

Estudio de una pantalla LCoS como modulador de fase

M. Goldin, G. Díaz Costanzo, S. Ledesma

Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI). Departamento de Física "Juan José Giambiagi"
 - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires - Pabellón I,
 Ciudad Universitaria (1428) - Buenos Aires - Argentina
 e-mail: ledesma@df.uba.ar mgoldin@df.uba.ar guadalupedc@gmail.com
 (Octubre de 2007)

La última tecnología en pantallas de cristal líquido está asociada a las así llamadas LCoS (liquid crystal on silicon). Los displays de este tipo tienen gran modulación de fase y alta resolución. Sin embargo, persiste aún el problema del acoplamiento entre la modulación de fase y la de amplitud. En efecto, aplicaciones como óptica difractiva, hologramas digitales o conformadores de pulsos suelen requerir que la respuesta sea pura de fase y que la amplitud se mantenga constante para casi todo el rango de niveles de gris. Para pantallas convencionales de cristal líquido que operan por transmisión, se han desarrollado métodos que permiten desacoplar la amplitud de la fase utilizando para esto polarizaciones elípticas tanto a la entrada como a la salida del sistema. Sin embargo, estudios recientes muestran que las LCoS no responden de la misma manera que las pantallas por transmisión, con lo cual los métodos mencionados no pueden ser utilizados para lograr una modulación óptima y es necesario el desarrollo de nuevos modelos. En este trabajo mostramos que una LCoS puede considerarse como una lámina retardadora, bajo ciertas aproximaciones. También presentamos una configuración que modula mayormente la fase.

Palabras clave: Óptica difractiva, pantallas de cristal líquido, LCoS, polarización.

The last technology in liquid crystal displays is associated with the so called LCoS (liquid crystal on silicon). This kind of displays have great phase modulation and high resolution. However, the coupling problem between phase and amplitude is still present. In fact, applications such as diffractive optics, digital holograms or pulse conforming systems usually require an only phase response and an almost constant amplitude over the whole gray level range. For conventional transmissive liquid crystal displays, some methods have been developed allowing the uncoupling between amplitude and phase by means of elliptical polarization in the entrance and in the output of the system. However, recent studies show that the LCoS does not respond in the same way as transmissive displays, so the mentioned methods can not be used to achieve an optimum modulation and it is necessary to develop new methods. In this work we show that under certain approximations a LCoS can be considered as a wave plate. We also present a configuration that presents a mostly phase modulation.

Key words: Diffractive optics, liquid crystal displays, LCoS, polarization.

I. INTRODUCCIÓN

Las pantallas de cristal líquido nemático, LCDs (*liquid crystal displays*) utilizadas como moduladores espaciales de luz tienen un gran interés en la corrección y conformación de frentes de onda. Se han explorado muchas aplicaciones, y se han utilizado estas pantallas como medio para representar una transmitancia compleja que puede modificar el frente de onda para diversos fines. Por ejemplo, se han realizado aplicaciones que van de la compresión de pulsos para comunicaciones ópticas a simulación de fenómenos cuánticos. Para estas pantallas se han logrado modulaciones completas para longitudes de onda cortas. Sin embargo para el rojo y el infrarrojo sólo se ha conseguido una modulación de media onda¹.

En cuanto a las pantallas LCoS (*liquid crystal on silicon*), son la última tecnología disponible, y poseen la capacidad de obtener una mayor modulación en fase. Esta capacidad fue explorada en diferentes trabajos que apuntan a la utilización de estas pantallas como focalizadores dinámicos²⁻³. Recientemente, varios trabajos se valen de estas pantallas para corregir los frentes de onda para la estabilización de haces⁴, como la precisa medición de perfiles y deformaciones de elementos microscópicos⁵.

En este trabajo se exploraron las posibilidades de una pantalla de cristal líquido nemático para ser utilizada como modulador de fase. Se analizó una pantalla por reflexión (LCoS, *liquid crystal on silicon*). A diferencia de las pantallas de cristal

líquido nemático por transmisión las pantallas LCoS poseen mayor factor de llenado logrando así píxeles más pequeños, y por ende mayor resolución.

