

B.7. Dispositivos de visualización y modulación

B.7.1. Introducción

La invención en el siglo diecinueve del tubo de rayos catódicos o CRT ha influido nuestras vidas hasta lo imaginable. También los ordenadores utilizan el monitor de televisión como medio de comunicación con el exterior. Esta importancia del monitor de televisión es debido a que realmente una imagen vale más que mil palabras y nuestro cerebro es capaz de asimilar toda la información gracias a las imágenes. Comparado con un circuito integrado un monitor es un elemento muy hambriento de energía. Este desequilibrio entre el visualizador y el ordenador se está arreglando con la evolución de los visualizadores de cristal líquido o LCDs. Después de su debut en relojes y calculadoras ahora ya pisan fuerte en monitores portátiles y en monitores de televisión.

Los monitores de LCD son los que más futuro tienen en la actualidad. No sólo se encuentran ya en todos los ordenadores portátiles, si no que ya se utilizan en monitores a bordo de aviones y en televisores basados en LCD. El mercado de esta nueva tecnología promete ser similar al de circuitos integrados multiplicando por diez el capital que mueve.

En un tema anterior ya se comentó el funcionamiento del cristal líquido. El paso de una simple célula de cristal líquido a un visualizador completo es una difícil tarea de complejidad similar a la fabricación de complicados circuitos integrados.

Los LCD se clasifican en dos tipos: el LCD de matriz pasiva y el LCD de matriz activa. Estudiaremos ambos dispositivos. Lo más interesante de un visualizador LCD es que no utiliza ningún tipo de fuente luminosa, es decir, que el LCD no emite la luz para transmitir la información sino que más bien la absorbe.

La célula de cristal líquido es principalmente un dispositivo de modulación de luz. Es posible modificar la polarización de la luz que lo atraviesa, controlando de esta forma la transmisión luminosa. Este control puede realizarse mediante la aplicación de una diferencia de potencial externa que modifica la posición del eje óptico del cristal. Ya se comentó en un tema anterior que cuando el cristal líquido era situado entre dos polarizadores era posible controlar la intensidad de la luz de salida, es decir, la transmitancia del sistema mediante la aplicación de un campo eléctrico. Sin embargo, como modulador no puede ser utilizado en sistemas de modulación a alta velocidad. Las velocidades de conmutación de un LCD están entre los milisegundos y los microsegundos. A estas lentas velocidades no se puede utilizar el dispositivo para comunicaciones ópticas, donde se necesitan frecuencias del orden del gigahercio o mayores. En tales aplicaciones, se utilizan dispositivos electro - ópticos basados en niobato de litio o arseniuro de galio. Los tiempos de conmutación en estos dispositivos alcanzan los 10 picosegundos. También trataremos los dispositivos electro-ópticos en este tema.

En la siguiente figura se muestran los tres modos diferentes en que una célula de cristal líquido puede ser aplicada a visualizadores prácticos. En (a) se muestra el visualizador de transmisión, el cual requiere una fuente luminosa por debajo del visualizador. Este tipo de

visualizador es posible emplearlo bajo condiciones de escasa luz ambiental. En (b) se muestra el visualizador de reflexión, cuyo funcionamiento depende de la luz ambiental que se refleja en un reflector situado en la parte posterior del visualizador. En consecuencia, no puede ser utilizado en condiciones de poca luz ambiental. El tercer tipo (c) es una mezcla de ambos y es posible utilizarlo bajo un amplio rango de iluminación ambiental.

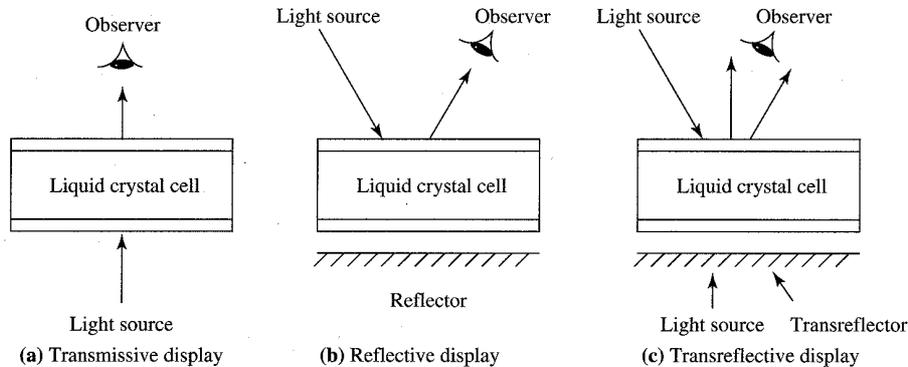


Fig. B.7.1: Modos de funcionamiento de un visualizador de cristal líquido.

Si comparamos con los visualizadores que emplean fuentes activas, el LCD presenta las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas

1. Consumo muy bajo, del orden de $20\text{nA}/\text{mm}^2$. Se puede utilizar el dispositivo alimentándolo con baterías.
2. Las tensiones requeridas son muy bajas, entre 1,5V y 5V.
3. Compatible con CMOS.
4. Se puede leer a plena luz solar.
5. Flexibilidad; se puede utilizar el dispositivo para matrices de puntos, gráficos y otras aplicaciones.

Desventajas

1. El visualizador por reflexión (muy popular) no se puede utilizar en condiciones de baja iluminación ambiental.
2. La respuesta es demasiado lenta para muchas aplicaciones.
3. El ángulo de visión del visualizador es muy limitado.
4. El dispositivo es muy sensible a la temperatura.

Las células de cristal líquido responden tanto a tensiones de continua como de alterna. Sin embargo, la aplicación de una tensión continua puede llegar a causar deterioro por electrolisis. Si hay impurezas iónicas presentes en la célula de cristal líquido, la utilización de una tensión de continua la destruirá rápidamente. Por ello, normalmente son utilizadas señales alternas bien sinusoidales bien cuadradas con una componente mínima de continua. La respuesta de la célula a la tensión aplicada se muestra en la siguiente figura. Para activar la célula se requiere un valor RMS superior a V_{10} (o V_{90} en el caso de un visualizador invertido). Como puede observarse, la tensión necesaria para activar la célula depende de la temperatura. Cuanto menor es la temperatura mayor tensión se requiere.

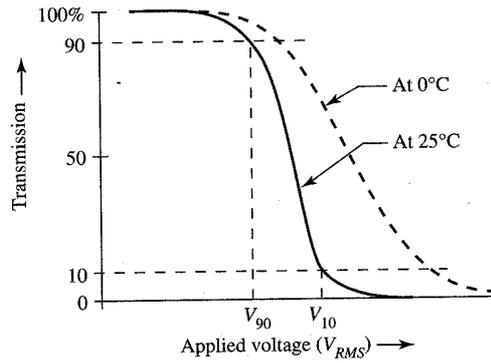


Fig. B.7.2: Característica transmisión/tensión de un cristal líquido nemático girado en función de la temperatura.

El contraste del visualizador depende del ángulo de visión α . Por lo tanto, la tensión requerida para la activación es también función del ángulo de visión, como se muestra en la siguiente figura. La tensión requerida para la visualización de la imagen es mínima si el ángulo de visión es de 45° y es máxima cuando la visión es perpendicular a la superficie del visualizador, $\alpha=0^\circ$. En (c) se muestra el mapa de contraste típico de un visualizador LCD. El área central con mayor contraste representa la mejor dirección de visión. Está ligeramente fuera de la perpendicular, hacia el alineamiento de los polarizadores.

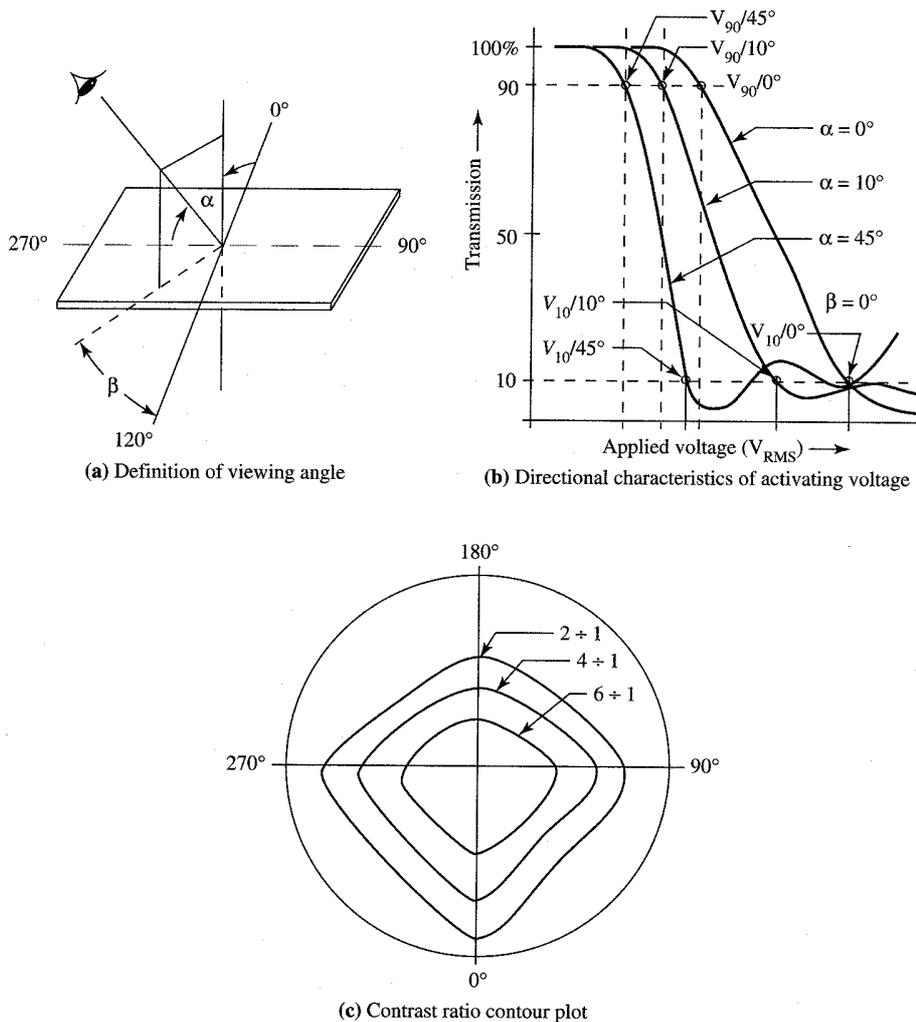


Fig. B.7.3: Características direccionales del cristal líquido.

B.7.1.1. Factores humanos a tener en cuenta en los visualizadores

Los visualizadores están hechos para poder percibir mediante la vista información. Para ello tenemos que tener en cuenta las limitaciones del ojo humano. Los tres factores a tener en cuenta en un buen visualizador son: (1) legibilidad, (2) brillo y (3) contraste.

La **legibilidad** es la propiedad de los símbolos alfanuméricos que los hace fáciles de leer con velocidad y precisión. Hay dos factores que contribuyen a la legibilidad: el estilo y el tamaño.

Para fuentes impresas hay una multitud de estilos habiendo disponibles fuentes con buena resolución y alta claridad. Sin embargo, esto no sucede en electrónica, donde una buena resolución es muy costosa. Esto es debido a que los caracteres se componen de un número mínimo de elementos, barras o puntos por lo que los símbolos electrónicos no dan lugar a perfectos números o letras. En situaciones en que se requiera un reconocimiento rápido de los símbolos, podría utilizarse un visualizador que nos proporcionase una mayor claridad (más elementos).

Si se utilizan caracteres pequeños hay que tener en cuenta que la máxima resolución del ojo humano son 15 minutos de arco, definidos como,

$$\tan\alpha = \frac{H}{D} \quad (\text{B.7.1})$$

donde α es ángulo de visión en grados, H la altura del carácter (m) y D la distancia desde donde se mira (m). Esta ecuación también puede ser escrita de la forma:

$$\alpha = \frac{180}{\pi} 60 \cdot \frac{H}{D} \quad (\text{B.7.2})$$

donde ahora α es el ángulo de visión en minutos.

Teniendo en cuenta el límite de 15 minutos de arco de resolución del ojo humano los límites de los visualizadores deberían ser,

visualizador de LED	20 minutos
visualizador de LCD de transmisión	26 minutos
visualizador de LCD de reflexión	30 minutos

La proporción de los caracteres recomendada es

Anchura/altura	50% a 100%
Espaciado/altura	26% a 63%
Anchura del segmento/altura	13% a 20%
Máximo ángulo de visión/ángulo normal	0° a 19°

Lo anguloso y la forma de los caracteres también son factores importantes, aunque es difícil asignar valores cuantitativos a dichas cualidades.

