

cristales líquidos

nuevas aplicaciones (y III)

En este último artículo de la serie se presentan algunos desarrollos que ofrecen nuevas posibles aplicaciones de los cristales líquidos. El énfasis se da a moduladores, deflectores, biestables ópticos y moduladores opto-ópticos.

J.A. Martín-Pereda, M.A. Muriel y J.M. Otón

LIQUID CRYSTALS New applications (last part)

Some new developments, based on liquid crystals, are reported in this paper. The main applications are as modulators, deflectors, optical bistable devices and opto-optical modulators.

INTRODUCCION

Una vez ofrecida, en los dos artículos anteriores, una panorámica de las diferentes clases, propiedades y aplicaciones actuales de los cristales líquidos, sólo queda ya presentar cuáles pueden ser los usos que en el futuro pueden encontrar, de acuerdo con las perspectivas que se extraen de la literatura del tema. Como es lógico, esta perspectiva tendrá un cierto sesgo hacia la componente de los trabajos que el grupo de Electrónica Cuántica de la ETS de Ingenieros de Telecomunicación está realizando en la actualidad, ya que éstos son, lógicamente, los que mejor conoce. A pesar de ello, creemos que una gran parte de los desarrollos que se están realizando a nivel mundial coinciden en un porcentaje bastante alto con lo que se presentará. Faltan aún bastantes años para que muchos de estos desarrollos puedan llegar a constituir algo tan tangible como lo que se vió en el segundo artículo de esta serie. Es posible que, incluso, algunos de ellos no resulten nunca aprovechables desde un punto de vista práctico. Pero las ideas que llevan involucrados pueden servir de base para posteriores desarrollos en campos que, quizás, no se ha pensado. Por todo ello hemos creído necesario escribir este artículo. La sola posibilidad de su uso futuro justifica nuestro planteamiento.

Y lo primero que queremos es hacer constar que, de hecho, este artículo debería tener más firmantes que los que aparecen. De una manera u otra, en él deberían figurar todos aquellos que, con su trabajo o sus ideas, lo han hecho posible. En algunos casos constituyó parte de su Tesis Doctoral; en otros, muchos días de trabajo encerrados en una habitación oscura sin más luz que la de un láser atravesando una célula de cristal líquido; en otras ocasiones, horas ante la pantalla de un terminal de ordenador en la que se pretendía justificar teóricamente un resultado experimental. A todos ellos, firmantes anónimos de este artículo, quede constancia de nuestro reconocimiento.

Los temas en los que nos centraremos son aquellos que hemos creído de más interés para los lectores. En primer lugar veremos algunas aplicaciones, como moduladores y deflectores de luz, que pueden ser de interés para comunicaciones ópticas. Su empleo en dispositivos biestables ópticos, tema que ya nos ocupó en esta misma revista hace algunos meses, constituirá la parte central del artículo. Finalmente, algunos otros tópicos, como el de la modulación opto-óptica o el de las fases azules, cerrarán esta breve exposición de un futuro posible.

MODULADORES Y DEFLECTORES

Evidentemente, la primera aplicación que surge, de modo natural, como resultado de los diferentes conceptos que fueron introducidos en los anteriores artículos, es la del empleo de células análogas a las ya vistas como moduladores de luz en general y de haces láser en particular. De igual manera a como en los visualizadores es posible ver oscurecerse periódicamente a los diferentes segmentos que lo componen de acuerdo con la señal de tensión que se les aplique, es posible también que un haz láser continuo dirigido hacia uno de dichos segmentos salga de la célula modulado. Este efecto puede aplicarse directamente para modular su intensidad a un láser y, de hecho, en múltiples ocasiones así ha sido utilizado. El inconveniente más señalado que presenta es el de su velocidad, que, como se ha visto, muy difícilmente puede ser inferior a los milisegundos. Esto se debe a que la velocidad depende del cuadrado del espesor de la célula empleada. Reducir esta velocidad implica, en consecuencia reducir el espesor. Pero éste viene limitado por el de los espaciadores empleados. Evidentemente, tecnologías especiales pueden hacer reducir la separación entre placas de la célula. Ello redundaría en una mayor velocidad pero, al mismo tiempo, en un mayor costo. En algunos casos es necesario hacer un balance entre ambos factores que conduzca a una mejor respuesta en frecuencia y un coste comparable con el de los visualizadores convencionales.

Por otra parte, conjuntamente con el problema de la modulación de un haz surge el de su deflexión. Ambos hechos son fundamentales cuando se intente dar alguna aplicación a los cristales líquidos en sistemas empleados en comunicaciones ópticas. Como es evidente, estos dispositivos basados en cristales líquidos nunca podrán hacer la mínima sombra a los basados en semiconductores, verdade-

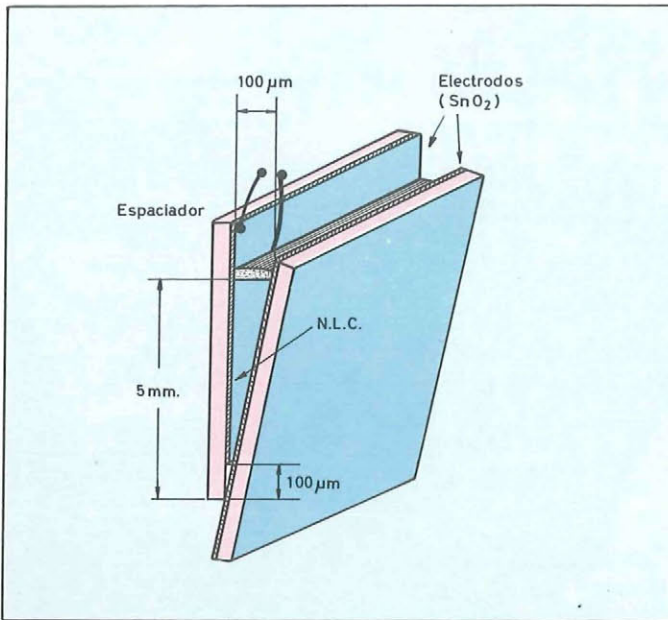


Figura 1. Configuración general de una estructura en cuña de cristal líquido.

ros y únicos protagonistas de este tipo de comunicaciones. Pero existen aplicaciones, por ejemplo en conmutación, donde la velocidad de los cristales líquidos puede ser compatible con la requerida en algunos casos. Debido a ello se han presentado en la literatura del tema, diferentes variantes de conmutadores sin que hasta el momento ninguna de las posibles configuraciones haya adquirido preferencia sobre las demás. Por ello aquí presentaremos las desarrolladas por nuestro grupo y que, en algunos aspectos, ofrece ciertas ventajas sobre las otras.

La base de nuestro desarrollo ha sido el empleo de estructuras en cuña en lugar de paralelas como es usual en los otros grupos. Un ejemplo típico aparece en la figura 1. Como puede apreciarse, la diferencia con las convencionales es el empleo de un único separador de manera que se forme la estructura en cuña requerida. Las caras internas siguen estando recubiertas de un conductor transparente con el requisito adicional aquí de que en una de las caras, la metalización sea tal que no llegue a hacer contacto con la de la otra.

Las ventajas de este tipo de estructura, con respecto al fin que aquí nos hemos propuesto, son dos. La primera es que, trabajando cerca del vértice de la cuña, pueden tenerse separaciones entre electrodos casi tan pequeñas como se

deseen. Y esto debe repercutir en el aumento de velocidad del dispositivo. La segunda, como se verá a continuación, es que una configuración como ésta dará lugar a una posibilidad de deflexión del haz láser, cosa que no puede lograrse con estructuras paralelas.

El comportamiento de estas células tiene su raíz en los diferentes índices de refracción que puede «ver» un haz láser, dependiendo de la polarización que éste tenga y de las posiciones que hayan adoptado las moléculas de dichas células. Así, y como ejemplo que sintetiza lo anterior, está el caso de la figura 2. En él, una radiación láser no polarizada incide sobre una célula cuya configuración molecular es homogénea y con los directores de sus moléculas situados ortogonalmente con respecto al eje de la cuña. La consecuencia es que cada una de las dos componentes en que puede descomponerse el haz verá índices de refracción distintos. La paralela al borde de la cuña verá un índice n_0 mientras que la perpendicular verá n_e . Debido a este hecho, aunque las dos componentes entraron unidas en la cuña, en su interior recorrerán caminos diferentes y a la salida seguirán trayectorias distintas formando entre sí un cierto ángulo. Este ángulo dependerá, como puede calcularse fácilmente a partir de la ley de Snell, del ángulo que forma la cuña y de la diferencia existente entre n_e y n_0 . Si suponemos incidencia normal sobre la cara frontal, los ángulos a la salida de los dos rayos serán

$$\alpha_e = \alpha (n_e - 1)$$

$$\alpha_0 = \alpha (n_0 - 1)$$

de donde la diferencia de ángulos entre los dos rayos será, aproximadamente,

$$\Delta\alpha = \alpha \Delta n$$

donde α es el ángulo de la cuña y $\Delta n = n_e - n_0$. Análogo resultado se tendría para el caso de una orientación molecular perpendicular a la anterior. Si las moléculas se encuentran en una configuración homeotrópica, las dos polarizaciones del haz láser verían el mismo índice de refracción, n_0 , con lo que únicamente resultará un rayo de salida, formando un ángulo de salida con la dirección de entrada de valor α_0 .

