

Caracterización de una pantalla de cristal líquido de baja resolución para su uso como modulador óptico

Characterization of a low resolution liquid crystal display to be used as an optical modulator

M. L. Álvarez ⁽¹⁾, A. Márquez ⁽¹⁾, L. A. Puerta ⁽¹⁾, R. Estévez ⁽¹⁾, E. Fernández ⁽²⁾,
A. Beléndez ⁽¹⁾, I. Pascual ⁽²⁾

1. Dep. de Física, Ing. de Sistemas y T. de la Señal, Universidad de Alicante, Ap. 99, 03080 Alicante.
2. Departamento Interuniversitario de Óptica, Universidad de Alicante, Ap. 99, 03080 Alicante.
Email de contacto: Andres.Marquez@ua.es

RESUMEN:

Existen numerosas aplicaciones donde un dispositivo monopíxel de cristal líquido puede ser interesante, tales como retardador variable, atenuador variable, etc. En estos dispositivos se tiene un control directo sobre la señal de voltaje aplicada en cada píxel, lo cual no es posible en las pantallas de cristal líquido (LCD, liquid crystal display) de elevada resolución. Este control directo facilita el estudio de las propiedades electroópticas del cristal líquido. Este trabajo se centra en el análisis de las propiedades de modulación de uno de los segmentos de un display alfanumérico de muy bajo coste. Se pretende por un lado verificar en este display si existen diferencias respecto a resultados y modelos comprobados para las pantallas LCD de alta resolución. Por otro lado, se pretende poner a punto el display para su uso como modulador óptico de sólo fase y de sólo amplitud. Se ha encontrado que se trata de un LCD el doble de grueso en comparación con lo habitual en pantallas LCD de elevada resolución. Esto nos ha permitido verificar por primera vez la validez de un modelo ya usado con pantallas LCD delgadas. El rango dinámico de modulación, principalmente de la fase, también se ve favorecido por este mayor grosor. Así se han obtenido configuraciones de modulación de sólo fase y de sólo amplitud con una longitud de onda larga (633 nm).

Palabras clave: Cristal líquido nemático, Birrefringencia, Modulador Espacial de Luz, Modulador Optico, Pantalla de Cristal Líquido.

ABSTRACT:

Monopixel liquid crystal displays are interesting devices in many applications, such as variable retarder, variable attenuator, etc. In contrast with high resolution liquid crystal displays (LCDs), in these devices the voltage is directly addressed to each pixel. This makes them a very useful device to study the electrooptic performance of LCDs. In this work we focus on the analysis of the modulation properties of one of the segments of a very low cost alphanumeric display. We want to verify if there are differences between this low resolution LCD and the results and modelling obtained in the literature for high resolution LCDs. Furthermore, we want to analyse if the display can be applied as a phase-only modulator and as an amplitude-only modulator. We have found that the thickness of the LCD is double than the usual value for high resolution LCDs. This has allowed to verify for the first time the validity of a model previously demonstrated for thin LCDs. The modulation dynamic range, in particular for the phase, is enhanced by this larger thickness. We have obtained phase-only modulation and amplitude-only modulation configurations with this thick LCD using a long wavelength (633 nm).

Keywords: Twisted Nematic Liquid Crystal, Birefringence, Spatial Light Modulator, Optical Modulator, Liquid Crystal Display.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] P. Yeh, C. Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays*, John Wiley & Sons (1999).
- [2] H. K. Liu, J. A. Davis, R. A. Lilly, "Optical-data-processing properties of a liquid-crystal television spatial light modulator", *Opt. Lett.* **10**, 635-637 (1985).
- [3] H. J. Coufal, D. Psaltis, B. T. Sincerbox, Eds., *Holographic Data Storage*, Springer-Verlag, Berlin, (2000).
- [4] A. Márquez, C. Iemmi, J. Campos, J. C. Escalera, M. J. Yzuel, "Programmable apodizer to compensate chromatic aberrations effects using a liquid crystal spatial light modulator", *Opt. Express* **13**, 716-730 (2005).
- [5] R. Dou, M. K. Giles, "Closed-loop adaptive optics system with a liquid crystal television as a phase retarder", *Opt. Lett.* **20**, 1583-1585 (1995).
- [6] S. Ledesma, H. Lozza, M. Pomata, "Undergraduate optical experiments using simple liquid crystal displays", *Proc. SPIE* **3831**, 342-351 (2000).
- [7] A. Márquez, C. Iemmi, I. Moreno, J. Campos, M. J. Yzuel, "Anamorphic and spatial frequency dependent phase modulation on liquid crystal displays. Optimization of the modulation diffraction efficiency", *Opt. Express* **13**, 2111-2119 (2005).
- [8] K. Lu, B. E. A. Saleh, "Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator", *Opt. Eng.* **29**, 240-246 (1990).
- [9] J. A. Coy, M. Zaldarriaga, D. F. Grosz, O. E. Martinez, "Characterization of a liquid crystal television as a programmable spatial light modulator" *Opt. Eng.* **35**, 15-19 (1996).
- [10] A. Márquez, J. Campos, M. J. Yzuel, I. Moreno, J. A. Davis, C. Iemmi, A. Moreno, A. Robert, "Characterization of edge effects in twisted nematic liquid crystal spatial light modulators", *Opt. Eng.* **39**, 3301-3307 (2000).
- [11] C. Soutar, K. Lu, "Determination of the physical properties of an arbitrary twisted-nematic liquid crystal cell", *Opt. Eng.* **33**, 2704-2712 (1994).
- [12] J. A. Davis, D. B. Allison, K. G. D'Nelly, I. Moreno, "Ambiguities in measuring the physical parameters for twisted nematic liquid crystal spatial light modulators", *Opt. Eng.* **38**, 705-709 (1999).
- [13] A. Márquez, C. Iemmi, I. Moreno, J. A. Davis, J. Campos, M. J. Yzuel, "Quantitative prediction of the modulation behavior of twisted nematic liquid crystal displays based on a simple physical model", *Opt. Eng.* **40**, 2558-2564 (2001).
- [14] A. Márquez, I. Moreno, J. Campos, M. J. Yzuel, "Analysis of Fabry-Perot interference effects on the modulation properties of liquid crystal displays", *Opt. Commun.* **265**, 84-94 (2006).