El **brillo** es nuestra percepción de la luminancia. El brillo determina nuestra percepción del mundo y es el elemento más importante de nuestra visión. Desgraciadamente

es un fenómeno psico-físico extremadamente difícil de medir de forma objetiva o técnicamente. Es por ello que no se dispone de tablas de esta magnitud aunque se puede medir fácilmente la luminancia (el estímulo del brillo) asociada a una determinada fuente de luz y asociarla a éste. Un instrumento típicamente utilizado para la medida de la luminancia se muestra en la siguiente figura:

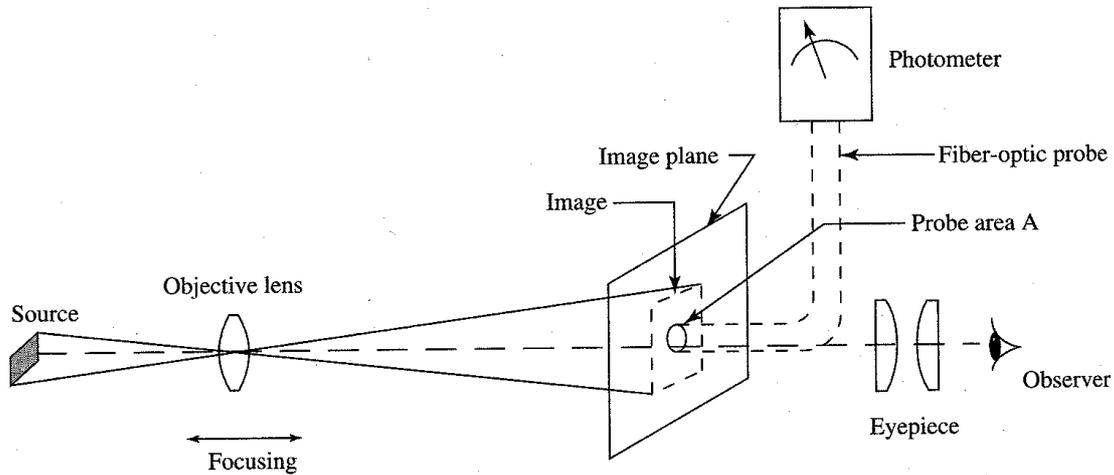


Fig. B.7.4: Aparato para la medida de la luminancia.

El instrumento proyecta la imagen del objeto (en este caso un segmento de un LED) en un plano. Dicha imagen puede ser vista por un observador a través de un ocular. Una punta de prueba de fibra óptica se sitúa en el área bajo investigación. Ésta mide la iluminación del área, la cual es convertida a luminancia del objeto teniendo en cuenta esta área.

La relación luminancia/brillo es compleja dependiendo del nivel de luminancia, el color del objeto, y de otros factores difíciles de determinar. Afortunadamente, la facilidad para la visión de un visualizador no depende del brillo del carácter sino de la relación entre el brillo del objeto y el brillo del fondo, llamada **relación de contraste**. Esta relación puede ser determinada a través de medidas de luminancia.

El **contraste** se define de dos formas. Para visualizadores pasivos como los de LCD, el contraste se define como:

$$C = \frac{L_0 - L_B}{L_0} \quad (\text{B.7.3})$$

donde C es el contraste, L_0 la luminancia del objeto (cd/m^2) y L_B la luminancia del fondo (cd/m^2).

Para visualizadores activos (como LEDs y otros) se usa la siguiente ecuación para determinar la relación de contraste,

$$CR = \frac{L_0}{L_B} \quad (\text{B.7.4})$$

El contraste puede tener valores entre 0 y 1. Un contraste cero corresponde al caso en que objeto y fondo tengan la misma luminancia y un contraste 1 a cuando el fondo tiene una

luminancia cero. La relación de contraste, sin embargo, toma valores entre 1 e infinito. Para un valor 1, objeto y fondo tienen la misma luminancia y, por tanto, el visualizador no es en absoluto visible. Para un valor infinito, la luminancia del fondo es cero y el visualizador tiene la mejor visibilidad. Una representación contraste-relación de contraste con los límites recomendados se muestra en la siguiente figura:

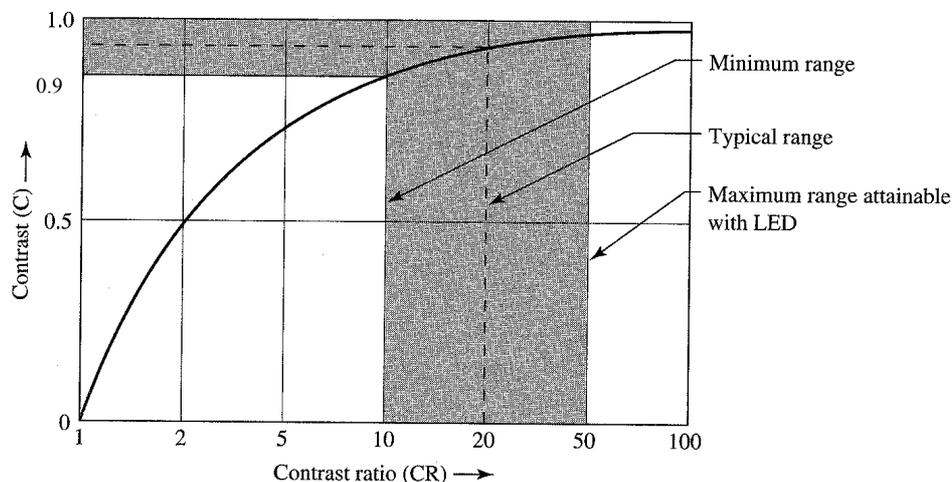


Fig. B.7.5: Relación entre el contraste y la relación de contraste y sus valores óptimos.

La tarea de un buen diseñador de visualizadores es diseñar un visualizador con el máximo contraste o relación de contraste. Un bajo contraste reduce la agudeza visual del ojo afectando a la facilidad para la visión del visualizador. En la anterior figura se muestran también los límites mínimos de contraste y relación de contraste.

Para incrementar el contraste, en el caso de visualizadores pasivos LCD, debería incrementarse la luminancia del fondo, bien aumentando la iluminación bien seleccionando un visualizador de transmisión. Para incrementar la relación de contraste de un visualizador activo (por ejemplo, un LED), se requiere lo contrario: debe disminuirse la luminancia del fondo. Para ello se reduce la iluminación ambiental mediante el uso de "capuchas", cubiertas cerradas, y similares, o ahuecando el visualizador.

Un factor que permite alcanzar un correcto contraste, más complejo que el simple ajuste de la relación de luminancias, es la selección adecuada de los colores de visualizador y fondo. La selección de un apropiado color de fondo puede realzar la facilidad de visión incluso a bajas relaciones de contraste. La utilización de filtros es el mejor método para sacar partido de los colores de visualizador y fondo para el incremento de la facilidad de visión.

El filtro, ya sea pasa-banda o pasa-baja, transmite la longitud de onda emitida por el visualizador y bloquea todas las demás longitudes de onda. En consecuencia, la luminancia del fondo se reduce incrementándose la relación de contraste. Existen una gran variedad de filtros plásticos o de vidrio disponibles para tal aplicación. La mayor parte de visualizadores activos emplean filtros.

B.7.2. Cristales líquidos: principios de funcionamiento.

Aunque los cristales líquidos se conocen desde hace más de un siglo, su primera aplicación práctica como visualizadores la hicieron G. H. Heilmeyer, L. A. Zanoni y L. A.

Barton en 1968. El principio físico usado entonces fue distinto al usado hoy en día en los visualizadores LCD. Entonces se basaba en el efecto de "dispersión dinámica" de la luz cuando una corriente eléctrica pasaba a través del cristal líquido. En ausencia de señal eléctrica, se mantiene el orden a gran escala permitiendo la transmisión de luz. El paso de una corriente eléctrica provoca la generación de pequeños dominios de moléculas ordenadas que presentan una orientación aleatoria y, en consecuencia, la luz se dispersa haciendo que el cristal sea más opaco (mayor cantidad de luz es reflejada).

En 1971 M. Schadt y W. Helfrich describieron los cristales nemáticos girados. Los dispositivos basados en los cristales nemáticos girados se basan en la variación del eje óptico del cristal líquido mediante un campo eléctrico. En un tema anterior ya vimos la propagación de la luz en un medio anisótropo, conocimientos que serán necesarios en este tema. Los cristales líquidos presentan notables características que les han permitido ser un material muy empleado en la fabricación de paneles visualizadores planos. Gracias al avance de la tecnología hoy en día disponemos de paneles cuyo comportamiento es parecido al de un visualizador basado en tubo de rayos catódicos (CRT). Los avances de la tecnología permitirán en un futuro que las pantallas de cristal líquido se apliquen a televisores y ordenadores normales. Ya discutimos la anisotropía de las propiedades ópticas en cristales, en particular, los conceptos de índices de refracción ordinario y extraordinario y del eje óptico. En este tema hablaremos de dispositivos que explotan el hecho de que las propiedades ópticas de los cristales pueden alterarse mediante la aplicación de campos eléctricos.

En cristales sólidos el efecto del campo eléctrico es alterar la anisotropía entre n_{re} y n_{ro} , de forma que se modifique la diferencia de fase entre los rayos ordinario y extraordinario y, por tanto, la polarización de la señal óptica. El campo eléctrico consigue estos cambios al variar ligeramente la distribución de electrones en cada átomo del cristal. No existe distorsión física o reorientación de los átomos ya que la fuerza creada por el campo eléctrico es demasiado pequeña para provocar el movimiento de los átomos. Los dispositivos basados en este efecto se discutirán más adelante en este tema. Los cristales líquidos por el contrario no son rígidos y por ello sus fuerzas interatómicas características son lo suficientemente pequeñas como para poder causar una realineación de sus átomos con un campo eléctrico relativamente pequeño. Esto permite cambiar también el eje óptico del cristal líquido y es la base de los actuales LCDs.

Existen tres tipos de distorsiones que se pueden producir en un cristal líquido nemático. Se caracterizan por i) divergencia, donde una fuerza produce una distorsión de las moléculas en forma de barra como la mostrada en la siguiente figura (a), ii) giro, que es causado por la rotación en el alineamiento de las moléculas y iii) curvatura, donde el cristal líquido es distorsionado de forma que se produce una curvatura en el alineamiento de las moléculas. Las constantes elásticas que definen la energía por unidad de longitud para crear estas distorsiones se llaman K_1 , K_2 y K_3 . Los valores típicos de estas constantes elásticas están entre 10^{-5} y 10^{-7} dina ($1 \text{ dina} = 10^{-5} \text{ N}$).

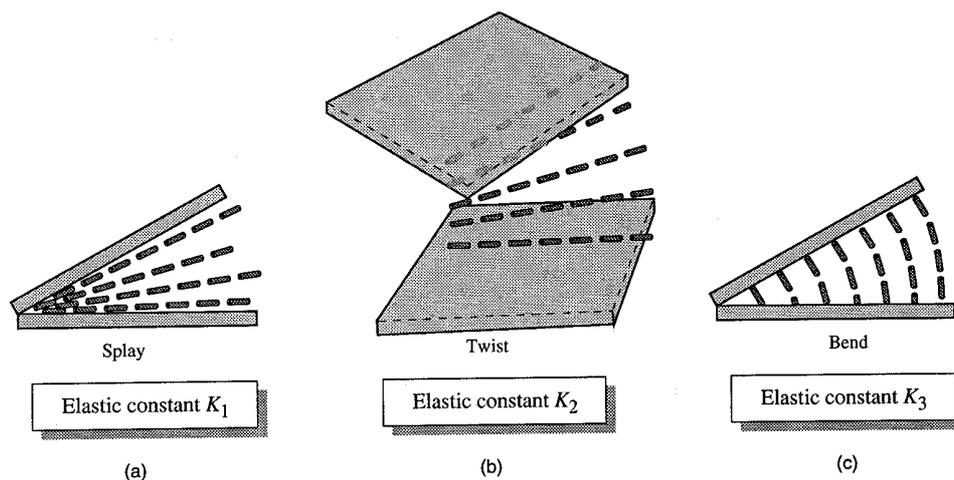


Fig. B.7.6: Las tres distorsiones que aparecen en un cristal líquido nemático. Estas distorsiones pueden aparecer por las fuerzas aplicadas a las dos paredes de vidrio.

Cuando aplicamos un campo eléctrico al cristal líquido, actúa una fuerza sobre el cristal que provoca una distorsión en la orientación del eje óptico. Esto se aprovecha en cristales líquidos para modular la luz que pasa a través de la célula.

