

Diseño de una superficie cónica en silicio cristalino

A.G. Rojas H., F. Renero C., W. Calleja A., R. Pérez R., O. Totolhua P. y F. Gracia T.
Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica,
Apartado postal 51 y 216, 72000 Puebla, Méx,
e-mail: agrojas@inaoep.mx, paco@inaoep.mx, wcalleja@inaoep.mx,
raperez@inaoep.mx, ototolhua@inaoep.mx, temich@inaoep.mx.

Recibido el 4 de mayo de 2005; aceptado el 5 de octubre de 2005

Presentamos el diseño de fabricación de una superficie cónica con $k = -6.5$. En un sustrato de silicio monocristalino, tomando como base la técnica de grabado anisotrópico con KOH. La superficie cónica es aproximada mediante ventanas esféricas. Comparaciones entre diámetro y separación de las ventanas esféricas, así como los parámetros que rigen la elección son discutidos.

Descriptores: Dispositivos optoelectrónicos; micromaquinado en microelectrónica; espejos ópticos.

A fabrication design of a conic surface ($k = -6.5$), in monocrystalline silicon substrate and based on anisotropic etching with KOH, is presented. The conical surface is approximated by means of spherical windows; comparisons between diameter and separation of the spherical windows, as well as the parameters that govern the selection are discussed.

Keywords: Optoelectronic devices; micromachining in microelectronics; optical mirrors.

PACS: 85.60.q; 85.40.Hp; 42.79.Bh

1. Introducción

Las componentes micro-ópticas esféricas son usadas en telecomunicaciones ópticas para acoplar luz a fibra óptica, en sensores de frente de onda [1] en memorias ópticas [2]. Los métodos tradicionales de fabricación, como el esmerilado y el pulido, no son aplicables debido al tamaño reducido de las componentes. Por otro lado, los métodos de fabricación indirecta como el duplicado, mediante moldeado, acuñado, depósito y repujado sobre un original, son desarrollados con la dificultad de que el original es complicado de fabricar [3]. Es posible fabricar microcomponentes ópticas con tolerancias estrictas para el radio de curvatura y espesores, garantizando mejor desempeño óptico, por micromaquinado [4].

En este trabajo presentamos el diseño de una superficie cónica reflectora, con constante de conicidad $k = -6.5$, basado en las características de fabricación de componentes ópticas mediante el grabado húmedo anisotrópico con KOH (hidróxido de potasio) [5–7]. Esta superficie óptica es aproximada mediante aberturas de ventanas circulares y es parte del diseño de un microescáner integrado en silicio. En particular, para el microescáner bidimensional se requiere un microespejo con diámetro de $505 \mu\text{m}$. Así, estudiamos los diámetros y separaciones de las ventanas, que se ajustan a la cónica.

2. Superficies esféricas

Las superficies esféricas, usadas en algunos sistemas ópticos, con simetría rotacional, están definidas por la siguiente expresión:

$$s = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2\rho^2}} + A_1\rho^4 + A_2\rho^6 + A_3\rho^8 + A_4\rho^{10} + \dots, \quad (1)$$

donde s es la sagita, $\rho^2 = x^2 + y^2$, y $c = 1/R$ (R : radio de curvatura), $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots$ son constantes esféricas de deformación y k es la constante de conicidad. Si las A_i son todas cero, la superficie es una superficie cónica de revolución [8, 9].

3. Grabado anisótropo de superficies esféricas mediante KOH

La Fig. 1 es una esquematización del grabado anisotrópico de silicio $\{100\}$ (donde $\{hkl\}$ indica equivalencia mediante relaciones de simetría, (hkl) indica un solo plano o un conjunto de planos paralelos y $[hkl]$ es la dirección perpendicular al plano (hkl) ; sólo en cristales cúbicos como es nuestro caso, $\langle hkl \rangle$ indica una dirección, y (hkl) son los índices de Miller). En la Fig. 2 mostramos una estructura cúbica simple para representar la familia de planos $\{100\}$.

Primero pequeñas aberturas circulares son grabadas en una máscara resistente al grabado, tal como el dióxido de silicio crecido a cierta temperatura en un horno (como en nuestro caso), nitruro de silicio u oro; la superficie posterior es protegida con fotoresina durante este paso (Fig. 1a). Segundo, una pirámide invertida es formada en el silicio debido al grabado con $KOH : H_2O$ a través de la abertura o ventana en la máscara. La sección piramidal es formada por los planos $\{111\}$ de grabado lento respecto a los planos $\{114\}$, y subtienden 54.74 grados respecto a la superficie de la oblea (001), (ver Figs. 1b, 1c y 3a) respectivamente, donde la profundidad de la sección es $d_0/\sqrt{2}$, (d_0 es el diámetro de la ventana inicial). Tercero, la máscara resistente al grabado sobre la superficie superior del silicio es removida mientras mantenemos la máscara protectora en la cara posterior (Figs. 1c y 3a).