1. Introducción

Los dispositivos de cristal líquido son utilizados ampliamente en la electrónica de consumo como pantallas de visualización (LCD, Liquid Crystal Display) [1] que cuentan con cientos de miles de píxeles. Estas pantallas LCD han recibido considerable atención de cara a su aplicación como moduladores espaciales de luz en diversos campos, tales como la óptica difractiva, procesado óptico, óptica adaptativa, y almacenamiento holográfico de datos entre otros [2-5]. En estas aplicaciones se persigue utilizar el LCD para controlar la amplitud, la fase o/y el estado de polarización del haz de luz incidente.

En general, los dispositivos de cristal líquido con un bajo número de píxeles [6] no han recibido demasiada atención en comparación con los LCD, probablemente porque el rango de aplicaciones sea más limitado. Sin embargo, existen numerosas aplicaciones donde un dispositivo monopíxel de

cristal líquido puede ser interesante, tales como retardador variable, atenuador variable, filtro interferencial sintonizable, modulador de fase, generador de estados de polarización, etc. Otro punto de interés de los dispositivos con un bajo número de píxeles es que cada píxel puede ser direccionado directamente aplicando la señal de voltaje con un generador de formas de onda, en lugar de ser controlado con señales de vídeo desde una tarjeta gráfica. Este control más directo elimina ciertos efectos eléctricos adicionales de las pantallas LCD [7], facilitando el análisis de modelos que intentan describir las propiedades de modulación de las moléculas de cristal líquido.

Las propiedades electroópticas de un LCD se pueden caracterizar a través de una serie de parámetros, dependientes e independientes del voltaje. Las curvas de modulación dependen de éstos. Los parámetros independientes del voltaje están ligados a detalles en la construcción del LCD, como son el ángulo de giro total (α), la orientación

del director en la cara de entrada (Ψ_D) y el valor de la birrefringencia máxima. En cuanto a los parámetros dependientes del voltaje, estos se relacionan con las propiedades de anisotropía óptica del cristal a lo largo del espesor de la celda y del voltaje aplicado a ésta. Existen diferentes modelos simplificados que intentan describir estas variaciones con el voltaje [8-10]. En numerosos trabajos anteriores con pantallas LCD de elevada resolución se ha venido utilizando un modelo simplificado que permite predecir con una gran exactitud las curvas de modulación de amplitud y fase proporcionadas por los LCD [10]. En este trabajo, se aplica dicho modelo a la caracterización de un dispositivo monopíxel y se comprueba si estos dispositivos son susceptibles de ser utilizados como modulador óptico por transmisión.

2. Modelo teórico

En general las pantallas LCD más difundidas son las de estructura helicoidal en fase nemática (TN-LCD, twisted-nematic LCD). En estas pantallas el eje director del cristal líquido (coincidente con el eje óptico) describe un giro de unos 90° desde la cara de entrada hasta la cara de salida del LCD. Para calcular las curvas de modulación de los LCD es necesario conocer previamente los parámetros independientes y dependientes del voltaje [10]. El modelo en que nos basamos tiene en cuenta que las moléculas de cristal líquido próximas a los vidrios se hallan prácticamente ancladas a la superficie de los mismos y no pueden reorientarse con el voltaje aplicado [10]. En este caso, el grosor total del LCD se puede descomponer en dos regiones laterales de anchura d_1 y una región central de anchura d_2 , tal como se muestra en la Fig. 1. De este modo, las propiedades de anisotropía del LCD se pueden modelizar mediante dos parámetros dependientes del voltaje, la birrefringencia en la zona central (β) y la birrefringencia en las capas de los bordes (δ), cuyas expresiones son

$$\beta = \pi \Delta n d_2 / \lambda_0, \quad \delta = \pi \Delta n_{\max} d_1 / \lambda_0. \quad (1)$$

donde λ_0 es la longitud de onda de la luz, Δn es la diferencia entre índice extraordinario y ordinario, siendo Δn_{\max} el valor máximo. Las birrefringencias dependen del voltaje aplicado a través de las anchuras $d_1(V)$ y $d_2(V)$, y de la diferencia de índices $\Delta n(V)$, todas estas cantidades varían con el voltaje aplicado.

