC MATERIALS
MICROELECTRONIC TECHNOLOGIES

MICROPOSIT™ S1800™ G2 SERIES PHOTORESISTS

For Microlithography Applications

DESCRIPTION

MICROPOSIT S1800 G2 Series Photoresists are positive photoresist systems engineered to satisfy the microelectronics industry's requirements for advanced IC device fabrication. The system has been engineered using a toxicologically-safer alternative casting solvent to the ethylene glycol derived ether acetates. The dyed photoresist versions are recommended to minimize notching and maintain linewidth control when processing on highly reflective substrates.

Substrate	Silicon
Photoresist	MICROPOSIT S1813 G2 Photoresist
Coat	12,300Å
Softbake	115°C/60 sec. Hotplate
Exposure	Nikon 1505 G6E, g-Line (0.54 NA), 150 mJ/cm ²
Develop	15 +50 sec. Double Spray Puddle (DSP) @ 21°C

ADVANTAGES

Product Assurance

- Lot-to-lot consistency through state-of-the-art physical, chemical and functional testing
- Filtered to 0.2 µm absolute

Coating Properties

- Cellosolve™ acetate and xylene-free
- Striation-free coatings
- Excellent adhesion
- Excellent coating uniformity
- A variety of standard viscosities are available for single-layer processing

Exposure Properties

- Optimized for g-line exposure
- Effective for broad-band exposure
- Reflective notch and linewidth control using dyed versions

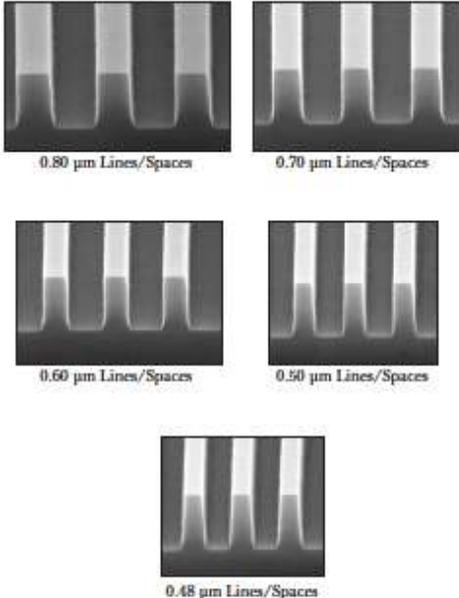
Develop Properties

- Optimized for use with the MICROPOSIT MF®-319 metal-ion-free developer family
- Compatible with metal-ion-bearing MICROPOSIT developers

Removal Property

- Residue-free photoresist removal using standard MICROPOSIT removers

Figure 1. Masking Linearity SEMs



0.80 µm Lines/Spaces

0.70 µm Lines/Spaces

0.60 µm Lines/Spaces

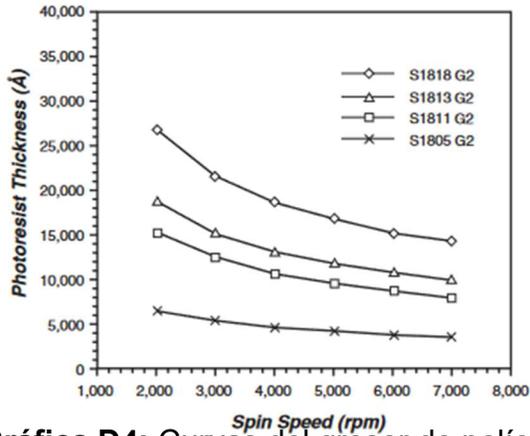
0.50 µm Lines/Spaces

0.48 µm Lines/Spaces

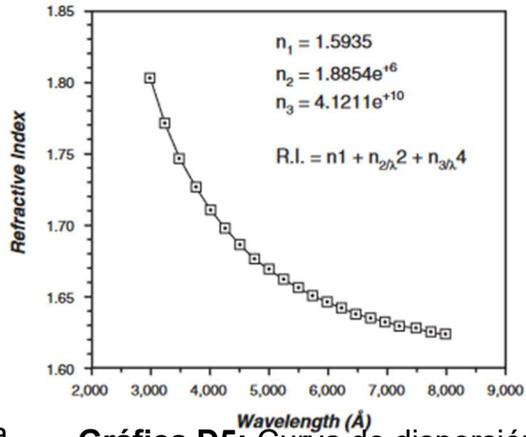
© 2006 Rohm and Haas Electronic Materials. All rights reserved. Not to be reproduced, in whole or part, without the express permission of Rohm and Haas Electronic Materials.