Con lo anterior ya se tiene la base para poder desarrollar una familia de deflectores que trabaje con los conceptos vistos. Como puede intuirse, dos son las formas posibles de realizar esta deflexión: mediante cambio en la dirección de polarización del haz de entrada, manteniendo fija la configuración molecular de la cuña o mediante cambio en la orientación de las moléculas de cristal líquido, manteniendo fija la polarización de entrada.

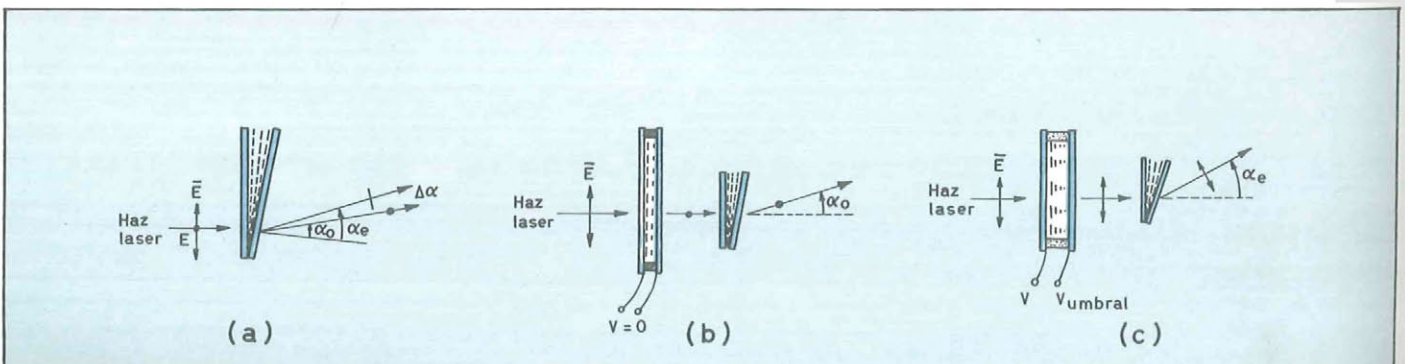


Figura 2. a, b) Comportamiento de una estructura en cuña de cristal líquido, con configuración molecular homogénea frente a un haz láser no polarizado. α_0 y α_e están definidos en el texto; c) Esquema de un sistema de modulación electroóptica mediante una célula torsionada activa y una en cuña pasiva (a) sin tensión aplicada y (b) con tensión aplicada.

El primer método es el representado esquemáticamente en la figura 2c. Un haz polarizado linealmente incide sobre una muestra positiva torsionada 90°. Según haya o no tensión aplicada a ella, la radiación de salida seguirá polarizada en la misma dirección o habrá girado 90°. Si este haz se hace incidir ahora sobre una cuña homogénea, con sus moléculas, por ejemplo, apuntando en dirección perpendicular a su arista, dependiendo de la existencia o no de tensión aplicada, saldrá del sistema con un ángulo α_e o α_0 . Variando el ángulo de la cuña, α , podrá variarse a voluntad la separación entre ambos ángulos. Este tipo de deflexión es puramente digital ya que son sólo dos las posiciones posibles. La velocidad de conmutación viene limitada por la de la célula torsionada, esto es, será del orden de los milisegundos.

La otra posibilidad es la de hacer activa a la cuña. Posee la ventaja, con respecto a la anterior de que sólo es necesaria una célula en lugar de dos como era antes. El esquema básico es el de la figura 3. En la figura 3a aparece el caso de una estructura homogénea paralela y en la figura 3b el de una torsionada. En ambos casos el nemático utilizado es del

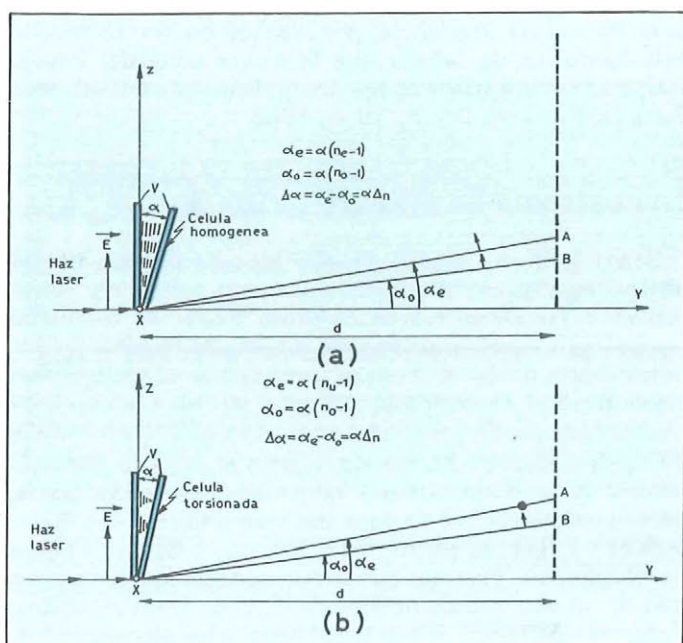


Figura 3. a) Sistema de modulación analógica mediante célula en cuña activa configurada de forma homogénea paralela; b) Sistema de modulación digital mediante célula en cuña activa configurada de forma torsionada.

tipo positivo. Cuando no existe tensión aplicada a los electrodos internos de dichas células, una radiación polarizada que los atraviese verá siempre el índice de refracción n_e , con lo que su ángulo de salida será α_e . Si por el contrario, se aplica una tensión superior al umbral, las moléculas se orientarán de forma homeotrópica y con ello el ángulo de salida será α_0 ya que la radiación óptica que atraviesa la cuña verá el índice de refracción ordinario, n_0 . La diferencia primera entre ambas configuraciones es que en la homogénea paralela la radiación de salida estará siempre polarizada de forma análoga a la de entrada, mientras que en la torsionada sólo ocurrirá esto cuando haya tensión aplicada. Si no la hay, el haz de salida estará polarizado ortogonalmente. La segunda radica en su comportamiento. Si se representa para ambos casos la gráfica ángulo de salida en función de la tensión aplicada, el resultado es el que aparece

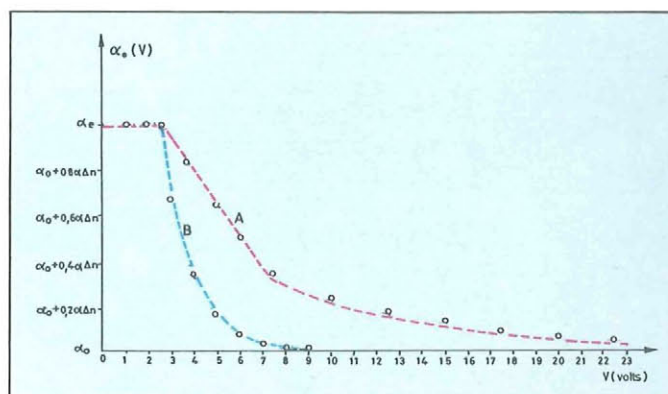


Figura 4. Variación del ángulo de salida α_e en función de la tensión aplicada para (A) célula homogénea paralela y (B) célula torsionada.

en la figura 4. Como puede apreciarse, la diferencia más significativa se refiere al margen de tensiones necesarias para pasar del ángulo α_e al α_0 . En el caso de la estructura torsionada, son necesarios poco más de 2 voltios para pasar de uno a otro. En la homogénea paralela, por el contrario, para un resultado análogo son necesarios del orden de 8 voltios; entremedias existe una zona aproximadamente lineal. En consecuencia puede decirse que la primera se comporta de una forma prácticamente digital, mientras que la segunda lo hace analógicamente. Ambos tipos de deflectores los hemos presentado como deflectores digitales y analógicos, respectivamente.