Un cristal líquido es un cristal uniáxico de forma que de las tres constantes dieléctricas principales que nos proporcionan los semiejes del elipsoide de Fresnel, dos de ellas son iguales y de valor ϵ_{\perp} y la tercera es diferente y de valor ϵ_{\parallel} . En los ejes de dicho elipsoide los vectores desplazamiento eléctrico \vec{D} y campo eléctrico \vec{E} son paralelos y están relacionados entre sí a través de las constantes dieléctricas principales. La dirección correspondiente a la constante dieléctrica desigual ϵ_{\parallel} corresponde al eje óptico, mientras que las otras dos de valor ϵ_{\perp} están en direcciones perpendiculares al eje óptico. Esto significa que la constante dieléctrica será ϵ_{\parallel} para campos eléctricos que apunten en la dirección de alineamiento de las moléculas (eje óptico) y ϵ_{\perp} para campo eléctricos que apunten en dirección perpendicular a dicho eje óptico. Podemos definir la anisotropía dieléctrica como

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} \quad (B.7.5)$$

Vamos a ponernos en el caso de que el eje óptico sea el eje z, con lo que $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_{\perp}$ y $\epsilon_z = \epsilon_{\parallel}$. Cuando aplicamos un campo eléctrico constante al cristal líquido, se inducen dipolos eléctricos y las fuerzas de tipo eléctrico resultante producen un par sobre las moléculas, como se muestra en la siguiente figura. La energía de las moléculas al estar sujetas a dicho campo eléctrico es igual al valor negativo de la energía electrostática $-\frac{1}{2} \cdot \vec{E} \cdot \vec{D} = -\frac{1}{2} \cdot [\epsilon_{\perp} \cdot E_x^2 + \epsilon_{\perp} \cdot E_y^2 + \epsilon_{\parallel} \cdot E_z^2]$ pues es esta energía la que hay que proporcionar a las moléculas para que se puedan "liberar" de dicho campo y quedar libres. Las moléculas rotarán en un sentido tal que su energía sea mínima. Si el cristal líquido es un cristal uniáxico positivo con lo cual $\epsilon_z = \epsilon_{\parallel} > \epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_{\perp}$ ($\Delta\epsilon > 0$), para cualquier dirección del campo eléctrico aplicado, la energía mínima se tiene cuando las moléculas se alinean con el campo, es decir $E_x = E_y = 0$, $\vec{E} = (0, 0, E)$ y la energía es entonces $-\frac{1}{2} \cdot \epsilon_{\parallel} \cdot E^2$. Por tanto, la configuración de menor energía para las moléculas es cuando el eje óptico está alineado paralelamente al campo eléctrico aplicado. Cuando la alineación se ha completado el eje molecular apunta en la dirección del campo eléctrico.

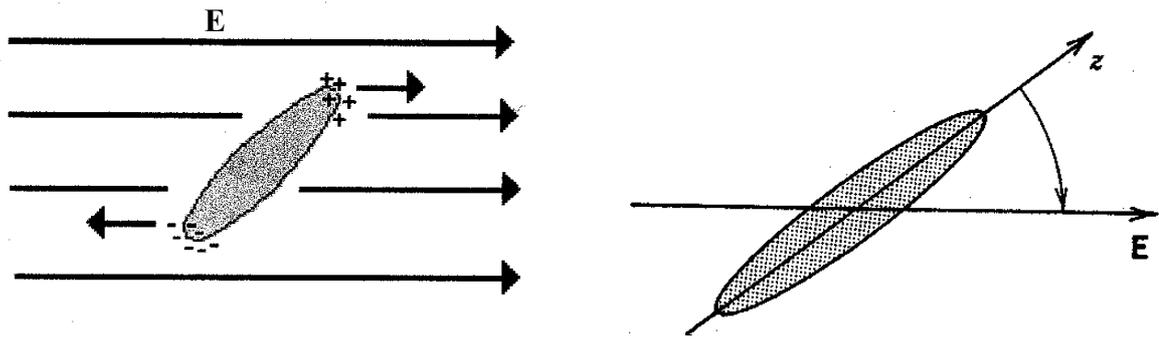


Fig. B.7.7: Las moléculas de un cristal líquido uniaxial positivo rotan y se alinean con el campo eléctrico aplicado.

Si el cristal líquido es un cristal uniaxial negativo, es decir, $\epsilon_z = \epsilon_{\parallel} < \epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_{\perp}$ ($\Delta\epsilon < 0$), la configuración de menor energía para las moléculas corresponde a aquella en que el eje óptico es perpendicular al campo.

Una célula de cristal líquido (LCD) está constituida por una fina capa de cristal líquido situada entre dos placas paralelas de vidrio. Vamos a suponer que las placas de vidrio han sido previamente frotadas de forma que las moléculas tienen siempre la misma orientación. El material se comporta como un cristal uniaxial cuyo eje óptico es paralelo a la orientación de las moléculas. Cuando una onda electromagnética penetra en el cristal líquido (sustancia anisótropa) se descompone en dos ondas linealmente polarizadas y perpendiculares: la onda ordinaria y la onda extraordinaria. Cada una de ellas se propaga a diferente velocidad, la ordinaria a c/n_{ro} y la extraordinaria a c/n_{re} generando un desfase ϕ y, por tanto, la onda electromagnética de salida tendrá una polarización diferente a la de entrada. Para un dispositivo de grosor d el desfase introducido es:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (n_{re} - n_{ro}) \cdot d \tag{B.7.6}$$

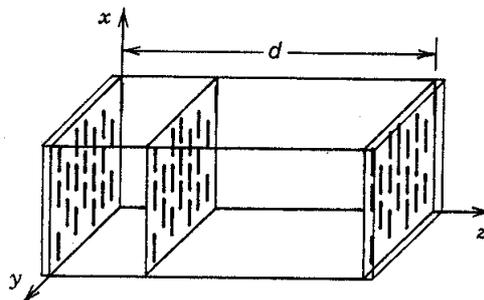


Fig. B.7.8: Orientación molecular en una célula de cristal líquido en ausencia de campo eléctrico aplicado.

Si se aplica un campo eléctrico en la dirección z (aplicando una diferencia de potencial V a través de dos electrodos situados en el interior de las placas de vidrio), las fuerzas eléctricas resultantes (para el caso $\Delta\epsilon > 0$) tenderán a hacer que las moléculas se alineen con el campo, pero las fuerzas de tipo elástico de las superficies de las placas de vidrio (cuyas constantes elásticas han sido introducidas con anterioridad) se opondrán a este movimiento.

Por tanto, existirá un campo eléctrico mínimo que se habrá de aplicar para vencer dichas fuerzas y conseguir dicho alineamiento.

Para explotar la capacidad de un campo eléctrico para alterar el eje óptico, existen varias configuraciones de células de cristal líquido. El funcionamiento de estas células puede ser comprendido si se tiene en cuenta que:

- i) cuando la luz viaja a lo largo del eje óptico, no hay cambio en la polarización de la luz debido a cambios en n_{re} y n_{ro} ya que, para este tipo de propagación, ambos índices de refracción son iguales ($\phi=0$);
- ii) cuando la luz se propaga perpendicularmente al eje óptico, la diferencia entre n_{re} y n_{ro} puede cambiar la polarización de la luz. En particular la polarización puede cambiar en $\phi=90^\circ$ si el grosor de la célula es escogido adecuadamente;
- iii) cuando la luz se propaga en un cristal líquido cuyo eje óptico gira lentamente (cristal líquido nemático girado) la polarización de la luz sigue el giro del cristal.

Basándonos en estos hechos utilizaremos dos polarizadores cruzados para modular la luz. El primer polarizador prepara la polarización de la luz cuando ésta entra en la célula de cristal líquido, de forma que la luz que entra a la célula está linealmente polarizada en la dirección de este polarizador. Cuando la luz pasa a través de la célula su polarización puede variar dependiendo del estado del cristal. El segundo polarizador sólo permitirá pasar la componente de la luz que esté polarizada en su misma dirección.

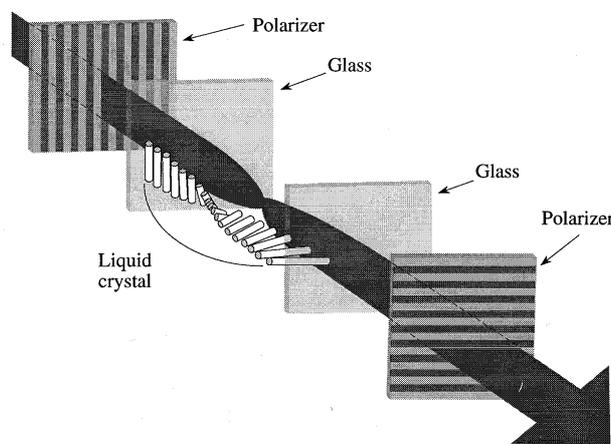


Fig. B.7.9: Utilización de dos polarizadores cruzados junto con una célula de cristal líquido. En este caso concreto se tiene una célula de cristal líquido nemático girado.

Veamos las tres posibles configuraciones de cristales líquidos y sus tensiones umbrales necesarias para cambiar su eje óptico.

Orientación paralela

Esta configuración la podemos utilizar si $\Delta\epsilon$ es positiva. En ausencia de campo eléctrico las placas de vidrio están dispuestas de forma que el eje óptico es paralelo a las placas. Cuando aplicamos un campo eléctrico, las moléculas tienden a alinearse en dirección paralela al campo, de forma que el eje óptico quede paralelo a éste. Se puede calcular una

tensión umbral por encima de la cual el campo eléctrico es lo suficientemente fuerte como para contrarrestar la fuerza de tipo elástico ejercida por las superficies de las placas de vidrio,

$$V_{th} = \sqrt{\frac{\pi K_1}{4\Delta\epsilon}} \quad (B.7.7)$$

Los valores típicos de esta tensión están entre 2 y 6 voltios.

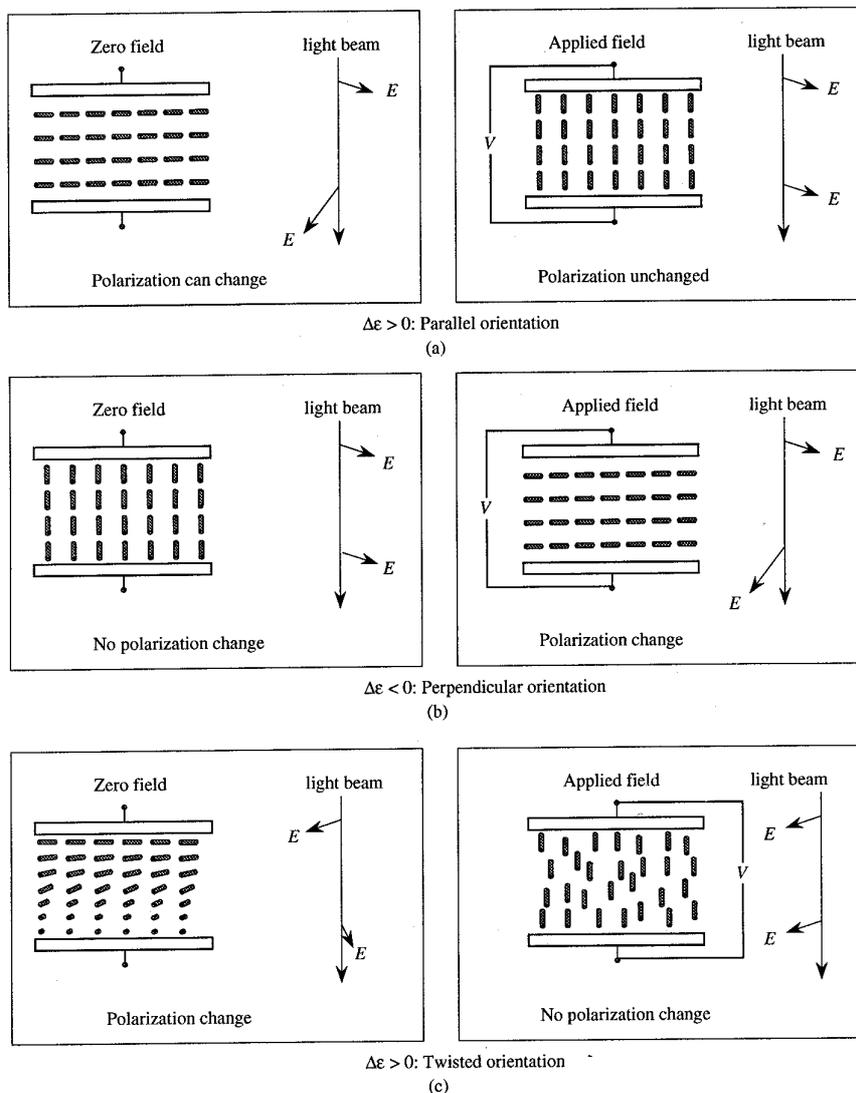


Fig. B.7.10: Posibles configuraciones de cristales líquidos para aprovecharlas como "válvulas de luz". (a) En la orientación paralela el eje óptico es paralelo a las placas de vidrio en ausencia de polarización eléctrica y paralelo al campo eléctrico aplicado en su existencia; (b) en la orientación perpendicular, el eje óptico es perpendicular a las placas de vidrio antes de aplicar el campo y paralelo a ellas después de aplicar el campo eléctrico; (c) en la configuración girada, el giro está presente en ausencia de campo eléctrico y desaparece con el campo eléctrico.