MEDW041, Rev. D
October 2006

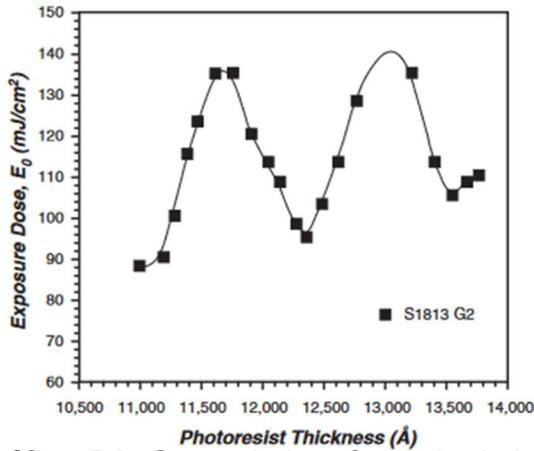
Apéndice D (cont.)



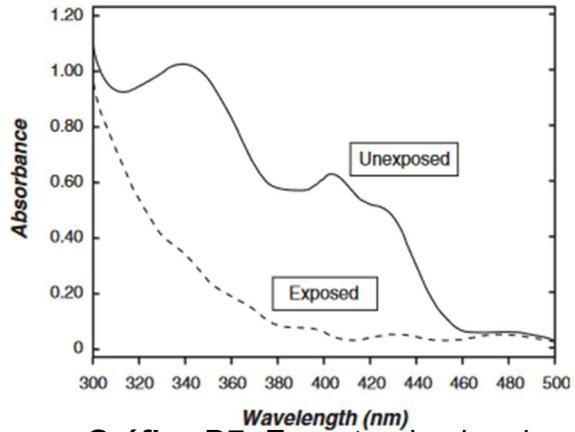
Gráfica D4: Curvas del grosor de película respecto a velocidad de centrifugado de diferentes resinas SC-1800



Gráfica D5: Curva de dispersión de la resina SC-1800



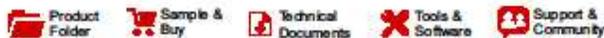
Gráfica D6: Curva de interferencia de la resina SC-1800



Gráfica D7: Espectro de absorción de la resina SC-1800

Apéndice E: Sistema óptico del proyector

Documento E1: Datasheet con descripción y características del chip DMD para proyector doméstico DLP6500



DLP6500

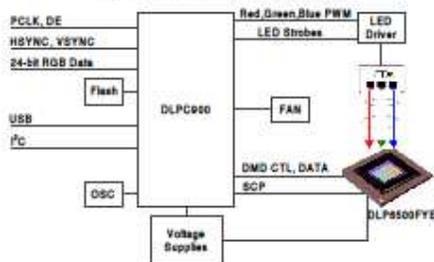
DLP60538 - OCTOBER 2014 - REVISED OCTOBER 2016