La ventaja de esta configuración activa sobre la anterior es que al ser empleada aquí una estructura en cuña como lugar de formación del campo orientador de las moléculas, puede aprovecharse el hecho de que se apuntó al principio de la pequeña separación entre placas. Y esto redundará en una mejor velocidad del dispositivo. En el caso de nuestros desarrollos, la frecuencia más alta conseguida fue de 12,5 kHz. Como el ángulo de nuestra cuña era de unos 2°, y el valor de Δn de 0,2, el ángulo de deflexión estaba próximo a 0,5°. El número de puntos resolubles que se obtuvo fue de 4. Estos dos últimos resultados no son, realmente, muy espectaculares ya que muchos otros sistemas electroópticos consiguen mayores ángulos de deflexión y mayor número de puntos resolubles. Pero todos ellos tienen la desventaja de que los valores de las tensiones son algunos órdenes de magnitud superiores a los aquí empleados. Evidentemente, una forma de conseguir mayores valores del ángulo de deflexión es hacer mayor el ángulo de la cuña. Si la velocidad del dispositivo no es objetivo final, puede hacerse sin problemas, y llegar así a varios grados. La otra forma es conseguir cristales líquidos con mejor valor de Δn . El nuestro, una mezcla de MBBA y PEBAB, no es de los más indicados, pero hay otros en los que el valor de Δn es mucho más elevado.

Entre las aplicaciones de este tipo de deflectores, y a modo de ejemplo de otras posibles, vamos a presentar el desarrollo de un conmutador total 1×2 capaz de conmutar un haz de luz no polarizada a dos posibles caminos sin una pérdida apreciable de intensidad. La estructura básica es la de la figura 5. La base de su comportamiento es la división del haz de entrada en dos, polarizados ortogonalmente entre sí, mediante un clásico prisma de Wollastrom. Estos dos haces, I y D , separados a su salida del Wollastrom, atraviesan dos estructuras en cuña formadas sobre la superficie del mismo. Estas cuñas son activas de manera que si se aplica una cierta tensión a la B y ninguna a la A , los caminos que seguirán los

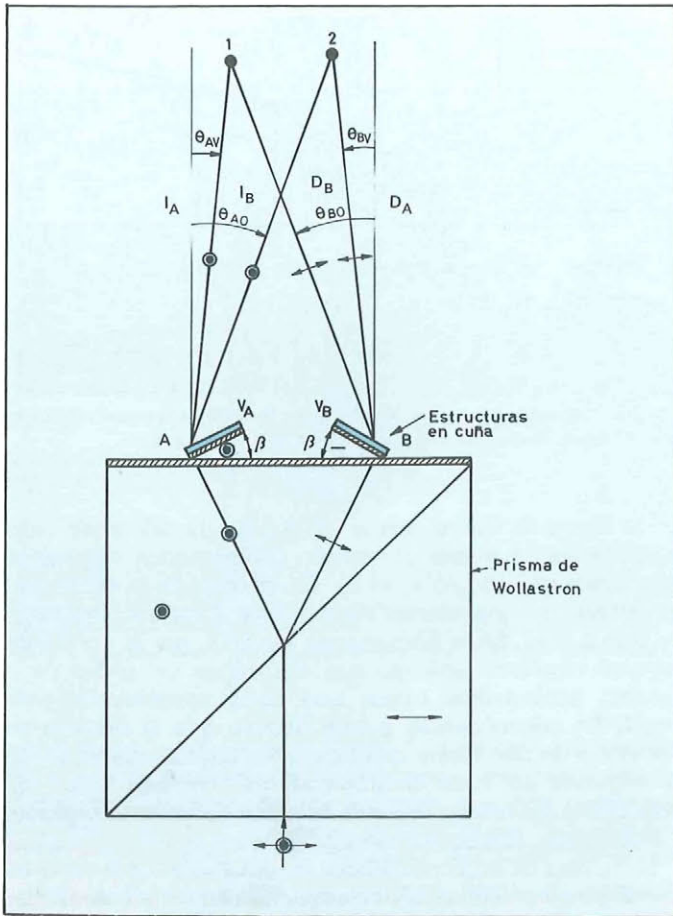


Figura 5. Conmutador 1 x 2 para comunicaciones ópticas.

rayos serán I_A y D_B que coincidirán en el punto 1 donde se recombinarán. Si, por el contrario, se aplica tensión a A y no a B, los caminos que seguirán los rayos serán D_A e I_B coincidiendo en el punto 2. Se ha obtenido así un conmutador 1 x 2 con las ventajas de emplear cristales líquidos para su realización y, así necesitar tensiones muy bajas y bajo consumo de potencia. Este conmutador fue el primero que presentamos encontrándonos en fase de desarrollo de otros más elaborados y ampliables a 2 x 2 y, en general, a $n \times n$.

Queda finalmente, dentro de este apartado, hablar de los moduladores. Aquí una vez planteado lo anterior, el concepto puede desarrollarse más rápidamente. La única diferencia es que el cristal líquido empleado ha sido nemático negativo, en lugar de positivo. El que utilizamos fue MBBA que es el más clásico de todos. La estructura es análoga a la de la figura 1 y la configuración homogénea. Debido al hecho de que ahora las moléculas no se orientarán en la dirección del campo eléctrico aplicado, sino que lo harán perpendiculares a él, con los fenómenos adicionales de creación de dominios de Williams y dispersión dinámica que ya se vieron en el artículo primero. Si a esta estructura se aplican pulsos de tensión que lleven la célula a la situación segunda, esto es, a dispersión dinámica, aparecerá un efecto muy fuerte de modulación. Cuando se sitúe un detector, figura 6, en el camino del haz de salida, recogerá señal cuando no hay tensión aplicada mientras que no recibirá radiación al ser aplicada la antedicha tensión. Los resultados que hemos obtenido son los que se muestran en la figura 7. Como se aprecia, la máxima frecuencia alcanzada está próxima a 50 kHz, muy superior a la obtenida por otros

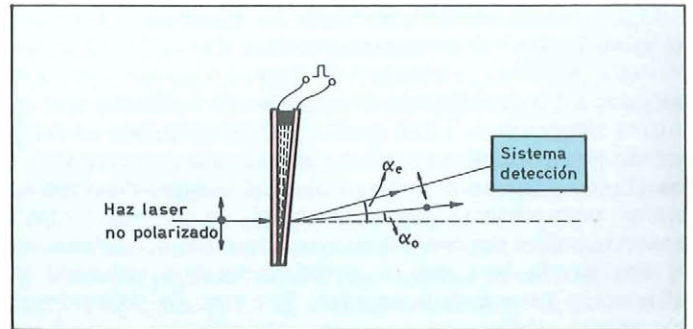


Figura 6. Esquema de modulador con célula en cuña de cristal líquido.

grupos en este mismo campo. Creemos que este resultado es muy prometedor para poder aplicar los cristales líquidos en dispositivos electroópticos de modulación. Posteriores desarrollos parecen poder extender el anterior resultado a un margen más amplio.

Hay que señalar, para concluir ya con este apartado, que aunque hemos hablado aquí sólo de campos eléctricos, estos efectos no quedan limitados a ellos. Los campos magnéticos pueden conducir a similares resultados aunque la limitación de frecuencia, por razones obvias, es mucho más fuerte. Es de señalar que la mayor parte del trabajo realizado en este apartado fue desarrollado como parte de la Tesis Doctoral del Dr. Muriel en 1980.

DISPOSITIVOS BIESTABLES OPTICOS

Como ya se ha escrito en otro artículo de esta misma revista, los dispositivos biestables ópticos constituyen en la actualidad, según se prevee, el futuro caballo de batalla de los sistemas ópticos destinados a ejecutar muchas de las funciones que hoy se realizan únicamente con elementos electrónicos. La justificación de este hecho, y en paralelo de esta necesidad, está basada en varios puntos que, aunque de modo simplificado, vamos a intentar recordar aquí. El primero es, sin duda, la mayor velocidad que puede lograrse, desde cualquier punto de vista, tratando únicamente señales ópticas en lugar de electrónicas. Hay que recordar, a modo de ejemplo, que mientras que se han conseguido, hace poco más de un año, pulsos ópticos de algunos femtosegundos, de forma electrónica es aún difícil llegar a los picosegundos.