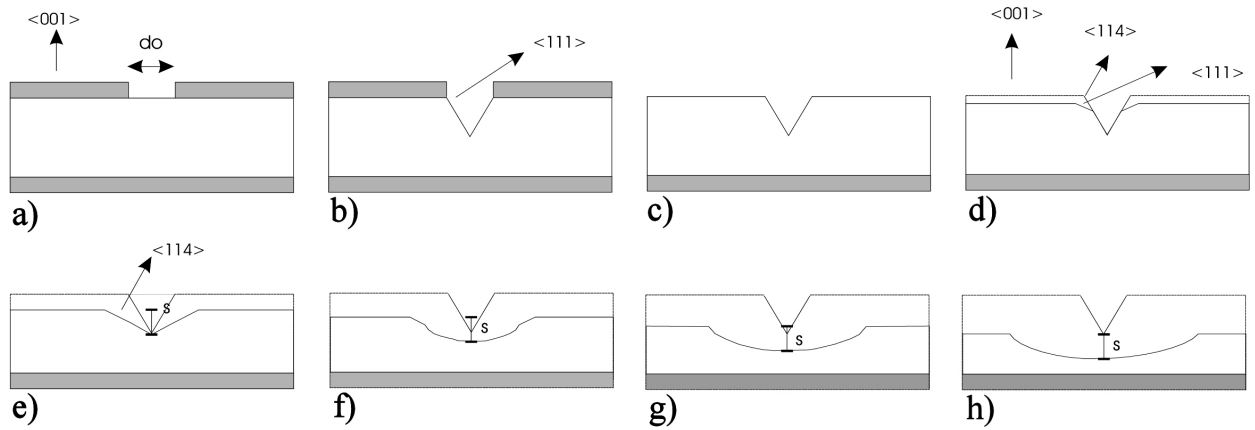


FIGURA 1. Esquematación del grabado anisotrópico de silicio mediante KOH, a) la parte gris es un óxido enmascarante, do es la ventana inicial a grabar, b) después de un primer paso de grabado tenemos una pirámide invertida formada por las caras $\langle 111 \rangle$, c) se retira la máscara superior, d) se continúa con el grabado, e) aparece nueva pirámide formada por planos $\langle 114 \rangle$, la profundidad de esta pirámide es la sagita, f) se mantiene la sagita y se empieza un suavizado, g) y h) continúa el suavizado de la depresión esférica, hasta que desaparecen los planos $\langle 114 \rangle$.

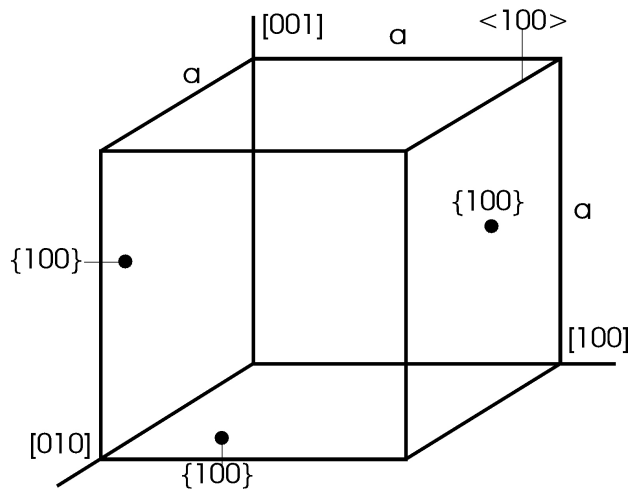


FIGURA 2. Índices de Miller para algunos de los planos de la familia de planos $\{100\}$.