DLP6500 0.65 1080p MVSP S600 DMD

1 Features

- High Resolution 1080p (1920x1080) Array With > 2 Million Micromirrors
 - 0.65-Inch Micromirror Array Diagonal
 - 7.56 μm Micromirror Pitch
 - $\pm 12^\circ$ Micromirror Tilt Angle (Relative to Flat State)
 - Designed for Corner Illumination
- Designed for Use With Broadband Visible Light (420 nm - 700 nm)
 - Window Transmission 97% (Single Pass, Through Two Window Surfaces)
 - Micromirror Reflectivity 88%
 - Array Diffraction Efficiency 86%
 - Array Fill Factor 92%
- Two 16-Bit, Low Voltage Differential Signaling (LVDS), Double Data Rate (DDR) Input-data Buses
- Two Dedicated Controller Options at 400 MHz Input Data Clock Rate
- DLPC900 Digital Controller
 - Up to 9523 Hz (1-Bit Binary Patterns)
 - Up to 19.7 Giga-bits Per Second (1-Bit Binary Patterns)
 - Up to 1031 Hz (8-Bit Gray Patterns Pre-Loaded With Illumination Modulation), External Input Up to 360 Hz
- DLPC910 Digital Controller
 - Up to 11574 Hz (1-Bit Binary Patterns)
 - Up to 24 Giga-bits Per Second (1-Bit Binary Patterns)
 - Up to 1446 Hz (8-Bit Gray Patterns With Illumination Modulation)
- Integrated Micromirror Driver Circuitry

DLPC900 Simplified Diagram



2 Applications

- Industrial
 - 3D Scanners for Machine Vision and Quality Control
 - 3D Printing
 - Direct Imaging Lithography
 - Laser Marking and Repair
- Medical
 - Ophthalmology
 - 3D Scanners for Limb and Skin Measurement
 - Hyper-spectral Imaging
 - Hyper-spectral Scanning
- Displays
 - 3D Imaging Microscopes
 - Intelligent and Adaptive Lighting

3 Description

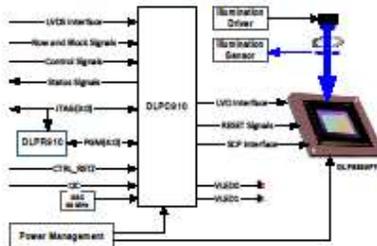
Featuring over 2 million micromirrors, the high resolution 0.65 1080p digital micromirror device (DMD) is a spatial light modulator (SLM) that modulates the amplitude, direction, and/or phase of incoming light. The unique capability offered by the DLP6500 makes it well suited to support a wide variety of industrial, medical, and advanced imaging applications. Reliable function and operation of the DLP6500 requires that it be used in conjunction with the DLPC900 or the DLPC910 digital controllers. This dedicated chipset provides full HD resolution at high speeds and can be easily integrated into a variety of end equipment solutions.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
DLP6500	FYE (350)	35.0 mm x 32.2 mm x 5.1 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

DLPC910 Simplified Diagram



IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Apéndice E (cont.)

Documento E2: Datasheet con condiciones de operación recomendadas para el chip DMD para proyector doméstico DLP6500



DLP6500

www.ti.com

DLPS053B – OCTOBER 2014 – REVISED OCTOBER 2016

Recommended Operating Conditions (continued)

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	NOM	MAX	UNIT
LVDS INTERFACE					
f_{clock}	Clock frequency for LVDS interface, DCLK (all channels)			400	MHz
V_{ID1}	Input differential voltage (absolute value) ⁽¹¹⁾	100	400	600	mV
V_{CM}	Common mode ⁽¹¹⁾		1200		mV
V_{LVDS}	LVDS voltage ⁽¹¹⁾	0		2000	mV
$t_{\text{LVDS_RSTZ}}$	Time required for LVDS receivers to recover from PWRDNZ			10	ns
Z_{di}	Internal differential termination resistance	95		105	Ω
Z_{LINE}	Line differential impedance (PWB/trace)	90	100	110	Ω
ENVIRONMENTAL⁽¹²⁾					
T_{ARRAY}	Array temperature – operational, long-term ^{(13) (14) (16)}	10		40 to 70 ⁽¹⁶⁾	$^{\circ}\text{C}$
	Array temperature – operational, short-term ^{(13) (14) (17)}	0		10	$^{\circ}\text{C}$
T_{WINDOW}	Window temperature – operational ⁽¹³⁾			85	$^{\circ}\text{C}$
T_{DELTA1}	Absolute temperature delta between any point on the window edge and the ceramic test point TP1. ⁽¹⁸⁾			26	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{DP-AVG}}$	Average dew point temperature (non-condensing) ⁽²⁰⁾			28	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{DP-ELR}}$	Elevated dew point temperature range (non-condensing) ⁽²⁰⁾	28		36	$^{\circ}\text{C}$
CT_{ELR}	Cumulative time in elevated dew point temperature range			24	Months
ILL_{UV}	Illumination, wavelength < 420 nm			0.68	mW/cm^2
ILL_{VIS}	Illumination, wavelengths between 420 and 700 nm			Thermally Limited ⁽²²⁾	mW/cm^2
ILL_{IR}	Illumination, wavelength > 700 nm			10	mW/cm^2

(11) Refer to Figure 4, Figure 5, and Figure 6.