Orientación perpendicular

Esta orientación es para $\Delta\epsilon$ negativa. La tensión umbral necesaria para reorientar el eje óptico del cristal líquido vale,

$$V_{th} = \sqrt{\frac{\pi K_3}{4|\Delta\epsilon|}} \quad (\text{B.7.8})$$

Orientación girada

Esta es la orientación más utilizada en la tecnología de los visualizadores. Ya hemos explicado como el giro en el cristal líquido provoca una rotación en la polarización de la luz incidente. Este giro molecular se consigue frotando las placas de vidrio en dos direcciones particulares. Es posible anular dicho giro mediante la aplicación de un campo eléctrico. La tensión umbral necesaria para destruir el giro vale,

$$V_{th} = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{4K_1 + K_3 - 2K_2}{\pi\Delta\epsilon}} \quad (\text{B.7.9})$$

Una célula de cristal líquido basada en un cristal líquido nemático girado se muestra en la siguiente figura. El giro en el cristal se produce preparando las dos placas de vidrio que son frotadas previamente con un paño para establecer las direcciones de orientación a lo largo de las cuales las moléculas de cristal líquido se alinean. Las dos placas son entonces orientadas con las direcciones de frotamiento perpendiculares (giro de 90°) la una a la otra y con un pequeño espacio entre ellas. El espaciado entre placas suele ser de 4 a 10 micras. Cuando se rellena este espacio con cristal líquido las moléculas cercanas a las placas de vidrio se orientan en la dirección del frotamiento y así se consigue el giro del cristal.

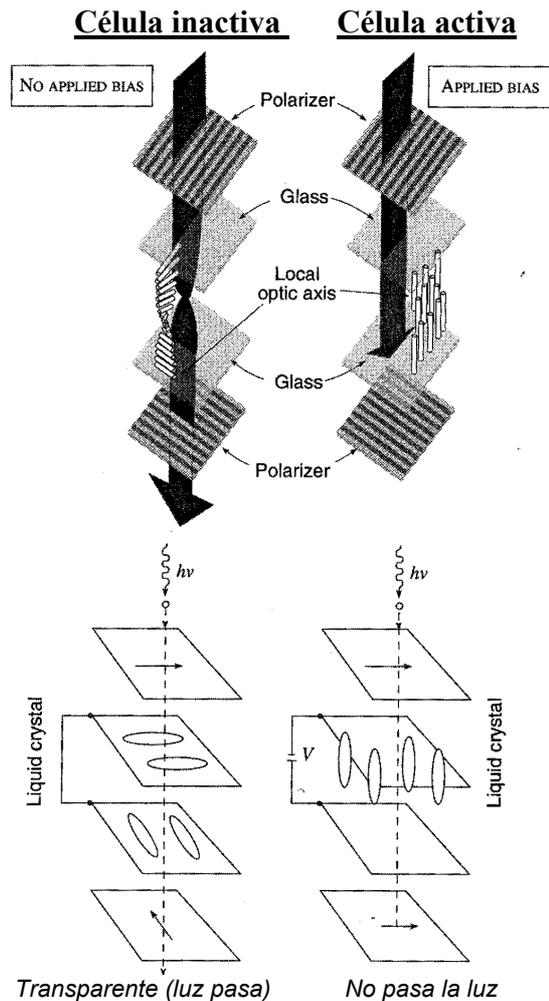


Fig. B.7.11: Funcionamiento de una célula de cristal líquido nemático girado. En la parte superior se observa la localización de los diferentes elementos de la célula y en la parte inferior se observan los cambios de polarización producidos en la célula.

Sin tensión aplicada, la luz atraviesa el dispositivo, es decir, que éste es transparente. Por tanto, cuando la célula está inactiva (OFF), tenemos la imagen iluminada sobre el fondo negro. Al aplicar una tensión, la célula se activa (ON), se anula el giro y la luz es bloqueada, difundida y, en consecuencia, tenemos una imagen oscura.

La tensión umbral antes descrita, no produce un cambio brusco en el eje óptico de un estado a otro. El cambio es no lineal pero no completamente abrupto. No hay que olvidar, que incluso en el estado de transparencia cuando la luz atraviesa la célula existe una considerable absorción en el cristal líquido. Profundizando más en la célula de cristal líquido nemático girado, la cual es la más ampliamente utilizada, si consideramos el caso ideal la transmitancia del cristal líquido debería cambiar bruscamente en V_{th} como se muestra en la línea discontinua de la siguiente figura. Sin embargo, en la célula de cristal líquido real esto no sucede debido a que el giro desaparece gradualmente y por tanto la transmitancia también cambia suavemente. La transición gradual nos proporciona un tramo donde es parcialmente activa (escala de grises) que hay que evitar. Por otra parte, esta transición suave es una desventaja para el uso de cristales líquidos girados a 90° para visualizadores pasivos de gran tamaño, como se verá más adelante.

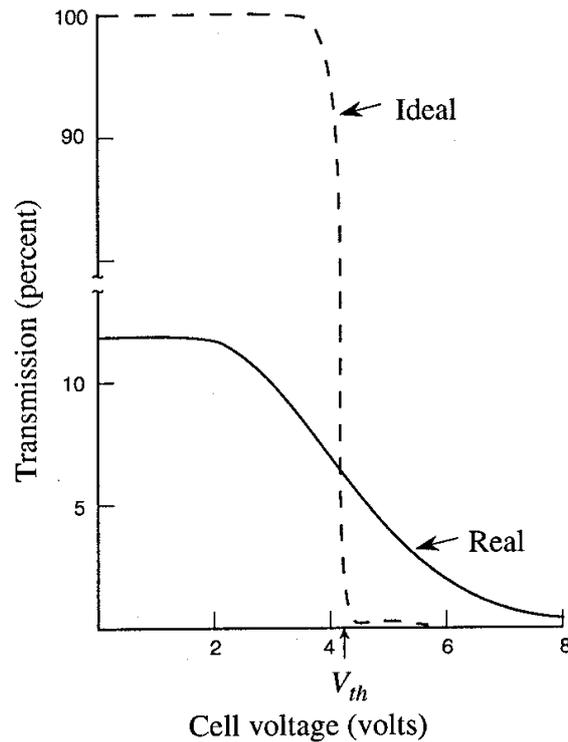


Fig. B.7.12: Transmítancia de un cristal líquido en función de la tensión aplicada. Se comparan la respuesta ideal y la respuesta real.

En el caso de que el polarizador de salida tuviese la misma orientación que el de entrada, la transmitancia del sistema variaría y sería como se muestra en la siguiente figura. En dicho caso, cuando la célula estuviese activa, estaría iluminada.

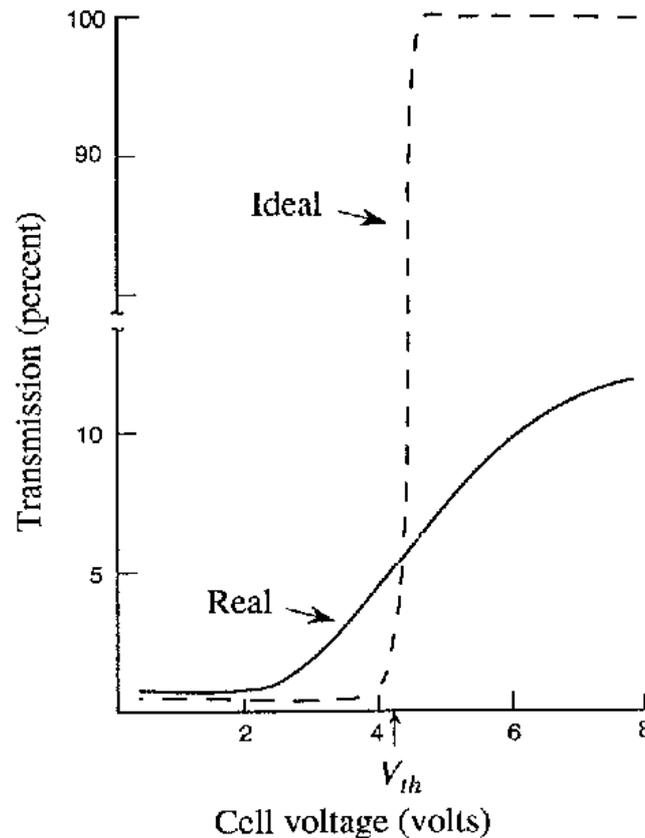


Fig. B.7.13: Transmitancia de un cristal líquido en función de la tensión aplicada para el caso en que ambos polarizadores tengan la misma orientación. Se comparan la respuesta ideal y la respuesta real.

En 1984 se descubrieron cristales líquidos que permitían un giro de 270° en vez de 90° , los llamados cristales nemáticos supergirados (STN). Estos cristales no son puramente nemáticos ya que en estos últimos el ángulo estable de giro es el de 90° . Sin embargo, una pequeña adición de componente colestérica puede conseguir una estabilización del ángulo en 270° . Como ya se comentó, los cristales colestéricos tienen ya un giro natural en su eje óptico (orientación de las moléculas) lo que permite la estabilización del giro en 270° .

La ventaja de la célula STN es que cuando se le aplica un potencial a la célula, se produce un cambio brusco del giro de 270° a la ausencia de giro. Como consecuencia, la curva de transmitancia frente a tensión es muy abrupta. Esta respuesta permite ir desde un estado de baja transmitancia a un estado de alta transmitancia y viceversa con una pequeña variación en la tensión aplicada. En la actualidad se utilizan una gran variedad de cristales STN con giros que van desde 180° a 270° . La atracción fundamental de todas estas estructuras es la extremadamente abrupta característica transmitancia-tensión.

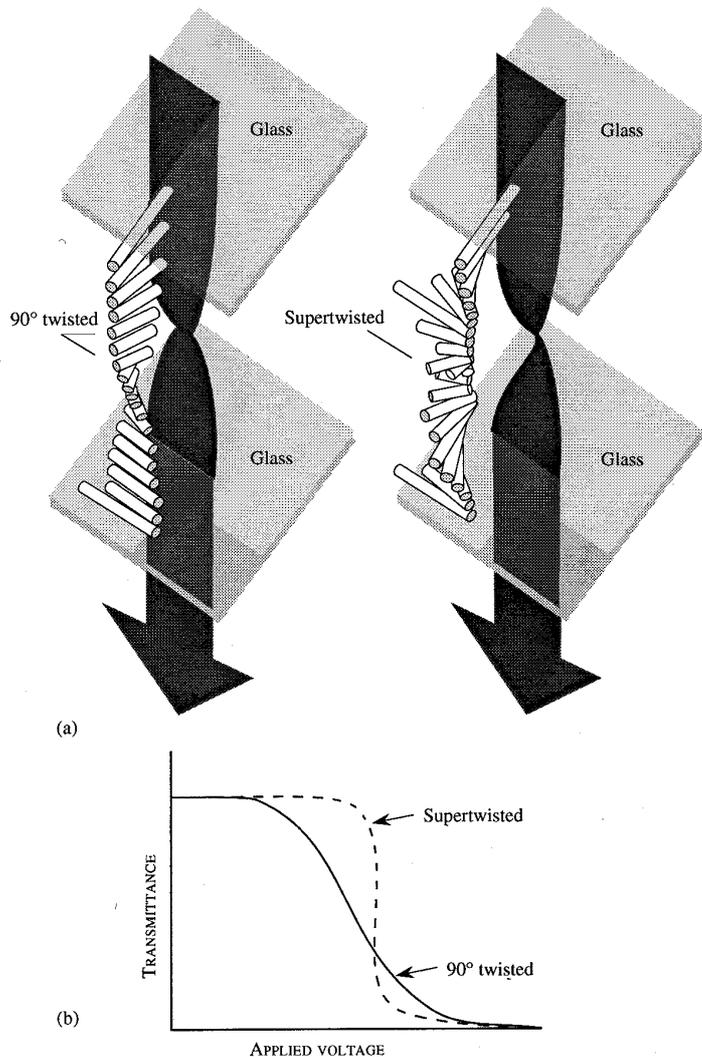


Fig. B.7.14: (a) Comparación de un cristal líquido girado 90° y uno girado 270° . (b) Relación transmitancia/tensión de una célula de cristal líquido nemático supergirado.

