

Diseño de sistemas ópticos afocales con microlentes de silicio

A.G. Rojas H., F. Renero C., W. Calleja y R. Pérez R.
Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica,
Apartado Postal 51 y 216 Puebla, 72000, México,
Telfax: (52)(2) 2 47 29 40
e-mail: agrojas@inaoep.mx, paco@inaoep.mx,
wcalleja@inaoep.mx, raperez@inaoep.mx

Recibido el 22 de abril de 2004; aceptado el 6 de junio de 2005

Presentamos diseños de sistemas ópticos afocales para la longitud de onda de $1.5\mu\text{m}$. Los diseños están basados en el telescopio galileano, formado por una lente negativa de silicio con diámetro $305\mu\text{m}$ y la lente positiva elegida entre 10 diferentes materiales de acuerdo a su desempeño óptico, evaluado mediante el cálculo de la aberración esférica y la razón de Strehl del sistema. La evaluación muestra que el mejor desempeño es obtenido con el ZnSe.

Descriptores: Sistemas ópticos; transmisión infrarroja; materiales de aberturas; colimadores.

Design of afocal systems, for $1.5\mu\text{m}$ wavelength, are presented. They are based on the Galilean Telescope, composed of a silicon negative microlens ($305\mu\text{m}$ diameter) and a positive lens chosen between 10 different materials, according to the best optical performance. The spherical aberration and the Strehl ratio are used to compute the best optical performance. It is shown that the afocal system, that uses the ZnSe as the positive lens, has the best optical performance.

Keywords: Optical system; infrared transmitting; aperture materials; collimators.

PACS: 42.15.Eq; 42.70.Km; 42.79.Ag

1. Introducción

Los sistemas afocales son usados en una amplia variedad de propósitos, desde cambios de potencias en microscopios, escaneo infrarrojo, expansores, reductores de haz láser, visores y sensores del frente de onda. En este trabajo demostramos la factibilidad de integrar un sistema afocal galileano, (expansor, reductor) como un sensor de frente de onda en el infrarrojo cercano y realizamos el diseño para la caracterización de una microlente.

La fabricación y caracterización de un arreglo de microlentes en sustrato de silicio con el proceso de grabado húmedo mediante hidróxido de potasio (KOH) ha sido reportada en la Ref. 1. Para un sensor de frente de onda se requiere que la fase entre el haz expandido sobre la región del haz reducido sea menor o igual a un décimo de la longitud de onda.

Por otro lado, un sistema de telescopio galileano, reduce la aberración esférica y el tamaño del sistema, por ejemplo en óptica integrada; sin embargo, la selección de abertura no es posible [2]. En este trabajo un sistema de este tipo es usado para expandir o reducir el ancho del haz, de acuerdo al aumento angular (MP).

En el expansor de haz láser, si enviamos un haz angosto (o ensanchado) y colimado hacia la parte posterior de un telescopio enfocado al infinito, emergerá aún colimado, pero con una sección transversal aumentada o disminuida, respectivamente [3].

Usando como elemento negativo una microlente de silicio de $305\mu\text{m}$ de diámetro, por tener mayor uniformidad de grabado, diseñamos un reductor y expansor de haz, como se muestra en la Fig. 1. El sistema está formado de una microlente de silicio de forma plano cóncava (negativa) y una lente

positiva seleccionada de diferentes materiales. La selección de la lente positiva se hace mediante la evaluación del desempeño óptico, representado por la aberración esférica y la razón de Strehl, además comparamos la diferencia de camino óptico (OPD) pico-valle (PV) y raíz cuadrática media (RMS), respectivamente.