(12) Optimal, long-term performance and optical efficiency of the Digital Micromirror Device (DMD) can be affected by various application parameters, including illumination spectrum, illumination power density, micromirror landed duty-cycle, ambient temperature (storage and operating), DMD temperature, ambient humidity (storage and operating), and power on or off duty cycle. TI recommends that application-specific effects be considered as early as possible in the design cycle.

(13) Simultaneous exposure of the DMD to the maximum [Recommended Operating Conditions](#) for temperature and UV illumination will reduce device lifetime.

(14) The array temperature cannot be measured directly and must be computed analytically from the temperature measured at test point 1 (TP1) shown in [Figure 15](#) and the package thermal resistance in [Thermal Information](#) using [Micromirror Array Temperature Calculation](#).

(15) Long-term is defined as the average over the usable life.

(16) Per [Figure 1](#), the maximum operational case temperature should be derated based on the micromirror landed duty cycle that the DMD experiences in the end application. Refer to [Micromirror Landed-on/Landed-Off Duty Cycle](#) for a definition of micromirror landed duty cycle.

(17) Array temperatures beyond the specified long-term operational DMD temperature are recommended for short-term conditions only (for example, power-up). Short-term is defined as cumulative time over the usable life of the device and is less than 500 hours.

(18) The locations of thermal test points TP2, TP3, TP4 and TP5 in [Figure 15](#) are intended to measure the highest window edge temperature. If a particular application causes another point on the window edge to be at a higher temperature, a test point should be added to that location. This will ensure that the window bond temperature does not exceed the limits in [Absolute Maximum Ratings](#).

(19) Temperature delta is the highest difference between the ceramic test point 1 (TP1) and anywhere on the window edge as shown in [Figure 15](#). The window test points TP2, TP3, TP4 and TP5 shown in [Figure 15](#) are intended to result in the worst-case delta temperature. If a particular application causes another point on the window edge to result in a larger delta temperature, that point should be used.

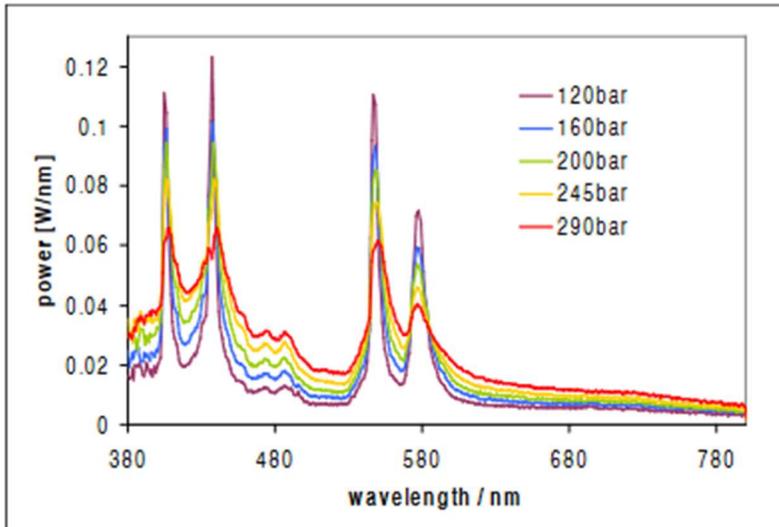
(20) The average over time (including storage and operating) that the device is not in the 'elevated dew point temperature range'.

(21) Exposure to dew point temperatures in the elevated range during storage and operation should be limited to less than a total cumulative time of CT_{ELR} .