Aunque el funcionamiento de una única célula de cristal líquido es muy sencilla, el proceso de escalado para producir un visualizador con alrededor de un millón de células es un enorme reto. En una sección posterior estudiaremos estos retos y como están siendo resueltos.

B.7.2.1. Cómo activar células de cristal líquido

El circuito equivalente de una célula de cristal líquido es un condensador en paralelo con una resistencia de pérdidas. Los valores de estas componentes dependen del área y construcción de la célula. Los valores de la resistencia son normalmente mucho mayores que la reactancia del condensador. La tensión que se le suele aplicar a la célula es alterna ya que la tensión continua deteriora el cristal líquido ya que se produce un efecto de electrólisis. La tensión no debe tener un valor DC mayor que 50mV para no degradar la célula por esta razón. Es la tensión eficaz la que controla entonces la célula. Su frecuencia debe ser superior a 30Hz para evitar efectos de parpadeo siendo el valor máximo 1kHz. Para frecuencias mayores empieza a aumentar el consumo (mayor corriente) debido al condensador equivalente.

Se tienen dos modos posibles de alimentación: alimentación directa o multiplexada. La alimentación directa es más sencilla pero requiere un contacto para cada elemento del visualizador, siendo por tanto utilizada únicamente en visualizadores poco complejos. Pero en visualizadores más complejos (matrices), como veremos en el punto siguiente, es necesaria la multiplexación de la señal aplicada.

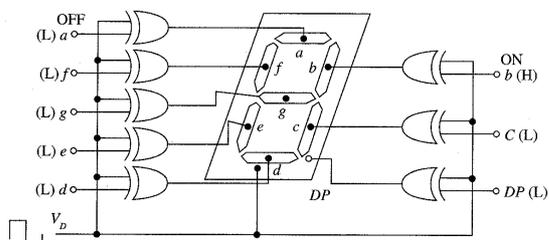
Alimentación directa

En la siguiente figura se muestra un circuito típico de alimentación de un visualizador de "siete-segmentos" mediante el uso de una señal cuadrada. Cada segmento tiene un electrodo y luego tienen un electrodo común. A este último se le aplica la señal cuadrada V_D con una amplitud de pico a pico V_{P-P} adecuada. El otro electrodo de cada segmento está conectado a la salida de una puerta XOR, de cuyas entradas una es la señal cuadrada y la otra una señal de control la cual puede estar a nivel alto (uno lógico) o a nivel bajo (cero lógico). Cuando esta señal de control está a "uno" lógico, la salida de la puerta tiene la señal cuadrada común invertida V_B y cuando la señal es un "cero" lógico, la salida de la puerta es la misma señal común, V_A . El resultado es que el segmento ve por un lado una señal de cero voltios ($V_D - V_A = 0$) o una señal cuadrada del doble de la amplitud ($2 \cdot V_{P-P}$) de la señal cuadrada común. Como la célula de cristal líquido responde al valor RMS de la forma de onda, hay que tener en cuenta que el valor eficaz o RMS de una señal cuadrada es igual a su tensión de pico a pico partido por dos.

$$V_{RMS} = V_{P-P} / 2 \tag{B.7.10}$$

donde V_{RMS} = Valor RMS de la onda cuadrada (V)

V_{P-P} = Valor de pico a pico de la onda cuadrada (V)



(a) Direct drive circuit

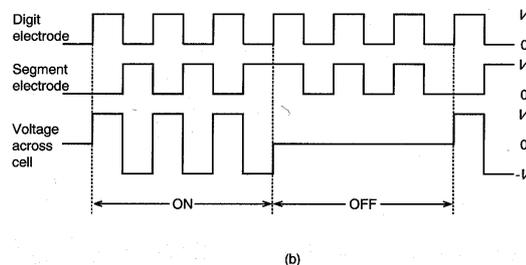
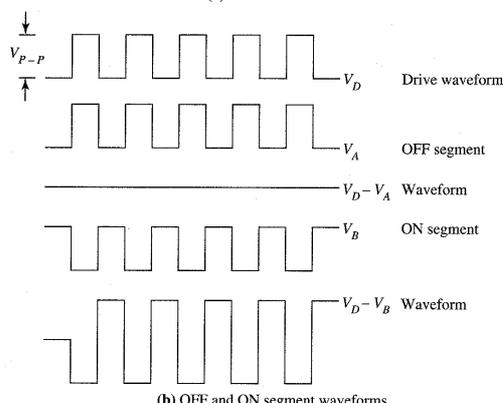
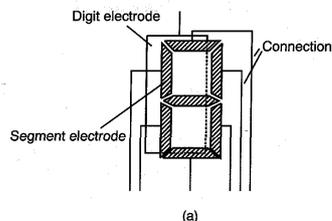


Fig. B.7.15: Alimentación directa de un visualizador de cristal líquido de 7 segmentos. En la figura podemos observar los estados de ON y de OFF.

Alimentación multiplexada

Si tenemos una matriz de puntos con N filas y M columnas debemos multiplexar la alimentación ya que no es posible darle una conexión directa a cada una. El problema surge cuando hay que darle tensiones alternas a una fila o columna que den como resultado un valor eficaz deseado para activar o desactivar la célula correspondiente por medio del valor eficaz y además que su valor medio (componente de continua) sea cero. Para conseguir un valor medio igual a cero es necesario utilizar ondas rectangulares bipolares. Esto puede ser visto en la siguiente figura, en donde se compara con los pulsos de disparo empleados en otros visualizadores, los cuales pueden pasar a ON o a OFF simplemente aplicando o no una tensión al elemento.

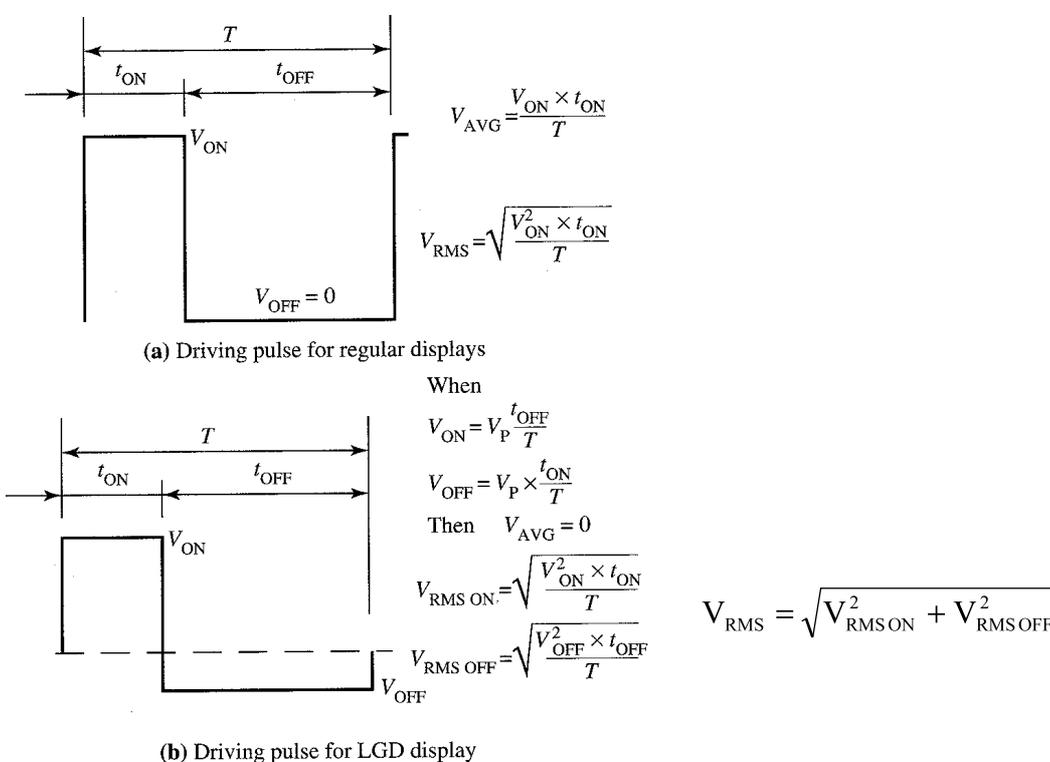


Fig. B.7.16: Pulsos para alimentar (a) circuitos normales; (b) circuitos de LCD (el valor medio, su valor de continua, es cero).

Para una matriz de tamaño medio la generación y diseño de las formas de onda se convierte en una tarea muy compleja y se deben utilizar los circuitos integrados existentes ya en el mercado. En el ejemplo que mostramos a continuación, se aplican alternativamente dos pulsos que son los inversos uno del otro para así cancelar la componente residual de continua disponiendo de un sistema de cuatro niveles de tensión. Se observa como el valor eficaz aplicado a cada célula oscila entre 1,17V y 1,70V que representarán los estados altos y bajos respectivamente. Lo que se busca es obtener siempre una relación entre estos estados altos y bajos lo mayor posible. En el punto siguiente demostraremos que esta relación depende del tamaño de la matriz, es decir del número de columnas.

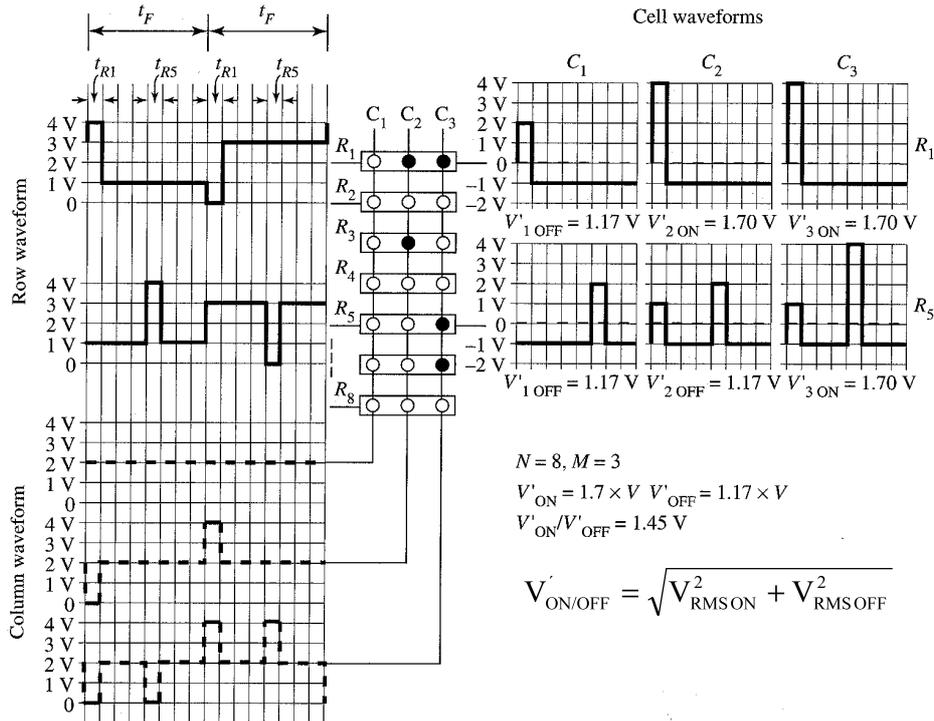


Fig. B.7.17: Ondas de disparo de 4 niveles para un visualizador de 8 filas y 3 columnas.

B.7.3. Retos para pasar de la célula a la pantalla de cristal líquido

La mayor atracción de los cristales líquidos es su aplicación en grandes pantallas donde se utilizarían hasta una millón de células de cristal líquido. Esto presenta algunos importantes retos tanto físicos como en lo referente al procesamiento. El primer reto que vamos a examinar es el de direccionar cada uno de los pixels o células particulares de la pantalla.

B.7.3.1. El direccionamiento de pixels

Si la tecnología LCD quiere competir con la de CRT, debe ofrecer una resolución y una calidad de imagen comparable a esta última. Debería ser capaz de mostrar imágenes en color así como una gran variación en la escala de grises del visualizador. Esto requiere que debe ser capaz de tener más de un millón de pixels (elementos de imagen) en una pantalla. ¿Cómo se direccionan tantos pixels y se presenta una imagen libre de destellos al ojo humano? El problema es parecido al que se tiene en el caso de un dispositivo de memoria dinámica o DRAM donde se tienen un número parecido de elementos a direccionar. Pero en la pantalla tenemos una dificultad adicional y es que las características tensión-transmitancia del cristal no son abruptas. Además al contrario que en las DRAM no sólo tenemos dos estados, 0 y 1, si no que toda una escala de grises además de color. Si se necesitan los tres colores básicos, rojo, verde y azul (RGB), se colocarán tres pixels, uno para cada color uno muy cerca de otro. Todos estos pixels deben estar direccionados y se deben refrescar 30 veces por segundo para presentar una imagen continua al ojo. Hay que tener en cuenta que hay que mantener un nivel de tensión en bornes de la célula para activar el pixel.