En general, el sistema óptico propuesto es referido como un sistema afocal, ya que ambos, objeto e imagen, están localizados al infinito. La amplificación angular de un telescopio es la razón del ángulo formado por la imagen y el ángulo formado por el objeto $MP = U_e/U_o = -f_o/f_e$, donde U_e y U_o , son los ángulos, y f_e , f_o distancias focales del objetivo y el ocular, respectivamente. La amplificación es igual al recípro-

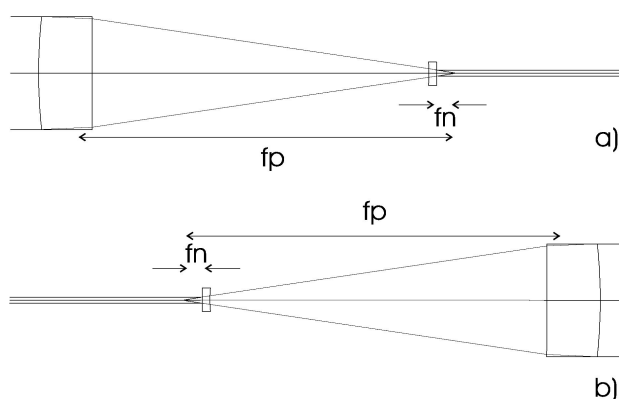


FIGURA 1. Sistemas afocales a) Telescopio Galileano, o reductor de haz. Distancia focal de la lente negativa (fn); Distancia focal de la lente positiva (fp), y b) Telescopio Galileano invertido o expansor de haz.

TABLA I. Parámetros del microespejo cóncavo de silicio que hace las veces de microlente negativa en el infrarrojo. Diámetro (Φ_n), radio de curvatura de la microlente (R_n), y espesor (e).

Silicio	$\phi_n(\mu m)$	$R_n(mm)$	$e(\mu m)$
$N=3.48206$	305	-2.618	150

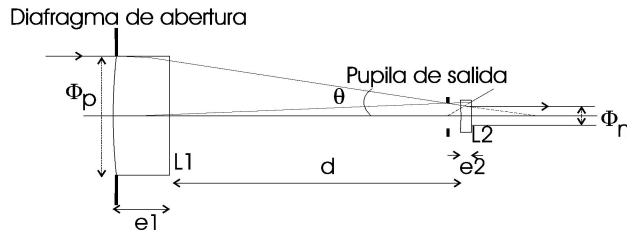


FIGURA 2. Esquematización de un sistema óptico reductor.

co de la amplificación angular $m = h'/h = 1/MP$, donde h y h' son las alturas del objeto y la imagen, respectivamente [4].

2. Diseño

Para facilitar el entendimiento del diseño de sistemas afocales empezamos teniendo clara la aplicación para determinar la amplificación y la distancia de separación entre las lentes positiva y negativa, en nuestro caso específico de un reductor de haz, las dificultades involucradas en este diseño son: que no hay un punto que localice el plano imagen, ya que los sistemas afocales tienen por característica que su imagen está al infinito. Y está es la principal dificultad también al intentar evaluar el sistema. La forma de evaluar un sistema afocal es usando una lente ideal que traiga la imagen del infinito y la ubique en un plano, donde se llevará a cabo la evaluación del sistema.

Como la lente usada es ideal, los defectos del sistema completo, serán debidos solamente al sistema afocal o reductor. Sin embargo, en nuestro caso, no es necesario realizar esta evaluación, ya que no deseamos formar imágenes sino solamente garantizar un haz colimado. Por otro lado, tenemos la dificultad del tamaño de la microlente de 305 micras, que es parte de una depresión en un sustrato de silicio, por lo que no tenerla aislada salva la dificultad de manipularla, la lente positiva se elige de un tamaño regular, ya que por un lado se quiere tener facilidad para manipularla y por el otro se quiere una amplificación que facilite la obtención de un haz colimado.

Para resolver este problema se usó la longitud de onda de 1.5 micras, ya que en esta longitud de onda, el silicio se comporta transparente, por consiguiente los materiales elegidos para la lente positiva tienen la misma característica y se estudia cual funciona mejor en el sistema. Se usa además esta longitud de onda, ya que es común en comunicaciones, y por tanto hay elementos extras para usarse si se requieren, por ejemplo, fibra óptica, rejillas, divisores, interferómetros, etc.

Se decidió evaluar directamente el sistema, pues no se requiere la formación de una imagen para medir la longitud focal de la microlente negativa, ya que basta con tener un haz colimado a la salida para poder tener la distancia d de separación entre los vértices internos a las superficies de las lentes que forman el sistema afocal.