Es sabido que las pantallas LCoS llegan a modulaciones mayores (aún mayores a 2π para ciertas polarizaciones) pero todavía no se logran configuraciones donde fase y amplitud estén desacopladas. Estas configuraciones están aún a nivel de investigación. Presentamos en este trabajo un estudio de las posibles configuraciones de una LCoS para modular mayormente la fase y mostramos una configuración con polarizaciones elípticas que permiten una modulación completa de fase con una modulación en intensidad del 30%. Presentamos además una configuración que permite una modulación de fase de $1,5\pi$, con una modulación de intensidad de 10%. Finalmente estudiamos el comportamiento de esta pantalla como lámina retardadora.

II. BÚSQUEDA DE LA CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

Trabajamos con una pantalla de cristal líquido por reflexión *Holoeye LC-R-2500*, con una resolución de 768×1024 píxeles manejada como un monitor adicional desde una PC mediante una tarjeta adaptadora DVI-D. La pantalla posee las siguientes dimensiones: $2\text{cm} \times 1.5\text{cm}$.

Se trabajó en incidencia cuasi normal (aproximadamente a

2° de la normal) en una configuración similar a la utilizada por Kohler *et al.*⁶. Para lograr ángulos de incidencia pequeños se ubicó la pantalla a 230 cm del láser. Cabe destacar que al no poseer aún un modelo que prediga el comportamiento de la pantalla como modulador, se ha recurrido a procedimientos empíricos. Para esto se han variado en forma sistemática las configuraciones de los elementos polarizantes, hasta encontrar los mejores resultados de modulación. Los resultados más significativos están presentados en la siguiente sección. Como base se han tomado resultados inherentes a las pantallas por transmisión para los cuales los modelos y los experimentos predicen una máxima modulación de fase desacoplada de la amplitud para polarización elíptica tanto a la entrada como a la salida del cristal. Por este motivo se ha procedido añadiendo estos elementos en distintos pasos para tratar de optimizar la respuesta.

En primer lugar se trabajó con luz linealmente polarizada utilizando para ello un polarizador $P1$ a la entrada. A la salida de la pantalla se puso otro polarizador $P2$ y luego el fotodetector (Melles Griot calibrated photosensor) con el que se hicieron las mediciones de intensidad. Para determinar la modulación de fase se utilizó el método de Zhang *et al.*⁷. Según este método, para obtener la fase se representa una red de Ronchi o cuadrada en el modulador y se mide la intensidad relativa de los órdenes difractados junto con la transmisión del sistema para distintos niveles de gris. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\phi = \cos^{-1} \frac{r(NG) - c}{t(NG)[1 - cr(NG)]} \quad (1)$$

donde ϕ es el desfasaje, $c = (\pi^2 - 4)/(\pi^2 + 4)$, $r(NG)$ es el contraste del nivel 0 con respecto al 1, $t(NG)$ es la transmisión y NG denota la dependencia de los parámetros con el nivel de gris.

Se variaron los ejes de los polarizadores $P1$ y $P2$ pero no se consiguió desacoplar la amplitud, como se verá en la sección de resultados.

En un primer intento por mejorar la modulación de fase obtenida, se agregó una lámina retardadora, $L1$, de $\lambda/4$ para $632,8nm$ entre $P1$ y la pantalla LCoS, para incidir con luz elíptica sobre la misma. Los resultados obtenidos mejoraron claramente, como mostramos en la siguiente sección. Para esta segunda configuración debimos determinar los ángulos de $L1$ y $P2$, dejando fijo $P1$. Teniendo en cuenta que a esta altura ya conocemos el comportamiento de la curva de fase (monótonamente creciente y con mayor crecimiento en los últimos niveles de gris), alrededor del nivel de gris 180 forzamos una modulación π . Proyectamos en la pantalla una red de fase cuadrada, con una frecuencia de 8 píxeles normalizada de 0 a 180 en nivel de gris. Rotamos $L1$ hasta obtener *antes* de $P2$, intensidades similares en los tres órdenes difractados. Por último, rotamos $P2$ hasta anular el orden 0 y dejar los órdenes 1 y -1 con igual intensidad.

Se siguió trabajando en la calibración de la pantalla LCoS utilizando una última configuración experimental. Se agregó una lámina retardadora, $L2$, de 72° de desfasaje para $632,8nm$ entre la pantalla LCoS y $P2$. El criterio de elección de los án-

gulos de $L2$ y $P2$ fue similar al utilizado anteriormente. Es decir, con una red cuadrada normalizada de 0 a 180 en nivel de gris nuevamente, buscamos que los tres órdenes difractados tuvieran intensidades similares antes de $P2$, al hacer rotar $L2$. $P1$ y $L1$ se mantuvieron fijos o se variaron en ángulos pequeños.