Cuarto, la superficie frontal de la oblea es adelgazada por grabado adicional en $KOH : H_2O$. El enmascarado en la parte posterior de la oblea es dejado intacto para prevenir un adelgazamiento excesivo de la oblea de silicio, durante subsecuentes pasos. La pequeña sección piramidal crece y se transforma en una cavidad circular-esférica, (Figs. 1d a 1h) [4]. Los bordes convexos de las caras laterales $\{111\}$ son atacados y grabados rápidamente, formando las caras $\{114\}$, (Fig. 1d y 3b). Cuando el proceso de grabado sobrepasa completamente las caras $\{114\}$ los planos $\{111\}$ se graban lentamente (Figs. 1e, 1f y 1g). A esta profundidad crítica la sección grabada se vuelve la sagita (s), la cual es entonces establecida como una cantidad constante. Una sección esférica empieza a formarse en el fondo de la sección grabada (Figs. 1f, 3c), y crece hasta que consume las caras $\{114\}$, (Fig. 1g). La sagita se mantiene constante desde la profundidad crítica en adelante debido a que el centro de la superficie grabada es el plano (001) , que es también la superficie frontal

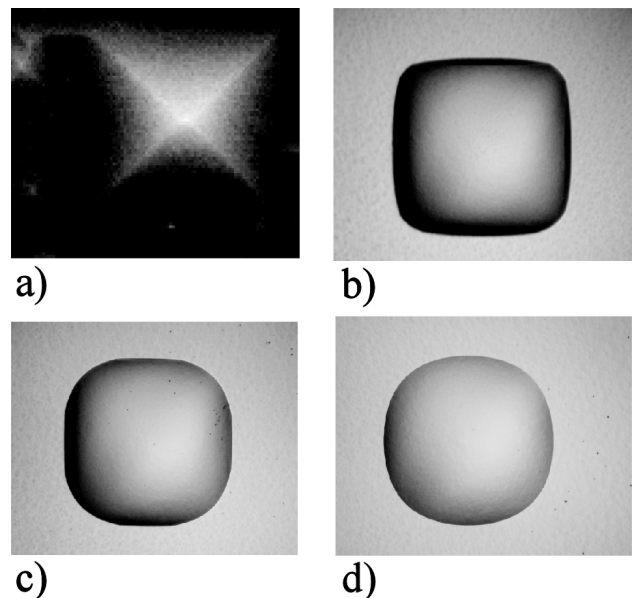


FIGURA 3. Diferentes fases del grabado anisotrópico de silicio cristalino a) corresponde a la vista superior de la Fig. 1c, b) corresponde a la vista superior de la Fig. 1d, c) corresponde a la vista superior de la Fig. 1f, y d) corresponde a la vista superior de la Fig. 1h.

de la oblea. Así, la parte frontal de la oblea y el centro de la superficie grabada, que ya es un microespejo cóncavo tienen exactamente la misma razón de grabado. Sin embargo los bordes del espejo continúan moviéndose lateralmente, permitiendo un incremento del radio de curvatura [3–5], (Fig. 1h, y 3d).

Se hace notar que las aberturas de ventanas circulares mencionadas en el primer paso son preferidas sobre las aberturas cuadradas, debido a que las primeras se autoalinean al cristal. En contraste, una abertura de ventana cuadrada desalineada (a saber con lados no paralelos a la dirección $\langle 110 \rangle$) daría una sección de grabado ligeramente mayor a lo espera-

do. La expresión para la sagita es dada por [4, 10]

$$s = d_0 \left[\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{m} \left(\frac{1}{2} \sin \theta - \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \theta \right) \right] \quad (2)$$

donde θ es el ángulo entre las caras de la segunda pirámide y la superficie superior y m es la razón de grabado (para los planos (114) y (001), $\theta = 19.47$ grados), y $m = R_{\{114\}}/R_{\{100\}}$ donde $R\{pqr\}$ indica la razón de grabado de los planos (pqr) para una concentración de KOH [10].

El resultado del grabado posterior forma una superficie redondeada en el fondo de la depresión, posiblemente como resultado del grabado más rápido de los planos $\{n11\}$ con $n > 2$, los cuales se adelantan uno tras otro consecutivamente; en el proceso las caras restantes (114) permanecen desplazándose lateralmente hasta que desaparecen. Así el diámetro de la sección esférica se incrementa (ver Figs. 1f, 1g, y 1h). Cuando la superficie superior del silicio ha sido grabada a una profundidad h , el diámetro D de la depresión esférica es dado por una formula empírica [4, 10]:

$$D = 7.8h^{0.58}d_0^{0.42} \quad (3)$$

Esta formula es sólo conceptualmente válida para $h > 2.5d_0$, profundidad a la cual no hay remanentes de los planos (114). El contorno superior evoluciona de cuadrado a circular cuando la profundidad de grabado se incrementa (Figs. 3a, 3b, 3c y 3d), para $h > 7d_0$ la uniformidad del diámetro permanece dentro del 5%, [10].