Se usa este método por que sólo involucra dos lentes y es muy sencillo, pues al trabajar con más lentes se complica el problema. Hay que señalar que el diseño se abordó buscando un sistema afocal, para poder tener un haz colimado a la salida de la microlente y éste nos permitiera determinar la distancia d entre los vértices de las lentes que forman un sistema galileano, que no es usado como telescopio. Es por eso que en la evaluación, aunque se consideran como parámetros a la aberración de esfericidad y la razón de Strehl para elegir a la lente positiva, no consideramos, ni es tan importante, la localización de la pupila ni el viñeteo o el campo pequeño que se desprende del diseño, ya que no estamos preocupados por formar una imagen, sino sólo por tener un haz colimado.

Presentamos diseños de un expansor y reductor de haz, basados en el telescopio galileano (ver Fig. 1). De la Fig. 2, $d = fp + fn$, donde fp es la distancia focal de la lente positiva y fn la distancia focal de la lente negativa, evaluamos el desempeño óptico con lentes positivas para el infrarrojo, que tienen transmitancia cercana a 1, para $\lambda = 1.5\mu m$ a un grosor específico [5–8].

Los parámetros de la lente positiva los obtenemos al formar el expansor/reductor con los parámetros ópticos de una microlente plano-cóncava fabricada en el Laboratorio de Microelectrónica del INAOE, listados en la Tabla I.

De la Fig. 2, y usando como ejemplo la lente positiva de ZnSe, restringimos el ángulo θ a la apertura numérica

$$N.A. = \frac{\phi_n}{2f_n} = \tan \theta = 0.1446, \quad (1)$$

$\phi_n/2$ es la altura del haz en la microlente negativa o semidiámetro, y f_n es la distancia focal de la microlente. Por otro lado;

$$f_p = \frac{\phi_p}{2 \tan \theta} \quad (2)$$

donde f_p la distancia focal de la lente positiva $\phi_p/2$, la altura del haz de incidencia sobre la lente positiva o semidiámetro. Usando una lente positiva de 6 mm de diámetro y 3 mm de espesor (e_p), de la Ec.(2) hallamos su distancia focal f_p , que es igual a 20.75 mm.

Podemos determinar los radios de curvatura de la lente positiva considerando R_2 infinita, para tener una lente plano convexa. Usando la ecuación del fabricante de lentes tenemos

$$R_p = (N - 1)f_p. \quad (3)$$

El radio de curvatura es $R_p = 30.27$ mm para el ZnSe, con índice de refracción N de 2.45896 en la longitud de onda de trabajo de $1.5\mu m$, donde $f_p = 20.75mm$, es el foco de la lente positiva.

TABLA II. Valores calculados en la sección de diseño y usados en la simulación en OSLO.

SRF	RADIO (mm)	GROSOR (mm)	N
AST	30.27	3	1.693388
2	0	18.47	1
3	-2.618	0.15	3.48206
4	—	—	1

Si consideramos que el diafragma de abertura se encuentra sobre la lente positiva, entonces la pupila de salida es la imagen del diafragma de abertura (ver Fig. 2), y está ubicada a una distancia de -0.996 mm , es decir, a la izquierda de la lente negativa:

$$i = \frac{f_n d}{f_n + d}, \quad (4)$$

donde i es la posición de la pupila de salida, f_n es la distancia focal del ocular y d la separación entre vértices interiores de ambas lentes, el tamaño de la pupila de salida es de 0.305 mm. Los parámetros de este sistema óptico están mostrados en la Tabla II.

Este procedimiento se realiza para cada uno de los materiales considerados en el sistema óptico, manteniendo fija la amplificación, de tal manera que las variantes en los resultados sean solamente debidas al material.

Los materiales usados, para la lente positiva, en los diseños son CaF₂, Cuarzo, BaF₂, F₂, LaF₃, LaF₃₅, ZnS, ZnSe, Si, y Ge [5–8] (Tabla III).

3. Resultados

Se considera una amplificación de 19.67, ya que para un sistema de esta índole se tiene una lente positiva de longitud focal 20.75 mm comparada con la lente negativa de -1.054 mm, la positiva es maniobrable, ya que tiene un diámetro de 6 mm y la negativa solo 0.305 mm, se buscan estas dimensiones, ya que se quiere un sistema afocal, que funcione como reductor de haz con haces colimados de salida.