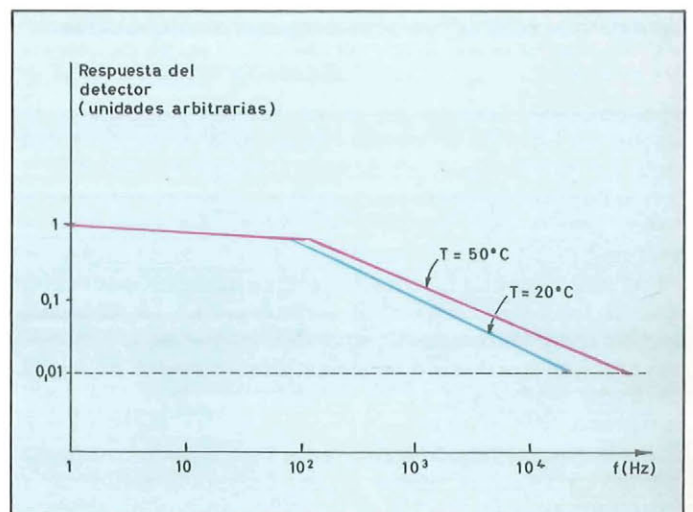


Figura 7. Comportamiento en frecuencia del modulador de la figura 7.

Igualmente, y este es el segundo punto, si el futuro de las comunicaciones está en las comunicaciones ópticas, es mucho más coherente tratar de utilizar señales ópticas en la mayor cantidad de etapas que sea posible. Esto redundaría en menor pérdida de información y en una mayor fiabilidad del sistema. Por el momento, la única forma de conseguirlo es mediante biestables ópticos. El último punto a señalar es el de que, además, los biestables ópticos pueden servir de componentes básicos para otros sistemas en desarrollo. El caso más significativo es el de los computadores ópticos, tema hacia el que las grandes industrias del sector comienzan a encaminar sus pasos. Así como el transistor cambió por completo la evolución de la Electrónica, hay muchas voces que reclaman para el futuro un papel análogo para los biestables ópticos. En este apartado revisaremos algunos desarrollos realizados con cristales líquidos que presentan la ventaja de su facilidad de comprensión.

La base de un dispositivo biestable óptico híbrido (BOH), ya que en los híbridos nos vamos a centrar, es la configuración mostrada en la figura 8. Nada se diferencia, en principio, de la empleada en cualquier otro biestable óptico híbrido de los que ya se habló en el artículo previo sobre Biestabilidad Óptica. El material electroóptico no lineal es en este caso, como es lógico, una célula de cristal líquido. La

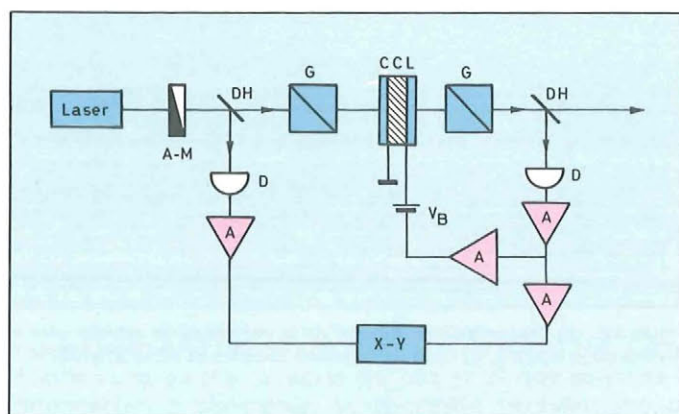


Figura 8. Configuración básica de un sistema biestable óptico híbrido. A-M: atenuador-modulador. G: prisma de Glenn. CCL: célula de cristal líquido. DH: divisor de haz. D: detector. A: amplificador. X-Y: registrador u osciloscopio.

configuración molecular más empleada es la torsionada en 90° , con cristal líquido nemático de anisotropía dieléctrica positiva. Como se recuerda del segundo artículo de esta serie, este tipo de estructura tiene la propiedad de que una radiación que incide con una dirección de polarización que sea la misma de la del eje principal de las moléculas de la cara frontal de la célula, aparecerá a la salida de la misma polarizada ortogonalmente a como entró. Esta propiedad se aprovechó, como ya hemos visto, para la realización de visualizadores. En el caso que nos ocupa ahora la raíz del funcionamiento como BOH se basa en su curva de transmisión luminosa en función de la tensión aplicada. Como es lógico, esta curva dependerá de cómo estén situados los polarizadores de entrada y de salida. En la figura 9 se dan las dos más características. La representada como curva A corresponde a la situación de dos polarizadores cruzados, mientras que la B es para polarizadores paralelos. La primera es la clásica en visualizadores, mientras que la segunda será la que aquí emplearemos. Su justificación es sencilla, por analogía con lo que ya se vio anteriormente para

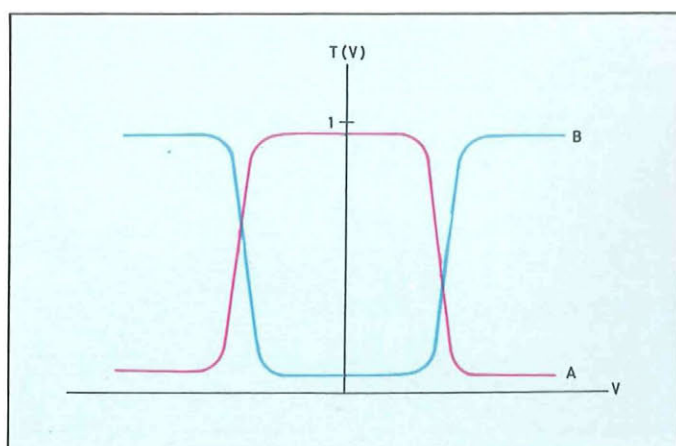


Figura 9. Transmisión de una célula torsionada de cristal líquido en función de la tensión aplicada, (A) con polarizadores cruzados y (B) con polarizadores paralelos.

polarizadores cruzados. Cuando no hay tensión aplicada, o ésta no ha llegado aún a un cierto umbral, las moléculas tendrán una orientación idéntica a la de partida. Debido a ello, la luz polarizada que incide sobre la célula rotará 90° y, ya fuera de la célula, se encontrará con un polarizador que impedirá su paso. Con ello la intensidad de salida del conjunto será prácticamente nula. En cambio, cuando la tensión ha superado el umbral, las moléculas de nemático pasarán a tener una configuración homeotrópica, la polarización de salida será igual a la de entrada y, al encontrarse un polarizador paralelo al primero, podrá salir libremente del conjunto. La intensidad luminosa será así máxima.

Si ahora, mediante un divisor de haz, se toma parte de la radiación de salida y se hace incidir sobre un elemento sensible a la luz, como puede ser un fotodiodo o un fototransistor, se obtendrá una señal eléctrica proporcional a la intensidad de luz de salida. Si esta señal, conjuntamente con una cierta tensión de polarización V_B , se lleva a las placas conductoras transparentes de la célula de cristal líquido, se habrá conseguido una realimentación que es la base de la BO.

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del sistema, son sencillas. La relación entre la radiación de salida y la de entrada vendrá dada por

$$I_0 = T(V)I_i$$

mientras que la tensión aplicada a la célula de nemático será

$$V = V_B + \beta I_0$$

donde β es, esencialmente, un parámetro que da la realimentación del sistema. Esta última expresión puede escribirse como

$$V = V_B + \beta (I_0/I_i)I_i$$

que no es sino

$$V = V_B + \beta I_i T(V)$$

Esta última ecuación, que es una recta en un diagrama $T(V) - V$, puede ya ser llevada a las curvas de la figura 9 y aparece en la figura 10. Como puede apreciarse, un hecho es el más importante: su pendiente es función del producto (βI_i). Intensidades de entrada muy bajas, se corresponderán con pendientes casi de 90° con el eje de abscisas, mientras que muy altas harán que se aproximen a la horizontalidad. Esto

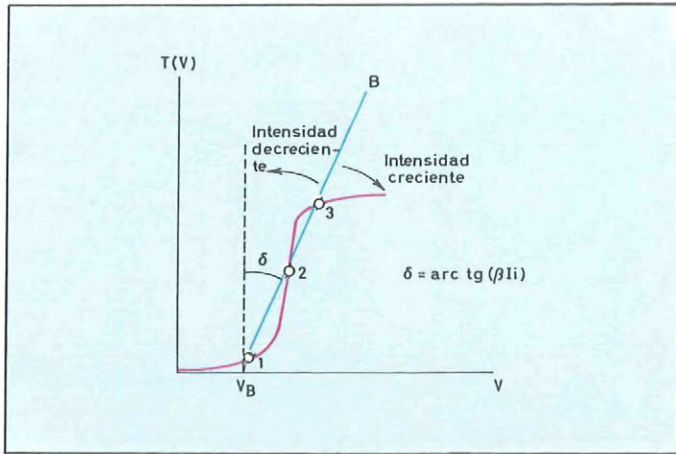


Figura 10. Puntos de trabajo posibles en el sistema de la figura 9.

es, su pendiente no es sino $\text{arc tg}(\beta I_i)$, este hecho, como veremos más adelante, es de capital importancia.