(22) Refer to [Thermal Information](#) and [Micromirror Array Temperature Calculation](#).

Apéndice E (cont.)

Espectro lumínico producido por lámparas de mercurio UHP, usadas en proyectores domésticos.



Gráfica E1: Curva que muestra el espectro lumínico de diferentes modelos de lámpara de mercurio UHP para proyector doméstico [27].

Apéndice F (cont.)

Peak Wavelength	Radiant flux (Power) unit: mw@700mA		
	Bin Code	Min	Max
U2: 365~370nm	P35	3,000	3,500
	P40	3,500	4,000
	P45	4,000	4,500
	P50	4,500	5,000

Tabla F1: Configuraciones de potencia lumínica del LED IN-C68QA(X)TM a 700 mA, expresado en mW



Figura F1: Fotografías de la construcción de una lámpara para proyector a partir de un LED de alta potencia, un disipador de calor y un reflector de linterna de mano, cortesía del usuario Claudiopolis en el sitio web Instructables [12]. Para activarlo se debe conectar el LED a una fuente de poder externa, y para integrar al proyector, debe seguirse el siguiente procedimiento:

- Remover la lámpara del proyector.
- Abrir la tarjeta madre del proyector; en ella, buscar con un multímetro una señal lógica de 5V que se activa al encender y se desactiva justo antes de encenderse el LED que indica que la lámpara no está.
- Puentear dicha salida lógica con una fuente de 5V dentro de la misma tarjeta.
- Colocar lámpara en su espacio correspondiente, encender y conectar proyector normalmente. La lámpara se enciende por separado.

Apéndice H: Sistema óptico láser

Documento H1: Datasheet de diodo láser de 405 nm a 100 mW, similar al usado por la cabeza escritora Blu-Ray



405nm Laser Diode

■ Features

- Output Power: 100mW (CW)
- Efficient Quantum Well Structure
- Standard TO-18 Package



■ Absolute Maximum Ratings

(Tc=25°C)

Item	Symbol	Absolute Maximum Ratings	Unit
Optical Output Power	Po	100	mW
LD Reverse Voltage	Vr (LD)	5	V
PD Reverse Voltage	Vr (PD)	-	V
Storage Temperature	Tstg	-40~85	°C
Operating Case Temperature	Tc	-10~70	°C

■ Initial Electrical/Optical Characteristics

(Tc=25°C)

Item	Condition	Symbol	Typ.	Unit
Optical Output	CW	Po	100	mW
Peak Wavelength*	Po=100mW	λ_p	405	nm
Threshold Current	CW	Ith	≤ 0.035	A
Operating Current	Po=100mW	Iop	≤ 0.12	A
Slope Efficiency	CW	η	≥ 1.3	W/A
Operating Voltage	Po=100mW	Vop	≤ 4.6	V
FWHM Beam Divergence	Po=100mW	$\theta_{//}$	≤ 9	deg.
		θ_{\perp}	≤ 20	deg.
Wavelength	Po=100mW		0.3	nm/°C
Temperature Coefficient				
Polarization	Po=100mW		TE	

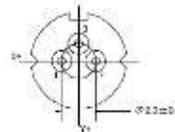
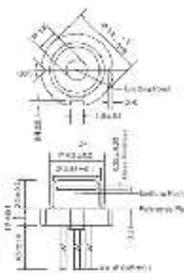
* Measuring specifications.

All figures in this specification are measured by CNI's method and may contain measurement deviations

The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice.

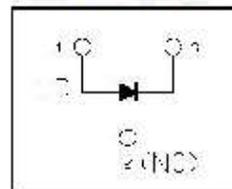
Outline Dimension

TO-18 Package



(Unit: mm)

Pin Connection



Changchun New Industries Optoelectronics Tech. Co., Ltd

<http://www.cnilaser.com>

◆ CONTACT

No.668, Chuangxin Road, High-tech zone, Changchun 130012, China

Phone: 0086-431-85603799

Fax: 0086-431-87020258

Apéndice H (cont.)