El dispositivo se puede ver en la Figura 1. Todos los ángulos, mirando en el sentido de la propagación de la luz, crecen en sentido horario siendo el ángulo 0 el correspondiente al eje vertical del laboratorio.

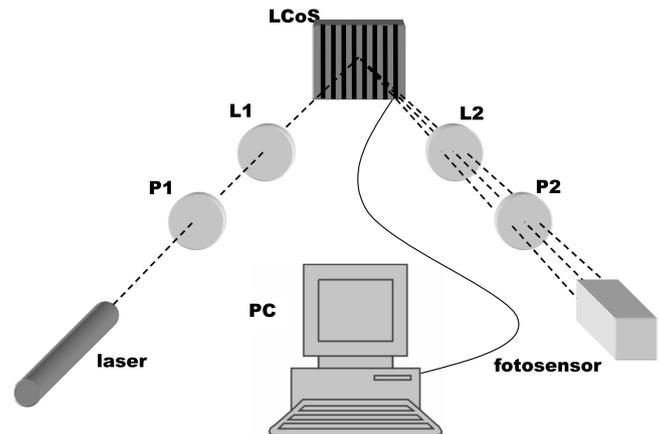


Figura 1: Dispositivo experimental utilizado para medir la modulación en fase de la pantalla LCoS. Se miden las intensidades relativas de los órdenes de difracción generados por una red de fase cuadrada en la LCoS y la transmisión para distintos niveles de gris. El fotosensor es un fotodiodo de silicio calibrado (Universal Power Meter de Melles Griot).

III. RESULTADOS

A. Modulación mayormente de fase

En la Figura 2 se muestra una de las mediciones obtenidas utilizando la primera configuración experimental. Es decir, con $P1$ y $P2$ únicamente. La modulación en fase alcanza, y de hecho supera, el valor de 2π y la intensidad oscila cualitativamente igual que en el trabajo de Osten, *et al.*⁶, que además está lejos de ser constante. El método de determinación de fase utilizado, propuesto en el trabajo de Zhang, *et al.*⁷, no puede predecir adecuadamente la fase si las intensidades son muy bajas y generalmente alrededor de un valor de π , hecho que se nota claramente en la Figura 2

Sin embargo, existe un cambio notable en las mediciones cuando incorporamos $L1$. Obtuvimos oscilaciones en intensidad menores, del 40 %, y más suaves. Las mejores mediciones se pueden apreciar en las Figuras 3 y 4.

Por lo tanto, aún incorporando $L1$ es posible modular la fase en 2π . De las Figuras 3 y 4 es posible observar que la modulación en fase se mantiene entre pequeños cambios en la posición de $P2$ y $L1$. Esto nos indica que las configuraciones medidas, no son muy sensibles a cambios en estos ángulos.

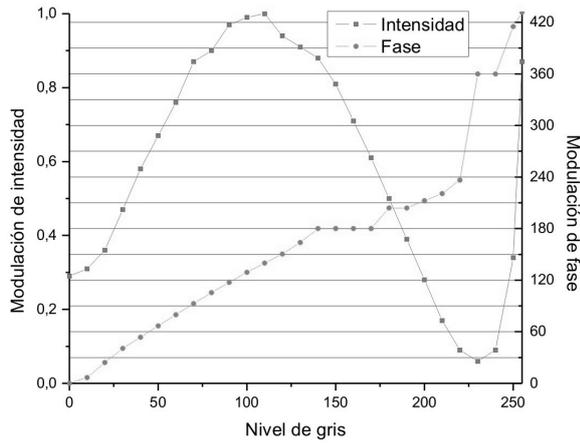


Figura 2: Modulación de intensidad y fase para niveles de gris en la pantalla LCoS utilizando $P1$ a 48° a la entrada y $P2$ a 15° a la salida. Se llega a una modulación de fase mayor a 2π .