A partir del modelo propuesto y usando el formalismo matricial de Jones de la polarización podemos obtener la matriz M_{LCD} que describe la acción del LCD por transmisión,

$$M_{LCD} = \exp(-j(\beta + 2\delta))R(-\alpha) \begin{pmatrix} X - jY & Z \\ -Z & X + jY \end{pmatrix}, \quad (2)$$

donde $R(-\alpha)$ es la matriz de rotación, y donde

$$X = \cos \gamma \cos(2\delta) - \frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \sin(2\delta), \quad (3)$$

$$Y = \cos \gamma \sin(2\delta) + \frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \cos(2\delta), \quad (4)$$

$$Z = \frac{\alpha}{\gamma} \sin \gamma, \quad (5)$$

$$\gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}. \quad (6)$$

La expresión de la matriz dada en la Ec. (2) se obtiene considerando el sistema de referencia con su eje-x paralelo al director en la cara de entrada. Una vez tenemos la matriz podemos calcular la acción del LCD en cualquier montaje óptico.

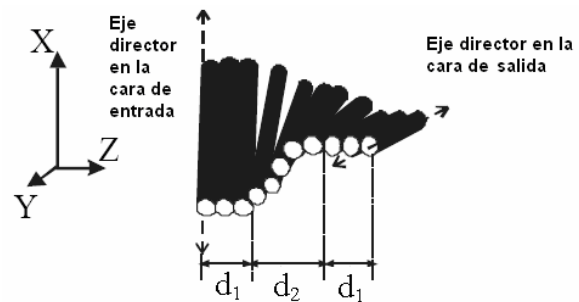


Fig.1. Regiones laterales y región central para describir la orientación del eje director.

3. Calibración del monopíxel

En este trabajo caracterizaremos un display de bajo número de píxeles. Concretamente un display alfanumérico de $3\frac{1}{2}$ dígitos, modelo C-2630, comercializado para actuar por reflexión, distribuido por CEBEK mostrado en la Fig. 2(a).

Antes de proceder a las medidas se eliminan del dispositivo dos polarizadores y una lámina plateada (que actúa como espejo) adheridos a las caras del display, quedando éste transparente, Fig. 2(b). El display tiene 32 segmentos (o píxeles) de entre los cuales escogemos uno para la caracterización, el segmento correspondiente al signo de desbordamiento o “overflow”. El display tiene un electrodo común en una de las caras y electrodos diferenciados para cada uno de los segmentos en la otra cara.

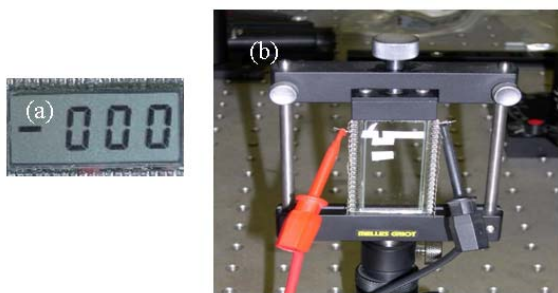


Fig. 2. Display LCD utilizado: (a) display de 3 1/2 dígitos de 0,5" (13mm), (b) detalle en el montaje óptico.

Los diferentes electrodos se corresponden con diferentes terminaciones eléctricas, o pines, de modo que podemos controlar cada segmento de manera directa conectando sus terminales a un generador de tensión. En principio la tensión a aplicar debe ser bipolar de valor medio nulo para evitar la degradación electrolítica del cristal líquido y los electrodos [1].

3.a. Parámetros independientes del voltaje

Para el calibrado de los diferentes parámetros seguimos el procedimiento experimental existente en la literatura [10-12]; el montaje experimental se muestra en la Fig. 3. El display se sitúa entre dos polarizadores (P1 y P2) en determinadas orientaciones de sus ejes de transmisión respecto a la vertical [11]; el convenio de signos utilizado se rige por un sistema de referencias a derechas con el eje X a lo largo de la vertical y el eje Z apuntando en la dirección de propagación de la luz. Los ángulos son positivos en el sentido antihorario vistos desde el detector. La intensidad a la salida es medida con un radiómetro de Newport modelo 1830-C.

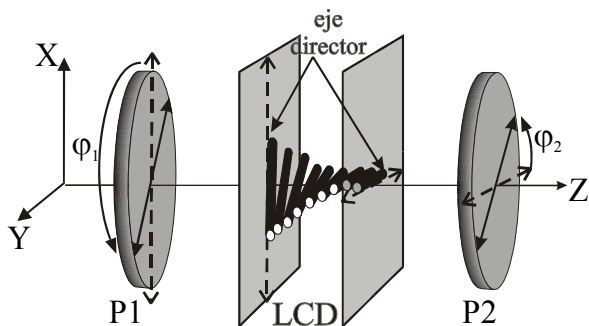


Fig. 3. Montaje experimental para la calibración del LCD.