El radio de curvatura de la sección esférica resultante es dado por [4, 10]

$$R = \frac{D^2}{8s} + \frac{s}{2}. \quad (4)$$

Experimentalmente se sigue el proceso de grabado anisótropo reportado en [4], para la fabricación de microespejos, con 45% de KOH a $80^\circ C$. Midiendo arreglos de microespejos con ventanas de inicio cuadradas de lado d_0 , entre 10 y $40 \mu m$ obtuvimos radios de curvatura que varían de 2.7 mm a 2.5 mm, con la finalidad de caracterizar el proceso, la Tabla I muestra los resultados de donde dedujimos la razón sagital ($s = \alpha d_0$) midiendo la sagita s y el diámetro de la ventana de inicio d_0 .

4. Aproximación de la superficie cónica mediante traslape de ventanas circulares

Traslapando ventanas circulares aproximamos una superficie esférica arbitraria mediante depresiones esféricas con graba-

TABLE I. Obtención de α mediante valores experimentales.

$d(\mu m)$	$s(\mu m)$	$\alpha = s/d_0$
10	4.3	0.439
20	8.91	0.445
30	13.22	0.441
40	17.3	0.432
50	21.2	0.424

do anisotrópico. La Fig. 4 muestra el proceso de traslape de 2 ventanas circulares que se produce por el grabado anisótropo de depresiones esféricas. Las ventanas están separadas tal que el pico formado en la oblea de silicio es: a) igual a la sagita, b) igual a la mitad de la sagita, c) reducido a un porcentaje óptimo.

En particular para un microescáner bidimensional requerimos un microespejo con diámetro $D = 505 \mu m$ y constante $k = -6.5$. Considerando (como ejemplo debido a que las diferencias son más ilustrativas) $d_0 = 35 \mu m$, obtenemos el radio de curvatura $R = 2089 \mu m$, y la distancia focal $f = 1.04$ mm, la sagita la obtenemos de la Tabla I; con $\alpha = 0.44$.

En la Fig. 5 se muestra una sección ampliada de la gráfica de la diferencia de sagita entre la cónica y la esfera

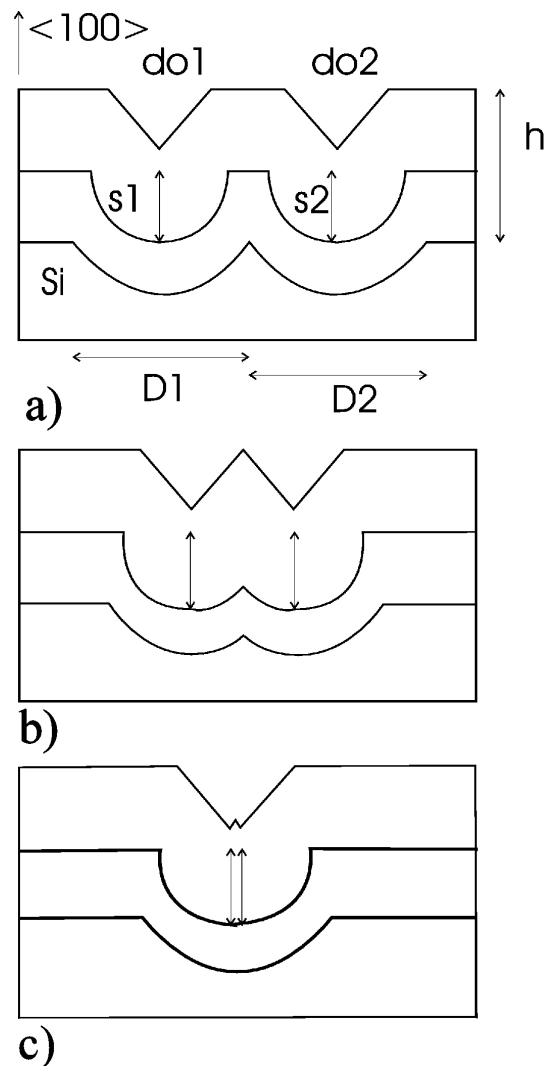


FIGURA 4. Aproximación de una superficie cónica mediante dos esferas del mismo diámetro, usando grabado anisotrópico del silicio mediante KOH , a) separación máxima que produce un error igual a la sagita, b) Se reduce el error, c) Separación ideal, con mínimo error.