Una posibilidad para el direccionamiento de una matriz de pixels $N \times N$ podría ser acceder a cada pixel individualmente (alimentación directa), pero esto es imposible cuando la matriz supera el tamaño de unos cientos de pixels. Lo que se haría es colocar cada pixel en una matriz de conexiones y aplicar la tensión apropiada a cada fila y columna (alimentación multiplexada).

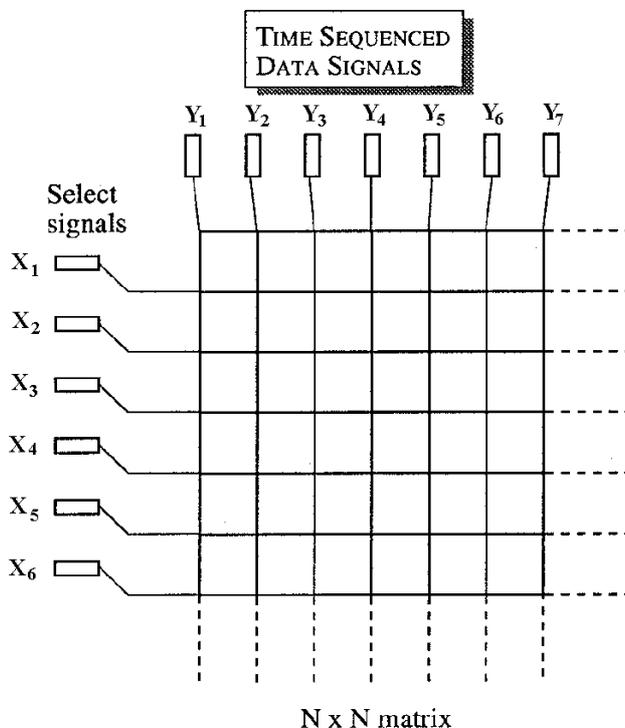


Fig. B.7.18: Aproximación para el direccionamiento de una matriz de pixels mediante alimentación multiplexada.

Para darnos cuenta de las limitaciones de este sistema vamos a describir la curva T-V (supondremos el caso en que ambos polarizadores tengan la misma orientación).

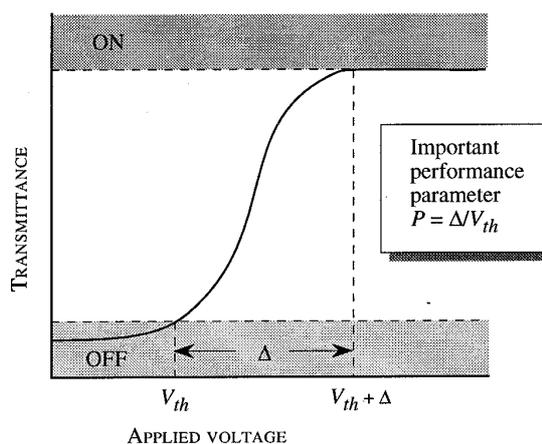


Fig. B.7.19: Curva estática transmitancia-tensión, T-V para una típica célula de cristal líquido.

La curva T-V se caracteriza, simplificando, por una tensión umbral V_{th} por debajo de la cual el dispositivo está apagado y un nivel de tensión $V_{th} + \Delta$ por encima del cual está encendido. Esto es una imagen estática, es decir, para el caso en que la tensión aplicada y la transmitancia correspondan a una polarización continuada de valores eficaces. En una pantalla

en la que las imágenes deben cambiar rápidamente y, por tanto, las células deben ser direccionadas con rapidez, no se puede mantener un nivel de tensión para un pixel que satisfaga la condición de tensión continua. En dicho caso lo que se aplica a la célula es una señal pulsante.

Supondremos, para comprender los cálculos que se van a seguir a continuación, el ejemplo de una matriz $N \times N$ que debe ser direccionada aplicando unos pulsos secuenciales de tensión a N filas y N columnas. Vamos a suponer también que la pantalla se debe refrescar cada cierto tiempo t_{refresh} (típicamente 20ms). En cada fila se suministra una de las señales de referencia (strobe) $V(X_1) \dots V(X_N)$, que corresponden a pulsos de tensión de duración t_{refresh}/N cuya amplitud será V_s o $-V_s$. En cada columna se introducen unas señales de información $V(Y_1) \dots V(Y_N)$ de valor constante en el intervalo de tiempo t_{refresh} y que puede valer V_D o $-V_D$. La tensión aplicada a la célula será $V(X_i) \cdot V(Y_j)$ y tendrá dos posibilidades. En una primera posibilidad, los límites máximo y mínimo son $V_s + V_D$ y $-(V_s + V_D)$ que ocurren durante tiempos t_{refresh}/N con valores V_D o $-V_D$ el resto del tiempo. En la segunda posibilidad los límites máximo y mínimo son $V_s - V_D$ y $-(V_s - V_D)$ que ocurren durante tiempos t_{refresh}/N con valores V_D o $-V_D$ el resto del tiempo. En el primer caso, como se verá a continuación el valor RMS de la señal es mayor y el pixel está a ON. En el segundo caso el valor RMS es menor y el pixel está a OFF.

El resultado es que cada pixel sólo recibe un pulso de tensión durante un tiempo t_{refresh}/N . Durante el resto del tiempo ($t_{\text{refresh}} - t_{\text{refresh}}/N$) el pixel soporta una tensión constante.

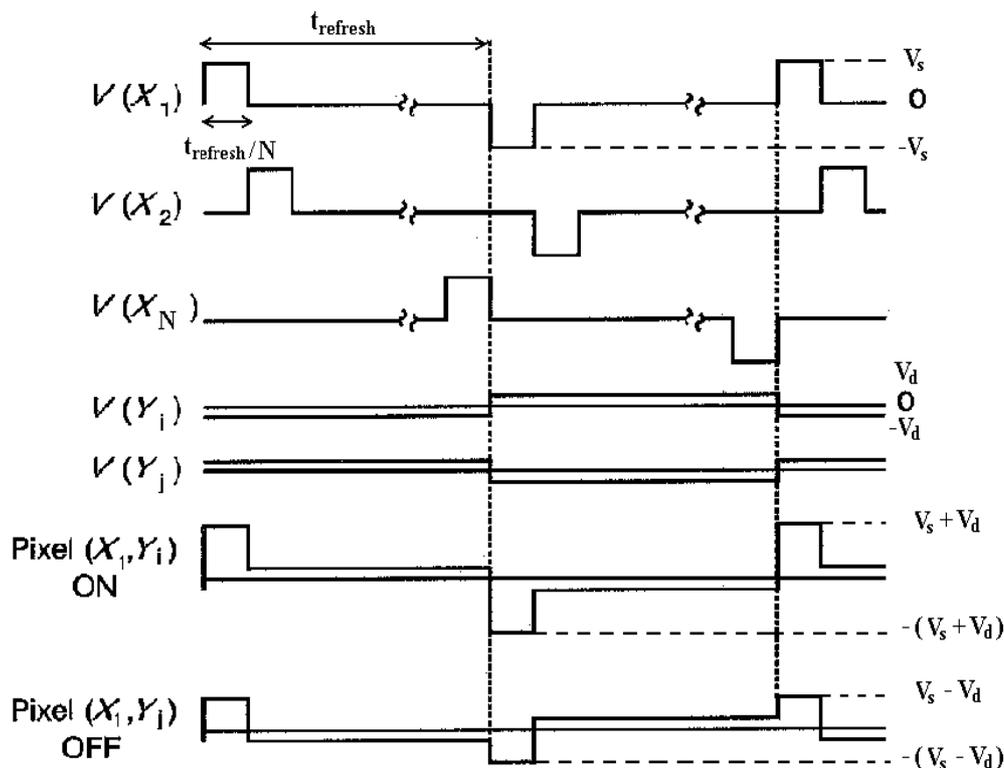


Fig. B.7.20: Alimentación multiplexada de una matriz $N \times N$.

Obviamente, en tal esquema, si el tamaño de la matriz aumenta (N) entonces la diferencia entre los estados ON y OFF también disminuye (es decir, disminuye la diferencia entre los valores RMS de las señales a ON y a OFF) y por tanto necesitaremos una curva T-V

cuyo parámetro Δ sea muy pequeño si queremos direccionar matrices muy grandes. Esta idea intuitiva puede ser confirmada matemáticamente.

Pasemos ahora a analizar matemáticamente la relación entre Δ y N . Como se comentó anteriormente el dispositivo responde de forma muy aproximada según el valor eficaz (RMS) del pulso de tensión. A las tensiones eficaces les colocaremos una barra encima para distinguirlas. Basándonos en las formas de onda que se muestran en la siguiente figura los pulsos de tensión para un estado ON y para un estado OFF durante un periodo T (con $T=2 \cdot t_{\text{refresh}}$) tendrán unos valores eficaces que vendrán dados a partir de las siguientes expresiones:

$$\bar{V}_{OFF}^2 = \frac{1}{N} (V_S - V_D)^2 + V_D^2 - \frac{V_D^2}{N} \quad (\text{B.7.11})$$

$$\bar{V}_{ON}^2 = \frac{1}{N} (V_S + V_D)^2 + V_D^2 - \frac{V_D^2}{N} \quad (\text{B.7.12})$$

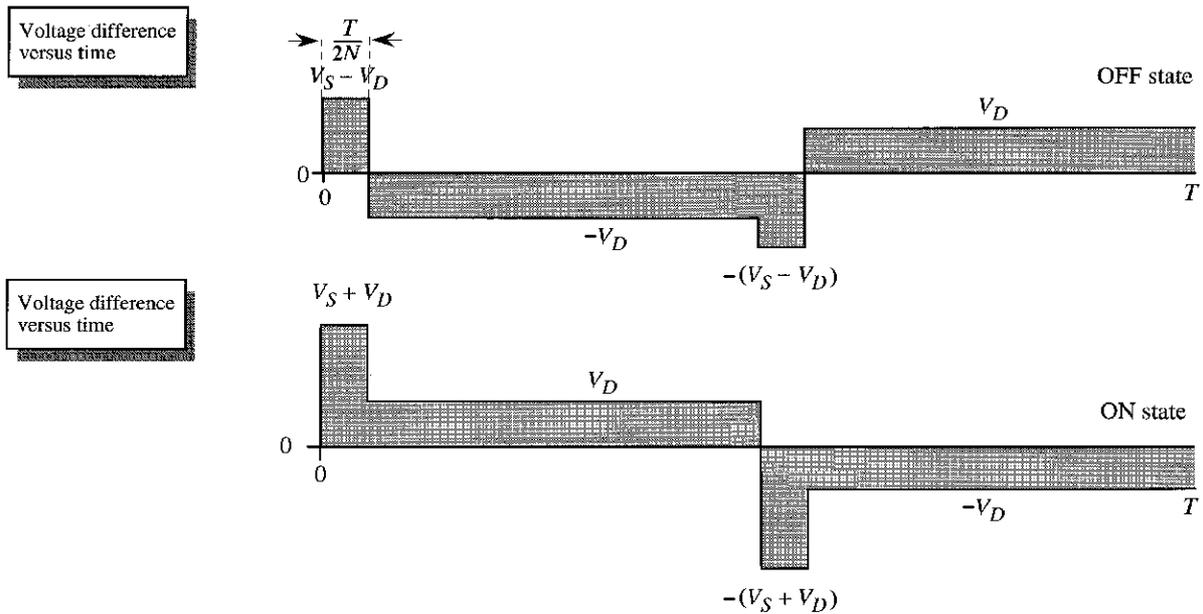


Fig. B.7.21: Tensiones de OFF y ON en bornes de un pixel.