Las medidas se realizan para tres longitudes de onda: 633 nm y 594 nm de dos láseres de He-Ne, y 532 nm de un láser de Nd:YVO₄. Se han utilizado diferentes longitudes de onda para reducir el número de conjuntos posibles de soluciones [12].

TABLA I

Parámetros independientes de voltaje.

| Parámetros del display | Resultados del ajuste |
|---|-----------------------|
| α | +95° |
| Ψ_D | +47° |
| $\beta_{\max}(\lambda_0=633_{\text{nm}})$ | 288° |
| $\beta_{\max}(\lambda_0=594_{\text{nm}})$ | 312° |
| $\beta_{\max}(\lambda_0=532_{\text{nm}})$ | 360° |

Las curvas de transmisión en intensidad experimentales se utilizan para obtener los parámetros de las expresiones teóricas; esto se realiza a través de un ajuste por mínimos cuadrados. En la Tabla I se muestran los valores obtenidos para los tres parámetros independientes del voltaje a través del ajuste.

El ángulo de giro está alrededor de los 90°, lo cual indica que el display que caracterizamos es un TN-LCD, al igual que sucede en las pantallas de LCD de alta resolución. En el caso de los displays de baja resolución es común que sean de estructura superhelicoidal (STN, supertwisted-nematic) por lo que es necesario medir el ángulo de giro en la fase inicial de la caracterización.

Por otro lado, la birrefringencia máxima obtenida es muy elevada, 288° a 360° dependiendo de la longitud de onda; ésta es del orden del doble de la birrefringencia que se encuentran habitualmente en las pantallas de LCD. Estamos hablando por tanto de un LCD grueso. En principio el modelo descrito en la sección 2 ha sido verificado con éxito en LCDs delgados. En este trabajo se comprobará por primera vez su validez en LCDs gruesos. El contar con un LCD grueso permitirá disponer de un mayor rango dinámico de modulación de fase.

3.b. Parámetros dependientes del voltaje

Los parámetros que varían con el voltaje cuyos valores se determinarán son la birrefringencia de la zona central (β), y la birrefringencia en las capas laterales (δ).

El vector campo eléctrico a la salida del sistema (E_{out}) viene dado por el siguiente producto de matrices de Jones, respecto de la vertical:

$$\vec{E}_{out} = P_x R(\alpha + \varphi_2) M_{LCD}(\alpha, \beta, \delta) \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

donde P_x es la matriz de Jones de un polarizador lineal con su eje de transmisión paralelo al eje X de coordenadas. La transmisión en intensidad del sistema (T) viene dada por el producto hermitico del campo eléctrico a la salida:

$$T = \vec{E}_{out}^\dagger \cdot \vec{E}_{out}. \quad (8)$$

En el experimento a realizar colocaremos el LCD entre dos polarizadores con ángulos φ_1 y φ_2 respecto a la orientación del director en la cara de entrada y cara de salida respectivamente, midiendo la intensidad resultante a la salida [10]. Esta medida, se realiza para cada voltaje, con valores que van desde 0 hasta 10 voltios, en pasos de 0,1 y 0,2 voltios en las zonas más sensibles, y de 0,5 voltios en las zonas de menor variación de la intensidad. La señal que aplicaremos a nuestra celda es una onda bipolar cuadrada de 1 kHz. En el caso de los cristales líquidos el valor de voltaje de interés [1] es el voltaje cuadrático medio (rms, root mean square). En este experimento se utilizan igualmente las tres longitudes de onda. Las orientaciones usadas para los polarizadores se muestran en la Tabla II.

Los ajustes realizados para las medidas experimentales y las expresiones teóricas permiten obtener los parámetros de birrefringencias. Los resultados de la calibración de valores experimentales y teóricos para las diferentes configuraciones y longitudes de ondas se muestran en las Fig. 4. Las expresiones teóricas siguen el comportamiento de las medidas experimentales, y están prácticamente solapados para las diferentes configuraciones de los polarizadores (φ_1 , φ_2) y longitudes de onda. Este resultado permite confirmar que el modelo descrito en la sección 2 es también válido para LCDs gruesos.

TABLA II
Ángulos de los polarizadores.

| Ángulos del polarizador φ_1 | Ángulos del polarizador φ_2 |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 90° | 90° |
| -45° | 45° |
| 112,5° | 22,5° |

Como puede apreciarse, la pantalla comienza a reaccionar a partir de 1 voltio aproximadamente, por tanto éste sería el voltaje umbral [1]. La máxima variación de la intensidad se obtiene en el intervalo de 1,5 a 4 voltios, mientras que a partir de los 5 voltios la intensidad permanece constante.

Los valores de las birrefringencias en las diferentes longitudes de ondas no varían libremente, sino que se impone un factor de escala entre ellas. Dicho factor de escala viene dado por el cociente entre las birrefringencias obtenidas en apagado [10].