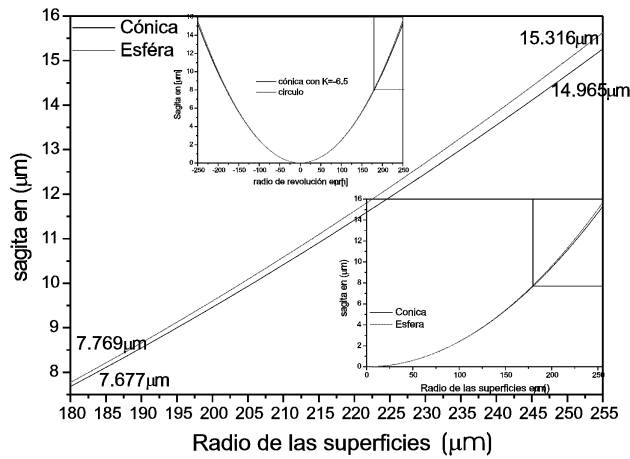


FIGURA 5. Gráfica de ejemplo de perfiles esférico y cónico ($k = -6.5$), y radio de curvatura paraxial de $2089 \mu\text{m}$ y un $d_0 = 35 \mu\text{m}$, donde se encuadra la parte que se desea resaltar.

en función de su diámetro (semidiámetro), encontrándose la esfera por encima de la cónica. En los recuadros se ilustra la parte ampliada de los valores extremos de sagita, se observa que el semidiámetro va de 180 a $255 \mu\text{m}$, región donde es más apreciable la diferencia máxima entre las dos superficies, es decir, 351nm en el extremo del semidiámetro $252.5 \mu\text{m}$, ver Tabla II.

Comparamos los perfiles de una superficie esférica con una cónica que tiene el mismo radio de curvatura paraxial. Podríamos aproximar la superficie cónica mediante un conjunto de ventanas esféricas con diferente diámetro y cerca una de otra, sin embargo esto se hace para reproducir altas frecuencias [10]. Estamos interesados en una superficie suave, por lo cual usamos una ventana circular desplazándola a lo largo del diámetro para compensar las diferencias en sagita.

La separación está limitada por la tecnología de fabricación de elementos integrados, en el INAOE, $10 \mu\text{m}$. Sin embargo, con cierto error se puede alcanzar hasta $5 \mu\text{m}$, por lo cual elegimos desplazamientos laterales de 5 y $10 \mu\text{m}$, en-

TABLE II. Desplazamiento entre las esferas para compensar la diferencia de sagita ($Desp.$), Diámetro de la ventana de inicio (d_0), razón entre la profundidad de grabado (h) y d_0 , diferencia entre sagitas de las dos superficies ($Dif.$), distancia focal (F), radio de curvatura (R).

$Desp(\mu\text{m})$	$d_0(\mu\text{m})$	h/d_0	$Dif(\text{nm})$	$F(\mu\text{m})$	$R(\mu\text{m})$
0.06	5	82.7	1.06	7311.49	14622.99
0.24	10	25.0	8.42	3655.74	7311.49
0.55	15	12.4	28.34	2437.17	4874.33
0.97	20	7.6	66.89	1827.87	3655.74
1.50	25	5.2	129.87	1462.29	2924.59
2.15	30	3.8	222.83	1218.58	2437.16
2.89	35	2.9	350.96	1044.49	2088.99
3.75	40	2.3	519.05	913.93	1827.87

tre los centros de los dos círculos desplazados que forman la máscara inicial, es decir 2.5 y $5 \mu\text{m}$ a cada lado del eje de revolución de la cónica.

En la Fig. 6 mostramos la gráfica ampliada de la sagita en función del diámetro (la zona ampliada es mostrada en el recuadro). Es clara la compensación mediante un desplazamiento radial de la ventana de inicio de $2.5 \mu\text{m}$. La máxima diferencia entre los perfiles es -133.9nm (ver Tabla III), es decir, ahora la cónica se encuentra por encima de la semi-esfera, pese a esto se logró disminuir la diferencia a menos de la mitad y esta diferencia está ubicada en la parte media, $151 \mu\text{m}$. Mientras que para desplazamientos de $5 \mu\text{m}$ la máxima diferencia entre perfiles es de 336nm . Es decir se logró disminuir pero no lo suficiente. Este último desplazamiento, junto con los resultados de la Tabla III muestran que pequeños desplazamientos producen grandes diferencias.

TABLE III. Diferencias, desplazamientos y ubicaciones: desplazamiento lateral de la ventana inicial (DL), diferencia en el extremo del diámetro final entre cónica y esfera (DE), diferencia máxima (DM), ubicación de la diferencia máxima (P), profundidad de grabado (h).

