



INAOE

**INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y
ELECTRÓNICA.**

REPORTE TÉCNICO

No. 698

COORDINACIÓN DE ÓPTICA

Fabricación de elementos ópticos con forma libre

Dr. Agustín Santiago Alvarado

Dr. Fermín Salomón Granados Agustín

Dr. Alejandro A. Cornejo Rodríguez

Dra. Elizabeth Percino Zacarias

Jorge de Jesús Alvarado Martínez

M. M. Víctor Manuel Cruz Martínez

11 de julio de 2025

Luis Enrique Erro No. 1

Sta. Ma. Tonantzintla

72840, Puebla, México

©INAOE 2025

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes mencionando la fuente.



Fabricación de elementos ópticos con forma libre

Contenido

Resumen	1
1 Introducción	1
2 Superficies con forma libre	2
3 Técnicas de Fabricación	3
3.1 Mecanizado de Precisión	4
3.1.1 Fresado de ultra-precisión de diamante	5
3.1.2 Fresado de ultra-precisión (UPM)	6
3.1.3 Corte aéreo de ultra-precisión (UPFC)	6
3.2 Litografía y Grabado	7
3.2.1 Litografía UV convencional	8
3.2.2 Litografía por proyección (mask aligner)	9
3.2.3 Litografía electrónica (e-beam lithography)	9
3.2.4 Litografía profunda con protones (DLP)	10
3.2.5 Litografía nanoimprint (NIL)	11
3.2.6 Litografía por inmersión (para mayor resolución)	11
3.3 Fabricación Aditiva	12
3.4 Técnicas por replicación	13
3.5 Método de reflujo térmico o fusión por resistencia	14
3.6 Técnica de escritura directa	15
3.7 Técnica de ablación con láser	15
3.8 Técnica de impresión a microchorro	17
3.9 Moldeo por inyección	17
3.10 Moldura de vidrio	18
4 Técnicas de acabado	20
4.1 Revestimiento	20
4.2 Rectificado de ultraprecisión (UPG)	20
4.3 Pulido del bonete	21
4.4 Acabado magnetorreológico (RM)	22
4.5 Pulido láser	22
4.6 Pulido por haz de iones (IBP)	23
5 Metrología asociada	24
5.1 Procesos de Acabado	24
5.2 Metrología de contacto	25
5.3 Metrología basada en no contacto	26
5.4 Medición de superficie en máquina (OMSM)	29
6 Aplicaciones	30
7 Retos tecnológicos	33
8 Conclusiones	34
9 Referencias	34

Resumen

La nueva generación de la instrumentación óptica se ha marcado con el empleo de la óptica de forma libre, sobre todo en estas últimas décadas. La óptica de forma libre ha permitido la reducción en tamaño, peso y ampliado los campos de aplicación de la instrumentación óptica. Esto ha sido posible gracias al desarrollo de nuevos materiales y a las técnicas de fabricación que se ha desarrollado, permitiendo con ello la generación de micro y nano componentes con forma libre, además de impactar en la instrumentación tradicional. Es por ello, que en este reporte se aborda el desarrollo de las técnicas más empleadas en la de fabricación de componentes ópticas con forma libre, la descripción de una superficie de forma libre, los materiales comúnmente empleados y algunas de las técnicas de metrología empleadas en la inspección de estas componentes junto con sus áreas de aplicación. Finalmente, se presentan los retos y desafíos que existen junto con las conclusiones.

Palabras claves: Freeform, pruebas ópticas, técnicas de fabricación, manufactura

1. Introducción

Recientemente las superficies ópticas de forma libre son consideradas más a menudo para el desarrollo de nuevos instrumentos, ya que permite generar concentraciones, iluminación o imágenes deseadas con menos componentes ópticos, haciendo que los instrumentos sean compactos, ligeros, versátiles por mencionar algunas de sus características [1-5]. A su vez, permite mayor grado de libertad para realizar el diseño óptico de los componentes. Pero todo esto ha sido posible gracias al uso de nuevas técnicas de fabricación de dichos componentes y a la incorporación de nuevos materiales ópticos, como los materiales poliméricos, ya que para las técnicas tradicionales de fabricación es un gran desafío debido a que la infraestructura no es adecuada para ello [6-12].

Entre las técnicas existentes para fabricar elementos ópticos con forma libre se pueden describir en los siguientes grupos: a) técnicas aditivas, b) técnicas de desbaste, c) técnicas de copiado, y d) técnicas electro-químicas [13-42].

Es por ello, que en este reporte se describe a las superficies con forma libre y su representación matemática, además de revisar las técnicas existentes para la fabricación de elementos ópticos con forma libre, resaltando su funcionamiento, ventajas y desempeño. Finalmente se presentan algunas técnicas reportadas para evaluar la calidad de las superficies fabricadas junto con sus principales aplicaciones y desafíos [43-50].

2. Superficies con forma libre

Es un tipo de superficie óptica no tiene simetría rotatoria o lineal, a diferencia de las superficies tradicionales como las superficies esféricas o asféricas. También se conocen como superficies de invariancia rotacional sin eje, o como superficies axialmente desequilibradas [1, 46]. Las superficies no convencionales están diseñadas con geometrías complejas y personalizadas, lo que permite un control de la luz más preciso y abre nuevas posibilidades en el diseño de sistemas ópticos. Entre sus principales características se encuentran la geometría compleja, los diseños personalizados, los sistemas compactos y el alto rendimiento.

Entre las aplicaciones más comunes se encuentran: Realidad aumentada y virtual, iluminación automotriz, sistemas de imagen, sistemas de iluminación y concentración [5]. Permitiendo con su uso una mayor flexibilidad en el diseño, reducción de tamaño y peso.

Las superficies ópticas de forma libre son componentes deseadas en el diseño óptico moderno, que permite soluciones innovadoras y de alto rendimiento en aplicaciones avanzadas y producción en masa. Normalmente introducidas en sistemas ópticos compactos o de alta precisión, estas superficies han llegado a revolucionar los sistemas ópticos tradicionales.

La descripción matemática de las superficies de forma libre puede ser global o local. Es por eso que se han desarrollado diferentes funciones para su representación, como las de base radial, splines, wavelets, híbridos, polinomios 2-Q, polinomios X-Y, polinomios Zernike, superficies asféricas con términos de deformación, etc. [5, 48-50]. Las representaciones matemáticas más empleadas de las superficies con forma libre, es la de superficies asféricas con deformación en forma radial o por componentes X, Y, como las mostradas en las siguientes ecuaciones [9, 48-50]

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N a_i Z_i(\rho, \varphi), \quad (1)$$

y

$$Z(x, y) = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k_x)c_x^2 x^2 - (1+k_y)c_y^2 y^2}} + \sum_{i=2}^N A_i x^m y^n, \quad (2)$$

Donde c es el inverso del radio de curvatura, r es el semidiámetro de la superficie, a_i son los coeficientes de deformación, Z_i son los coeficientes de Zernike. A_i son los coeficientes polinomiales, k , k_x y k_y son las constantes cónicas en la dirección de los ejes, c_x y c_y son los radios de curvatura en la dirección x e y

$$i = \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2} + 1, \quad (3)$$

Una vez diseñada una componente óptica de forma libre, conocida su aplicación y el tipo de material que será utilizado, el siguiente paso es definir la técnica de fabricación que será empleada. Por lo que en la siguiente sección se describen las técnicas de fabricación más empleadas, y que permiten el uso de componentes poliméricas y de vidrio.

3. Técnicas de Fabricación

Las técnicas de fabricación de componentes ópticos de forma libre, surgen para fabricar elementos simples, arreglos de lentes, lentes únicas o en serie, del tipo micro y nano componentes, lentes milimétricas o del orden de centímetros, del tipo GRIN o sintonizables. En esta sección se describen las técnicas más empleadas y reportadas en la literatura para manufacturar este tipo de componentes.

Entre las técnicas existentes para elaborar superficies de forma libre se encuentran: Fotolitografía de grabado húmedo o seco, mecanizado láser, microperforación, impresión por chorro de polvo [5-7], moldeo de vidrio de precisión, estampado en caliente [9, 10, 17-20], moldeo por inyección y compresión [10, 13-15, 20], molienda, torneado de diamante de ultra precisión, micro-fresado, grabado electroquímico, oxidación local, escritura láser directa o modelado con rayos láser, irradiación láser CO₂, ablación láser [5, 8, 26-30, 32-33], catapultación láser, [20, 34], litografía de haz (de electrones, de iones, protones) [6, 7, 9, 32, 36]. También existen técnicas por expansión fototérmica [36], intercambio iónico [44], grabado de iones reactivos, reflujo fotoresistente [45-46], fotopolimerización [44] por mencionar algunas [42].

En el caso de la técnica de intercambio de iones se utiliza en materiales de vidrio para producir lentes tipo GRIN con formas libres, para reflujo térmico se emplea con materiales fotorresistentes, en el de grabado iónico reactivo de lentes de reflujo térmico se emplea en sílice fundido, la técnica de escritura directa en laser se emplea en materiales poliméricos, la técnica de litografía profunda con protones es ocupada principalmente en PMMA, por su parte la técnica de ablación con láser generalmente es empleada en Policarbonatos, para el caso de microcomponentes hechas de polímeros epoxi se utiliza la técnica de impresión por microinyección, y así cada técnica tiene sus particularidades en la fabricación de componentes con forma libre.

Estas técnicas siguen siendo desafiantes para la producción en masa, ya que algunas requieren procesos de fabricación complicados, donde se deben encontrar parámetros óptimos para evitar alterar los parámetros ópticos deseados como perfiles, distribución de índices de refracción, o presentar estrés térmico residual debido a la contracción o generar distribución de índices no homogéneos y birrefringencia [49], además de que muchas de ellas son para generación de micro y nano componentes.

Sin embargo, difieren en que algunos métodos de fabricación son más adecuados que otros para la creación rápida de prototipos, para la fabricación en masa o para la integración monolítica.

Así mismo, existen varias técnicas para obtener microlentes GRIN en un sustrato de vidrio o plástico: como la técnica de intercambio selectivo de iones en un sustrato de vidrio adecuado [46], la de polimerización por difusión en plásticos [47], deposición química de vapor, irradiación de neutrones,

relleno de iones y crecimiento de cristales [36, 52]. Un ejemplo de fabricación de lentes GRIN, es el mostrado en la figura 1.

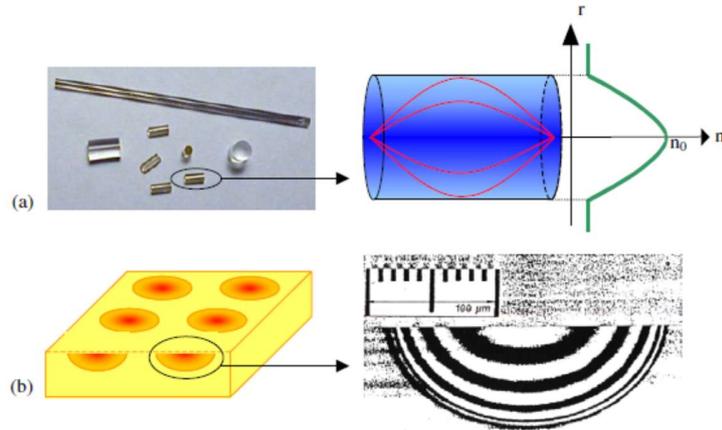


Figura 1. Fabricación de lentes GRIN. a) Lente, b) sustrato de vidrio [53].

Durante el proceso de intercambio iónico el sustrato está blindado con una máscara para protegerlo contra el intercambio iónico no deseado, excepto en pequeñas aberturas circulares que definen las huellas de las micro lentes planas. El sustrato se sumerge en un baño de una sal fundida elegida adecuadamente, Las lentes GRIN de varilla o cilíndricas tiene aplicaciones en fotocopiadoras, sistemas de fax, lectores de códigos de barras y sistemas de comunicación.

En las siguientes subsecciones se describen algunas de las técnicas de fabricación de componentes.

3.1 Mecanizado de Precisión

La técnica de mecanizado de precisión emplea un torno de diamante CNC para crear superficies complejas con alta precisión. Es comúnmente empleada para generar lentes metálicas y poliméricas. En la literatura se reportan precisiones menores de 10 nm Ra, empleada para generar componentes con geometrías complejas del tipo convexas y cóncavas simples. Para ello, se hace uso de herramientas de carburo o de diamante, el inconveniente es que requiere de post procesamiento para mejorar el acabado superficial. Se basa en sistemas CNC de ultra alta precisión, con sistemas de medición interferométricos para verificar geometría en tiempo real. Ideal para lentes de vidrio con forma libre. Una imagen de este sistema es mostrada en la figura 2.

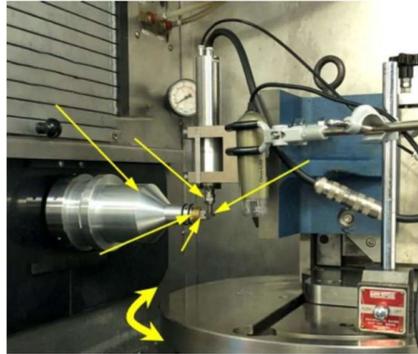


Figura 2. Torno CNC con herramienta de diamante [5].

3.1.1 Fresado de ultra-precisión de diamante

Dentro de las técnicas de mecanizado se encuentra la de fresado de ultra- precisión, la cual consiste en la eliminación de capas delgadas de material por medio de una herramienta de diamante, dando como resultado, la creación de una superficie con forma lisa y de alta precisión. La punta de diamante ejerce la fuerza de corte y la fuerza normal en la capa superior de la superficie de la pieza de trabajo con parámetros de proceso como la alimentación y la profundidad de corte. El material se elimina en dos regímenes, es decir, modo dúctil [54] y modo quebradizo [55] dependiendo del tipo de material. Se reportan rugosidades superficiales tan baja como 1 nm y una precisión superficial del orden de 100 nm. Una foto de una fresadora CNC de la marca Moore Nanotech 650 FG multi axis es mostrada en la figura 3.