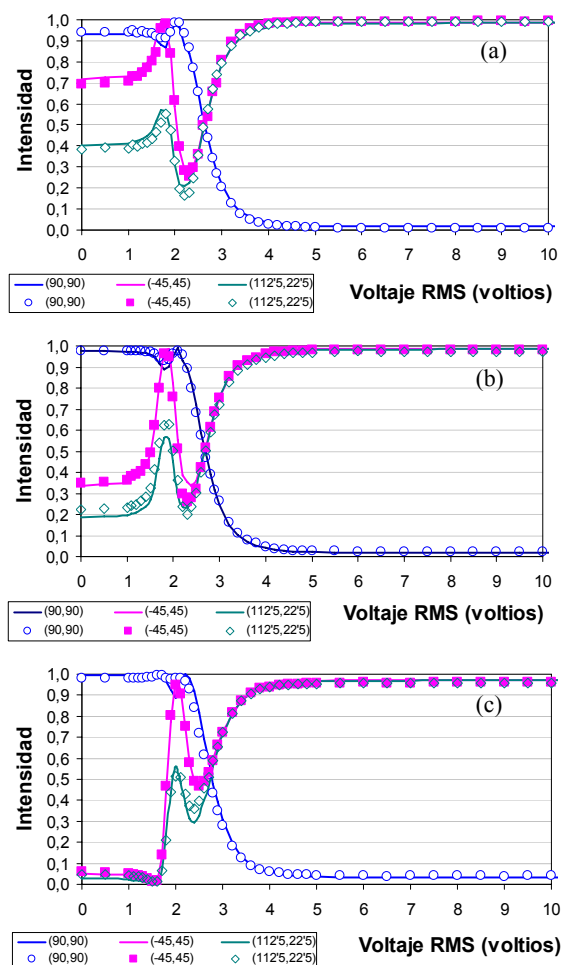


Fig. 4. Intensidad teórica (líneas) y experimental (símbolos) para distintas configuraciones de los polarizadores: (a) $\lambda=633$ nm, (b) $\lambda=594$ nm y (c) $\lambda=532$ nm.

El conjunto de las soluciones óptimas de β y δ que nos ofrece el ajuste, para las 3 longitudes de onda, se muestra en la Fig.5. Como era de esperar, la birrefringencia en la zona central (β) es mayor a menor voltaje aplicado, llegando a ser prácticamente nulo a partir de 5 voltios. La birrefringencia en las capas laterales (δ), crece inicialmente para luego volver a bajar, quedándose estable en unos 12° a partir de los 4 voltios. En trabajos anteriores [10] la birrefringencia δ tenía un comportamiento monótonamente creciente con el voltaje. A partir del modelo simplificado [10] utilizado para el ajuste de δ , lo único que tiene sentido imponer es que su valor sea nulo para voltajes por debajo del voltaje umbral. El comportamiento de δ puede ser por tanto monótonamente creciente o tener, como en la Fig. 5(b), un máximo intermedio. Sería necesario disponer de un mayor número de medidas con pantallas gruesas para poder confirmar si un perfil con máximo intermedio, tal como en la Fig. 5(b), es la tendencia en este tipo de pantallas.

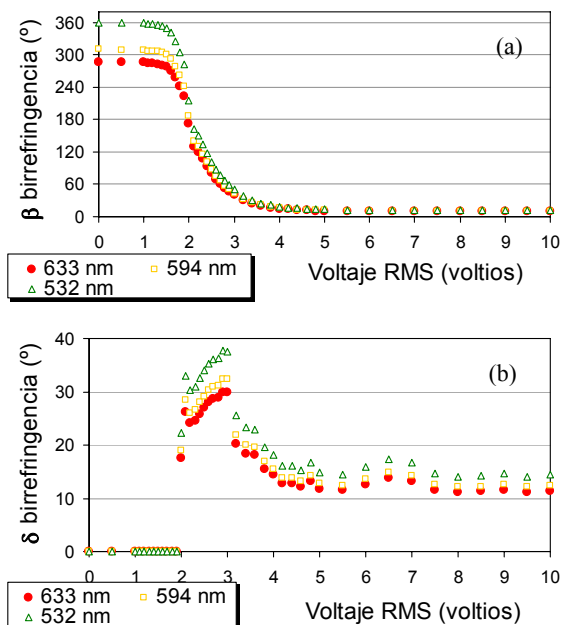


Fig. 5. Valores de β (a) y δ (b) para cada voltaje y longitud de onda.

4. Optimización de la modulación

En general, el LCD se usa insertado entre dos polarizadores, tal como se presenta en la Fig. 1. Ésta es una configuración en la cual la luz que incide sobre el LCD es linealmente polarizada y el sistema detector a la salida, formado por el analizador, es óptimo para detectar luz linealmente polarizada. Un sistema de este tipo no aprovecha todos los grados de libertad que puede ofrecer el estado de polarización de la luz. La configuración propuesta en [13] permite aprovechar al máximo la capacidad de modulación de las pantallas LCD. Ésta consiste en utilizar el modulador entre dos láminas retardadoras, además de los polarizadores. Considerando, que tanto las láminas como los polarizadores se puede rotar arbitrariamente y con total libertad, el sistema permite no sólo generar y detectar luz lineal sino también luz elíptica.

Utilizando el formalismo de Jones puede obtenerse la expresión teórica para la amplitud compleja del vector campo eléctrico a la salida del sistema. Se utilizan los resultados obtenidos en la sección 3.b. para $\beta(V)$ y $\delta(V)$ para encontrar las curvas óptimas de modulación.