$d_0(\mu\text{m})$	$DL(\mu\text{m})$	$DE(\text{nm})$	$DM(\text{nm})$	$P(\mu\text{m})$	$h(\mu\text{m})$
5	2.5	-42.3	-70.2	549.0	417.2
	5.0	-86.0	-176.7	693.0	420.7
10	2.5	-78.1	-88.4	346.5	250.4
	5.0	-165.4	-222.5	438.0	253.0
15	2.5	-100.8	-101.1	264.5	186.7
	5.0	-231.3	-254.4	334.5	188.3
20	2.5	104.4	-111.2	218.5	151.6
	5.0	-277.3	-279.8	276.5	153.0
25	2.5	-82.7	-119.8	188.5	129.0
	5.0	-297.0	-301.2	238.5	130.1
30	2.5	-30.0	-127.2	167.0	113.0
	5.0	-285.2	-319.9	211.5	114.0
35	2.5	58.9	-133.9	151.0	101.1
	5.0	-235.8	-336.6	191.0	101.9

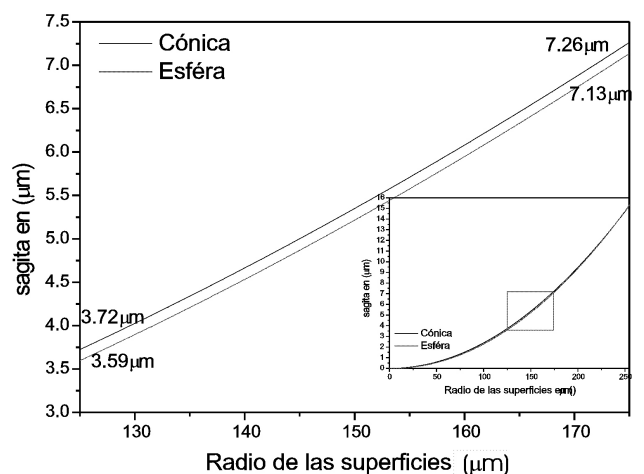


FIGURA 6. Gráfica de perfiles esférico y cónico (mismas condiciones de Fig. 5), detallando la diferencia media máxima de 133.9nm . resultado de un corrimiento de $2.5 \mu\text{m}$.

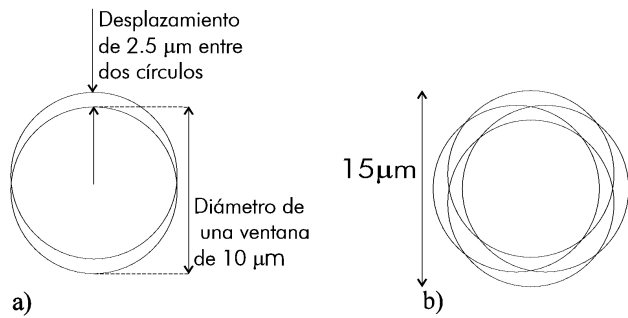


FIGURA 7. Mascara de aproximación mediante círculos de igual dimensión y separación de $5 \mu\text{m}$ entre centros, a la diferencia mínima posible.

En la Fig. 7a, mostramos el desplazamiento de una de las ventanas, y en la Fig. 7b, mostramos las cuatro ventanas circulares desplazadas lateralmente $2.5 \mu\text{m}$ respecto del eje de revolución de la cónica.

5. Resultados

En las gráficas de las Figs. 5 y 6 se muestra la diferencia entre la superficie esférica y cónica, y el desplazamiento a realizar entre las ventanas para compensar esta diferencia. Es claro de la Fig. 4 que debemos grabar sobre los planos (114) para obtener la cónica requerida.

En la Tabla II elegimos d_0 entre 5 y $40 \mu\text{m}$ con separaciones de $5 \mu\text{m}$, así en el enmascarado, la diferencia entre una cónica y una esfera crece con el incremento de d_0 .

Además, observamos que para compensar esta diferencia es necesario un corrimiento lateral de la esfera o desplazamiento (Desp), del orden de fracciones de micras, lo cual es una limitante para la tecnología de fabricación en el INAOE. La distancia focal y el radio de curvatura crecen de manera inversa con d_0 , y no son una limitante, no así h/d_0 como se menciono antes.