Figura 3. Fresadora CNC Moore Nanotech 650 FG multi eje [5].

El servo de herramienta rápida (FTS) que emplea es un sistema que tiene un conjunto de servosistemas de microalimentación con capacidad de respuesta rápida para herramientas de mecanizado de ultra precisión.

Las categorías principales para los principios de actuación de FTS son hidráulico, magnetostrictivo, electroimán de esfuerzo de cizallamiento, electroimán de tensión normal y fuerza de Lorentz (tanto rotativa como lineal). Estos dispositivos se clasifican con respecto a las carreras o su rango de operación, como carrera larga por encima de 1 mm, intermedia entre 100 μm y 1 mm, y carrera corta por debajo de 100 μm .

Las desventajas del torneado de diamante de ultraprecisión son la vida útil de la herramienta de diamante, las altas demandas de energía y el alto costo de mantenimiento.

3.1.2 Fresado de ultra-precisión (UPM)

Otra técnica de manufactura de componentes de forma libre por mecanizado es el UPM, que es un proceso de mecanizado de alta velocidad donde la punta de la herramienta es de diamante y la herramienta de corte se fija y gira con el husillo. Esta técnica de mecanizado se utiliza para crear microestructuras [56] y canales [57] para diversas aplicaciones como biomédica, imagen e iluminación.

La figura 4, visualiza la disposición de fresado, la geometría de la herramienta, es decir, cero rastrillo, la punta de la herramienta de 1,5 mm del molino de diamante de cristal único y la geometría de fresado con ángulo de inclinación cero entre el eje normal de la pieza de trabajo y el eje de la herramienta de fresado, espesor de viruta sin cortar (t_c) y d_A .

Se ha mostrado que en aleación de aluminio 6061 la velocidad de avance afecta la rugosidad superficial, es decir, aumenta la rugosidad aritmética con el aumento de la velocidad de avance durante el corte horizontal y aumenta la rugosidad (R_a) con la disminución de la velocidad de avance durante el corte vertical [58].

La baja calidad de la superficie en materiales frágiles, la formación de rebabas, la deformación del material de la pieza de trabajo son algunas desventajas de UPM.



Figura 4. Fresadora CNC para UPM [59].

3.1.3 Corte aéreo de ultra-precisión (UPFC)

La técnica UPFC es un procedimiento de corte intermitente que utiliza una herramienta de diamante colocada en un husillo para eliminar material de una pieza de trabajo. La alimentación de las herramientas en la pieza de trabajo se aplica en una dirección perpendicular, lo que resulta en el

logro de perfiles de superficies con forma libre basadas en características proporcionadas por el diseñador. El proceso de corte por mosca se puede realizar de dos maneras, corte por mosca final (EFC) y corte por mosca radial (RFC).

La configuración experimental de UPFC se muestra en la Figura 5, donde la pieza de trabajo está montada en la mesa angular (eje b) de la máquina UPM de cinco ejes (Precitech Freeform 705G).

UPFC es un proceso que toma tiempo en comparación con el torneado por diamante, pero al aumentar la velocidad de avance en el primer corte reducirá el tiempo total de mecanizado. La rugosidad superficial alcanzada durante el primer corte es mayor, pero la forma obtenida es prácticamente inalterada para superficies de forma libre, se sugiere un segundo proceso de corte para minimizarse mediante bucles de corrección, es decir, cortes de desbaste rápidos, lo que también facilita la reducción de errores de forma. Donde este segundo corte debe ser guiado por pruebas ópticas en situ, para no perder la referencia. Por último, se realizan cortes de acabado para suavizar la superficie de forma libre sin cambiar su forma. Las limitaciones de esta técnica es que se emplea para superficies pequeñas micro y unos cuantos milímetros.

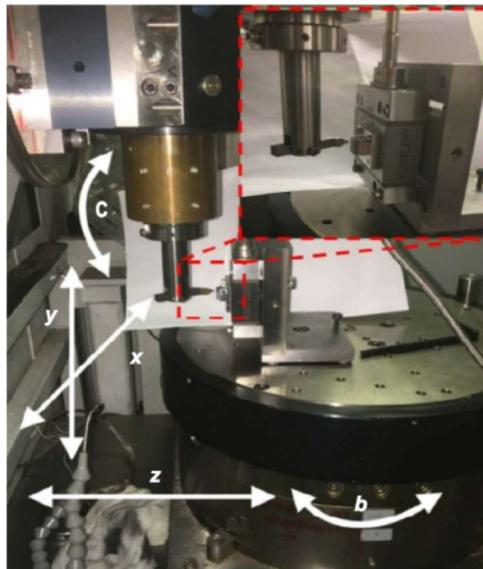


Figura 5. Configuración experimental de UPFC [60].

3.2 Litografía y Grabado

Es una técnica que consiste en la transferencia de un patrón desde una máscara o molde a un sustrato o capa fotosensible (como silicio, vidrio o polímeros) mediante procesos químicos y ópticos, hasta crear estructuras de alta precisión, eliminando átomos de la superficie de la fotorresistencia y del material del sustrato hasta que forma la microlente [61]. El proceso se describe en el diagrama de flujo mostrado en la figura 6.



Figura 6. Proceso de fabricación microlentes por litografía.

El proceso comienza con la preparación del sustrato en un cuarto limpio, que puede ser una oblea de silicio o un vidrio, En seguida se aplica una capa delgada de material fotosensible sobre la superficie, la cual reaccionara al exponerse a la luz UV; posterior se utiliza una máscara con el patrón de las lentes, por el cual pasa la luz a la capa fotosensible volviéndolas solubles. Posteriormente, el sustrato se coloca en una solución de revelado que elimina las zonas de la capa que no fueron expuestas a la luz, dejando el patrón deseado, para luego realizar el grabado químico o físico para transferir el patrón a la resina, donde se crean las estructuras de las microlentes en el material base, para finalmente, retirar la capa fotosensible residual restante, y dejar la estructura grabada en el sustrato.

Existen diferentes tipos de litografía utilizados en la fabricación de microlentes, los cuales serán descritos brevemente a continuación.

3.2.1 Litografía UV convencional

Funciona con el proceso descrito en la figura 6, utilizando luz ultravioleta para la exposición del patrón, empleándose comúnmente en la fabricación de circuitos integrados y dispositivos microópticos. Permite alta reproducibilidad, pero en sustratos planos o con curvatura constante, teniendo un control preciso de perfiles de grabado. La desventaja es que requiere equipo especializado y del cual no se tiene fácil acceso, una foto de una maquina litográfica es mostrada en la figura 7.



Figura 7. Máquina litográfica para microlentes y circuitos [62].

3.2.2 Litografía por proyección (mask aligner)

Esta técnica generalmente es ocupada para la micro y nano fabricación de componentes, Se utiliza una máscara que contiene el patrón de las microlentes, y mediante la proyección de luz, se imponen estos patrones en la capa fotosensible. Es comúnmente empleada para generar diseños en materiales semiconductores para circuitos, como obleas de silicio, transfiriendo un patrón desde la máscara a un material fotosensible. El proceso consiste en preparar la máscara con el patrón deseado, luego se recubre el material de silicio con una capa de material fotosensible, alineando la máscara y la capa para su exposición a la luz UV, posteriormente, se revela eliminando el material que ha sido expuesto a la luz, quedando grabado en la capa de la fotosensible. La Figura 8, muestra una máquina de litografía por proyección.



Figura 8. Máquina litográfica por proyección. [63]

3.2.3 Litografía electrónica (e-beam lithography)

También es conocida como litografía de haz de electrones, a diferencia de la litografía UV, esta técnica utiliza un haz de electrones para escribir patrones directamente la resina fotosensible. Es extremadamente precisa y se utiliza para patrones a escala nanométrica, como las microlentes de precisión. Al igual que las técnicas de litografía previamente mencionadas, se aplica una capa fotosensible sobre el sustrato y es expuesta a un haz de electrones siguiendo un patrón definido y modificando sus propiedades químicas haciéndola soluble e insoluble dependiendo donde el haz incida. Posteriormente, se aplica un disolvente que elimina las áreas que fueron alteradas dejando el patrón grabado en el sustrato, que es utilizado como máscara para crear estructuras tridimensionales.

Sus principales ventajas son la alta resolución del orden de nanómetros, es una técnica de escritura directa y es compatible con otros procesos de fabricación. La desventaja es que es un proceso lento, costoso y no está pensado para producción masiva. En el área de óptica se utiliza para prototipado de lentes holográficas o elementos ópticos complejos. Una imagen de una máquina litográfica por haz de electrones es mostrada en la figura 9. Existen variantes con haces de protones y de iones.



Figura 9. Foto de maquina de litografía de haz de electrones marca Vistec SB254. [64]

3.2.4 Litografía profunda con protones (DLP)

Esta técnica utiliza protones para penetrar en muestras hechas de PMMA lineal de alto peso molecular, dividiendo las largas cadenas de polímero para grabar patrones [36]. Como consecuencia, el peso molecular del material ubicado en las zonas irradiadas se reducirá y se crearán radicales libres, lo que dará lugar a propiedades del material muy diferentes a las del material en masa. También se utiliza para la fabricación de micro y nanoestructuras principalmente empleados en dispositivos electrónicos y ópticos.

El proceso consiste en generar un haz de protones de alta energía y enfocarlo hacia la superficie del material resistente, el cual interactúa con este modificándolo o eliminando material para crear el patrón deseado.

Este proceso permite la fabricación de microlentes hemisféricas estables con curvas bien definidas. Los protones se generan mediante un acelerador tándem o ciclotrón. Esta técnica permite la creación de estructuras con detalles finos del orden de nanómetros, con profundidades y paredes laterales definidas. La figura 10 ilustra el proceso de DLP.

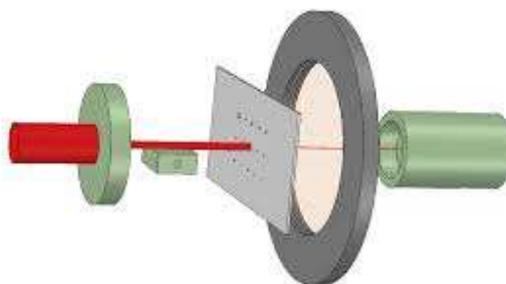


Figura 10. esquema de un DLP [36].

3.2.5 Litografía nanoimprint (NIL)

La litografía nanoimpresa al igual que la litografía electrónica usa electrones y una plantilla para "imprimir" un patrón de nanómetros sobre el sustrato. Utiliza un molde o sello para crear patrones a escala nanométrica en un material. Es un método prometedor para la fabricación de microlentes en grandes volúmenes.

Se usa un molde maestro con las características deseadas (fabricado mediante litografía tradicional), luego se aplica una capa del material sensible al sustrato, el molde se presiona contra este material. Se cura el material con luz UV o calor, solidificando el material y transfiriendo el patrón. Posteriormente, se presiona un molde con el patrón deseado contra un material blando (resina), que luego se endurece con calor o luz UV.

Las ventajas de esta técnica es que permite imprimir patrones en áreas extensas de forma rápida y eficiente, es de bajo costo en comparación con las técnicas previas de litografía, tiene alta resolución del orden de nanómetros, y puede adaptarse a diferentes materiales, replicando lentes esféricas o freeform en masa para smartphones, lentes difractivos, esféricas o freeform de manera masiva. Un esquema es mostrado en la figura 11.

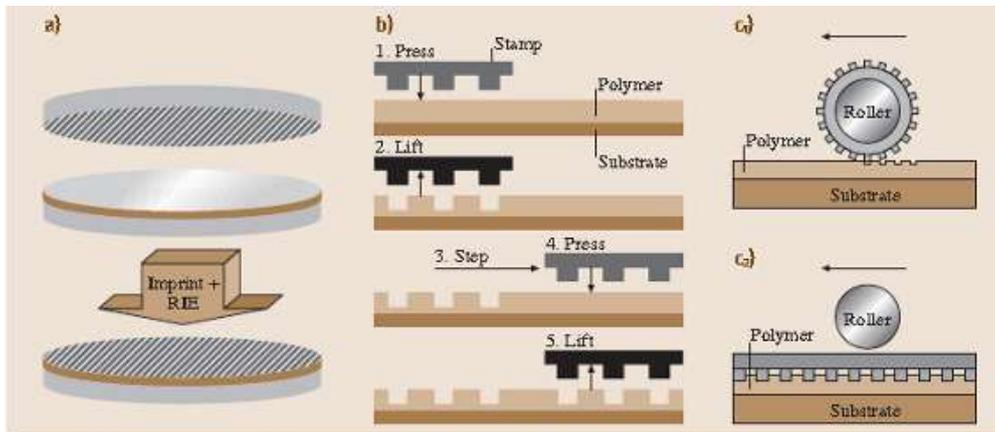


Figura 11. Esquema de proceso de litografía nanoimpresa [65].

3.2.6 Litografía por inmersión (para mayor resolución)

Es un proceso de impresión en un sustrato que sirve para transferir un patrón a una superficie, es similar a la fotolitografía, pero el sustrato se sumerge en un líquido para mejorar la precisión. Es empleada para fabricar chips avanzados y óptica de alta gama.

Esta técnica mejora considerablemente la resolución de la exposición al inyectar un líquido de alto índice de refracción en el espacio entre la lente y la superficie a trabajar. Manteniendo la pureza y la uniformidad del líquido sumergido y evitar la formación de gotas residuales durante el escaneo. El líquido permite que la luz se refracte para alcanzar mayor resolución, con la grabación de patrones más pequeños. El inconveniente es que requiere de un sistema para el manejo de fluidos precisos y de otro para evitar la contaminación del fluido. Una esquema es mostrado en la figura 12.