En el proceso de optimización [13], se intentan obtener unas curvas de amplitud y fase que cumplan ciertos criterios. Para ello se definen las funciones de méritos apropiadas a optimizar. En la curva de sólo amplitud se desea que la transmisión en intensidad presente un máximo contraste; además de conseguir un valor de fase lo más constante posible a lo largo de todo el voltaje. Una óptima configuración de sólo fase, produce una transmisión constante de amplitud

y una variación de fase de al menos 360° en todo el rango de voltajes.

4.a. Medidas de la modulación de fase

A continuación se verifica experimentalmente el modelo teórico de optimización y se comprueba el funcionamiento del LCD como modulador de fase.

Para ello se utiliza un interferómetro de Mach-Zehnder, Fig. 6, colocando el display en uno de los brazos del interferómetro y entre los elementos de polarización; los ángulos de los polarizadores se corresponden a las orientaciones obtenidas en el proceso de optimización.

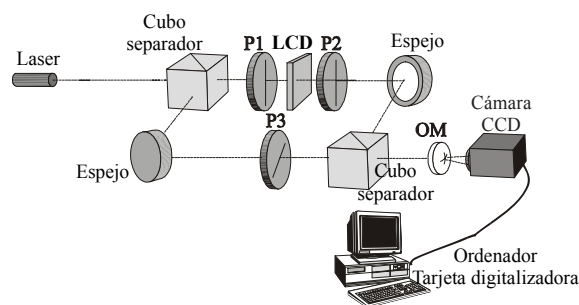


Fig. 6. Montaje del interferómetro Mach-Zehnder utilizado para la medición de la modulación de fase.

La separación del haz en los dos brazos del interferómetro y su posterior recombinación la realizan dos cubos separadores no polarizantes, marca Newport, modelo 10BC16NP.4. Controlando la orientación de los espejos y del cubo separador de salida, se introduce un ligero ángulo de inclinación entre los dos haces a lo largo del plano horizontal. De este modo, la interferencia entre los dos haces produce franjas de interferencia verticales. El objetivo del microscópico, OM de 20 aumento (20x), amplifica el tamaño de las franjas sobre la cámara CCD. La cámara CCD utilizada es de la marca Hamamatsu, modelo C5403, que proporciona una señal analógica que es adquirida y digitalizada por una tarjeta de adquisición de imágenes marca Matrox, modelo Meteor, incorporada en el ordenador. Para mejorar la resolución en la medida de la fase convendría que el periodo de las franjas fuera grande, sin embargo, para medir de manera fiable el periodo de las franjas, se necesita tener un mayor número de éstas. Un buen compromiso entre ambas condiciones se ha establecido en unas 4 franjas recogidas por la cámara CCD. El voltaje se va variando en el intervalo de 0 a 10 voltios, con intervalos de 0,5 voltios. El valor de la fase se obtiene midiendo el desplazamiento relativo de las franjas de cada imagen, respecto del interferograma obtenido para 0 voltios, que se toma como referencia. Para mejorar la relación señal-ruido en el proceso de detección se mide el desplazamiento de las franjas a partir de las imágenes resultantes de

correlacionar cada uno de los interferogramas con el interferograma de referencia. Este procedimiento es implementado en Matlab.

4.b. Resultados de la modulación de la amplitud compleja

Las optimizaciones y las medidas de fase han sido realizadas para la longitud de onda de 633 nm. Se distinguen las configuraciones con y sin láminas retardadoras, indicando en cada caso el valor de los ángulos de polarizadores que nos ofrece la optimización. Las configuraciones a tratar, son básicamente dos: configuración de sólo amplitud y configuración de sólo fase. Como ya se ha comentado, en la configuración de sólo amplitud se pretende el máximo contraste y la fase lo más uniforme posible.

En la Fig. 7. se muestran los valores de intensidad en función del voltaje para la configuración de sólo amplitud y para ángulos de 90° en cada polarizador.

La amplitud presenta una gran variación de intensidad, comenzando en valores altos para voltajes iniciales y terminando en valores nulos para voltajes elevados. La caída de intensidad es abrupta en el intervalo de 2 a 4 voltios, pudiendo diferenciar claramente las zonas en las que se presenta el máximo y el mínimo valor de amplitud. En cuanto a la modulación de fase, ésta presenta una variación de unos 110°, que aunque está lejos de ser constante, entra dentro del margen de uniformidad válido. En principio el rango de voltajes interesante de cara a aplicaciones está en el intervalo entre 2 y 5 voltios, que ofrece una caída monótona desde el valor máximo de transmisión hasta un valor mínimo cercano a cero.

Por otro lado, en la configuración de sólo fase, interesa una gran variación en la fase completando el rango de 360°, y una intensidad constante en todo el rango de voltajes. En la Fig. 8. se muestran los valores de intensidad en función del voltaje para la configuración de sólo fase para los ángulos $\phi_1 = -28^\circ$, $\phi_2 = 20^\circ$ obtenidos en la optimización.