En la Tabla III realizamos el estudio de corrimientos laterales de los centros de los círculos que forman la máscara para la ventana inicial, en la que no consideramos $d_0 = 40 \mu\text{m}$, ya que la razón $h/d_0 < 2.5$ no satisface la Ec. (3). Para diferentes valores de d_0 se realizan dos corrimientos 5 y $10 \mu\text{m}$ entre los centros de los dos círculos, es decir, desplazamos lateralmente ambos por 2.5 y $5 \mu\text{m}$, respectivamente. Encontramos, usando la Ec. (1), las diferencias en el extremo, si estudiamos el semidiámetro con el corrimiento de $2.5 \mu\text{m}$, entonces el extremo será $255 \mu\text{m}$. Lo mismo se hace para $5 \mu\text{m}$, con estos valores mínimos posibles de corrimiento tenemos los valores de diferencias ilustrados en la Tabla III, donde se observa que la menor diferencia corresponde a $d_0=10 \mu\text{m}$. Con un corrimiento lateral entre centros de $2.5 \mu\text{m}$, hay que señalar que para $d_0=5 \mu\text{m}$ tenemos menor diferencia, pero existe la limitante h que es la profundidad de grabado, que sería igual a $417.2 \mu\text{m}$, que es la profundidad a la que tenemos el diámetro de $510 \mu\text{m}$. Ésta es una gran limitante, ya que las obleas de silicio comercial tienen un grosor aproximado de $300 \mu\text{m}$.

En la Tabla IV se hace un resumen de los valores de diferencia de camino óptico (OPD) pico-valor (P-V) y raíz cuadrática media (RMS), donde, como era de esperarse, a mayor diferencia en los extremos tenemos también mayor OPD P-V y RMS. Así, para el caso $d_0 = 10 \mu\text{m}$, un campo de visión de 11 grados y con centros de las aberturas de ventanas iniciales circulares con corrimiento de $5 \mu\text{m}$, tendremos 1.1 y 0.16 longitudes de onda de OPD P-V y RMS, respectivamente, mientras que para la cónica tenemos a ese mismo campo de visión 0.52 y 0.13 longitudes de onda, que son comparables, lo cual ocasiona astigmatismo, (ver Fig. 9). En el caso paraxial tenemos 0.58 y 0.09 y para la cónica 0.02 y 0.007 de P-V y RMS, respectivamente. Hay que señalar que la cónica es una superficie para corregir aberración esférica y la estamos aproximando mediante esferas, limitados por que esta aproximación no permite inclinar las esferas debido a la naturaleza de grabado, por tanto podemos afirmar que ésta es la mejor aproximación.

Para poder evaluar la imagen de un punto objeto que forma esta superficie cónica, usamos OSLO versión 6.2. Mostramos en la Fig. 8, el diagrama de manchas de una super-

TABLE IV. Diferencia de camino óptico pico valle y raíz cuadrática media (OPD P-V y RMS).

$d_0(\mu\text{m})$	Campo de vis. en grados	OPDP - V(λ)	OPDRMS(λ)
10	0	0.5816	0.0928
	11	1.0850	0.1582
15	0	0.8714	-0.1389
	11	1.6530	0.2375
20	0	1.1600	0.1846
	11	2.2450	0.3136
25	0	1.4480	0.2300
	11	2.8430	0.3919
30	0	1.7330	0.2748
	11	3.4330	0.4658
35	0	2.0160	0.3191
	11	4.0740	0.5467

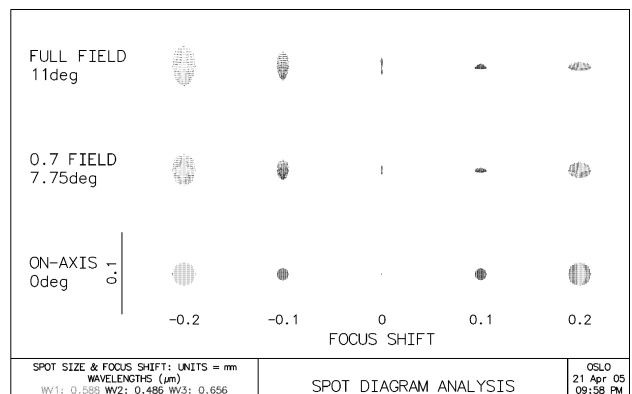


FIGURA 8. Diagrama de manchas de la cónica ideal.