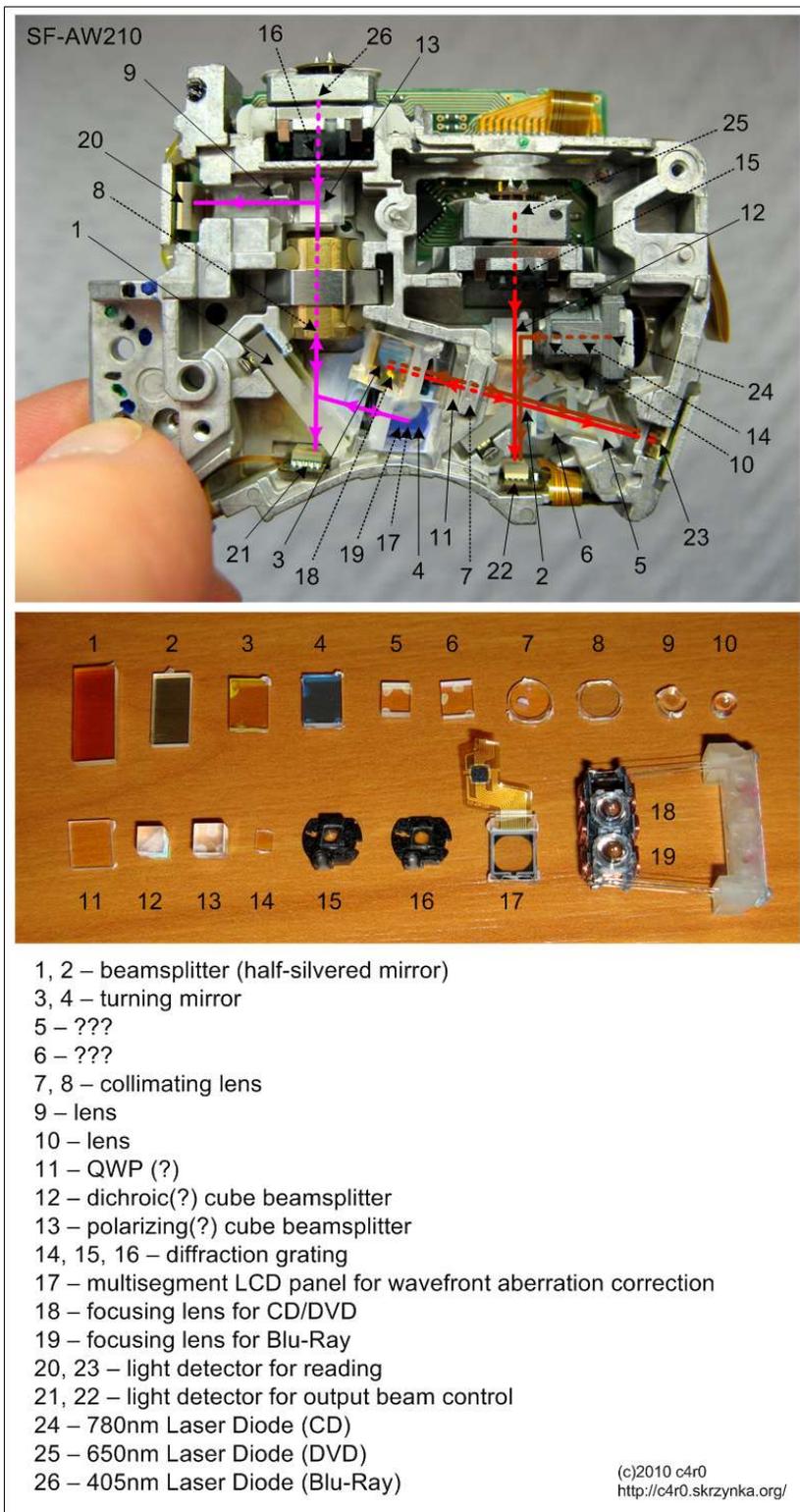


Figura H1: Fotografía de cabeza escritora de Blu-Ray SF-AW210, y listado de las partes que componen a su arreglo óptico. Obtenida de repairfaq.org [22].