Como puede apreciarse para la recta de la figura 10, en un caso particular, cortará a la curva $T(V) - V$ en tres puntos, que serían los tres posibles puntos de trabajo del sistema. De ellos, sólo el 1 y el 3 son estables, mientras que el 2 es inestable, de acuerdo con la teoría ya conocida por todos. Ahora bien, estos tres puntos pueden quedar reducidos a uno solo, según sea la pendiente de la recta. Es lo que ocurre con las rectas A, B y F de la figura 11.

Podemos pasar así a estudiar el comportamiento dinámico del sistema. Supongamos que la ganancia de realimentación β permanece constante y que es sólo I_i la que varía. Si se aplica una señal óptica progresivamente creciente a la entrada, la variación de los puntos de trabajo será la que aparece en la figura 11. Para un valor de I_i de 0, se tendrá el punto a. Según vaya aumentando I_i se pasará, sucesivamente del b al c, ya que en este último caso, aunque la recta de trabajo corta en tres puntos a la curva $T(V) - V$, sólo éste será el que puede alcanzarse. Igual ocurrirá con el d. Pero éste, al estar ya muy próximo al codo de la curva, será tal que, una ligera variación creciente de I_i le hará saltar al e'. Esto es, el sistema habrá cambiado de estado; habrá pasado de baja intensidad de salida a transmisión alta. Un posterior incremento de I_i , punto f', sólo variará el valor de trabajo de

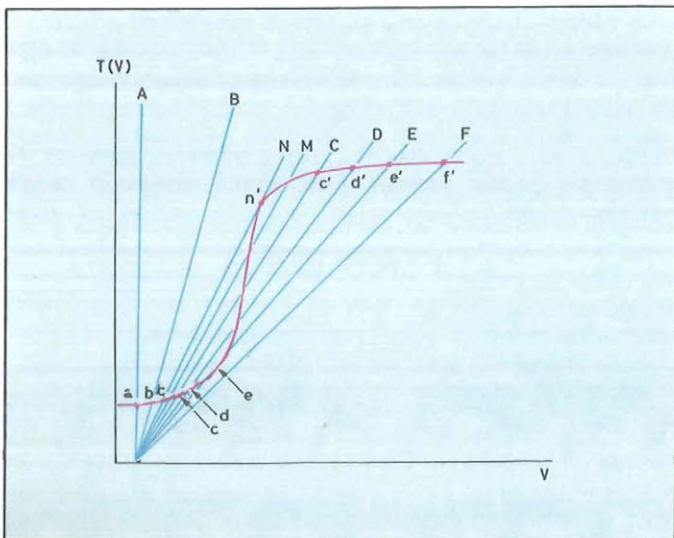


Figura 11. Comportamiento de un sistema biestable óptico híbrido. Explicación en el texto.

la V aplicada a la célula, pero no su transmisión, ya que está en su valor más alto.

Si a partir de ese punto, la intensidad I_i comienza a disminuir, los nuevos puntos de trabajo estarán ahora situados en la parte alta de la curva $T(V) - V$ (puntos d' y c'). Y esto ocurrirá hasta que se llegue a una pendiente como la de la recta M en la que un pequeño decremento hará saltar, de forma análoga a como se vio antes, a la zona de baja transmisión de la curva (recta B, de nuevo).

Si esto se representa en un diagrama I_o/I_i (que no es sino $T(V)$ en función de I_i , el resultado será el que aparece en la figura 12a. Como puede verse, se ha conseguido un ciclo de histéresis, que queda aún más claro, si se representa I_o en función de I_i representado en la figura 12b.

La importancia de este comportamiento es patente para todos. Con un sistema como éste, y que ya ha sido presentado en algunos congresos internacionales, es posible conseguir una serie de funciones que hasta ahora eran puramente electrónicas. Algunas aparecen en las figura 13-16. La primera, figura 13, es una de las que creemos puede tener más interés para comunicaciones ópticas. Se trata de su empleo como supresor de ruido. Suponiendo que el ciclo

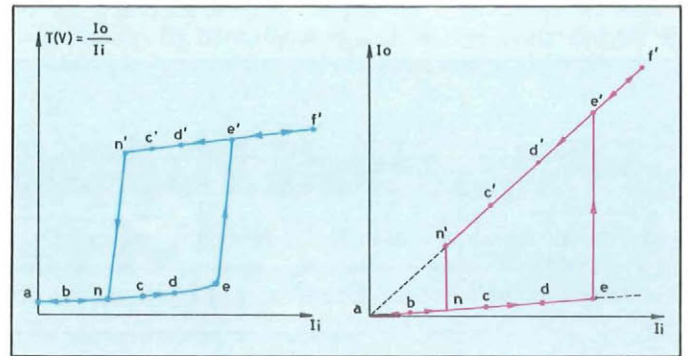


Figura 12. a) Transmisión en función de la intensidad de entrada para el sistema de la figura 8; b) Ciclo de histéresis del sistema de la figura 8.

de histéresis ha reducido su área hasta ser casi una simple línea, lo que puede hacerse con una adecuada elección de V_B , tiene un comportamiento tal que, señales ópticas inferiores a una determinada, en nuestro caso I_{in} , se corresponden con una transmisión baja, con lo que son eliminadas. Por el contrario, las superiores pasarán a transmisión alta y serán transmitidas sin apenas atenuación. El ruido, en consecuencia, ha sido suprimido. Nuestro grupo ha realizado algunas experiencias en este campo, para transmisión de láser a través de la atmósfera, que han sido muy satisfactorias.

La figura 13b muestra su aplicación como amplificadores de una señal óptica variable y la figura 14 como conformadores de ondas. El comportamiento de ambos, de acuerdo con lo visto hasta aquí, no ofrece ningún problema, por lo que no es necesario que nos detengamos en él.

Una aplicación adicional y que constituye la base para su posible uso en computadores ópticos, es la formación de puertas lógicas. En la figura 15 se muestran las dos posibles formas de trabajo como funciones AND y OR. Igual que en el caso anterior, su funcionamiento queda claro de acuerdo con los conceptos ya planteados. Conjuntamente con estas puertas, aparece la necesidad de realización de memorias ópticas compatibles con los anteriores sistemas. Y estas memorias pueden ser desarrolladas también mediante biestables ópticos híbridos. La configuración adoptada por

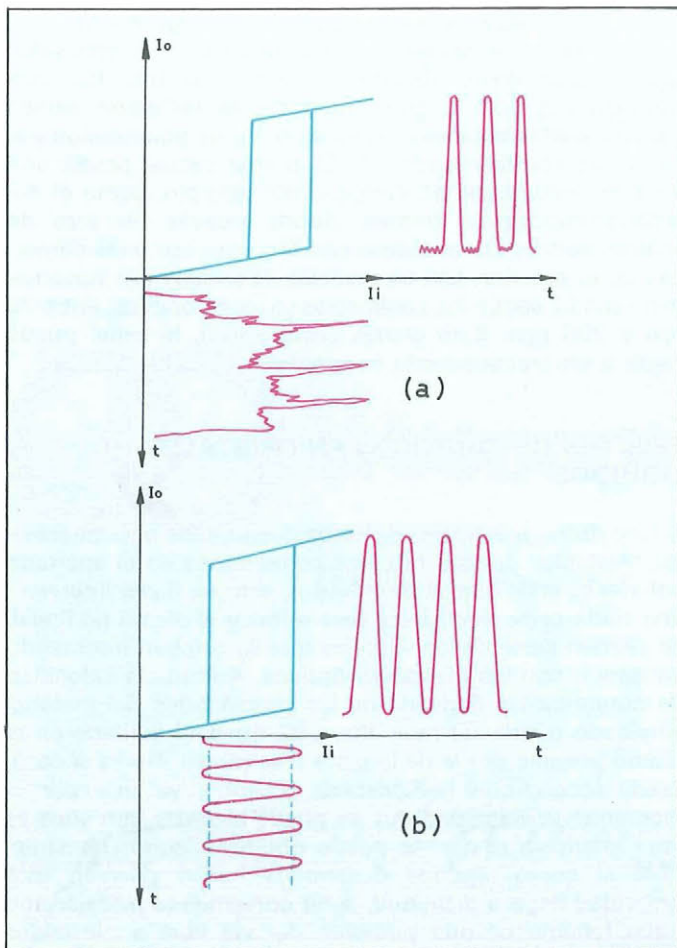


Figura 13. a) Supresión de ruido mediante un sistema biestable óptico; b) Amplificación mediante sistemas biestables ópticos.