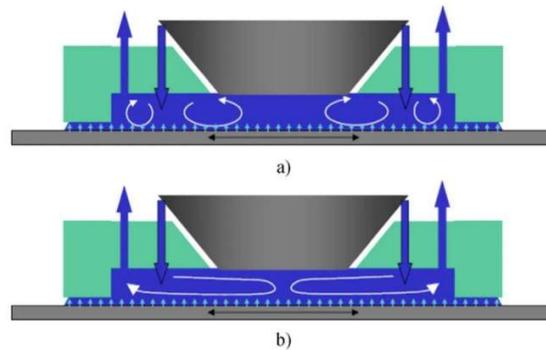


Figura 12. Diagrama de sistema litográfico por inmersión. [66]

Las aplicaciones de la litografía reportadas en la literatura se centran principalmente en la fabricación de lentes de Fresnel, redes de difracción para espectroscopía y sistemas con láseres, óptica integrada, con el desarrollo de chips fotónicos, sensores LiDAR, lentes difractivas, creación de microestructuras antirreflejantes. Su principal limitación es el alto costo de los equipos de la gran mayoría de ellos, y que están limitados para la fabricación en serie.

3.3 Fabricación Aditiva

Es un proceso de generación de componentes ópticos añadiendo material por capas, en contraste con la manufactura sustractiva que elimina material para dar forma a una pieza. La ventaja es que permite la fabricación de piezas con formas intrincadas o geometrías complejas y dimensiones que estén dentro del espacio de trabajo de la máquina. Entre las principales técnicas se encuentran la Estereolitografía (SLA) de precisión, impresión 3D, sinterización selectiva por láser (SLS), fusión selectiva por láser (SLM), fabricación aditiva volumétrica tomográfica (VAM). Generalmente es empleada para prototipado rápido de elementos ópticos elaborados con resinas ópticamente transparentes.

Es empleada para la fabricación de micro-componentes ópticas como lentes, prismas, sensores o sistemas de visión artificial, espejos, lentes para endoscopios, difusores de luz, guías, sistemas de iluminación, etc.

El principal desafío es la rugosidad superficial, y en algunas ocasiones la opacidad en el componente óptico e inhomogeneidad (sobre todo en elementos con espesores que van más allá de unos cuantos milímetros). Recientemente se ha reportado la Impresión 3D por deposición de nano-compuestos, empleando materiales con propiedades ópticas ajustables, que permite integración de múltiples funciones. La Figura 13 muestra una máquina SLA de precisión.

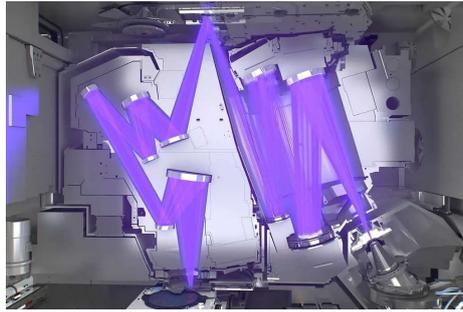


Figura 13. Máquina SLA para fabricación de nano y micro componentes ópticos. [67]

3.4 Técnicas por replicación

La fabricación de componentes ópticos por replicación consiste en crear copias de alta precisión de elementos ópticos utilizando un molde o master. Por lo que es empleada para la producción en masa de componentes ópticos con formas geométricas complejas o micro estructuras específicas. Por lo mismo cuando existe una producción de alto volumen el costo se reduce.

En esta técnica, los materiales comúnmente empleados son los polímeros, requiriendo de un master o molde. Esta técnica es utilizada ampliamente en la industria de consumo (óptica automotriz, óptica de teléfonos móviles). El proceso general inicia con la creación del master o molde que contiene las características geométricas de las componentes a producir, el cual es preparado con una capa para mejorar su vida útil y facilitar el desprendimiento de las replicas. Posteriormente el master puede requerir de una etapa de acabado y verificación de la calidad, para luego realizar las componentes o replicas.

El moldeo permite la elaboración de replicas en masa a bajo costo. Sin embargo, en ocasiones se requiere de moldes complejos con alta calidad y control térmico preciso. Dependiendo del material y acabado del master, este puede producir un número elevado de componentes en tiempos relativamente cortos. Uno de los polímeros más empleados es el PMMA.

La técnica tiene el inconveniente de que tanto el material como el proceso requieren evaluación de calidad y cuidados para no alterar las propiedades de los elementos fabricados, y su acabado. Entre las técnicas de replicación se encuentran: estampado en caliente, estampado de rollo a rollo, grabado en plasma, moldeo por inyección, etc. Imágenes de las técnicas o equipos son mostradas en la Figura 14.

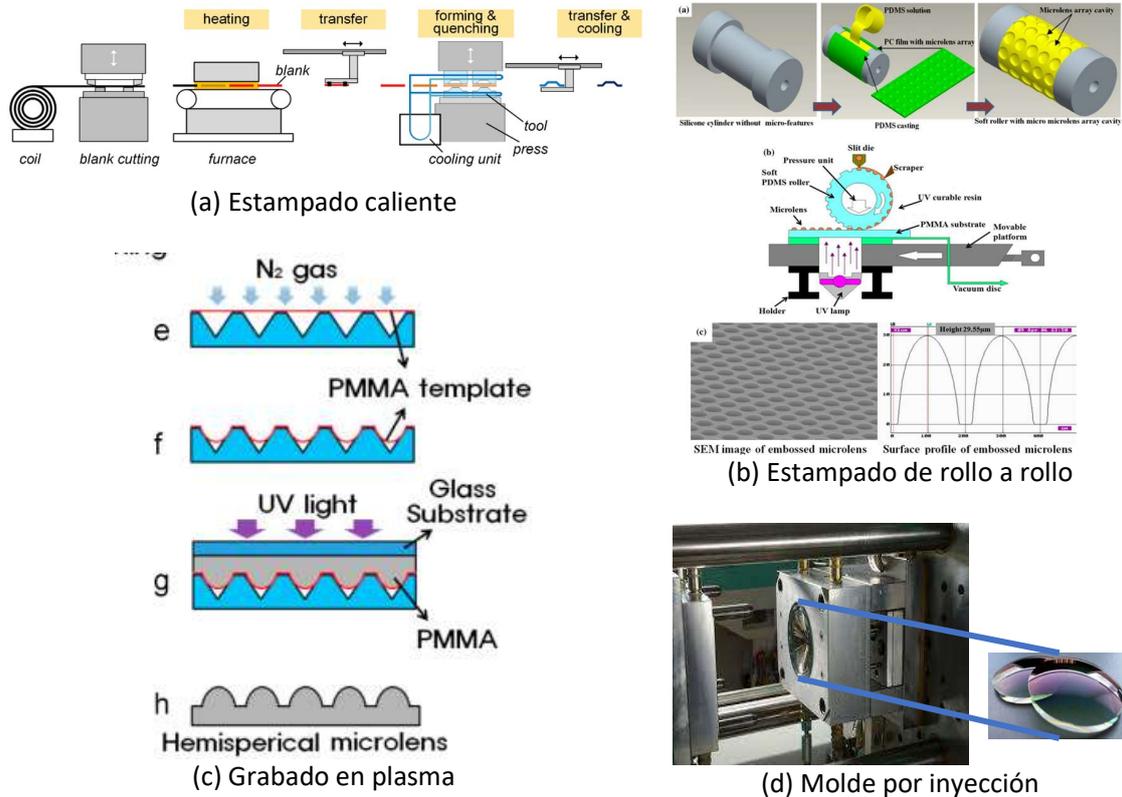


Figura 14. Técnicas de replicación. [32, 51, 68,]

3.5 Método de reflujo térmico o fusión por resistencia

El método de reflujo térmico se fabrican microlentes refractivas plásticas fundiendo islas cilíndricas con una fotorresistencia o un polímero similar. Primero se recubre un sustrato de vidrio con una capa de esta fotorresistencia y una máscara. A continuación, se modela litográficamente la capa gruesa, la cual, se calientan por encima de la temperatura de transición vítrea de la fotorresistencia, posteriormente, la fotorresistencia fundida fluye debido a la tensión superficial, adaptando una forma esférica formando la microlente. Finalmente, se deja enfriar para que solidifique la fotorresistencia y quede fija la microlente.

Aunque la técnica es sencilla y de bajo costo en comparación con otras técnicas, tiene el desafío de que a veces no se puede controlar con precisión la temperatura, el tiempo de exposición y otros parámetros del proceso, lo que ocasiona imperfecciones superficiales, reduciendo el rendimiento de los elementos fabricados. Una imagen del proceso es mostrada en la figura 15.

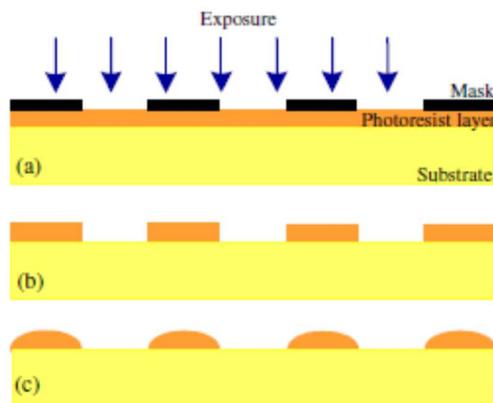


Figura 15.: Diagrama de proceso del reflujo térmico. (a) Exposición de fotoresistencia y máscara, (b) Generación de regiones expuestas, (c) Fusión de fotoresistencias [36].

3.6 Técnica de escritura directa

Esta técnica hace uso directo de haces de luz dirigidos con precisión para exponer localmente películas fotoresistentes. La exposición controlada de estas películas fotoresistentes permite la producción de una amplia variedad de componentes microópticos. Consiste en la generación de datos de relieve superficial que corresponden a las especificaciones de microlente deseada. Los datos, generalmente obtenidos con programas de diseño óptico personalizados o comerciales, se convierten posteriormente en valores de intensidad del haz láser.

Existen diferentes tipos de técnicas de escritura directa: escritura láser directa, escritura con haz de electrones y con haz de iones enfocado, y ablación láser [36]. La principal ventaja de la técnica de escritura directa reside en la posibilidad de fabricar microlentes con características adaptables a cada lente. Una vez fabricado dicho conjunto de microlentes, se pueden producir copias en masa a bajo coste mediante técnicas de replicación. Un esquema del proceso se puede ver en la figura 16.

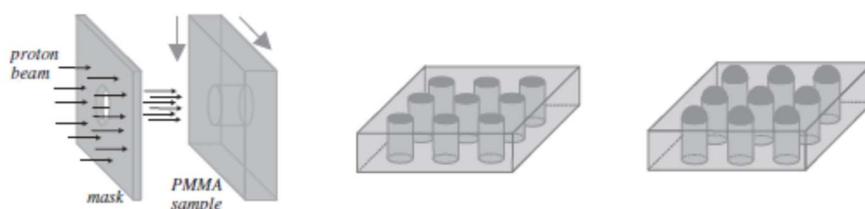


Figura 16. Esquema del proceso de fabricación de lentes por escritura directa [36].

3.7 Técnica de ablación con láser

El principio de la ablación con láser excimer se basa en la eliminación precisa del material del sustrato y funciona de la siguiente manera: un láser excimer enfocado ilumina una máscara, la imagen de esta máscara se proyecta sobre el sustrato. Si el material irradiado absorbe energía por encima de cierto umbral, se vaporiza espontáneamente. Este proceso se denomina fotoablación.

Materiales como metales, vidrios ópticos, plásticos y cerámicas ya se han utilizado para producir microestructuras ver figura 17.

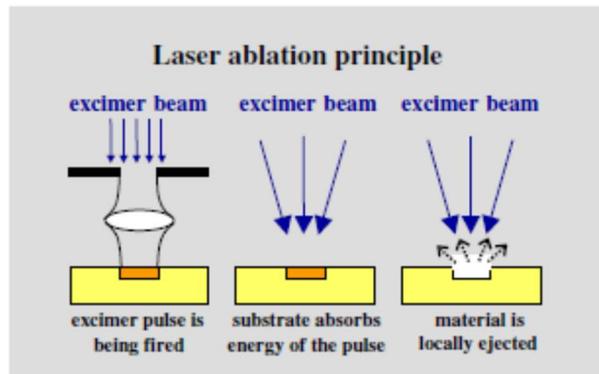


Figura 17. Esquema de principios de ablación por láser [36].

Esta técnica no requiere de un cuarto limpio, puede utilizar una amplia gama de materiales, la técnica es adecuada tanto para la creación de prototipos como para la fabricación de micropiezas en pequeñas cantidades, perforaciones, puede aplicarse para herramientas de precisión sin contacto en uno de los últimos pasos de fabricación o en el posprocesamiento de componentes optoelectrónicos o fotónicos ensamblados heterogéneamente.

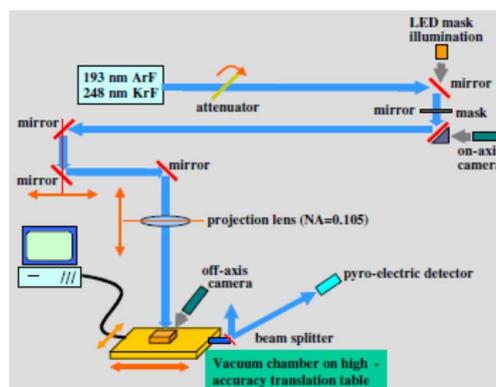


Figura 18. Arreglo esquemático de la técnica de ablación láser [69].

Una técnica diferente para fabricar estructuras microópticas en general y microlentes refractivas en particular es el uso de ablación directa con una única apertura circular como máscara.