La evaluación la realizamos en OSLO, versión 6.2. El plano de evaluación es referido a la última superficie, ya que después el haz no cambiará.

La aberración fluctúa de -0.082 a -0.022 longitudes de onda, y decrece conforme el índice de refracción de la lente positiva aumenta (Tabla III). Ésta y la razón de Strehl son las figuras de mérito para elegir el material de la lente positiva. Remarcamos que esta evaluación se obtuvo para los valores calculados de separación entre los vértices internos de las lentes $d = 18.47\text{ mm}$, en el caso de ZnSe, que coincide con la suma de las distancias focales de cada lente tomando en cuenta sus respectivos planos principales.

Para aberraciones del frente de onda pequeñas, la razón de Strehl es directamente relacionada con la varianza del frente de onda. Esta normalización es usada en la Ref. 9. Una razón de Strehl mayor a 0.3 es reportada en la Ref. 10 como

una microlente útil. En la Tabla III mostramos los valores de la razón de Strehl, que están entre 0.69 para el F₂ y 0.29 para el cuarzo.

Observando la razón de Strehl y las aberraciones del sistema reductor en la Tabla III, es clara la elección del ZnSe como material para la lente positiva. Este material tiene 0.53 de razón de Strehl y la más baja aberración esférica. Sin embargo, no es el único material disponible para estos fines como se ve en la Fig. 3, ya que si observamos al ZnS, Si y Ge, se encuentran con los mismos valores de aberración.

Cabe señalar que la Fig. 3 indica el desplazamiento de los rayos como una función de la abertura, y es igualmente útil para describir aberraciones [9]. Ya que el desempeño óptico con Si es similar al sistema óptico con ZnSe, de la Fig. 3, también puede ser usado como lente positiva, con la ventaja de que puede ser integrado en un mismo sistema, bajo las mismas condiciones de grabado pero diferentes condiciones de diseño.

El material F₂ nos da la más alta razón de Strehl, pero su aberración esférica no es la mínima por lo que no es considerado. Por otro lado los gráficos de desplazamiento de rayos como una función de la abertura para CaF₂ no son considerados ya que como se ve en la Tabla III tiene la mayor aberración esférica, y para el caso del cuarzo y H-BaF₂ son graficados aparte, ya que su escala en la dirección de las diferencias es claramente mayor.

Las diferencias OPD RMS y P-V en la Tabla III muestran una correspondencia con los valores de aberración esférica y razón de Strehl, ya que a menor aberración esférica y mayor razón de Strehl tendremos menores diferencias P-V y RMS.

En la Tabla IV se muestran los valores de aberración esférica y razón de Strehl para un sistema expensor como el mostrado en la Fig. 1b, donde ahora el objetivo es la lente negativa y el ocular la positiva, la distancia d de separación es la misma que en el sistema reductor de la Fig. 1a.

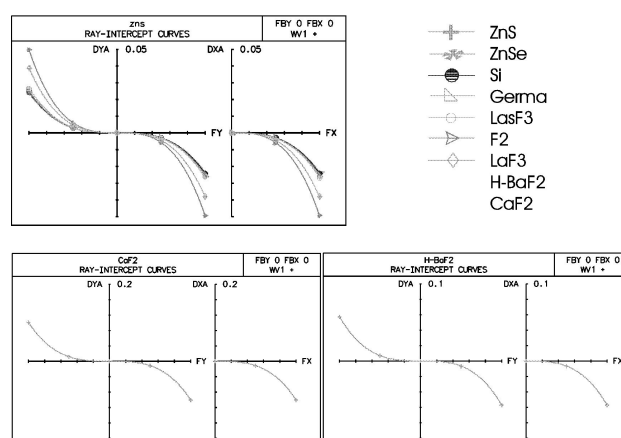


FIGURA 3. Representación gráfica de las desviaciones OPD P-V y RMS para el reductor de haz de todas las combinaciones de lentes positivas

TABLA III. Comparación de aberración esférica (AE), Índice de refracción para ($1.5 \mu\text{m}$), Diferencias de camino óptico (OPD) pico-valle (p-v), raíz cuadrática media (rms), y la razón de Strehl (R.S.) para el reductor.