nuestro grupo ha sido la que aparece en la figura 16a. Como puede verse en ella, además del haz en el que se envía la información a almacenar, es necesario también otro de mantenimiento. Cuando, en el momento inicial, únicamente está este último, la recta de trabajo del sistema, en el diagrama $T(V) - V$ es la A. En consecuencia, la salida corresponderá a la zona de baja transmisión. Si, en un momento determinado, el haz de mantenimiento se recombina, mediante el divisor de haz, con un pulso de luz I_i , el

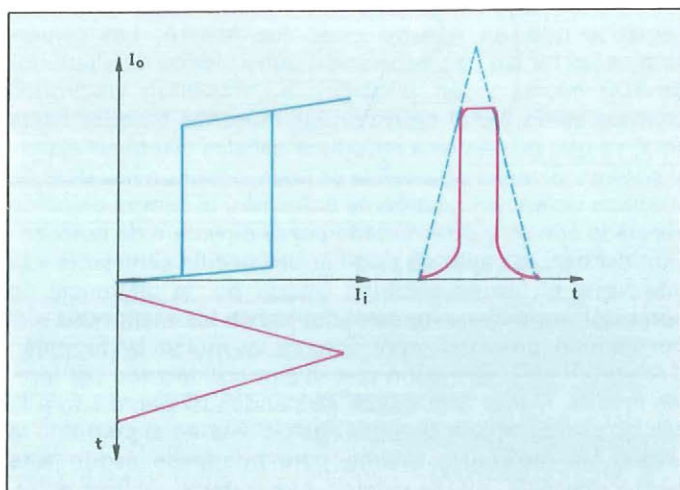


Figura 14. Conformación de ondas mediante biestables ópticos.

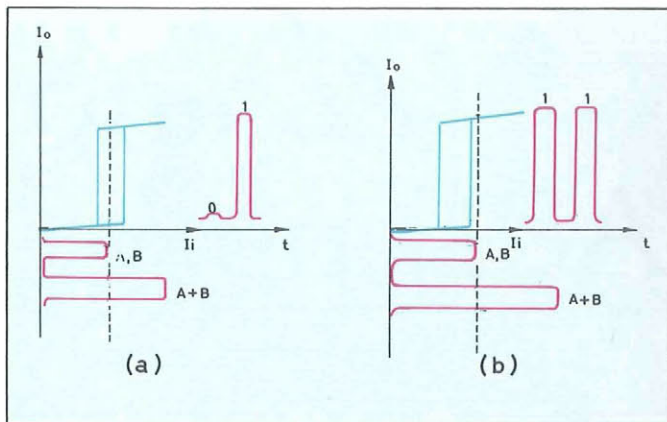


Figura 15. a) Puerta AND y b) Puerta OR con biestables ópticos.

nuevo punto de trabajo, pasará a ser el de corte de la nueva recta de trabajo, B, con la curva de transmisión, que ya se encuentra en la zona de transmisión alta. Cuando este pulso desaparezca, la recta de trabajo volverá a ser la A. Pero la diferencia con la situación anterior es que el punto de trabajo a' , se encontrará también en la zona de alta transmisión. Se ha obtenido así una operación de memoria. La única forma de borrar la información será anulando el haz de mantenimiento. El ciclo de histéresis correspondiente a esta forma de

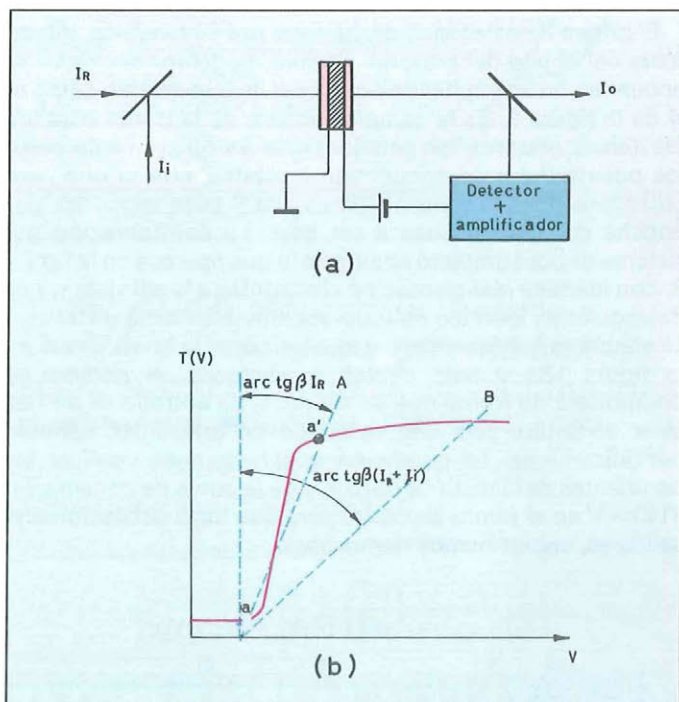


Figura 16. a) Esquema de una memoria óptica con biestables ópticos y b) comportamiento. I_R : haz de mantenimiento. I_i : haz de información.

trabajo es el que aparece en la figura 17. Con el dispositivo realizado por nuestro grupo se ha conseguido una relación ON:OFF de 100:3, siendo necesarios unos niveles de intensidad luminosa de alrededor de 0,1 mW. Evidentemente, este sistema no es óptimo desde el momento en que es necesaria una radiación de mantenimiento para que trabaje. Pero es un primer paso para el desarrollo de otros en los que este inconveniente sea superado.

Es evidente que todo lo anterior no es sino una muy

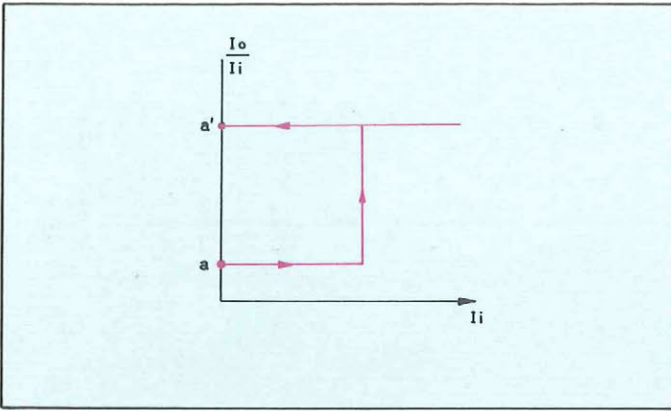


Figura 17. Ciclo de histéresis para el circuito de la figura 16a.

pequeña parte de lo que el tema de la biestabilidad óptica en general, y con cristales líquidos en particular, lleva consigo. Como ya se ha comentado en el artículo sobre el tema que apareció en esta revista en 1982, es casi seguro que los años próximos verán un amplio desarrollo del mismo y que, muy previsiblemente, llevará consigo un cambio de concepto en la forma de trabajo de muchos sistemas ópticos. Únicamente, y a modo de colofón de lo expuesto hasta aquí, quisiéramos apuntar un último tema relacionado con los sistemas biestables ópticos. Es el referente al desarrollo de relojes ópticos y de toda una serie de fenómenos no lineales que se están empezando a investigar.

El origen de estos efectos, aunque por su temática, quede fuera del objeto del presente artículo, podemos decir que se encuentra en el empleo de una curva de transmisión como la A de la figura 9. Es la complementaria de la usada para los biestables presentados anteriormente ya que, en este caso, los polarizadores se encuentran cruzados, con lo que para bajas tensiones la transmisión es alta y para tensiones por encima del umbral pasa a ser baja. La configuración del sistema es por completo análoga a la que aparece en la figura 8, con idéntica realimentación electrónica a la allí vista y, por consiguiente, idéntico método operativo. La recta de trabajo se encontrará ahora en una situación como la que aparece en la figura 18a y bajo ciertas condiciones, el sistema se comportará de forma que su salida, si su entrada es un haz láser continuo, será una radiación de intensidad variable periódicamente. La condición que habrán de verificar las pendientes de la recta de trabajo y de la curva de transmisión $T(V) - V$ en el punto de corte, para que haya oscilación a la salida es, según hemos demostrado,

$$\left(\frac{dT}{dV}\right) \leq \frac{1}{\beta I_i}$$

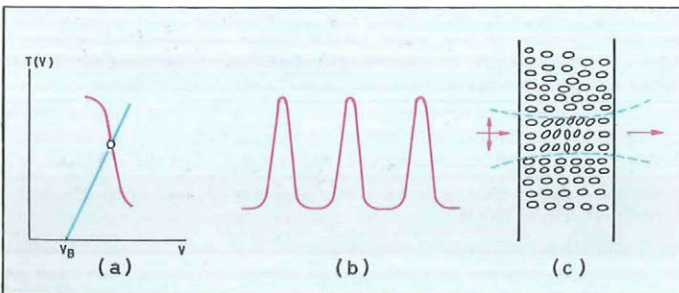


Figura 18. a) Zona de la curva $T(V) - V$ válida para trabajar como relojes ópticos basados en biestables ópticos; b) Señal de salida típica de un reloj óptico; c) Reorientación causada en una célula homeotrópica de cristal líquido nemático mediante un haz láser polarizado linealmente.