En este caso, la forma de la estructura se determina mediante los movimientos de la platina de traslación sobre la que se coloca la muestra y no se limita a ninguna forma circular simétrica en particular. Para la fabricación de microlentes, la energía y la frecuencia de pulso del láser se mantienen constantes durante el proceso de ablación. Mientras el láser excimer emite pulsos, la

platina de traslación realiza movimientos circulares concéntricos con diferentes radios y velocidades. Seleccionando cuidadosamente la velocidad y el radio, se puede obtener cualquier forma de superficie deseada con simetría circular ver figura 18.

3.8 Técnica de impresión a microchorro

En la técnica de impresión a chorro, se genera una corriente continua de fluido que se fragmenta en gotitas durante su recorrido desde la abertura hasta el sustrato objetivo o se genera gotitas de líquido individuales a una frecuencia fácilmente controlable.

La tecnología Microjet, desarrollada originalmente para la impresión de escritorio de bajo costo, ha sido adaptada recientemente para la fabricación de microlentes [7]. El cabezal de impresión por microchorro está fabricado con cerámica piezoeléctrica y cuenta con un microcanal (véase la figura 19). Este microcanal conecta un depósito que contiene el polímero líquido con una boquilla que dirige el líquido hacia la superficie de impresión.

Los materiales más adecuados para la fabricación de microlentes son los epóxicos ópticos curados por UV debido a su durabilidad térmica y química en comparación con otros plásticos de grado óptico como fotorresistencias, acrílicos y termoplásticos [50].

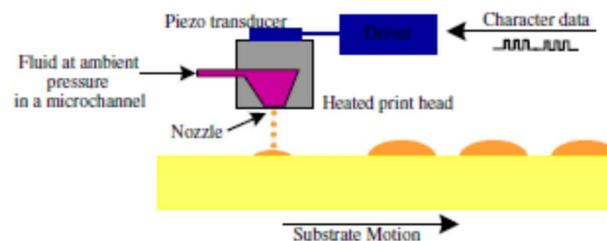


Figura 19. Esquema de impresión a microchorro [36].

3.9 Moldeo por inyección

El moldeo por inyección es un método rentable para la reproducción de ópticas en serie, para la creación de prototipos y productos finales de usuario. Es un proceso cíclico corto con un mecanismo simple. Debido a que el enorme volumen divide el costo inicial, las inversiones originales se vuelven casi insignificantes al final del ciclo de producción.

La ruta del proceso de fabricación sigue varios pasos, desde el desarrollo de la matriz de moldeo a través de procesos de mecanizado, la selección de materiales hasta la óptica utilizable para el consumidor final, como cámaras móviles, dispositivos de juego, reproductores de CD/DVD, lentes de contacto, etc. [70].

Inicialmente, los troqueles de moldeo están diseñados para ópticas de tamaño y forma requeridos, como planas, curvas, simétricas y no simétricas, junto con requisitos de rugosidad y calidad de

superficie. El primer paso es alimentar los gránulos de plástico en la tolva que pasan la resina al tornillo plastificante.

Los pellets se mezclan y se convierten en estado fundido por el elemento calentador externo. El tornillo facilita el movimiento del plástico fundido por el movimiento de rotación para desplazarlo en la cavidad del molde con alta presión a través de la boquilla de inyección. El material fundido inyectado se debe a la presión mecánica. Luego el material se deja enfriar (es decir, la etapa de solidificación). El sistema de entrega detiene el flujo de material fundido en los moldes a medida que se ocupa toda la cavidad. La presión se libera con la apertura de los troqueles a través de la retracción del troquel de perforación, la temperatura se normaliza y el producto se expulsa de él.

El proceso de moldeo por inyección incluyendo los componentes de la máquina ilustrada en la figura 20. Las desventajas del moldeo por inyección son el alto costo de herramientas en la etapa inicial de producción, el largo tiempo de configuración de la máquina y los moldes, y el costo de funcionamiento que a menudo es muy alto para tiradas pequeñas.

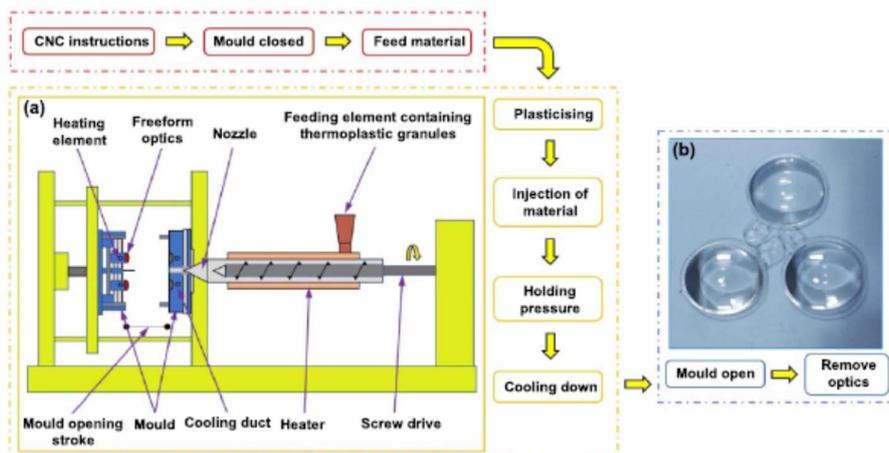


Figura 20. Proceso de inyección [5].

3.10 Moldura de vidrio

El moldeo de vidrio de precisión, también conocido como el proceso de replicación, es un proceso de expansión térmica y moldeo que convierte un vidrio en blanco en un componente óptico funcional de precisión. Este enfoque es ideal para la producción de óptica de alto volumen.

Los métodos de mecanizado directo para la producción de óptica requieren fases de pre-rectificado y post-pulido para lograr el nivel utilizable de la aplicación, lo que hace que la óptica sea de alto precio. La preforma material de vidrio (es decir, vidrio en blanco, bola, gob, disco, etc) se inserta en el molde después de que se ha precalentado.

La cámara de moldeo se evacua con un gas inerte como nitrógeno u oxígeno y comienza el proceso de calentamiento. Cuando la temperatura se eleva sobre la temperatura de transición del vidrio (T_g)

y el vidrio alcanza un cierto rango de viscosidad, el material de vidrio calentado se moldea utilizando una prensa mecánica para lograr la forma y el acabado deseados.

La fuerza de compresión se aplica de manera controlada y la temperatura se mantiene constante durante un período específico. El elemento de vidrio prensado mecánicamente toma la forma de la cavidad del molde y se deja enfriar con carga compresiva aplicada continuamente hasta que la temperatura del vidrio cae por debajo del punto de deformación del vidrio.

El desafío se observa a menudo en el mantenimiento de la estabilidad térmica del molde bajo alta temperatura, tiempo de contacto largo y gran carga de prensado, ya que la preforma de bajo T_g tiende a adherirse al material del molde que daña la superficie de los moldes, reduce su vida útil, reduce la calidad superficial del elemento óptico moldeado ver figura 21.

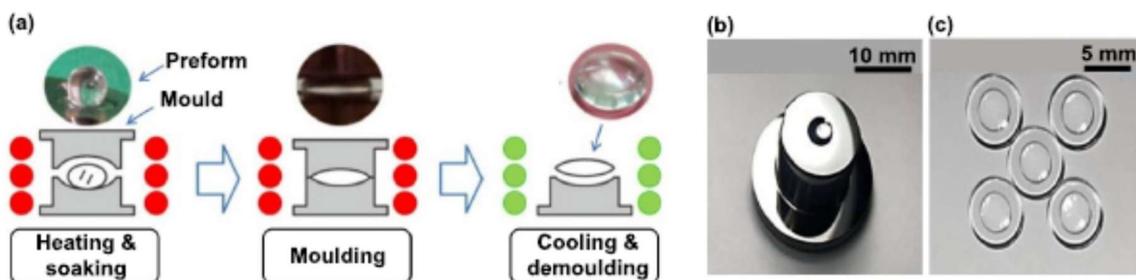


Figura 21. Técnica de molde de compresión de vidrio [5].

Esta técnica de moldeo por compresión de vidrio se ha empleado para producir elementos de vidrio de forma libre, donde se debe conocer previamente las temperaturas entre T_g y T_s del vidrio, alcanzando alta precisión en geometrías complejas.

Otras técnicas empleadas en la fabricación de elementos ópticos son: la técnica de expansión fototérmica, irradiación por láser e intercambio iónico. Imágenes del proceso de estas técnicas se muestran en la figura 22.

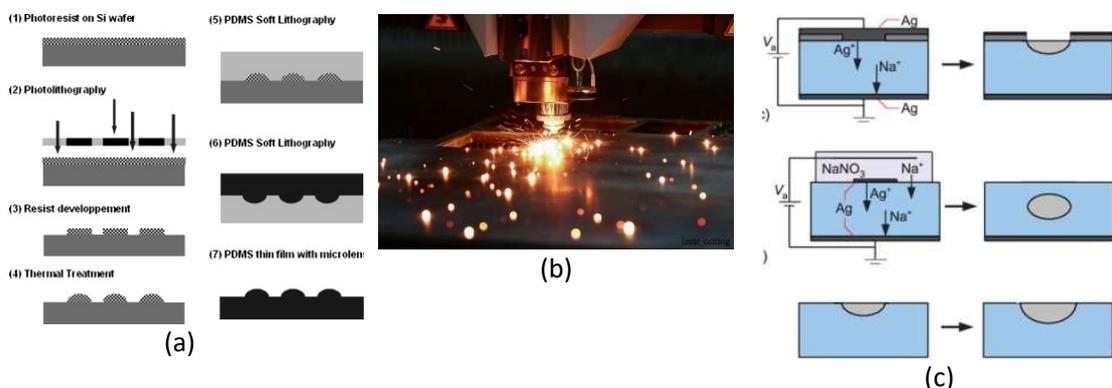


Figura 22. Tecnicas de fabricación, a) Expansión fototérmica, b) Irradiación por láser y c) Intercambio iónico [36, 44].

4 Técnicas de Acabado

4.1 Revestimiento

El último paso en la fabricación de óptica de forma libre es una película delgada de recubrimiento protector y de control de luz. Existen varios tipos de recubrimiento dependiendo de las características de rendimiento de la óptica, como antirreflejo, reflectores metálicos, reflexión dieléctrica de alta eficiencia y filtros de múltiples capas [5].

Los recubrimientos en componentes ópticos se utilizan comúnmente para garantizar durabilidad a largo plazo y alto rendimiento mediante el apilamiento de capas de materiales para obtener propiedades ópticas personalizadas. Algunos métodos de recubrimiento óptico son: deposición de capa atómica, deposición de vapor químico, pulverización, plateado iónico, deposición asistida por iones y sol-gel [5].

La Tabla 1 enumera el tipo de recubrimiento, los métodos y sus aplicaciones. Se realiza un recubrimiento en componentes ópticas de forma libre inclinada con un método de deposición de capa atómica que permite recubrimientos muy uniformes sobre cualquier forma [5].

Tabla 1 Tipo de métodos de recubrimiento y su aplicación [5].

S. no.	Tipo	métodos	Aplicaciones
1.	----	Métodos por lotes	Alta precisión
2.	infrarrojo	Evaporación	Aeroespacial y defensa
3.	visible o UV	Evaporación	Comercial
4.	----	Máquina de flujo en línea	Moderada y baja precisión
5.	----	Recubridores de rodillos	baja precisión

4.2 Rectificado de ultraprecisión (UPG)

UPG es la técnica de eliminación de material a base de abrasivo que utiliza la muela abrasiva con granos ultrafinos, con una precisión de la figura con $RMS < \lambda/10$ con $\lambda < 1 \mu m$, $Ra < \lambda/100$ como rugosidad superficial, y una sub-superficie libre de daños para evitar la dispersión de la luz en óptica transparente y evitar la formación de grietas en la pieza de trabajo.

La configuración experimental de UPG consiste en una medición cofocal de la sonda, la pieza de trabajo sujeta en el husillo de la pieza de trabajo usando el accesorio, y la rueda de diamante de pulido montada en el husillo de la herramienta que se mantiene perpendicular a la pieza de trabajo como se muestra en la figura 23.

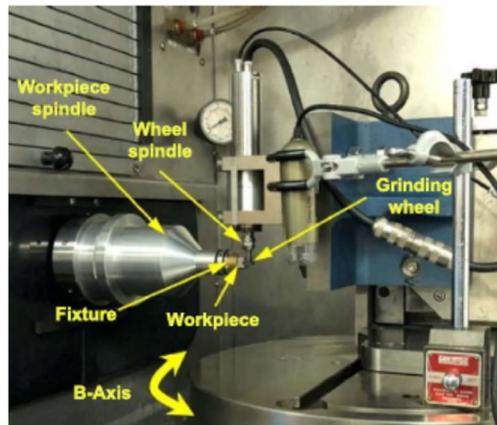


Figura 23. Rectificado de ultraprecisión [5].

El rastro de molienda que queda sobre la superficie molida es fino con una altura superficial muy pequeña. La cuestión clave al rectificar superficies curvas y de forma libre es mantener la precisión de la forma de la pieza de trabajo durante todo el proceso mediante el uso de una herramienta de rectificado precisa.

4.3 Pulido del bonete

Es una técnica de pulido determinista de sub-apertura en la que el tamaño de la herramienta es más pequeño que la pieza de trabajo. La velocidad de eliminación del material puede regularse entre $0,025$ y $120 \text{ mm}^3 \text{ min}^{-1}$ [71]. Una bolsa esférica hecha de tela de punto y laminación de goma sirve como la "herramienta" de pulido del capó. La película de pulido en la superficie de la herramienta se infla por el aire comprimido y proporciona estabilidad a la forma.