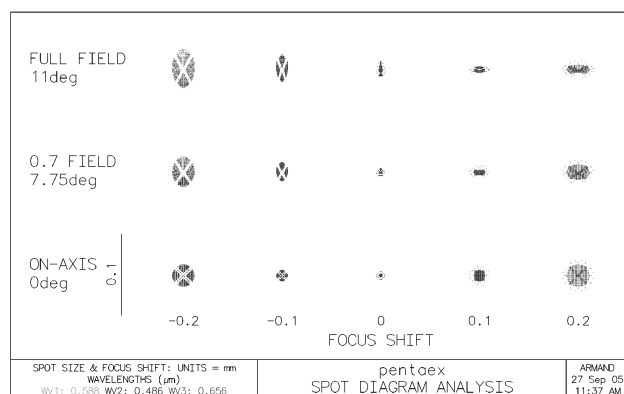


FIGURA 9. Diagrama de manchas del espejo doble.

ficie cónica reflectora con $k = -6.5$, diámetro de $505 \mu\text{m}$ y $f = 3.66 \text{ mm}$. Para esta cónica el tamaño de la mancha geométrica es de $3.2 \times 10^{-5} \text{ mm}$. Para un ángulo de campo de 11 grados observamos astigmatismo en el extremo del campo. Simulamos la superficie cónica mediante 2 espejos esféricos desplazados $2.5 \mu\text{m}$ a lo largo del semidiámetro y también en la dirección perpendicular. La Fig. 9, muestra el diagrama de manchas para el campo de 11° . El tamaño geométrico de la mancha es de $1.5 \mu\text{m}$, y comparado con la cónica es dos ordenes de magnitud mayor en eje óptico, pero en el extremo del campo, es decir a 11° , son del mismo orden, incluso con la misma aberración, (astigmatismo).

6. Conclusiones

Diseñamos una superficie cónica de constante $k = -6.5$, usamos la formulación del grabado químico húmedo mediante KOH. Obtuvimos la razón sagital para un diseño más simple.

La superficie cónica es diseñada usando ventanas circulares desplazadas $2.5 \mu\text{m}$, y tomando $d_0 = 10 \mu\text{m}$, introduciendo un error de traslape menor a 78 nm el cual nos da un diagrama de manchas en el extremo del campo de visión del mismo orden que la cónica ideal.

Con tecnología de fabricación de $0.1 \mu\text{m}$, y con un desplazamiento lateral entre los centros de los círculos que forman la máscara para la ventana de grabado inicial de $0.24 \mu\text{m}$, es posible tener el desempeño óptico ideal de la Tabla II.

La cónica y la esfera son similares, tanto que la diferencia máxima en el extremo es 8.4 nm , es decir, es menor a la que encontramos para nuestro arreglo con 4 esferas desplazadas. Esto nos permite afirmar que otra aproximación podría ser una sola ventana esférica grabada profundamente ($250 \mu\text{m}$) según la Tabla III. Para $d_0 = 5 \mu\text{m}$ se tiene menor error pero la profundidad de grabado es mucho mayor, $h = 417 \mu\text{m}$, por tanto una limitante más es el grosor de la oblea.

Aunque se ha encontrado que con grabado profundo se resuelve el problema de aproximar mediante esferas a una cónica, se continuó con su desarrollo, ya que este método no está limitado a una sola cónica particular, sino que podemos adaptarlo a cualquier superficie esférica arbitraria.

Se encontró α prácticamente, ya que la pureza de los reactivos no es la misma en cualquier lugar y depende del número de impurezas y del tiempo de almacenaje en PYREX [11].

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado mediante el proyecto CONACyT 34139A. Armando Gregorio Rojas Hernández (becario de Conacyt), agradece el apoyo económico a CONACyT por medio de Beca-Credito 136575. Los autores agradecen a Ana Maria Zarate, Gabriela Molar Velazquez y Edgar Méndez Martínez por sus comentarios y sugerencias; y al INAOE por facilitar sus instalaciones e infraestructura.

1. C. Paterson y J.C. Dainty, *Optical Letters*, **25** (2000) 1687.
2. D. Nikolov, K. Goto, Y.J. Kim y V.I. Kavardjikov, *Nanotechnology*, **13** (2000) 471.
3. H.P. Herzig, *Micro-Optics: Elements, systems and applications*, (London, Taylor & Francis, 1998).
4. D.L. Kendall, W.P. Eaton y R. Manginell, *Optical Engineering*, **33** (1994) 3578.
5. K.E. Bean, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **25** (1978) 1185.
6. D.L. Kendall, G.R. de Guel y S. Guel-Sandoval, *Appl. Phys. Lett*, **836** (1988) 1185.
7. D.A. Fletcher *et al.*, *J. of Microelectromechanical systems*, **10** (2001) 450.
8. D. Malacara, *Optical shop testing*, (Edi. John Wiley and Sons, 1978).
9. D.C. O'shea., *Elements of Modern Optical Design*, (John Wiley & Sons, N Y, 1985).
10. D.W. de Lima Monteiro *et al.*, *Optics Express*
11. Rai-Choudhury, *Handbook of Microlithography, Micromachining, y Microfabrication*, (Copublished by SPIE, 1997)