Una señal típica es la que aparece en la figura 18b.

Es de resaltar el hecho de que la frecuencia de esta señal depende de varios parámetros entre los que los más significativos son la intensidad de la radiación óptica incidente sobre el sistema; la tensión, V_B , de polarización y el factor de realimentación, β . El primer factor posee una notable importancia en campos, por ejemplo, como el del reconocimiento de formas, donde nuevas técnicas de análisis podrían desarrollarse con técnicas como las derivadas de lo anterior. Las frecuencias obtenidas por nosotros han variado, según los parámetros ya mencionados, entre 20 pps y 200 pps. Bajo ciertas condiciones, la señal puede llegar a ser prácticamente sinusoidal.

EFFECTOS OPTOÓPTICOS EN CRISTALES LÍQUIDOS

Uno de los principales defectos que pueden encontrarse a los biestables ópticos híbridos comentados en el apartado anterior es el de que, al ser híbridos, esto es, hacer intervenir una cierta parte electrónica para reforzar el efecto no lineal, se pierden parte de las ventajas que se estaban intentando conseguir con los biestables ópticos. Aunque la velocidad de conmutación derivada de las propiedades del material empleado pueda ser muy alta, ésta quedará limitada en el último extremo por la de la parte electrónica. No es el caso, desde luego, con los cristales líquidos, ya que por el momento, la velocidad que se puede alcanzar con ellos es muy inferior a la que se puede obtener electrónicamente. Pero si como algunos desarrollos hacen preveer, esta velocidad llega a disminuir, sería conveniente trabajar con otros fenómenos que pudieran dar vía libre a biestables puramente ópticos.

Una de las formas posibles de trabajo es la que va a ser presentada aquí. El concepto en el que se basa es, lógicamente el de originar variaciones en el índice de refracción que «ve» la radiación que atraviesa la muestra, según sea la intensidad de esta radiación. En el caso estudiado esta variación se obtiene mediante una rotación del eje principal de las moléculas de nemático inducida por el campo eléctrico que lleva consigo el haz láser. Según veremos, esta rotación da lugar a una serie de fenómenos que pueden anticipar una posible aplicación en biestabilidad óptica. El trabajo que presentaremos aquí se basa, esencialmente, en la Tesis Doctoral que presentó, en 1983, el Dr. López Hernández.

El punto de partida es una muestra homeotrópica de nemático que, en nuestro caso, fue MBBA. Las células empleadas tenían una separación entre vidrios de alrededor de 100 micras y, en principio, no requerían electrodos internos como era el caso con las muestras tratadas hasta aquí, ya que no vamos a introducir señales eléctricas ajenas al sistema. Si sobre esta célula se hace incidir un haz láser de mediana potencia ligeramente enfocado, el campo eléctrico asociado con él, y determinado por la dirección de polarización del haz, es capaz de originar una acción semejante a la que hacía el campo eléctrico creado por la diferencia de potencial impuesta externamente sobre los electrodos de, por ejemplo, un visualizador. Esto es, las moléculas tenderán a alinearse en la dirección que el campo eléctrico del láser les manda. Como éste incide perpendicularmente sobre la célula, y su dirección de polarización está en el plano de la célula, las moléculas rotarán para orientarse según esta misma dirección, que es paralela a las paredes de la muestra. La diferencia con respecto al caso del campo eléctrico

creado en los visualizadores es que aquí la acción está mucho más localizada, quedando reducida a la zona por donde pasa el láser. Además, ya que el haz no tiene una intensidad constante en toda su sección, sino que tiene un perfil gaussiano, el efecto orientador no será igual en todo el espacio atravesado por el láser. Las moléculas del centro «verán» una intensidad superior a las que se encuentren en las colas de la gaussiana. Por ello, su giro no será el mismo. Una representación de este fenómeno es la que puede verse en la figura 18c.

El principal resultado de lo expuesto hasta aquí es que el haz de salida pasa a ser drásticamente distinto del de entrada. La rotación de las moléculas da lugar a un cambio en el índice de refracción que «ve» el láser. Y este cambio dependerá de la zona que se tome de la sección del haz. Los consiguientes retardos de fase introducidos en los diferentes rayos que se propagan en el haz darán lugar, al final, a una serie de fenómenos de interferencia que se traducen en que si se observa la salida de la célula a una cierta distancia, podrán verse un conjunto de anillos concéntricos claros y oscuros



Figura 19. Figura de difracción obtenida en el haz láser de salida después de atravesar una célula de cristal líquido y reorientar a sus moléculas.

como los de la figura 19. El haz, de ser casi paralelo a la entrada, ha pasado a tener una divergencia que puede alcanzar más de 45° y llegar a tener hasta cerca de 80 anillos. En nuestro caso, las experiencias fueron realizadas con un láser de Ar^+ trabajando con la línea verde de $514,5 \text{ nm}$ y potencias del orden de 25 mW . Una vez enfocado, el haz llegó a alcanzar densidades de potencia próximas a 3 kW/cm^2 . Es de señalar que, debido a la orientación de las moléculas de la muestra, es necesaria una intensidad umbral. En nuestro caso ésta fue de 1 kW/cm^2 , aunque depende muy fuertemente del espesor de la capa de nemático en la célula. Espesores superiores a 300 micras pueden hacer descender este valor a unos 130 W/cm^2 . El inconveniente que aparece es que la velocidad de respuesta del fenómeno es, este caso, mucho menor ya que, de una forma aproximada puede decirse que es proporcional al cuadrado del espesor, a través de una ley que no vamos a detallar aquí.

El efecto anterior ha sido aprovechado para la realización de un modulador optoóptico en el cual un haz láser modulado en intensidad es capaz de modular a otro haz láser continuo sin ninguna intervención electrónica. El montaje empleado ha sido el de la figura 20. El resultado más significativo es el de que el haz sin modular, en nuestro caso uno de He-Ne de 1 mW de potencia, que antes de pasar por la zona influida por el otro láser era gaussiano, pasa a tener

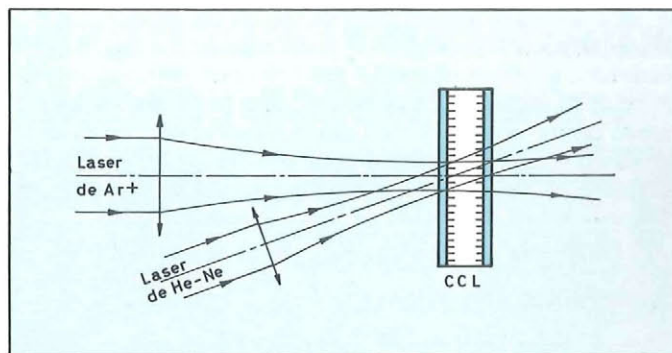


Figura 20. Esquema básico de un modulador optoóptico. El láser de Ar^+ está modulado en intensidad y el de He-Ne es continuo.

un perfil de intensidad como el de la figura 21 cuando está presente el otro. La imagen en una pantalla es un anillo luminoso brillante en torno a un círculo oscuro. Cuando el haz modulado no está presente, la imagen del modulado vuelve a ser gaussiana. La respuesta en frecuencia es la de la figura 22 que, como puede verse no se caracteriza precisamente por sus frecuencias altas. Algunas modificaciones de la pueden mejorar y, de hecho, es parte del trabajo de nuestro grupo su consecución.

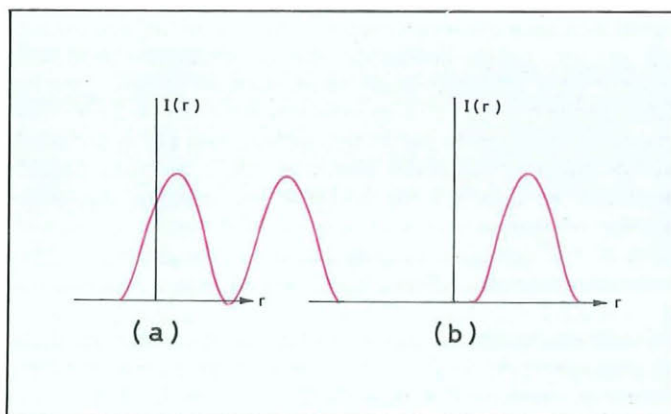


Figura 21. Variación en el perfil de intensidad del haz de He-Ne de la figura 19a antes de cruzar la célula de cristal líquido y b después de atravesada una vez que ésta ha sido reorientada por el haz de Ar^+ .