La velocidad del husillo y el inflado de la presión de la bolsa de aire son dos elementos principales que influyen en el parámetro de rendimiento, es decir, la rugosidad de la superficie.

La figura 24, ilustra el diagrama esquemático y la máquina herramienta real del pulido del bonete.

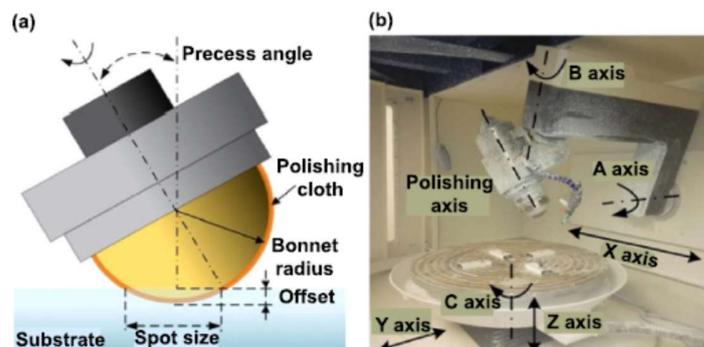


Figura 24. Pulido bonete, a) diagrama esquemático y b) máquina herramienta real [5].

El pulido con una herramienta de capó puede eliminar una capa defectuosa de 10 μm de la superficie de una pieza hexagonal de 1 m [5]. Este método de pulido de subapertura puede pulir rápidamente mientras se elimina una gran cantidad de material.

4.4 Acabado magnetorreológico (RM)

El fluido RM se comporta como fluido newtoniano en ausencia de campo magnético. El fluido de pulido por RM se endurece cuando se aplica el campo magnético externo. La Figura 25 explica el comportamiento de RM del fluido de pulido de RM en las condiciones de encendido y apagado del campo magnético.

La configuración de acabado MR desarrollada para el acabado de ópticas planas, curvas y de forma libre consta de una herramienta de pulido con imanes (ya sean permanentes o electroimanes), Sistema de suministro de fluidos de pulido MR, servomotores y accionamientos de precisión mecánica. El acabado de MR se utiliza para acabar con precisión los componentes ópticos y obtener una superficie libre de defectos con rugosidad superficial en el rango de nanómetros.

El fluido pulidor MR consta de partículas magnéticas de hierro, abrasivos y medio fluido [5]. El agua desionizada se utiliza como medio portador para el acabado del vidrio óptico.

La partícula de hierro magnetizable se alinea bajo la influencia del campo magnético y atrapa la partícula abrasiva entre sus cadenas. Por lo tanto, la viscosidad del fluido se puede cambiar con el cambio en el campo magnético.

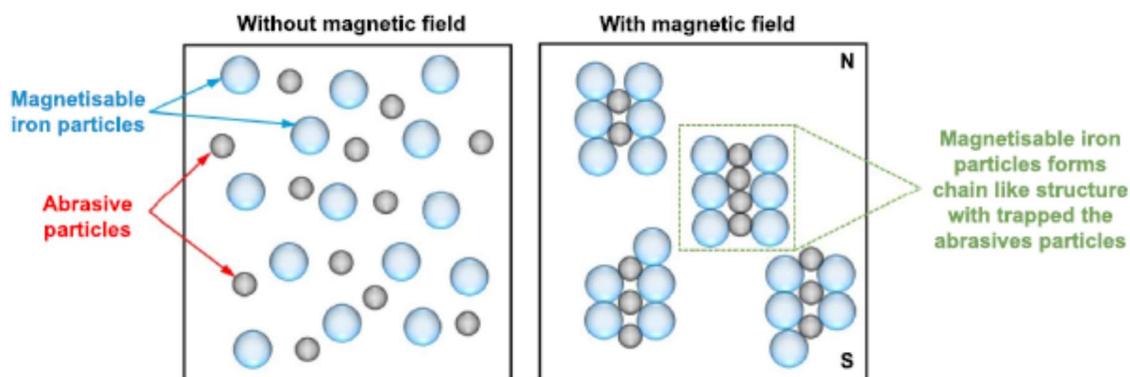


Figura 25. Esquema del principio magnetorreológico [5].

4.5 Pulido láser

El pulido láser es un proceso termodinámico sin contacto que utiliza un láser como fuente de energía para irradiar la superficie de la pieza de trabajo, con la intención de reducir la rugosidad de la superficie y minimizar o eliminar los defectos [5]. La configuración experimental de pulido láser se muestra en la figura 26 (a) que consiste en una fuente láser, cámara de alta velocidad, filtro de protección láser, cámara de proceso, dispositivo de medición de oxígeno, y un pirómetro para el monitoreo de alta temperatura.

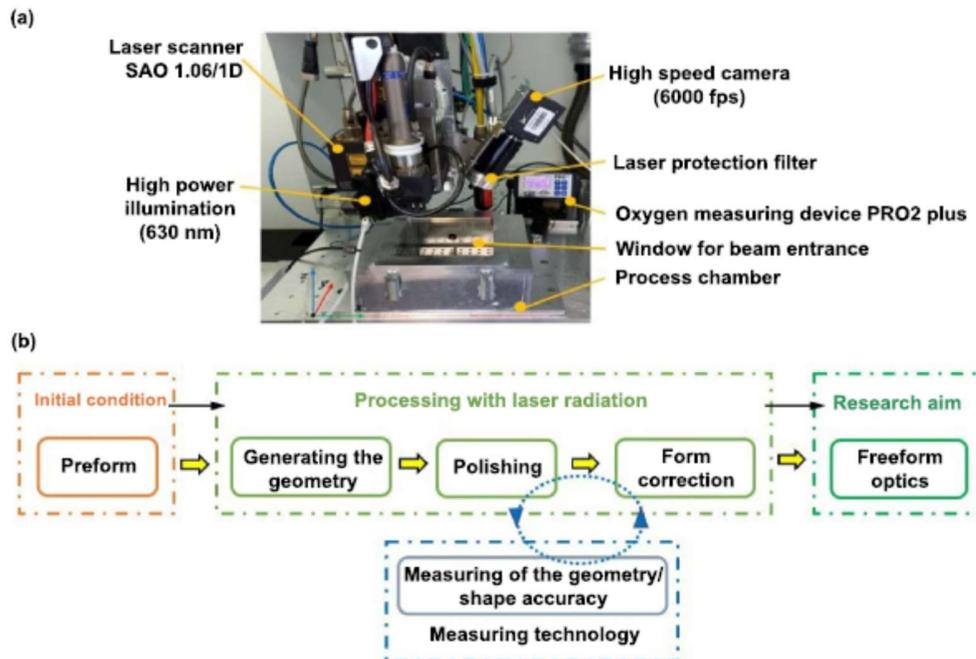


Figura 26. Configuración de pulido láser, a) Equipo pulidor, b) diagrama de proceso [5].

El láser irradia la superficie causando que los electrones libres vibren y emitan aún más la onda que sufren una proyección suave y alta reflexión. De acuerdo con los cambios en la superficie de la pieza de trabajo, el pulido láser se categoriza en dos tipos, como pulido en frío y pulido térmico. El pulido en frío incluye la ablación láser local y el pulido láser de gran área.

El enlace químico entre las moléculas se rompe cuando las moléculas absorben alta energía fotónica en el momento de la irradiación láser. En esta técnica, la vaporización de las moléculas se produce desde la molécula de polímero alto a bajo y se logra una baja rugosidad superficial. No debe haber ningún tipo de formas de acumulación de calor en la superficie de la pieza de trabajo.

Los desafíos del pulido láser también se limitan a los escaneos precisos sobre la pieza de trabajo, el precalentamiento que podría aumentar el consumo de energía, la zona afectada localmente por el calor, y no es adecuado para materiales reflectantes.

4.6 Pulido por haz de iones (IBP)

IBP utiliza el plasma para eliminar el material a nivel atómico de una manera controlada. Esta tecnología es capaz de proporcionar la corrección de la figura a nanoescala empleando un modo llamado procesamiento específico de la ubicación (LSP). En LSP, el material se elimina capa por capa o no uniformemente de la superficie para corregir errores de forma o errores de uniformidad superficial del componente.

La fuente de iones emite el haz de iones con una distribución espacial optimizada a lo largo de una cierta energía que afecta la superficie superior de la pieza de trabajo hasta una profundidad bien

definida. La dirección de los iones, el flujo entre la brecha de trabajo y la energía pueden ser controlados individualmente [5].

Por lo tanto, la energía absorbida juega un papel vital en la eliminación del material, es decir, si la energía absorbida es mayor que la energía de enlace de la red, se crea una perturbación entre los átomos de la pieza de trabajo a medida que los átomos se desplazan de sus posiciones de equilibrio y puede resultar en la colisión con los átomos cercanos alrededor para propagar la acción.

Los átomos presentes en la pieza de trabajo reciben la energía transferida de los iones colisionados en la superficie superior como se muestra en la figura 27. Si el nivel de energía absorbido es insuficiente por los átomos de la pieza de trabajo para superar la energía de enlace de la red, entonces la energía absorbida se libera en forma de fonones [5].

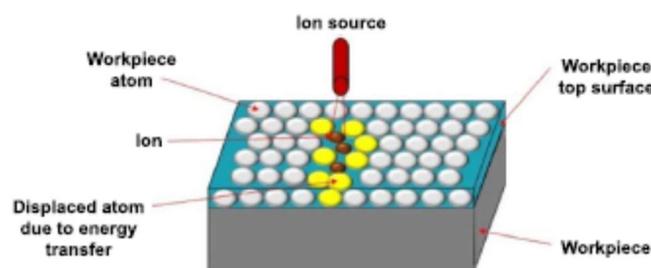


Figura 27. Esquema de pulido de haz de ion [72].

Las limitaciones del método IBP son su dependencia ambiental, y no es adecuado para los metales, ya que pueden reflejar de nuevo el haz de energía que puede resultar en radiación y daño al operador o al medio ambiente cercano.

5. Metrología asociada

5.1 Procesos de Acabado

Para fabricar una componente óptica, conlleva varios procesos de fabricación tales como esmerilado, mecanizado y pulido. Sin embargo, cada proceso de mecanizado deja de lado las huellas de la herramienta, patrones inesperados y manchas en las complejas superficies de forma libre generadas. Los defectos superficiales y subsuperficiales solo se pueden eliminar con los procesos de superacabado. En los materiales ópticos, los errores topográficos, como la frecuencia espacial baja, la frecuencia espacial media y la frecuencia espacial alta, se controlan mediante varias técnicas correctivas de pulido. Posterior a ello, se debe evaluar si la componente fabricada cumple con los requerimientos de diseño, por lo que a continuación se revisan diversas técnicas de metrología para medir la forma y el acabado de la óptica de forma libre.

Las técnicas profilométricas, interferométricas y no interferométricas se consideran los métodos típicos de metrología superficial para componentes ópticos de precisión. Estas técnicas también se clasifican en función del tipo de contactos, es decir, el contacto entre la sonda de medición y la superficie de la pieza de trabajo.

5.2 Metrología de contacto

Una de las primeras técnicas implementadas de contacto es el uso de la máquina de medición de coordenadas (MMC), es un dispositivo que utiliza una sonda para detectar puntos discretos en la superficie de un objeto físico para determinar su geometría. Los MMCS son ampliamente utilizados para medir la óptica convencional y no convencional mediante el empleo del principio de Abbe. Las mediciones basadas en contacto de puntos permiten cuantificar grandes superficies empinadas sobre mediciones de área grande o superficies rápidas. Las lentes simétricas rotacionales se escanean y se miden utilizando las sondas táctiles 2.5D con punta de diamante de forma cónica y piramidal [5].

A la punta del palpador se le permite hacer contacto físico con la superficie del componente óptico, dibujar escaneos sobre el rango requerido. Las variaciones y deformaciones superficiales de la superficie se registran con el desplazamiento del lápiz en función de la posición. El instrumento perfilométrico es capaz de trabajar para muchas ópticas de forma libre como NURBS, Zernike, tórico, bi-cónico, elipsoide, etc.

Este instrumento funciona para pendientes de hasta 50° y una resolución de hasta $0,8 \text{ nm}$. Se recomienda una técnica de medición de forma radial de tipo contacto para reducir los errores de medición [5]. Algunos desafíos que afectan la ruta del proceso de desarrollo de la óptica de forma libre son el largo tiempo de medición, los errores del sistema y las condiciones normales de contacto de las sondas con la superficie ver figura 28.

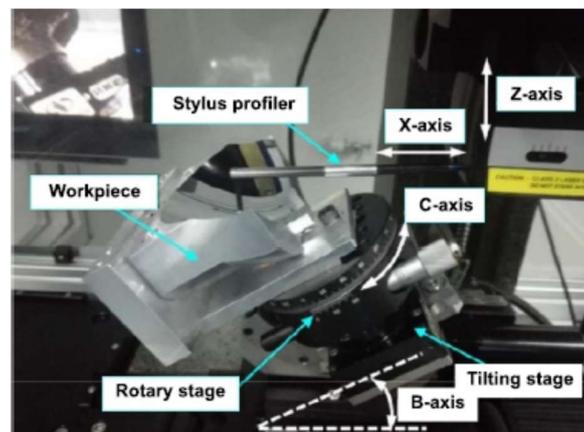


Figura 28. Medición de forma de una superficie con perfilómetro [5].

Las ventajas de las técnicas de metrología de tipo de contacto son la trazabilidad de las mediciones a larga distancia y el perfil de onda exacto. Sin embargo, algunas desventajas también están asociadas con estas técnicas, como el desgaste del lápiz óptico, la incapacidad de medir muestras viscosas, el requisito de corte de muestras y para el trazado por el detector, la presión de medición puede inducir arañazos en la superficie de los componentes ópticos, mediciones del radio de punta

de la sonda restringidas, y dificultades en la medición del perfil de ubicación exacta en una óptica de forma libre.