La intensidad varía en el rango de voltajes presentando una variación del 30 % y con valores de transmitancia altos, siendo de 1,5 a 3 voltios la zona más sensible a variaciones de intensidad. Los puntos experimentales quedan totalmente solapados con los valores optimizados. En cuanto a la fase, Fig. 9, es idónea completando todo el rango de 360°, en concreto 380° en la optimización. La zona de interés de cara a aplicaciones se sitúa en el intervalo entre 2 y 3.5 voltios, a lo largo de la cual se tiene una profundidad de modulación de fase de 360°.

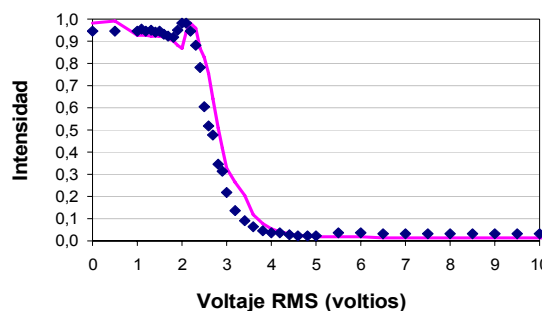


Fig. 7. Valores de intensidad en función del voltaje para la configuración “sólo amplitud”, sólo polarizadores, $\phi_1 = 90^\circ$ y $\phi_2 = 90^\circ$. Valores teóricos (líneas), valores experimentales (símbolos).

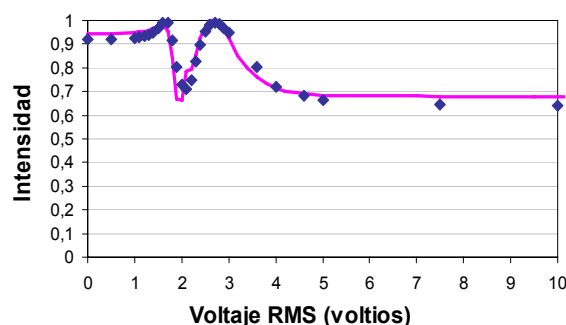


Fig. 8. Valores de fase en función del voltaje para la configuración “sólo fase”, sólo polarizadores, $\phi_1 = -28^\circ$ y $\phi_2 = 20^\circ$. Valores teóricos (líneas), valores experimentales (símbolos).

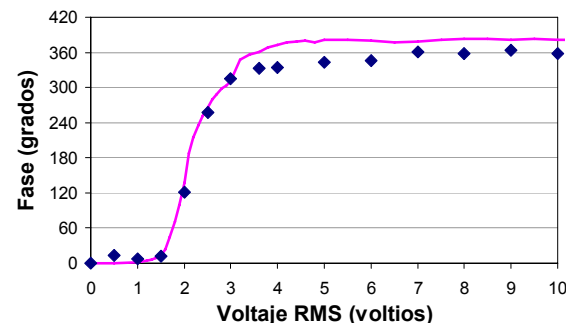


Fig. 9. Valores de fase en función del voltaje para la configuración “sólo amplitud”, sólo polarizadores, $\phi_1 = -28^\circ$ y $\phi_2 = 20^\circ$. Valores teóricos (líneas), valores experimentales (símbolos).

Por otro lado, los resultados obtenidos al utilizar láminas retardadoras nos permiten obtener un ajuste más fino en la optimización, en especial para la configuración de sólo fase. Para esta configuración, la transmisión en intensidad es más constante (en torno a un 10-15%) respecto al caso sin láminas. En cuanto a la modulación de fase se cumple con creces el objetivo, ya que llega a valores superiores a 450°. En general, en el uso de LCD más delgados como son las pantallas de elevada resolución, el régimen de sólo fase precisa de la utilización de láminas

retardadoras e iluminación con longitudes de onda cortas (azul-violeta). En el caso del LCD grueso, se obtienen resultados muy satisfactorios con sólo polarizadores y empleando longitudes de onda largas (633 nm).

5 Respuesta dinámica

En el estudio de la respuesta dinámica se aplican a la celda señales unipolares cuadradas con dos niveles de voltaje, 0 y 10 voltios, y para varias frecuencias. Medimos la señal de intensidad óptica con el radiómetro. Tanto la señal de voltaje aplicado como la señal óptica se visualizan en un osciloscopio digital, marca Tektronix, modelo 3012. En principio los valores de intensidad recogidos por el radiómetro dependen de la orientación de los elementos externos de polarización (polarizadores y/o láminas) entre los que se encuentre la pantalla.

La Fig. 10 muestra la imagen visualizada en el osciloscopio para una frecuencia aplicada de 1,2 Hz. La intensidad medida se ha obtenido con el polarizador de entrada orientado con su eje paralelo al director en la cara de entrada y sin colocar ningún analizador a la salida. La escala temporal (eje de abscisas) es de 100 ms por cuadro. La señal inferior corresponde a la señal binaria de 0 y 10 V aplicada. La señal superior corresponde a la señal de intensidad óptica recogida por el radiómetro. El origen del eje de ordenadas para las dos señales mostradas es el mismo, línea horizontal inferior de la Fig. 10. La escala en el eje de ordenadas es diferente para cada una de las dos señales: 5 V por cuadro para la señal eléctrica y 100 mV por cuadro para la señal óptica.