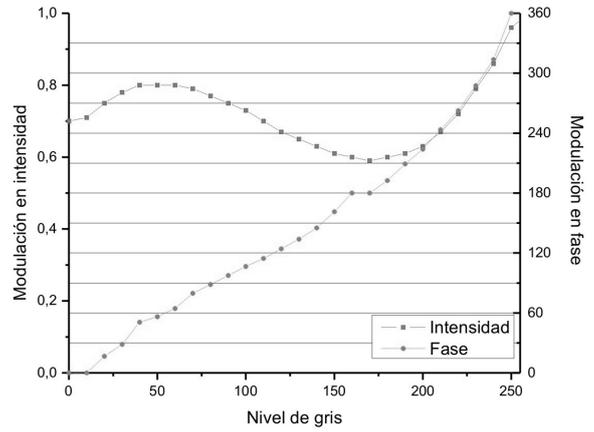


Figura 4: Modulación de intensidad y fase para niveles de gris en la pantalla LCoS utilizando $P1$ a 50° , $P2$ a 5° y $L1$ a 100° . Se llega a modulación de fase 2π .

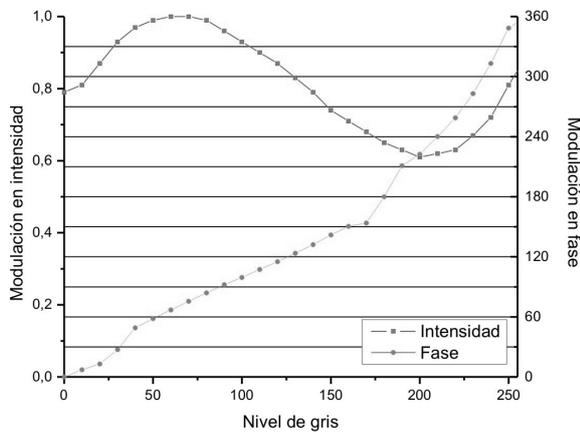


Figura 3: Modulación de intensidad y fase para niveles de gris en la pantalla LCoS utilizando $P1$ a 50° , $P2$ a 10° y $L1$ a 110° . Se llega a modulación de fase 2π .

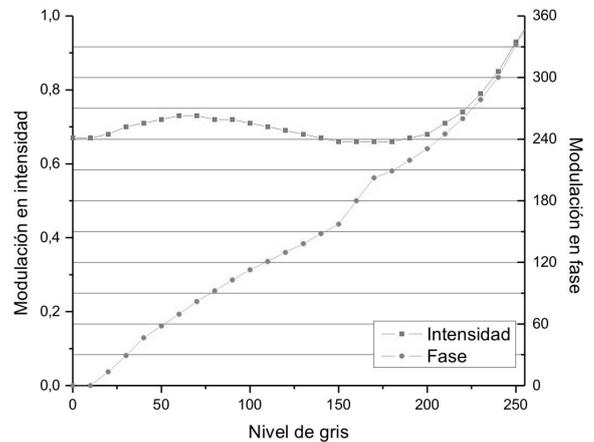


Figura 5: Modulación de intensidad y fase para niveles de gris en la pantalla LCoS utilizando $P1$ en 50° , $L1$ en 100° , $L2$ en 0° y $P2$ en 5° . Se llega a modulación de fase 1.5π con intensidad casi constante.

Incorporando $L2$ al sistema, obtuvimos gráficos que cualitativamente conservan la forma. Es decir, se llega a modulación 2π y la intensidad oscila de la misma forma que con la segunda configuración utilizada con $L1$. Los resultados óptimos se muestran en las Figuras 5 y 6. En la primera, hay modulación $1,5\pi$ hasta el nivel de gris 220. Para esta configuración, la intensidad se mantiene prácticamente constante, con variaciones del 10%. Si aceptamos variaciones que lleguen al 30%, como se ve en la Figura 6, entonces la modulación en fase es de 2π .

Una vez encontrada la modulación deseada se realizó un ajuste inverso de la curva de modulación en fase para cada caso con un polinomio de grado 7. Los coeficientes obtenidos se llevan al programa de generación de imágenes *ImageLab05*, que fue diseñado especialmente para generar y proporcionar

imágenes en escala de grises a la pantalla LCD. De esta manera, las imágenes que se envían a la pantalla se realizan en un rango de 0 a 2π , haciendo el programa la conversión correspondiente a nivel de gris.

Para probar la capacidad de modulación de las configuraciones encontradas se decidió probarlas con una red de blaze de fase 2π que produjese la anulaci3n del orden 0 de difracci3n y la m3xima intensidad en el orden 1. La red fue de un per3odo de 8 pixeles. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla I.