5.3 Metrología basada en no contacto

La medición de superficies con técnicas de no contacto se clasifican en geométricas, interferométricas, en las técnicas interferométricas generalmente toda la superficie se mide a la vez. La interferometría se puede realizar muy rápido con precisión en comparación con la metrología de tipo de contacto. Factores ambientales como la humedad, la temperatura, etc. pueden afectar la precisión de las mediciones y virutas que quedan después del mecanizado, lubricante, polvo, recubrimiento en las muestras también influye en las mediciones [73].

La interferometría es un método de medición que utiliza el fenómeno de interferencia de ondas de luz, ondas sonoras u ondas de radio. La interferometría óptica se ha utilizado durante más de cien años y su precisión se mejora utilizando fuentes de luz láser.

Los interferómetros láser Fizeau han demostrado su eficacia en la medición de superficies de formas planas y esféricas en términos de forma y frecuencia espacial media [5]. Para las formas arbitrarias, los desafíos surgen con las desviaciones en las salidas de leve a extremo, el frente de onda de referencia puede producir patrón de referencia que es difícil de resolver por la cámara de interferómetros.

La lente nula óptica o el holograma generado por computadora juega un papel importante en la producción de frentes de onda de referencia [5]. Sin embargo, no son factibles para todo tipo de superficies de forma libre. Por lo tanto, el diseño específico y la fabricación adecuada de dicho elemento difractivo óptico mantiene la precisión del sistema de medición.

Los desafíos se encuentran en la alineación de hologramas generados por computadora y la correspondencia de amplificación del frente de onda de las muestras. Hay un aumento en las franjas del detector con el desajuste de referencia y muestra. La solución a este problema es reducir el tamaño de la abertura o proyectar imágenes de la superficie en segmentos pequeños y hacer traslapes matemáticos en el área de medición grande [5]. En la medición superficial de la óptica de forma libre se utilizan varios interferómetros tales como el interferómetro lateral de cizallamiento y el interferómetro de onda inclinable.

Las ventajas de la interferometría sobre otras técnicas de medición superficial son su extrema sensibilidad a la topografía superficial, que normalmente se mide en nanómetros y no requiere contacto mecánico con la muestra de prueba. Sin embargo, la interferometría esta limita por el tipo de software y muestra de prueba utilizada.

Cuando la interferometría no se puede empelar, la deflectometría es una técnica generalmente empelada, consiste en la medición de fase (PMD), es una técnica de metrología óptica 3D fiable y rentable basada en la medición de fase de franja 2D. El principio básico del PMD se basa en la ley de la reflexión. Para PMD, establece que el rayo reflejado tendrá un ángulo doble (2α) si el ángulo de la muestra de prueba (α) se cambia en relación con una orientación de referencia.

En PMD, los rayos de la sonda se proyectan sobre la superficie de prueba y la irregularidad de la superficie produce variaciones en las franjas. La forma, el perfil y la curvatura de la superficie se obtienen mediante franjas de cambio de fase. Los desafíos radican en la compleja medición de superficies debido al tamaño de la pantalla, la muestra de prueba, y el tiempo de medición ver figura 29.

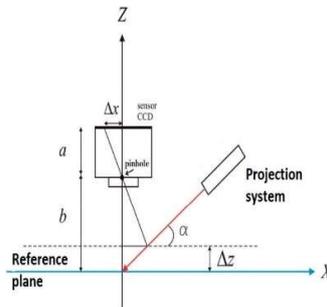


Figura 29. Esquema de la técnica de deflectometría [16].

Con los modelos matemáticos tales como polinomios Zernike, polinomios Chebyshev o B-splines, este método presenta simultáneamente la estimación de la pendiente y la altura de la superficie bajo prueba. El sistema experimental PMD que consiste en una superficie de prueba, cámaras y una fuente de luz, la configuración se muestra en la figura 29.

La tomografía óptica coherente y la dispersión láser se encuentran entre las técnicas de medición ampliamente utilizadas para daños en regiones de superficies (SSD). Las técnicas de dispersión superficial analizan la luz dispersa de la topografía superficial (incluida la rugosidad), la contaminación, las variaciones del índice a granel y la SSD para proporcionar una solución a la caracterización superficial [5]. Esquemas de las pruebas se muestra en la figura 30.

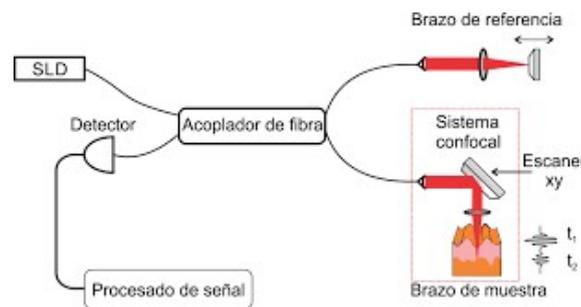


Figura 30. Esquema de tomografía óptica coherente [74]

La microscopía de reflexión total interna (TIRM) es otra técnica para detectar daños superficiales y SSD en materiales ópticos [5]. El principio de funcionamiento se explica como: una muestra se coloca en un prisma junto con una capa del fluido correspondiente intercalado entre ellos. La muestra es irradiada por la luz polarizada linealmente permitida a través del prisma y el fluido. Si la muestra está en buenas condiciones, toda la reflexión se produce en la interfaz muestra-aire. De lo contrario,

el daño dentro de la muestra dispersa la luz incidente. Una fracción de la luz dispersa pasa a través de la muestra, lo que permite vistas microscópicas del daño. La muestra debe tener una baja rugosidad superficial y ser transparente a la luz incidente para que TIRM funcione [5]. Un diagrama de la microscopia de reflexión total interna es mostrado en la figura 31.

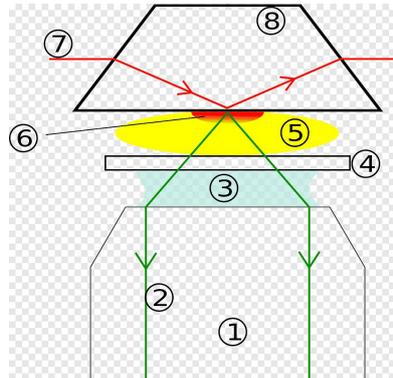


Figura 31. Diagrama de microscopia de reflexión total interna [75].

Otra de las pruebas para verificar la calidad de las componentes producidas es la prueba de pantallas nulas, dado que permiten medir perfiles de superficies rápidas, ya que la interferometría convencional no puede cuantificar grandes cambios de fase, requiriendo de elementos adicionales para ello, ocasionando un elevado costo. La prueba de pantallas nulas, por el contrario, solo requiere diseñar el arreglo experimental y generar la pantalla nula, requiriendo procesar la información para conocer la forma de la superficie bajo prueba [16]. Un diagrama del arreglo experimental de la prueba es mostrado en la Figura 32.

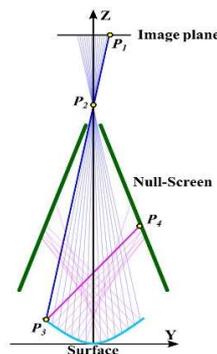


Figura 32. Esquema de prueba nula [16].

La prueba consiste en calcular la forma de una pantalla objeto que al ser reflejada en la superficie del molde y capturada por una cámara CCD, genere una imagen de un patrón preestablecido (arreglo de manchas con forma deseada), si la superficie tiene el perfil deseado, en caso contrario la imagen generada tendrá desviaciones de la superficie ideal, que al cuantificar las desviaciones la

forma de la superficie es obtenida. La pantalla objeto se obtiene al realizar un trazo de rayos inverso, considerando la forma ideal de la superficie bajo prueba [16, 51], es decir, tomar puntos de la imagen ideal y dibujar rayos sobre la superficie, calcular el rayo reflejado y el punto donde intercepta o golpea el plano del objeto, realizando este proceso barriendo el plano de la imagen, se construirá la pantalla del objeto.

La prueba de Ronchi es otra de las pruebas comúnmente empleadas en los talleres de fabricación de componentes ópticos. Esta consiste en elaborar una rejilla y colocarla cerca del centro de curvatura o donde los rayos de luz convergen, posteriormente, una fuente puntual coherente se coloca cerca de la zona de convergencia y un sensor es colocado detrás de la rejilla. La imagen captada es conocida como el patrón de Ronchi o simplemente Ronchigrama. En el patrón se graban las aberraciones del rayo, o los cambios de pendiente. Un tratamiento de la imagen permite conocer tanto las aberraciones del frente de onda, o conocer directamente la forma de la superficie y sus desviaciones [76]. Un diagrama del arreglo implementado es mostrado en la figura 33.

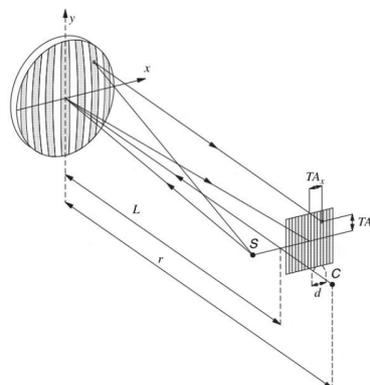


Figura 33. Diagrama del arreglo experimental de la prueba de Ronchi [76].

Para evaluar diversos perfiles de superficies, se han utilizado diversos tipos de rejillas, del tipo líneas transparentes y opacas, rejillas cuadradas, rejillas nulas o con diferentes periodos y con niveles de gris.

5.4 Medición de superficie en máquina (OMSM)

Otras de las técnicas empleadas en el proceso de producción de componentes ópticos para evaluar su calidad, son aquellas técnicas que se emplean las superficies en proceso de producción, ya que permiten evaluar la forma de la componente en etapas tempranas y saber en qué partes de la misma se debe realizar algún proceso de figurado para alcanzar la forma deseada, la cual se puede emplear en diversas técnicas de producción, ya sea en máquinas de fabricación de ultraprecisión (OMSM), o en etapas de pulido. El movimiento del sistema de medición se realiza por los accionamientos regulares de la máquina. La sonda táctil diferencial lineal variable se instala generalmente en una máquina de torneado de diamante comercial para una alineación rápida [77].

La Figura 34 muestra la configuración OMSM para caracterizar la superficie de forma libre. Un sensor confocal cromático está desarrollado para mediciones de superficie sin contacto junto con la precisión en el nivel de nanómetros para una máquina de ultra precisión. Este sensor proporciona la topografía tridimensional de superficies planas y curvas.

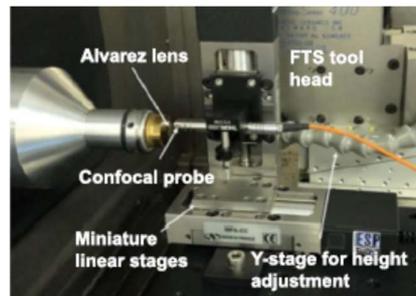


Figura 34. Máquina de fabricación de ultraprecisión con sonda de prueba [5].

La principal ventaja de OMSM es que los datos de medición se obtienen sin quitar la pieza de trabajo de la máquina. Esto ayuda a eliminar los errores de alineación causados durante la carga y descarga de la pieza de trabajo en el mandril de la máquina.

6. Aplicaciones

Desde su generación, las superficies de forma libre (FL) han tenido gran aceptación y con el tiempo se están implementando en nuevos diseños de instrumentos. Todo ello, porque permiten optimizar espacios, reducir el número de componentes, hacer a los instrumentos más ligeros, más versátiles, por mencionar algunas bondades. A continuación, se mencionan algunas áreas donde están teniendo gran impacto.

Visión artificial: Los componentes de forma libre se han incorporado para la corrección de aberraciones y para permitir campos amplios de visión con el menor número de elementos, como es el caso de la robótica tipo humanoide, y sistemas de visión para realidad aumentada y virtual. La Figura 35 muestra imágenes de dispositivos empleados en sistemas de visión de realidad virtual y realidad aumentada.

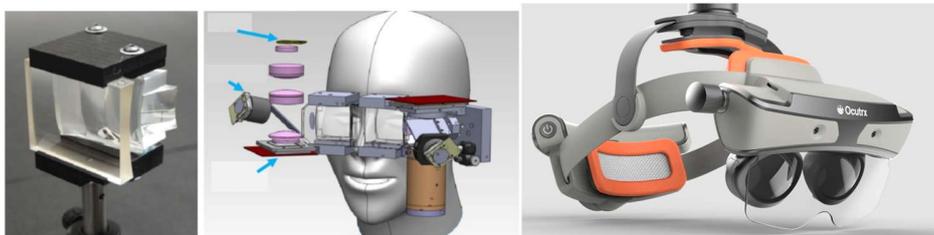


Figura 35. Imágenes de dispositivos de visión artificial (realidad aumentada y virtual) [5].

En el área de **Comunicación**, el uso de fibra óptica con perfiles con forma libre, asféricos y materiales tipo gradiente son empleados para transmisión de datos en redes de comunicación, o cámaras de telefonía celular, ver Figura 36.

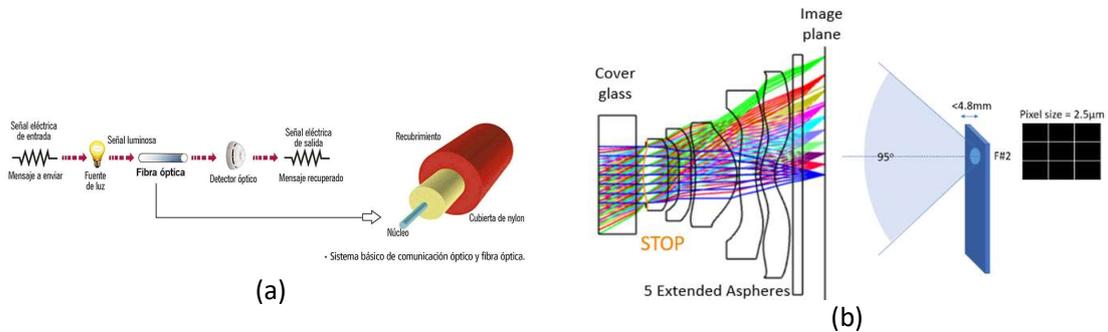


Figura 36. (a) Sistema de transmisión de datos, (b) cámara de celular [78].