Para que los dispositivos funcionen se debe cumplir que

$$\bar{V}_{OFF} \leq \bar{V}_{th} \quad (\text{B.7.13})$$

$$\bar{V}_{ON} \geq \bar{V}_{th} + \bar{\Delta} \quad (\text{B.7.14})$$

Restando las dos primeras ecuaciones obtenemos,

$$V_S = \frac{N}{4V_D} (\bar{V}_{ON}^2 - \bar{V}_{OFF}^2) \quad (\text{B.7.15})$$

Sumando las dos primeras ecuaciones y sustituyendo V_S , obtenemos,

$$N = \frac{8V_D^2(\bar{V}_{ON}^2 + \bar{V}_{OFF}^2 - 2V_D^2)}{(\bar{V}_{ON}^2 - \bar{V}_{OFF}^2)^2} \quad (\text{B.7.16})$$

Para encontrar el máximo de N,

$$\frac{\partial N}{\partial V_D} = 0 \quad (\text{B.7.17})$$

De donde se obtiene,

$$V_D = \frac{1}{2} \sqrt{\bar{V}_{ON}^2 + \bar{V}_{OFF}^2} \quad (\text{B.7.18})$$

Esto nos da el máximo número de filas y columnas

$$N_{max} = \left(\frac{\bar{V}_{ON}^2 + \bar{V}_{OFF}^2}{\bar{V}_{ON}^2 - \bar{V}_{OFF}^2} \right)^2 \quad (\text{B.7.19})$$

Utilizando los valores $\bar{V}_{ON} = \bar{V}_{th} + \bar{\Delta}$ y $\bar{V}_{OFF} = \bar{V}_{th}$ y definiendo un nuevo parámetro,

$$P = \frac{\bar{\Delta}}{\bar{V}_{th}} \quad (\text{B.7.20})$$

o

$$N_{max} = \left(\frac{(1+P)^2 + 1}{(1+P)^2 - 1} \right)^2 \quad (\text{B.7.21})$$

$$\frac{V_D}{\bar{V}_{th}} = \frac{1}{2} \sqrt{(1+P)^2 + 1} \quad (\text{B.7.22})$$

$$\frac{V_S}{\bar{V}_{th}} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{((1+P)^2 + 1)^3}}{(1+P)^2 - 1} \quad (\text{B.7.23})$$

Obsérvese que V_D tiene un valor muy parecido a la tensión umbral \bar{V}_{th} , pero si N crece el valor de V_S crece rápidamente. El valor de N_{max} depende críticamente de la relación P. Para un valor grande de N_{max} necesitamos un valor de $P = \bar{\Delta}/\bar{V}_{th}$ pequeño.

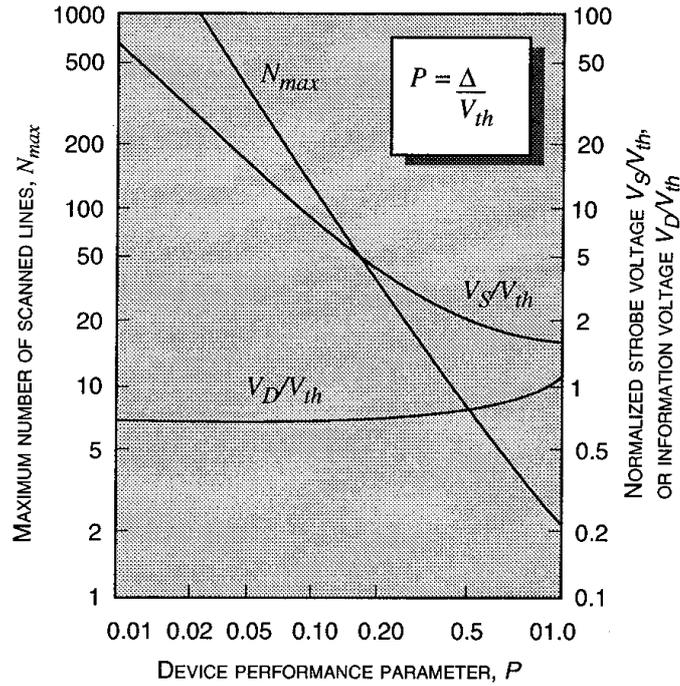


Fig. B.7.22: Representación de N_{max} , la relación entre las tensiones umbral y la máxima y mínima frente a P en un cristal líquido.

De todos estos cálculos se deduce que es bastante difícil de aumentar el valor de N_{max} si $P = \frac{\Delta}{V_{th}}$ tiene un valor de 0,1 por ejemplo, que es el valor típico para un cristal nemático girado a 90°. Por el contrario cristales nemáticos supergirados tienen valores de $P = \frac{\Delta}{V_{th}}$ mucho menores y se puede aumentar N_{max} mucho más (hasta un valor de varias centenas).

B.7.3.2. La solución del interruptor

La solución a este problema se obtiene colocando un simple interruptor en cada pixel. Si se colocase un interruptor adecuadamente, la tensión aplicada ($V_S - V_D$ para OFF o $V_S + V_D$ para ON) durante un tiempo $T/2 \cdot N$ podría mantenerse durante todo el intervalo $T/2$. La idea es utilizar un elemento activo como un transistor o un diodo para poder aplicar la tensión necesaria a la célula y además luego mantenerla durante el resto del periodo. Este procedimiento no sufre de ninguna limitación proveniente de los valores de Δ/V_{th} . El problema viene ahora de cómo colocar millones de interruptores, uno por pixel, en una pantalla.

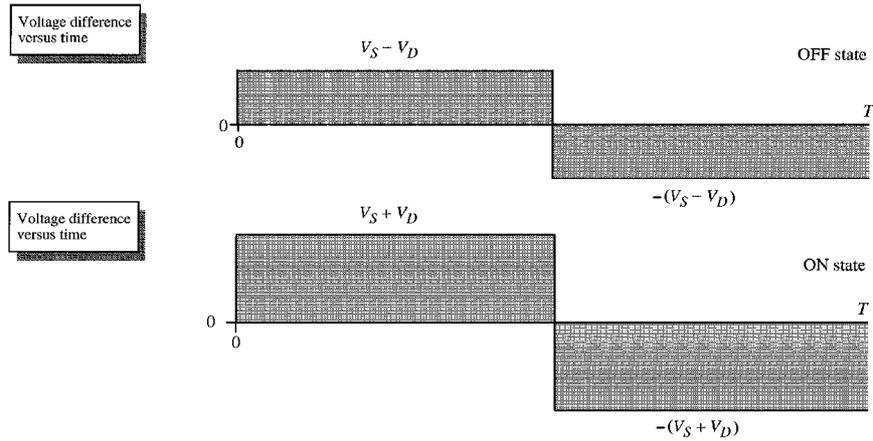


Fig. B.7.23: Tensiones de OFF y ON en bornes de un pixel con el empleo de un interruptor.

Los visualizadores de cristal líquido que no utilizan interruptores por pixel se llaman visualizadores de cristal líquido pasivos. Los que sí incorporan los interruptores se llaman activos (AMLCD - active matrix LCD).

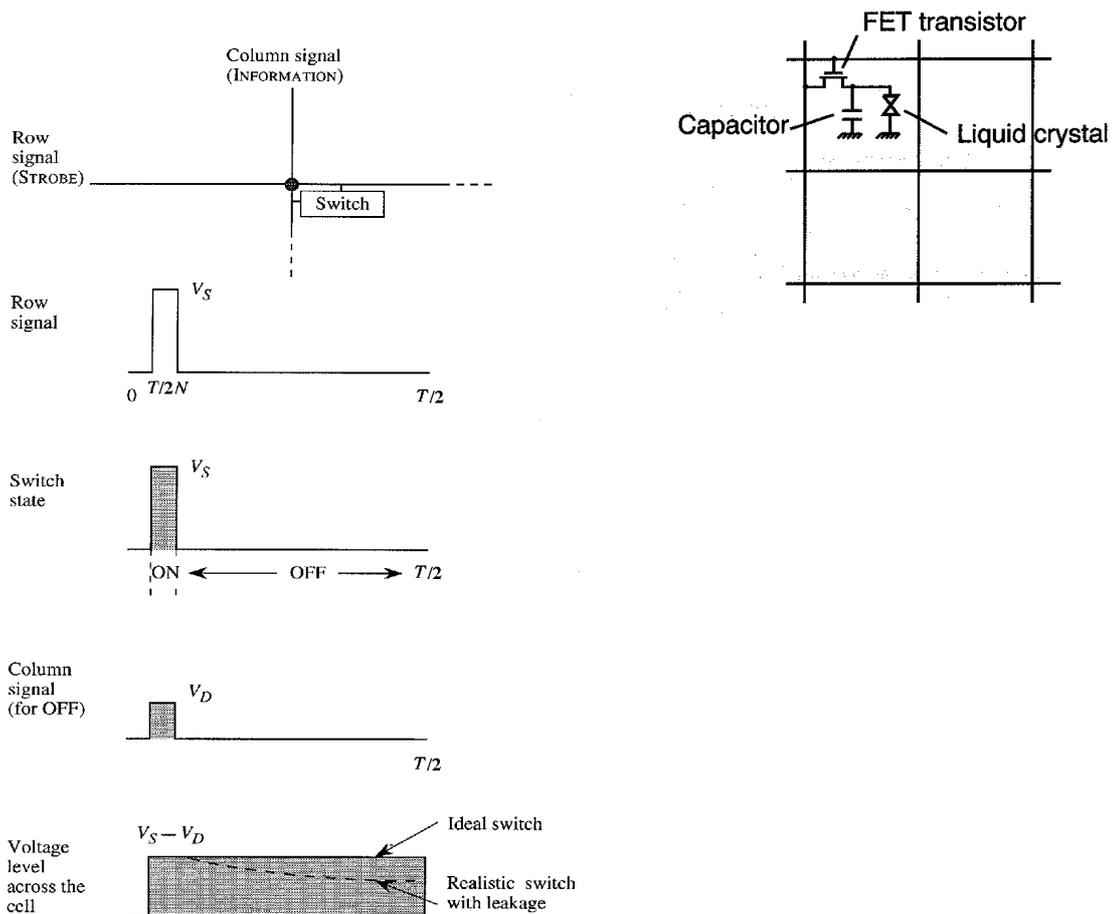


Fig. B.7.24: Tensiones aplicadas a un pixel desde su fila y columna y tensión presente en el pixel con interruptor.

B.7.4. Visualizadores de cristal líquido con matriz pasiva

En los visualizadores pasivos de cristal líquido se pasa la información a las células a través de filas y columnas de la matriz. No existen elementos no-lineales en cada célula de forma que se aplica la señal durante un pequeño intervalo del periodo de refresco, como se comentó con detalle con anterioridad.

En una matriz pasiva típica los electrodos para las filas están en una placa de la célula y los electrodos para las columnas están en la otra placa. Veamos los diferentes componentes de este sistema de visualización.

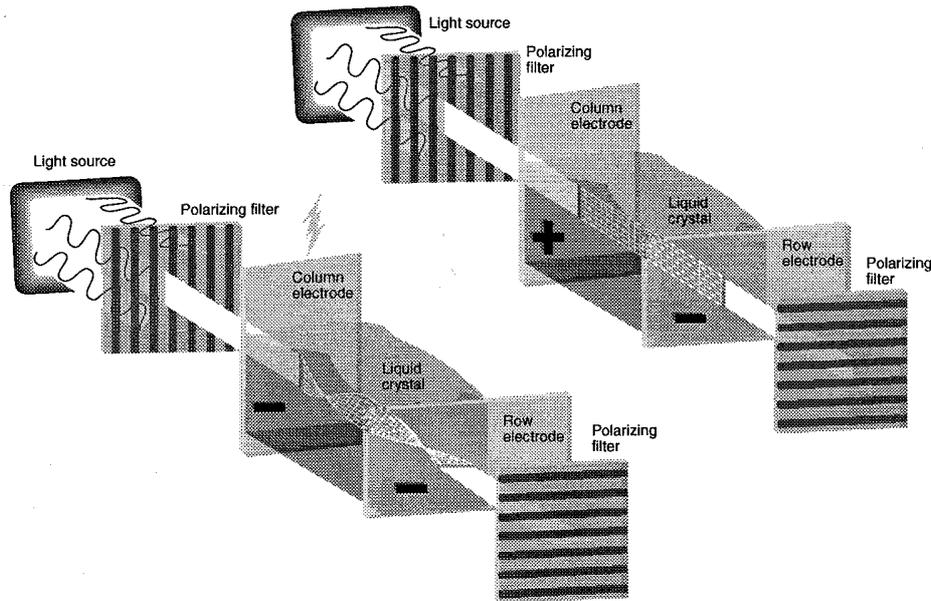


Fig. B.7.25: Visualizador pasivo de cristal líquido. En ausencia de tensión, existe un giro del cristal líquido y si se aplica tensión desaparece este giro.

Substrato de vidrio

Los substratos de vidrio utilizados para los visualizadores tienen que estar muy pulidos y limpios. Además y especialmente para los visualizadores pasivos, deben ser extremadamente planos. Esto es así porque los cristales STN tienen un gran ángulo de giro y son muy sensibles a cualquier minúscula abolladura o irregularidad en el substrato. Estas irregularidades pueden causar un "desenrollamiento" del giro. Los substratos se frotran con un tejido de terciopelo para provocar que el cristal líquido se alinee en la dirección preescogida de frotamiento.

Electrodos transparentes

Por razones obvias, los electrodos deben ser transparentes. Es una tecnología ya conocida y utilizada a menudo en detectores de semiconductor. El compuesto más utilizado es un cierto tipo de óxido basado en Indio (ITO).

Cristal líquido STN

El cristal líquido nemático supergirado (STN) se coloca entre los substratos después de que los extremos se hayan sellado con un tipo especial de epoxy (resina semiconductor). Se

usan unos minúsculas bolas espaciadoras para obtener la separación requerida entre las placas. La distancia de alineamiento suele ser de $4\mu\text{m}$ a $6\mu\text{m}$. Esta distancia es muy crítica en cristales STN y no se pueden permitir desviaciones mayores de $0,1\mu\text{m}$.