	N	$AE(\lambda)$	$P - VOPD(\lambda)$	$RMS - OPD(\lambda)$	R.S.
CaF2	1.426258	-0.091	1.189	0.323	0.447
Cuarzo	1.445595	-0.083	0.560	0.185	0.291
BaF2	1.551535	-0.053	0.326	0.073	0.672
F2	1.595502	-0.046	0.313	0.088	0.689
LaF3	1.693388	-0.036	0.436	0.131	0.385
LasF35	1.975304	-0.026	0.409	0.125	0.485
ZnS	2.272153	-0.023	0.388	0.119	0.526
ZnSe	2.458966	-0.023	0.385	0.118	0.533
Silicon	3.48206	-0.024	0.390	0.119	0.523
Germa	4.234101	-0.024	0.395	0.121	0.513

TABLA IV. Comparación de aberración esférica (AE), índice de refracción para ($1.5 \mu\text{m}$), diferencias de camino óptico (OPD) pico-valle (p-v), raíz cuadrática media (rms), y la razón de Strehl (R.S.) para el expansor.

	N	$AE(\lambda)$	$P - VOPD(\lambda)$	$RMS - OPD(\lambda)$	R.S.
CaF2	1.426258	-0.005	2.450	0.765	0.027
Cuarzo	1.445595	-0.004	2.220	0.693	0.064
H-BaF2	1.551535	-0.003	1.427	0.446	0.101
F2	1.595502	-0.002	1.239	0.387	0.124
LaF3	1.693388	-0.002	0.939	0.303	0.100
LasF35	1.975304	-0.001	0.682	0.213	0.157
ZnS	2.272153	-0.001	0.615	0.192	0.215
ZnSe	2.458966	-0.001	0.607	0.19	0.225
Silicon	3.48206	-0.001	0.631	0.197	0.200
Germa	4.234101	-0.001	0.650	0.203	0.182

4. Conclusiones

Presentamos diseños de sistemas ópticos afocales (reductor y expansor de haz respectivamente) para longitud de onda de $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$.

Se confirma que a mayor índice de refracción de la lente positiva tendremos una correspondiente disminución de la aberración esférica. No así para las desviaciones OPD, P-V y RMS que tienen un punto mínimo, intermedio, esto se explica debido a que los materiales utilizados tienen diferente rango de respuesta en el infrarrojo.

Es posible además usarlo como un sistema afocal integrado en un sensor de frente de onda para el infrarrojo cercano, donde la pupila de salida es interior al telescopio [2], para el cual se selecciona como lente positiva al ZnSe ya que muestra los parámetros óptimos para el sistema.

Se demuestra de la Fig. 3 y las Tablas III y IV que es factible la integración del sistema en sustrato de silicio y más

aún la fabricación de un sensor de frente de onda, que esta formado por un interferómetro que involucra ambos sistemas (expansor y reductor), con una amplificación más baja.

Mediante este sistema afocal, podemos medir la distancia focal de una microlente negativa, conociendo la distancia focal de la lente positiva fp y la distancia d a la cual tenemos un haz colimado, entonces $fn = d - fp$.

Agradecimientos

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

1. D.L. Kendall, W.P. Eaton y R. Manginell, *Optical Engineering* **33** (1994) 3578 .
2. M. Laikin, *Lens design*, 3a. Edi. (Marcel Dekker, Inc., New York, 2001) p. 159.
3. E. Hecht y A. Zajac, *Óptica*, 3ª Edi. (Addison-Wesley Iberoamericana, E.U.A,1986) p. 161
4. W.J. Smith, *Modern optical engineering*, 3a. Ed. (McGraw-Hill,2000) p. 215.
5. ZEMAX-EE Optical Design Program, Focus Software, Inc., (Tucson, 2001).
6. Essential Macleod optical coating design program, version 7.3, (Tucson, 1998).
7. H.A. Macleod, *Thin-film optical filters*, Elsevier publishing co., appendix. I, (New York 1969) p. 316.
8. M. Ohring, *Academic-Press*. (1992) 518.
9. Optics reference, Lambda Research Corporation, OSLO Software and Optics Reference version 6.1,(Littleton, MA. 2001)100,149.
10. M. Kufner y S. Kufner, *VUBPRESS-Brussels* (1997) 196.