En el caso de la **Medicina**, se han incorporado instrumentos formadores de imagen como los endoscopios, microscopios y dispositivos oftálmicos, los cuales facilitan las cirugías con sistemas de láser (procedimientos quirúrgicos), y fibra óptica (monitorización y oximetría). Algunos instrumentos son mostrados en la figura 37.

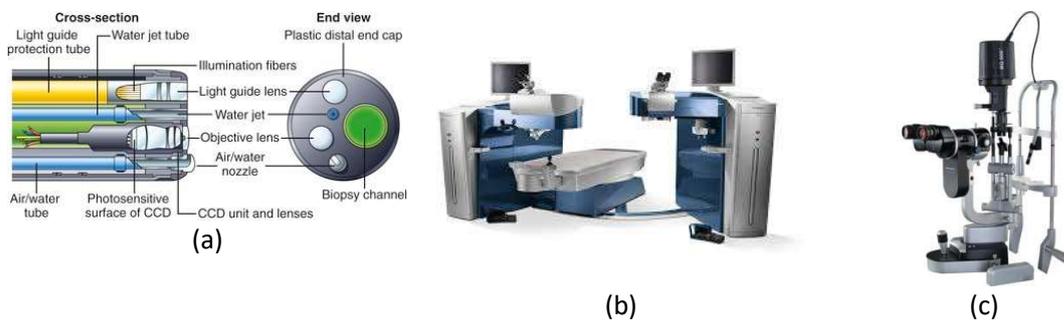


Figura 37. (a) Esquemas endoscopio, (b) y (c) Aparato optalmologicos [79-81].

En el área de **las ciencias e investigación**, se han desarrollado microscopios de alta resolución e instrumentos de laboratorio, así como telescopios con sistemas auxiliares, o concentradores de luz. En estos las superficies asféricas y de forma libre prevalecen, como se puede ver en la figura 38.

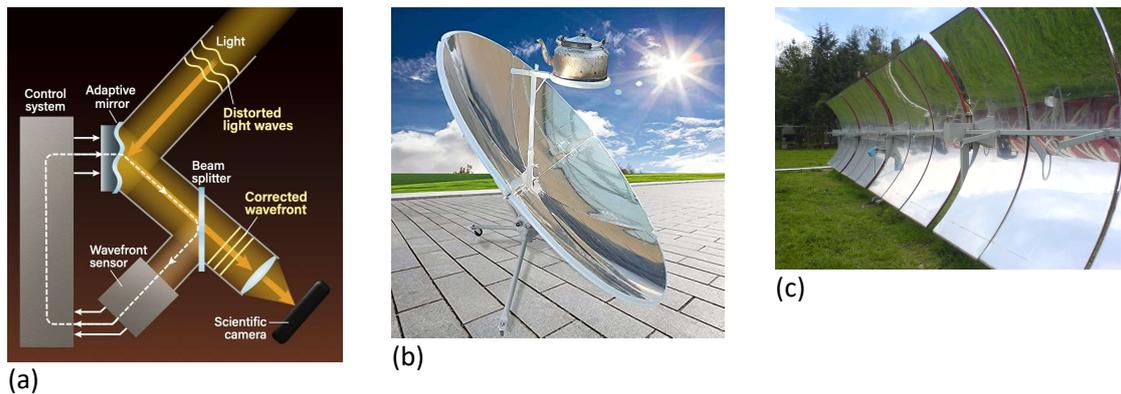


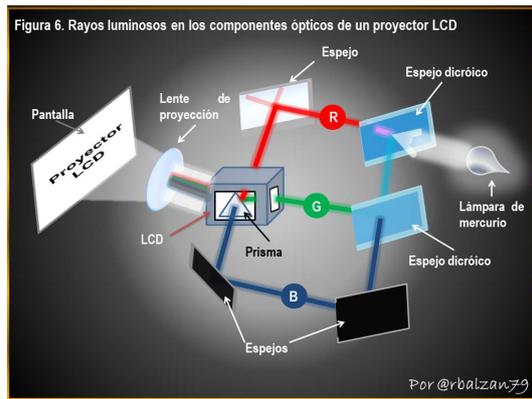
Figura 38. (a) Telescopio adaptativo, (b) concentrador parabólico, y (c) concentrador canal parabólico [82-84].

Otra de las áreas que ha tenido un gran impulso de aplicación de la instrumentación óptica es la **industria**, de inspección, seguridad, sistemas de reconocimiento de objetos y sistemas de visión. Con el uso de sistemas de visión nocturna, reconocimiento de personas, o sistemas de vigilancia y seguimiento de vehículos o personas. Como se puede ver en la Figura 39.



Figura 39. Sistemas de inspección y seguridad [85-89].

Otras aplicaciones de las componentes de forma libre se presentan en proyectores digitales como pantallas y proyectores, o sistemas de Automoción con sistemas de iluminación y seguridad (faros adaptativos) o parabrisas con realidad aumentada. Una imagen de algunos sistemas se muestran en la Figura 40.



(a)



(b)



(c)

Figura 40. (a) Proyector LCD, (b) Sistemas de iluminación vehicular, (c) Sistema de realidad aumentada para asistencia conductor [90-92].

7. Retos tecnológicos

A pesar de que las superficies con forma libre han revolucionado la instrumentación óptica, haciéndolos compactos, ligeros, versátiles, y de que existen diversas técnicas de manufactura para ello, aun se tienen grandes desafíos en cada una de estas técnicas existentes. Entre los principales retos se encuentran el control de la rugosidad superficial para aplicaciones de imagen ya que algunas técnicas emplean mascarar o moldes los cuales presentan huellas de las herramientas con las que se trabajaron, otro reto es la compensación de errores en sistemas de fabricación ya que la precisión que se tiene en algunas técnicas sobre todo aditivas no es grande y no se logra compensar dichos errores introducidos.

Otro desafío es el contar un estándar de medición para dichas tecnologías ya que al diseñar elementos con forma libre con diferentes bases matemáticas, y las técnicas de verificación de calidad empleada miden diferentes parámetros, como aberraciones del frente de onda, medición de pendientes, o desviaciones de forma. Es menester estandarizar dichas mediciones. Un desafío que se tiene que atender es la integración de sistemas de alineación activa, ya que al fabricar la componente, y pasar a la etapa de evaluación de su acabado, esta es llevada a otro arreglo experimental y si estos no están homologados, al encontrar errores deberá regresar al sistema con el que se fabrico y surgen problemas para reestablecer el sistema de referencia.

En algunos más, se requiere el control de temperatura, tiempo de curado, los cuales provocan en el componente elaborado que el medio ya no sea homogéneo, ya que introducen alteraciones, el elemento a su vez presenta zonas mas frágiles o con alteraciones de forma. Por lo que se debe

continuar estudiando dichas técnicas para mejorar los procesos de manufactura y garantizar un elemento libre de estas afectaciones.

8. Conclusiones

En este documento se han revisado las principales técnicas de manufactura de componentes de forma libre que existen en la actualidad, también se ha descrito lo que es una superficie de forma libre, los materiales empleados, las técnicas tradicionalmente empleadas para evaluar el acabado de las componentes, las áreas de aplicación que más han resonado de las componentes, y los principales retos o desafíos que existen en dichas técnicas de fabricación y evaluación. El futuro parece prometedor pero se requiere seguir trabajando en ello.

Por otra parte, la fabricación de elementos ópticos de forma libre requiere una combinación de técnicas avanzadas de manufactura y metrología para garantizar la calidad de los elementos fabricados. Para ello, se requiere conocer previamente los parámetros de diseño, y con ello seleccionar el método óptimo que depende del material del componente, el volumen de producción requerido, las especificaciones ópticas (rugosidad, precisión de forma), las consideraciones económicas.

Por lo que el desarrollo continuo en estas tecnologías promete expandir las aplicaciones de los elementos de forma libre en sistemas ópticos avanzados. Adicionalmente las técnicas de fabricación de componentes ópticos con forma libre han avanzado significativamente en la última década, permitiendo su aplicación en una gran variedad de dispositivos. A pesar de los desafíos de manufactura y metrología, estas tecnologías están abriendo nuevas fronteras en el diseño óptico.

9. Referencias

- [1].- Rolland, J. P., Davies, M. A., Suleski, T. J., Evans, C., Bauer, A., Lambropoulos, J. C., & Falaggis, K., "Freeform optics for imaging," *Optica*. 8(2), 161-176 (2021). <https://doi.org/10.1364/OPTICA.413762>.
- [2].- Chen, J. J., Wang, T. Y., Huang, K. L., Liu, T. S., Tsai, M. D., & Lin, C. T., "Freeform lens design for LED collimating illumination," *Optics express*. 20(10), 10984-10995 (2012). <https://doi.org/10.1364/OE.20.010984>.
- [3].- Ding, Y., Liu, X., Zheng, Z. R., & Gu, P. F., "Freeform LED lens for uniform illumination," *Optics express*. 16(17), 12958-12966 (2008). <https://doi.org/10.1364/oe.16.012958>.
- [4].- Sha, W., Xiao, M., Zhang, J., Ren, X., Zhu, Z., Zhang, Y., ... & Hu, R., "Robustly printable freeform thermal metamaterials," *Nature communications*. 12(1), 7228 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27543-7>
- [5].- Kumar, S., Tong, Z., & Jiang, X., "Advances in the design and manufacturing of novel freeform optics," *International Journal of Extreme Manufacturing*. 4(3), 032004 (2022). <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac7617>

- [6].- Li, K., Xu, G., Huang, X., Xie, Z., & Gong, F., "Manufacturing of micro-lens array using contactless micro-embossing with an EDM-mold," *Applied Sciences*. 9(1), 85 (2018). <https://doi:10.3390/app9010085>.
- [7].- Brenner, K. H., Kufner, M., Kufner, S., Moisel, J., Müller, A., Sinzinger, S., ... & Mohr, J., "Application of three-dimensional micro-optical components formed by lithography, electroforming, and plastic molding," *Applied Optics*. 32(32), 6464-6469 (1993). <https://doi.org/10.1364/AO.32.006464>.
- [8].- Mali, R. A., Gupta, T. V. K., & Ramkumar, J., "A comprehensive review of free-form surface milling—Advances over a decade," *Journal of Manufacturing Processes*. 62, 132-167 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.014>.
- [9].- Ottevaere, H., Volckaerts, B., Vervaeke, M., Vynck, P., Hermanne, A., & Thienpont, H., "Plastic microlens arrays by deep lithography with protons: fabrication and characterization," *Japanese journal of applied physics*, 43(8S), 5832 (2004). <https://DOI.10.1143/JJAP.43.5832>.
- [10].- Roeder, M., Guenther, T., & Zimmermann, A., "Review on fabrication technologies for optical mold inserts," *Micromachines*. 10(4), 233 (2019). <https://doi.org/10.3390/mi10040233>.
- [11].- Moskaleva, A., Safonov, A., & Hernández-Montes, E., "Fiber-reinforced polymers in freeform structures: a review," *Buildings*. 11(10), 481 (2021). <https://doi.org/10.3390/buildings11100481>
- [12].- He, R., Teng, C., Kumar, S., Marques, C., & Min, R., "Polymer optical fiber liquid level sensor: A review," *IEEE Sensors Journal*. 22(2), 1081-1091 (2021). <http://doi.10.1109/JSEN.2021.3132098>.
- [13].- Peixoto, C., Valentim, P. T., Sousa, P. C., Dias, D., Araújo, C., Pereira, D., ... & Cruz, S., "Injection molding of high-precision optical lenses: A review," *Precision Engineering*. 76, 29-51 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.02.002>
- [14].- Lu, X., & Khim, L. S., "A statistical experimental study of the injection molding of optical lenses," *Journal of Materials Processing Technology*. 113(1-3), 189-195 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00606-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00606-9).
- [15].- Liu, X., Zhang, L., Zhou, W., Zhou, T., Yu, J., Lee, L. J., & Yi, A. Y., "Fabrication of Plano-Concave Plastic Lens by Novel Injection Molding Using Carbide-Bonded Graphene-Coated Silica Molds," *Journal of manufacturing science and engineering*. 141(8), 081011 (2019). doi:10.1115/1.4043980.
- [16].- Alvarado, A. S., Agustín, F. S. G., Zacarias, M. E. P., Carranza, O. H., & Oliva, V. I. M., "Evaluation of aluminum molds using the null screens test," *Proc. SPIE 12619, Modeling Aspects in Optical Metrology IX*, 12619D (10 August 2023); <https://doi.org/10.1117/12.2672430>.
- [17].- Asgar, M. A., Kim, J., Haq, M. R., Kim, T., & Kim, S. M. (2021). A comprehensive review of micro/nano precision glass molding molds and their fabrication methods. *Micromachines*, 12(7), 812.
- [18].- Zhang, L., & Liu, W. (2017). Precision glass molding: Toward an optimal fabrication of optical lenses. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 12, 3-17.