Como puede inferirse de lo anterior, y aunque no detallamos más aquí ya que nos encontramos aún en fase de estudio, los fenómenos que se han presentado es plausible que puedan tener propiedades de biestabilidad óptica. Y ello

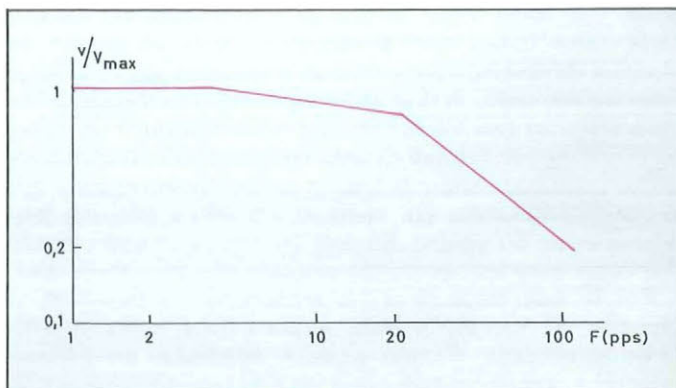


Figura 22. Respuesta en frecuencia del modulador de la figura 20.

se debe a que el tiempo de orientación de las moléculas es diferente del de vuelta a su posición inicial. Los trabajos realizados hasta el momento parecen confirmarlo y en breve es posible que publiquemos los primeros resultados. Este nuevo campo abre un nuevo camino a las aplicaciones de los cristales líquidos, aplicaciones en las que el requisito fundamental no sea la velocidad ya que, por el momento, esa es una batalla perdida frente a otros materiales.

CONCLUSIONES FINALES

Después de la larga serie de temas tratados en esta serie de artículos debería hacerse una pequeña síntesis que permitiera reunir en breves líneas los puntos más significativos y aquellos que se prevee puedan tener importancia en los próximos años. Creemos que, de forma particular, algo de esto ha sido ya hecho en apartados anteriores. Así, en el primer artículo se hizo un resumen de las principales aplicaciones de los cristales líquidos desde un punto de vista global. En el segundo se hizo una comparación de los dispositivos existentes en lo que se refería a sus características, ventajas e inconvenientes, y cuáles eran las posibilidades de nuevos desarrollos. Queda así recapitular lo anterior conjuntamente con lo expuesto en el presente artículo. Y esta recapitulación lleva consigo un hecho que no puede por menos de necesitar una breve exposición. Y es el de que aunque existen algunos campos, como el de los visualizadores, en los que la aplicación de los cristales líquidos ha llegado ya a su mayoría de edad, quedan todavía muchos otros en los que no se puede decir si el futuro verá un nuevo desarrollo que pueda ser de uso general o si por el contrario, se volverá a la situación previa a 1960. Nuestra opinión particular es que no. No volverán los cristales líquidos a quedar relegados a un olvido más o menos consciente porque las ventajas que pueden ofrecer frente a otros materiales son innegables. Y así lo reconocen cada vez más grupos a nivel mundial. Puede decirse, con la seguridad de no estar equivocados, que en la mayoría de las universidades de prestigio de todo el mundo existe un grupo de investigadores, al menos, que trabaja, de una forma u otra, con cristales líquidos. El empuje dado por los visualizadores se aprovechará, con toda seguridad, en otros terrenos.

Queda un punto, que ya ha sido tratado antes, que merece ser recalado aquí. Es el de la limitación que representa su baja velocidad. La única solución es la de la investigación de nuevos compuestos y nuevos efectos. Hasta ahora los nemáticos han sido, prácticamente, los únicos que se han empleado. Los esmécticos y los colestéricos eran más objeto de curiosidad de laboratorio que de interés práctico. Pero esto comienza a no ser cierto. Los colestéricos, por una parte, han dado lugar, aparte de termómetros en los que cada color indica una temperatura, a la obtención en algunos de ellos de unas nuevas mesofases, denominadas fases azules, cuyas aplicaciones comienzan a entreverse. Así y sin entrar en detalles ya que supondría introducir un nuevo apartado, se han logrado a nivel de laboratorio, dispositivos en los que una tensión da lugar a un cambio en el color que presentan, variando, por ejemplo, de 490 a 585 nm para tensiones de 50 voltios. En este terreno queda aún mucho por hacer pero los resultados actuales son prometedores.

Por lo que respecta a los esmécticos la situación es parecida. Se han encontrado algunos tipos, especialmente fases esmécticas C, que pueden conmutar en tiempos inferiores al milisegundo entre las dos orientaciones en las que pueden encontrarse. Además, se han detectado también

efectos de biestabilidad como los vistos para los nemáticos. El inconveniente que aún presentan es el de que no hay apenas variedades que sean esmécticas a temperatura ambiente, que es muy difícil tratar a las superficies para que se alineen adecuadamente con respecto a ellas y que las muestras, para que trabajen de manera correcta, han de tener un espesor de muy pocas micras. Estos tres hechos han de ser superados antes de que las aplicaciones prácticas sean realidad.

En resumen, los cristales líquidos tienen un presente satisfactorio, pero pueden tener un futuro mucho más espectacular. Y no porque vayan a ser empleados en espectáculos, terreno en el cual no han sido aprovechados como podrían, sino porque es posible desplazar a algunos dispositivos hoy perfectamente asentados. ●

BIBLIOGRAFIA

Creemos que aquí sólo procede dar una breve reseña de aquellas obras que pueden considerarse como clásicas dentro de este campo. Los libros más característicos son los siguientes:

- [1] P.G. de Gennes, «The Physics of Liquid Crystals», Clarendon Press, Oxford, 1979.
- [2] S. Chandrasekhar, «Liquid Crystals», Cambridge Press, Londres, 1977.
- [3] H. Kelker y R. Hatz, «Handbook of Liquid Crystals», Verlag Chemie, Weinheim, 1980.
- [4] E.B. Priestley, P.J. Wojtowicz y Ping Sheng, «Introduction to Liquid Crystals», Plenum, N.Y., 1979.

Es de destacar la obra de H. Kelker y R. Hatz en la que se presenta una exhaustiva bibliografía de varios miles de artículos que abarca prácticamente todos los publicados hasta 1980.

José Antonio Martín Pereda. Ingeniero de Telecomunicación y Licenciado en Ciencias Físicas en junio de 1967. Realizó los estudios de doctorado en el Departamento de Física, en el Grupo de Electrónica Cuántica, de la Colorado State University de Fort Collins, Colorado, de 1968 a 1971. Doctor Ingeniero de Telecomunicación en junio de 1971. Catedrático y Director del Departamento de Tecnología Electrónica y Electrónica Cuántica de la E.T.S. de Ingenieros de Telecomunicación, de Madrid, desde Diciembre de 1975. En la actualidad es Vicerrector de Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Ha publicado artículos y presentado ponencias en un gran número de Congresos Internacionales, casi todos ellos basados en el estudio de los cristales líquidos como medios electro-ópticos para modulación y deflexión y en sus posibles aplicaciones dentro del campo de las Comunicaciones Ópticas.

Miguel Angel Muriel Fernández. Ingeniero de Telecomunicación en junio de 1978. Doctor Ingeniero de Telecomunicación en julio de 1980. La Tesis Doctoral presentada, que tuvo como objeto el estudio de las deflexiones transversales de luz mediante cristales líquidos, obtuvo el Premio a la mejor Tesis Doctoral convocado por el Colegio y la Asociación de Ingenieros de Telecomunicación en septiembre de 1980.

Ha publicado y participado en varios Congresos Nacionales e Internacionales con temas derivados de sus trabajos sobre cristales líquidos. En la actualidad es Profesor Adjunto de la Cátedra de «Tecnología Electrónica y Electrónica Cuántica», de la E.T.S.I.T. de Madrid.

José Manuel Otón Sánchez. Licenciado en Ciencias Químicas por la Universidad de Murcia en 1973. Doctor en Química por la Universidad Complutense de Madrid en 1976. Ha trabajado en investigación en distintos campos de la Química Física en el Instituto «Rocasolano» del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y en el Departamento de Química de la Universidad de Maryland (USA).