Vemos que las fases encontradas responden aceptablemente. Para los casos elegidos se logra encender casi totalmente el primer orden difractado con un aporte de menos del 4% y 3% en ambos casos respectivamente.

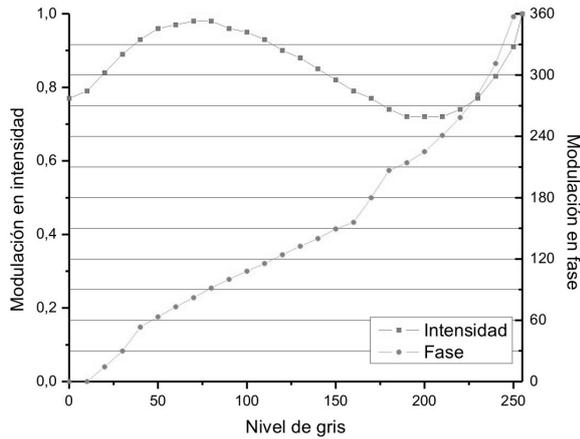


Figura 6: Modulación de intensidad y fase para niveles de gris en la pantalla LCoS utilizando $P1$ en 50° , $L1$ en 110° , $L2$ en 6° y $P2$ en 9° . Se llega a modulación de fase 2π con intensidad con variaciones del 30 %.

Tabla I: Intensidades obtenidas para los órdenes 0 y 1 para una red de blaze de fase 2π generada en la pantalla LCoS para las configuraciones que se muestran en las Figuras 5 y 6. Las intensidades muestran la buena capacidad de modulación de las configuraciones encontradas.

(nanoWatts)	Intensidad (Fig 5)	Intensidad (Fig 6)
Sin red orden 0	855	846
Con red orden 0	31	21
Con red orden 1	819	810
% luz sin difractar	3.6 %	2.5 %

B. Estudio de la pantalla como una lámina retardadora

A la vista de los satisfactorios resultados obtenidos y según el criterio de medición utilizado, decidimos tratar de buscar un modelo que explique el comportamiento de la pantalla LCoS en nuestras condiciones experimentales. Se propuso suponer a la pantalla como si fuese una lámina retardadora.

Los parámetros a determinar de una lámina son los ejes principales y el desfasaje de la misma. Estos se midieron para varios niveles de gris utilizando un conocido método que consiste en medir las intensidades resultantes al atravesar una lámina con un polarizador a la entrada y otro a la salida⁸. Las dos mediciones necesarias para calcular la fase se realizan rotando la lámina con respecto a los ejes de los polarizadores buscando la intensidad máxima en el caso de los polarizadores perpendiculares y la mínima para el caso de los paralelos. Dado que la pantalla LCoS no puede ser rotada por su montaje mecánico, los dos polarizadores debieron ser rotados a la vez. Para tener la misma intensidad de entrada al sistema al rotar el primer polarizador, debimos incidir con luz circular. Los ejes fueron encontrados midiendo la mínima transmisión que presentaba el sistema al rotar los polarizadores a 90° entre sí. Si esta transmisión fuese 0, estaríamos en presencia de una

lámina retardadora.

Los resultados obtenidos para los ejes de la pantalla fueron que este se ubicaba a los -2° con respecto a la vertical. Esto corresponde con la alineación del eje principal de las moléculas de cristal líquido en la cara externa de la pantalla. Cabe mencionar que la suposición de lámina se cumple hasta un nivel de gris de aproximadamente 150, en donde el método para encontrar los ejes ya no presenta una transmisión mínima cercana a 0.

En la Tabla II mostramos los desfasajes obtenidos para varios niveles de gris. Debemos recordar que este método es utilizado para medición de desfasaje en láminas y según los resultados obtenidos, la pantalla LCoS deja de comportarse como tal a partir de un nivel de gris de aproximadamente 100.

Tabla II: Desfasaje de la pantalla LCoS como lámina retardadora para diferentes valores de nivel de gris.

Nivel de gris	0	50	100	150	180	220	250
Desfasaje	174°	109°	72°	51°	66°	93°	157°

Vemos que sería posible trabajar con la pantalla como lámina retardadora de media hasta cuarto de onda si nos quedamos en escala de grises entre 0 y 100 aproximadamente.