Como se aprecia en la Fig.10, la señal óptica es constante salvo por la existencia de dos oscilaciones de diferentes características. Dado que no hay analizador sería de esperar una señal óptica totalmente plana. Estas oscilaciones son observables debido a las interferencias producidas por las reflexiones múltiples que tienen lugar entre las diversas interfaces de la celda de cristal líquido [14]. Se observa por un lado que cuando la señal de voltaje pasa de 0 a 10 voltios, se produce una pequeña y rápida bajada en la señal óptica de una duración inferior a 20 ms. Cuando la señal de voltaje pasa de 10 a 0 voltios, se tienen un par de pequeñas oscilaciones en la señal óptica de una duración de unos 100 ms. Se obtiene entonces, que el tiempo de reacción a subidas en el voltaje es mucho menor que el tiempo de relajación cuando se produce un descenso en el voltaje aplicado.

De estos resultados, se puede prever que la principal limitación en el ancho de banda de la respuesta del cristal líquido es el tiempo de relajación. Este depende inversamente con el

cuadrado del grosor de la capa de cristal líquido [1]. Así pantallas más delgadas tienen un tiempo de respuesta más rápido. El coste asociado es que las pantallas delgadas tienen menor rango dinámico.

Variando la orientación de los polarizadores, para la medida de la intensidad óptica, se realiza una segunda toma de medidas. En este caso se coloca un polarizador a la entrada y un analizador a la salida, con sus ejes de transmisión paralelos al director en la cara de entrada y de salida, respectivamente. En la Fig. 11. se muestran las señales obtenidas. Se obtienen nuevamente los dos transitorios ya descritos en la Fig. 10 para la señal óptica, siendo más prolongada la transición para pasar de 10 a 0 V.

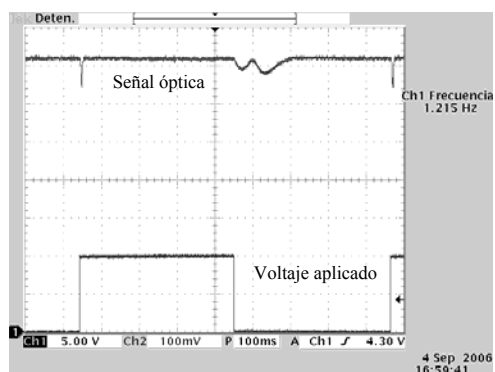


Fig. 10. Señales medidas con el osciloscopio. La señal de voltaje aplicado es binaria de valores de 0 y 10 voltios y frecuencia de 1,2 Hz. Colocando el polarizador de entrada con el eje de transmisión paralelo al director en la cara de entrada y sin analizador a la salida.

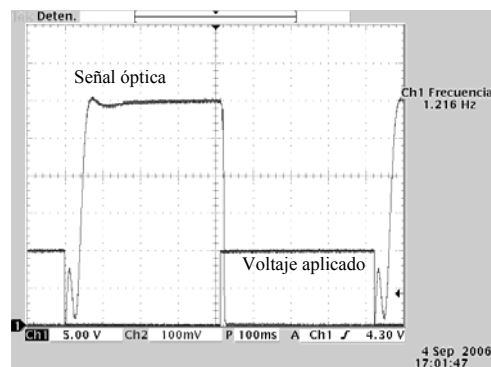


Fig. 11. Señales medidas con el osciloscopio. La señal de voltaje aplicado tiene valores de 0 y 10 voltios y una frecuencia de 1,2 Hz. Colocando polarizador a la entrada y a la salida con su eje de transmisión paralelos al director en la cara de entrada y salida, respectivamente.

Se realizaron medidas de la respuesta óptica para frecuencias superiores. Para frecuencias mayores de 5-10 Hz el transitorio cobra mayor importancia; la señal óptica resulta claramente distorsionada y deja de ser binaria. Con este análisis se ha acotado el régimen de frecuencias dentro del cual el LCD puede ser utilizado como modulador óptico en el tiempo.

6. Conclusiones

Este trabajo supone la primera aplicación del modelo propuesto en la Ref. [10] a pantallas LCD gruesas. Se ha verificado que dicho modelo, el cual incluye los efectos en los bordes del LCD a través de la birrefringencia δ , es aplicable a un LCD grueso. El buen ajuste entre valores teóricos y experimentales para diversas configuraciones de polarizadores y para varias longitudes de onda así lo demuestra.

Se ha encontrado que el voltaje umbral de la celda de LCD se encuentra alrededor de 1 voltio y, para valores superiores a los 4 voltios no se produce modulación. De este modo el rango efectivo para aprovechar la capacidad de modulación de la celda, se sitúa entre 1 y 4 voltios aproximadamente.

En este trabajo se ha verificado la capacidad del LCD como modulador de sólo fase y como modulador de sólo amplitud. Por otro lado, se ha comprobado que como modulador temporal su uso se delimita a aplicaciones que requieran bajas velocidades.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través de los proyectos FIS2005-05881-C02-01 y FIS2005-05881-C02-02, y por la Generalitat Valenciana, proyecto GV06-007.