- [19].- Gurganus, D., Novak, S., Symmons, A., & Davies, M. A. (2019, June). Precision glass molding of freeform optics. In *Freeform Optics* (pp. JW1A-4). Optica Publishing Group.
- [20].- Gates, B. D., Xu, Q., Stewart, M., Ryan, D., Willson, C. G., & Whitesides, G. M. (2005). New approaches to nanofabrication: molding, printing, and other techniques. *Chemical reviews*, 105(4), 1171-1196.
- [21].- Zhou, T., He, Y., Wang, T., Zhu, Z., Xu, R., Yu, Q., ... & Wang, X. (2021). A review of the techniques for the mold manufacturing of micro/nanostructures for precision glass molding. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 3(4), 042002.
- [22].- Michaeli, W., Hessner, S., & Klaiber, F. (2009). Analysis of different compression-molding techniques regarding the quality of optical lenses. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 27(3), 1442-1444.
- [23].- Li, Y., Li, K., & Gong, F. (2021). Fabrication and optical characterization of polymeric aspherical microlens array using hot embossing technology. *Applied Sciences*, 11(2), 882.
- [24].- Moon, S. D., Lee, N., & Kang, S. (2002). Fabrication of a microlens array using micro-compression molding with an electroformed mold insert. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13(1), 98.
- [25].- Loaldi, D., Quagliotti, D., Calaon, M., Parenti, P., Annoni, M., & Tosello, G. (2018). Manufacturing signatures of injection molding and injection compression molding for micro-structured polymer fresnel lens production. *Micromachines*, 9(12), 653.
- [26].- Huang, C. (2008). Investigation of injection molding process for high precision polymer lens manufacturing (Doctoral dissertation, The Ohio State University).
- [27].- Mayer, R. (2007). Precision injection molding: how to make polymer optics for high volume and high precision applications. *Optik & Photonik*, 2(4), 46-51.
- [28].- Spina, R., Walach, P., Schild, J., & Hopmann, C. (2012). Analysis of lens manufacturing with injection molding. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13, 2087-2095.
- [29].- Pelin, G., Sonmez, M., & Pelin, C. E. (2024). The use of additive manufacturing techniques in the development of polymeric molds: a review. *Polymers*, 16(8), 1055.
- [30].- Li, H., Li, L., Naples, N. J., Roblee, J. W., & Yi, A. Y. (2017). Micro-optical fabrication by ultraprecision diamond machining and precision molding. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 12, 181-192.
- [31].- Roeder, M., Guenther, T., & Zimmermann, A. (2019). Review on fabrication technologies for optical mold inserts. *Micromachines*, 10(4), 233.
- [32].- Fang, F. Z., Zhang, X. D., Weckenmann, A., Zhang, G. X., & Evans, C. (2013). Manufacturing and measurement of freeform optics. *Cirp Annals*, 62(2), 823-846.

- [33].- Singh, I. A., S, G. K., Reddy, T. N., & Vinod, P. (2021). Freeform machining of ophthalmic toric lens mould using fast tool servo-assisted ultra-precision diamond turning process. *Journal of Micromanufacturing*, 4(1), 84-92.
- [34].- Atwood, C., Griffith, M., Harwell, L., Schlienger, E., Ensz, M., Smugeresky, J., ... & Reckaway, D. (1998, November). Laser engineered net shaping (LENS™): A tool for direct fabrication of metal parts. In *International congress on applications of lasers & electro-optics* (pp. E1-E7). AIP Publishing.
- [35].- Chen, L., Kirchberg, S., Jiang, B. Y., Xie, L., Jia, Y. L., & Sun, L. L. (2014). Fabrication of long-focal-length plano-convex microlens array by combining the micro-milling and injection molding processes. *Applied Optics*, 53(31), 7369-7380.
- [36].- Ottevaere, H., Cox, R., Herzig, H. P., Miyashita, T., Naessens, K., Taghizadeh, M., ... & Thienpont, H. (2006). Comparing glass and plastic refractive microlenses fabricated with different technologies. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 8(7), S407.
- [37].- Lee, B. G., & Scherer, A. (2001, May). Diffractive lens fabrication by replica molding. In *Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics. Postconference Technical Digest (IEEE Cat. No. 01CH37170)* (p. 84). IEEE.
- [38].- Yu, H., Zhou, G., Chau, F. S., & Lee, F. (2009). Fabrication and characterization of PDMS microlenses based on elastomeric molding technology. *Optics letters*, 34(21), 3454-3456.
- [39].- Gregg E. Davis, Jeffrey W. Roblee, and Alan R. Hedges "Comparison of freeform manufacturing techniques in the production of monolithic lens arrays", *Proc. SPIE 7426, Optical Manufacturing and Testing VIII*, 742605 (24 August 2009); <https://doi.org/10.1117/12.824451>
- [40].- Zhong, Z. W., "Advanced polishing, grinding and finishing processes for various manufacturing applications: a review," *Materials and Manufacturing Processes*. 35(12), 1279-1303 (2020). <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1772481>.
- [41].- Lasemi, A., Xue, D., & Gu, P., "Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review," *Computer-Aided Design*. 42(7), 641-654 (2010). <https://doi:10.1016/j.cad.2010.04.002>.
- [42].- Zhan, Z., Wang, K., Yao, H., & Cao, Z., "Fabrication and characterization of aspherical lens manipulated by electrostatic field," *Applied optics*. 48(22), 4375-4380 (2009). <https://doi.org/10.1364/AO.48.004375>.
- [43].- Huerta-Carranza, O., Avendaño-Alejo, M., & Díaz-Urbe, R., "Null screens to evaluate the shape of freeform surfaces: progressive addition lenses," *Optics Express*. 29(17), 27921-27937 (2021). <https://doi.org/10.1364/OE.434289>.
- [44].- Visconti, A. J., Fang, K., Corsetti, J. A., McCarthy, P., Schmidt, G. R., & Moore, D. T., "Design and fabrication of a polymer gradient-index optical element for a high-performance eyepiece," *Optical Engineering*. 52(11), 112107-112107 (2013). <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.11.112107>.
- [45].- Carrasco, R., "Evolución Histórica de los materiales usados para lentes de contacto," *Valladolid: Universidad de Valladolid* (2019). [Tesis] <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/38376>.

- [46].- Fang, F., Cheng, Y., & Zhang, X., "Design of freeform optics," *Advanced Optical Technologies*. 2(5-6), 445-453 (2013). DOI 10.1515/aot-2013-0029.
- [47].- Elgarisi, M., Frumkin, V., Luria, O., & Bercovici, M., "Fabrication of freeform optical components by fluidic shaping," *Optica*. 8(11), 1501-1506 (2021). <https://doi.org/10.1364/OPTICA.438763>.
- [48].- Gross, H., Brömel, A., Beier, M., Steinkopf, R., Hartung, J., Zhong, Y., ... & Ochse, D., "Overview on surface representations for freeform surfaces," *Proc. SPIE 9626, Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI*, 96260U 195-208 (23 September 2015). <https://doi.org/10.1117/12.2191255>.
- [49].- Ye, J., Chen, L., Li, X., Yuan, Q., & Gao, Z., "Review of optical freeform surface representation technique and its application," *Optical Engineering*. 56(11), 110901 (11 November 2017). <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.11.110901>.
- [50].- Broemel, A., Lippmann, U., & Gross, H., "Freeform surface descriptions. Part I: Mathematical representations," *Advanced Optical Technologies*. 6(5), 327-336 (2017). DOI 10.1515/aot-2017-0030.
- [51] Santiago Alvarado A., Granados Agustin F. S., Percino Zacarias M. E., Cruz Martínez V. M., Huerta Carranza O., Alvarado Martínez J. J., and Rodolfo Palma Gúzman, Methodology to manufacturing and testing freeform aluminum mold, *Proc. SPIE 13567, Modeling Aspects in Optical Metrology*, 13567-78 (Munich, Germany, 23 June 2025).
- [52].- Yulin, L., Tonghai, L., Guohua, J., Baowen, H., Junmin, H., & Lili, W. (2007). Research on micro-optical lenses fabrication technology. *Optik*, 118(8), 395-401.
- [53].- Hutley M C 1997 *Refractive lenslet arrays Micro-optics: Elements, Systems and Applications* ed H P Herzig (London: Taylor and Francis) chapter 5.
- [54].- Doetz M, Dambon O, Klocke F, Vogt C, Rascher R and Fähnle O 2018 Ductile mode single point diamond turning (SPDT) of binderless tungsten carbide molds *Proc. SPIE 10742 107420E*.
- [55].- Pizani P S, Jasinevicius R, Duduch J G and Porto A J V 1999 Ductile and brittle modes in single-point-diamond-turning of silicon probed by Raman scattering *J. Mater. Sci. Lett.* 18 1185–7.
- [56].- Takeuchi Y, Suzukawa H, Kawai T and Sakaida Y 2006 Creation of ultra-precision microstructures with high aspect ratios *CIRP Ann.* 55 107–10.
- [57].- Zhu Z W, To S, Tong Z, Zhuang Z X and Jiang X Q 2019 Modulated diamond cutting for the generation of complicated micro/nanofluidic channels *Precis. Eng.* 56 136–42.
- [58].- Cheng M N, Cheung C F, Lee W B and To S 2007 A study of factors affecting surface quality in ultra-precision raster milling *Key Eng. Mater.* 339 400–6.
- [59].- <https://www.tekniker.es/es/micromecanizado-convencional-de-ultraprecision>
- [60].- Sun Z W, To S and Zhang S J 2018 A novel ductile machining model of single-crystal silicon for freeform surfaces with large azimuthal height variation by ultra-precision fly cutting *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 135 1–11.

- [61].- Stern M B and Jay T R 1994 Dry etching for coherent refractive microlens arrays Opt. Eng. 33 3547–51
- [62].- <https://www.guiahardware.es/litografia/>
- [63].- <https://www.upm.es/recursosidi/offers-resources/servicios-cientifico-tecnologico/servicios-servicios-cientifico-tecnologico/fotolitografia-por-proyeccion-de-mascara-en-el-uv/>
- [64].- <https://www.irida.es/litografia-por-electrones/>
- [65].- Wang, M. (Ed.). (2010). Lithography. BoD–Books on Demand.
- [66].- <https://www.fountyltech.com/es/news/flow-control-in-immersion-lithography/>
- [67].- <https://compraco.com.br/es/blogs/industria/os-4-principais-fabricantes-e-marcas-de-maquinas-de-litografia-em-2024?srsIid=AfmBOoosgixDIYB0c8aJ5Cn3XLx9q5ST7J24YWBQjY-8dfuvyl5wD5BY>
- [68].- Dannberg P, Mann G, Wagner L, Brauer A (2000) Polymer UV-moulding for Micro-optical Systems and O/E-integration Micromachine Technology for Micro-optics. Proceedings SPIE 4179:137–145.
- [69].- Naessens K, Van Daele P and Baets R 2001 Laser ablation based technique for flexible fabrication of microlenses in polymer materials Proc. 2nd Int. Symp. on Laser Precision Microfabrication (Singapore) pp 124–7.
- [70].- de Schipper R 2012 Injection molding of optics for high volume consumer products Adv. Opt. Technol. 1 31–37.
- [71].- Walker D D, Brooks D, Freeman R, King A, McCavana G, Morton R, Riley D and Simms J 2001 First aspheric form and texture results from a production machine embodying the precession process Proc. SPIE 4451 267–76.
- [72].- Zou J, Zhong Y, Zhang J Z, Ekelund M and Shen Z J 2015 Separating macrostresses from microstresses in Al₂O₃–15vol%SiC particulate reinforced composites Scr. Mater. 109 84–88.
- [73].- Fang F Z, Zhang X D, Weckenmann A, Zhang G X and Evans C 2013 Manufacturing and measurement of freeform optics CIRP Ann. 62 823–46.
- [74].- <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/54/1/VazquezViA.pdf>
- [75].- <https://www.pngegg.com/es/png-sycbk>
- [76].- Malacara Daniel, “Optical Shop Testing”, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, (2007).
- [77].- Tong Z, Zhong W B, To S and Zeng W H 2020 Fast-tool-servo micro-grooving freeform surfaces with embedded metrology CIRP Ann. 69 505–8.
- [78].- <https://saberesciencias.com.mx/2015/06/01/luz-y-fibra-optica-en-un-sistema-de-comunicacion-tendencias-actuales/>
- [79].- <https://ioi.cl/cirugia-lasek/>

-
- [80].- <https://guide.medicaexpo.com/es/elegir-el-instrumento-de-oftalmologia-adecuado/>
- [81].- <https://abdominalkey.com/how-endoscopes-work/>
- [82].- <https://astro.web.uma.pt/Investigacao/Astro/Ensino/InstAst/cap4.pdf>.
- [83].- https://es.wikipedia.org/wiki/Concentrador_solar.
- [84].- <https://www.amazon.com.mx/port%C3%A1til-concentrador-bricolaje-calefact%C3%B3n-temperatura/dp/B0C9QCSXY4>.
- [85].- <https://www.visioneng.es/recursos/articulos/el-papel-de-la-inspeccion-optica-en-la-exigente-industria-actual-de-los-componentes-electronicos/>.
- [86].- <https://atriainnovation.com/blog/son-caros-sistemas-vision-artificial/>
- [87].- <https://www.defensa.com/laad-2015/meproflight-confirma-laad-importantes-pedidos-para-sistemas>.
- [88].- <https://es.linkedin.com/pulse/aplicaciones-de-visi%C3%B3n-por-computadora-frida-ru%C3%ADz>
- [89].- <https://www.dow.com/es-es/market/mkt-mobility/sub-mobility-interior-exterior-safety/app-mobility-ies-lighting-systems.html>
- [90].- <https://www.studio-22.com/blog/enciclopedia/3lcd>
- [91].- <https://www.quadisrecambios.es/blog/recambios-originales/mecanica/los-avances-tecnologicos-la-iluminacion-los-coches/>
- [92].- <https://noticias.autocosmos.com.mx/2019/12/16/parabrisas-con-realidad-aumentada-el-futuro-de-la-industria-en-temas-de-seguridad>