A continuación realizamos una medición de las transmisiones que presenta la pantalla al incidir con luz linealmente polarizada sobre su eje y a 90° del mismo. Las mediciones se realizaron con un polarizador $P1$ a la entrada y un polarizador $P2$ a la salida. Los resultados se muestran en la Tabla III.

Tabla III: Transmisión de la pantalla LCoS en ejes perpendiculares incidiendo con luz linealmente polarizada para diferentes niveles de gris (N-G). 0° representa el eje y 90° perpendicular al eje de la pantalla, que se ubica en -2° .

N-G	P1	Intensidad		Amplitud		Total
		P2: 0°	P2: 90°	P2: 0°	P2: 90°	
0	0°	46 %	0 %	68 %	0 %	66.9 %
	90°	0 %	46 %	0 %	68 %	67.8 %
50	0°	45 %	0 %	67 %	0 %	66.9 %
	90°	0 %	46 %	0 %	68 %	68.4 %
100	0°	43 %	1 %	66 %	11 %	67.5 %
	90°	1 %	45 %	11 %	67 %	68.8 %
150	0°	38 %	5 %	62 %	23 %	68.4 %
	90°	5 %	40 %	23 %	64 %	69.2 %
180	0°	34 %	10 %	58 %	31 %	68.8 %
	90°	10 %	36 %	32 %	60 %	69.3 %
220	0°	24 %	21 %	49 %	46 %	68.1 %
	90°	21 %	25 %	46 %	50 %	68.0 %
250	0°	12 %	34 %	34 %	58 %	68.7 %
	90°	34 %	12 %	58 %	34 %	68.6 %

Vemos que la transmisión es casi nula en ejes perpendiculares hasta un nivel de gris de 150. A partir de allí la pantalla LCoS claramente deja de actuar como lámina retardadora presentando un comportamiento distinto.

IV. CONCLUSIONES

Propusimos una configuración experimental posible para la utilización de la pantalla LCoS. Esta consiste en la incidencia casi normal a la misma mediante la utilización de distancias lo suficientemente grandes entre el láser y el instrumento de medición con la pantalla.

Conseguimos encontrar empíricamente curvas que poseen una modulación principalmente de fase, llegando al máximo deseado de 2π . Obtuvimos curvas con variaciones de intensidad del orden del 30 %, y curvas con variaciones del 10 %, pero con un desfase de $1,5\pi$.

A partir del método empírico de búsqueda de configuraciones se realizaron varias mediciones con la intención de encontrar un modelo que describa al LCoS. Pensando la pantalla como una lámina retardadora se buscaron sus ejes y se

midieron sus desfasajes. Se concluyó que esta se comporta como una lámina desde un nivel de gris 0 hasta 150, teniendo desfasajes que van desde media onda hasta un cuarto de onda aproximadamente. Los ejes resultaron corresponder con la alineación de las moléculas del cristal en la cara externa de la pantalla. Además se midieron las transmisiones que esta produce al incidir en estos ejes y a 90° .

Para continuar con el estudio de la pantalla LCoS hay abiertos muchos interrogantes y propuestas posibles y creemos que el camino elegido puede ser fructífero en el corto plazo.

V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente realizado con subsidios de UBA (EX215) y ANPCYT (PICT12333).

-
- ¹ M.Goldin, G. Díaz Costanzo, S. Ledesma, Revista Anales AFA (2006)
² M.Goldin, G. Díaz Costanzo, O. E. Martínez, S. Ledesma, AIP-Proceeding of VI RIAO-OPTILAS, a ser publicado.
³ Q. Mu, Z. Cao, L. Hu, D. Li, L. Xuan, Opt.Exp 14, 18, 8013-8018 (2006)
⁴ X. Wang, B. Wang, J. Pouch, F. Miranda, M. Fisch, J. Anderson,

- V. Sergan, P. Bos, SPIE-Proceeding, (2003)
⁵ J. Kacperski, M. Kujawska, Opt. Exp. 14, 21, 9664-9678 (2006)
⁶ C. Kohler, X. Schwab, W. Osten, Appl. Opt. 45, 5, 960 (2006)
⁷ Z. Zhang, G. Lu, F. Yu, Opt. Eng 33, 9, 3018 (1994)
⁸ Born Wolf, Principles of Optics, Cambridge University Press, 6th Ed. (1980) 695.