Luz de fondo

El cristal líquido no produce luz como el LED o LD, sólo modula la luz. Por tanto es necesario proporcionar una luz de fondo al visualizador. El polarizador de entrada únicamente permite que la luz polarizada a lo largo de su dirección permitida pase a través de él. El resto de la luz se pierde. La luz de fondo es una de las fuentes de consumo de potencia mayores en un visualizador de cristal líquido.

Filtros de colores

Si el visualizador debe ser en color, hay que añadir filtros de color frente a cada pixel. Se utilizan filtros rojo, verde y azul. Los tres pixels, uno para cada color, se controlan individualmente y están muy próximos uno de otro de forma que el ojo humano sólo aprecia un color. Estos tres colores básicos pueden producir cualquier color que se desee.

Los visualizadores pasivos de cristal líquido se utilizan en muchas aplicaciones. Si se utilizan cristales STN se puede aumentar el número de N a varios centenares y crear aplicaciones de monitores de ordenador de 640×480 pixels.

B.7.5. Visualizadores de cristal líquido de matriz activa (AMLCD)

Ya hemos dicho que la diferencia entre un visualizador activo y uno pasivo está en el uso de un dispositivo interruptor para cada uno de los pixels. El interruptor permite que la tensión de control aplicada a la célula de cristal líquido permanezca en bornes del cristal durante todo el tiempo de refresco. Como se comentó anteriormente, esto permite una mejora en el comportamiento de las células y el uso de cristales nemáticos girados a 90° .

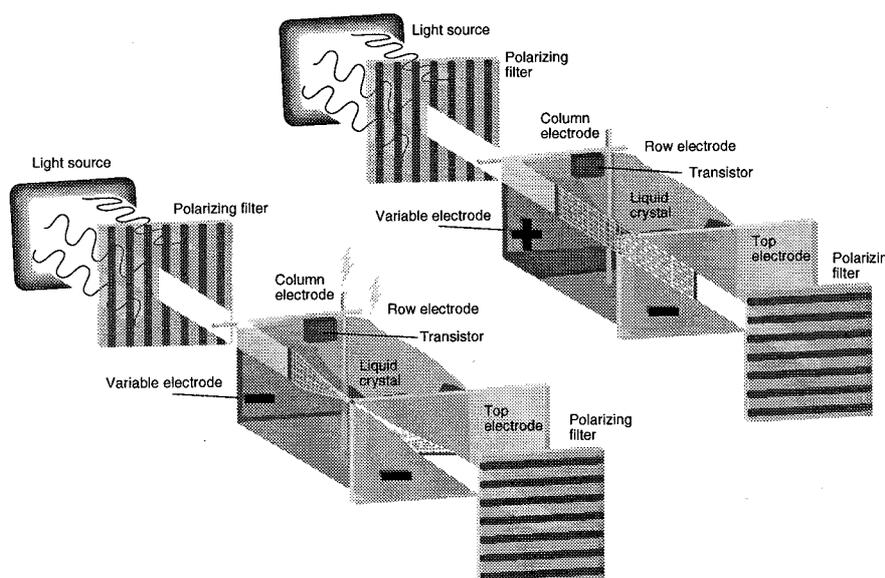


Fig. B.7.26: Esquema de una matriz de cristal líquido activa.

A diferencia de la matriz pasiva en el AMLCD las líneas de las filas y las columnas se colocan sobre el mismo sustrato lo que simplifica mucho el proceso de fabricación. El pixel va acompañado de un transistor de película fina (thin film transistor - TFT). Se aplica un pulso a la puerta del transistor de forma que éste se pone a conducir. Por la línea de datos se manda la información deseada por la columna de la matriz al drenador del transistor. El surtidor está conectado a un condensador de almacenamiento que conserva la tensión aplicada una vez desaparece la tensión aplicada a la puerta.

El TFT debe tener una resistencia muy baja cuando esté a ON y una resistencia muy alta cuando esté a OFF. Esto permite al condensador, C_S , que se cargue durante el tiempo que la señal está disponible en la línea. Además las capacidades del circuito, C_{gs} (puerta-surtidor), C_{gd} (puerta-drenador), C_{LC} (célula de cristal líquido) y $C_{parásita}$ (con las líneas adyacentes) deben ser tales que la pérdida de carga durante el tiempo de refresco sea mínima. Es evidente que el buen funcionamiento del AMLCD depende críticamente del TFT, por lo que vamos a examinar este dispositivo con más detalle.

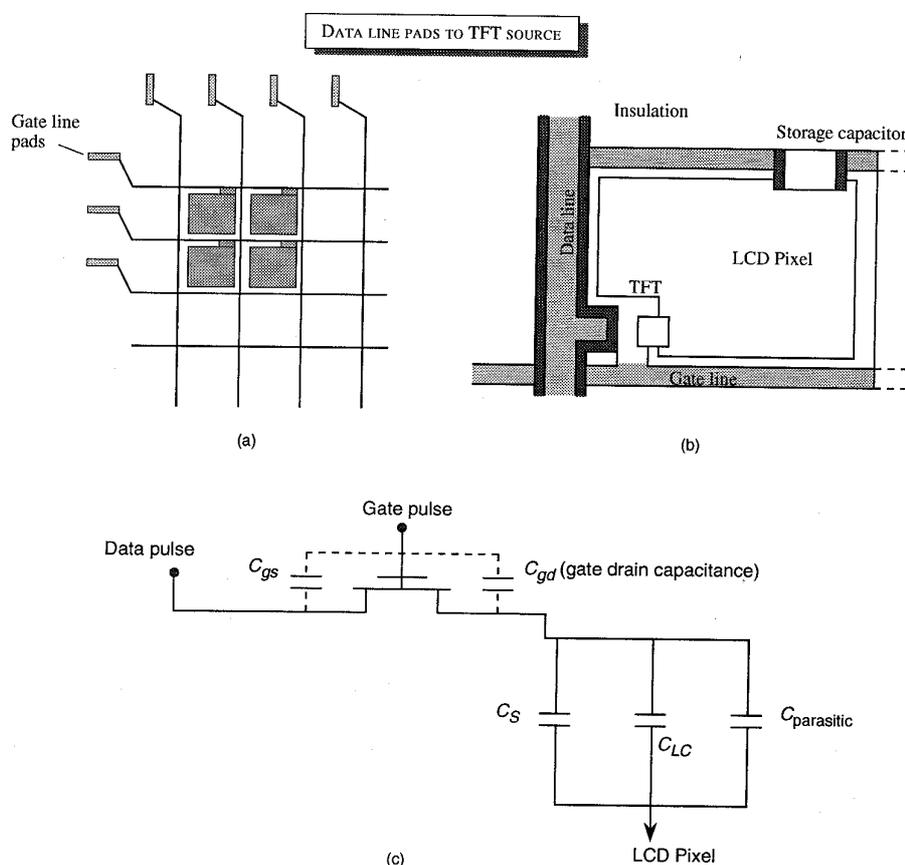


Fig. B.7.27: (a) Esquema de una matriz de pixels de AMLCD; (b) detalle de un pixel; (c) circuito equivalente del TFT y del condensador de almacenamiento de la célula.

El transistor de película fina (TFT)

El elemento fundamental en el AMLCD es el transistor de película fina (TFT). Para una pantalla en color harán falta más de un millón de TFTs por lo que la complejidad del circuito es muy alta y comparable a una DRAM. Sin embargo, en realidad la complejidad es aún mayor pues a diferencia de la DRAM, estos transistores no se fabrican sobre materiales cristalinos. Se utiliza o polisilicio o Silicio amorfo (a-Si) para fabricar el dispositivo que es un transistor de efecto de campo con puerta aislada. El Silicio policristalino tiene un mejor

comportamiento por disfrutar sus electrones de una mayor movilidad. Pero el proceso de fabricación de los dispositivos requiere altas temperaturas que resultan incompatibles con el sustrato de vidrio. Por ello se utilizan sustratos de cuarzo más caros para los FETs de polisilicio. Visualizadores de pequeño tamaño utilizan AMLCDs basados en polisilicio. Pero visualizadores de mayor tamaño utilizan sustratos de vidrio y por tanto TFTs de a-Si.

En las estructuras invertidas se deposita la puerta primero, mientras que en la estructura normal lo primero que se deposita es el semiconductor. El problema del TFT es el control de la calidad de los materiales. El uso de a-Si determina que el dispositivo no esté caracterizado por bandas si no por áreas de movilidad. La posición de estas áreas de movilidad, así como la densidad de estados "localizados" donde se encuentran los electrones esencialmente atrapados, depende del proceso de fabricación. En la actualidad la relación entre el proceso de fabricación y los valores exactos de la estructura de bandas aún se está investigando y es únicamente conocida de forma cualitativa. Como la tensión umbral del MOSFET depende de forma crítica de los defectos y estados localizados de las interfases, es todo un reto fabricar dispositivos con una tensión umbral determinada y controlable.

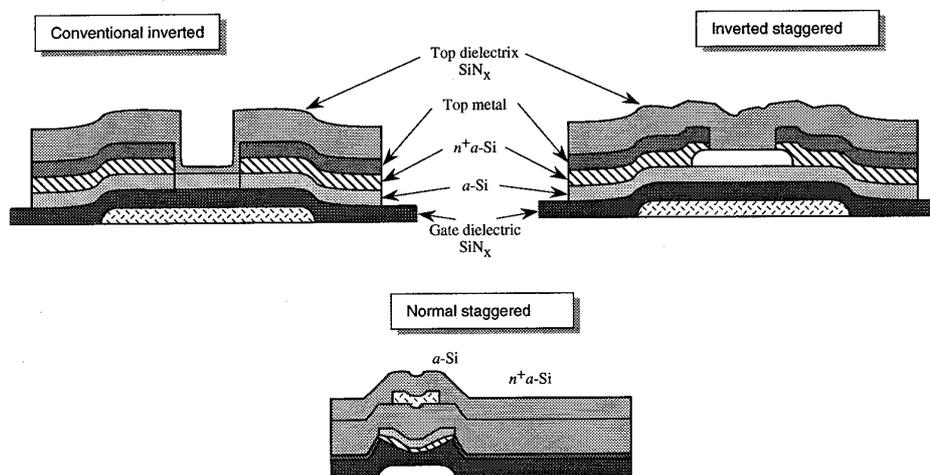


Fig. B.7.28: Esquemas de varios TFTs usados en AMLCDs.

Otro problema de los TFTs es la baja movilidad de los electrones en su canal. En el MOSFET cristalino la movilidad vale $\sim 600 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ (en silicio puro es $\sim 1100 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$) pero en a-Si TFTs sólo vale entre $1 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ y $10 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$. Además, la movilidad tiene una gran dependencia de la concentración de portadores en el canal. Debido a la baja movilidad se produce una gran caída de tensión en el canal del TFT el cual es de unas $3 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$. Por tanto no toda la tensión de la línea de datos es aplicada al condensador de almacenamiento. Esto, por supuesto, produce un mayor consumo de potencia. En la actualidad, se están llevando a cabo investigaciones con el fin de mejorar el funcionamiento del TFT.

Aunque el proceso de fabricación de MOSFETs cristalinos y TFTs es similar todavía quedan algunos temas por mejorar. Los problemas aparecen debidos a las características electrónicas tan pobres que presenta el a-Si, aunque su uso parece inevitable en pantallas de gran tamaño.

B.7.6. Retos de la tecnología de los visualizadores

La tecnología de visualizadores de cristal líquido (y otros materiales) es la clave para un futuro crecimiento del potencial de dicho mercado de visualizadores, que de acuerdo con algunos pronósticos podría ser mayor que el mercado de circuitos integrados de silicio en la primera parte del siglo 21. En un ordenador portátil el elemento más caro es la pantalla de cristal líquido, mucho más que la RAM, el procesador, los discos o el teclado y evidentemente la pantalla es un elemento indispensable. Pero todavía hay que mejorar: i) el alto consumo de energía para alimentar el visualizador, ii) transmisión de luz pobre cuando el visualizador está a ON lo que resulta en una imagen muy débil o en la necesidad de una luz de fondo muy potente, iii) ángulo de visión muy reducido y iv) limitaciones de tamaño de pantallas. Todos estos retos requieren un empuje de la investigación en nuevos materiales, así como mejoras en los dispositivos y en el proceso de fabricación.

Con estas mejoras el cristal líquido ya se está utilizando en la televisión reemplazando al venerable CRT. En la siguiente figura podemos ver un resumen de los distintos retos o áreas a mejorar para mejorar la tecnología de visualizadores.

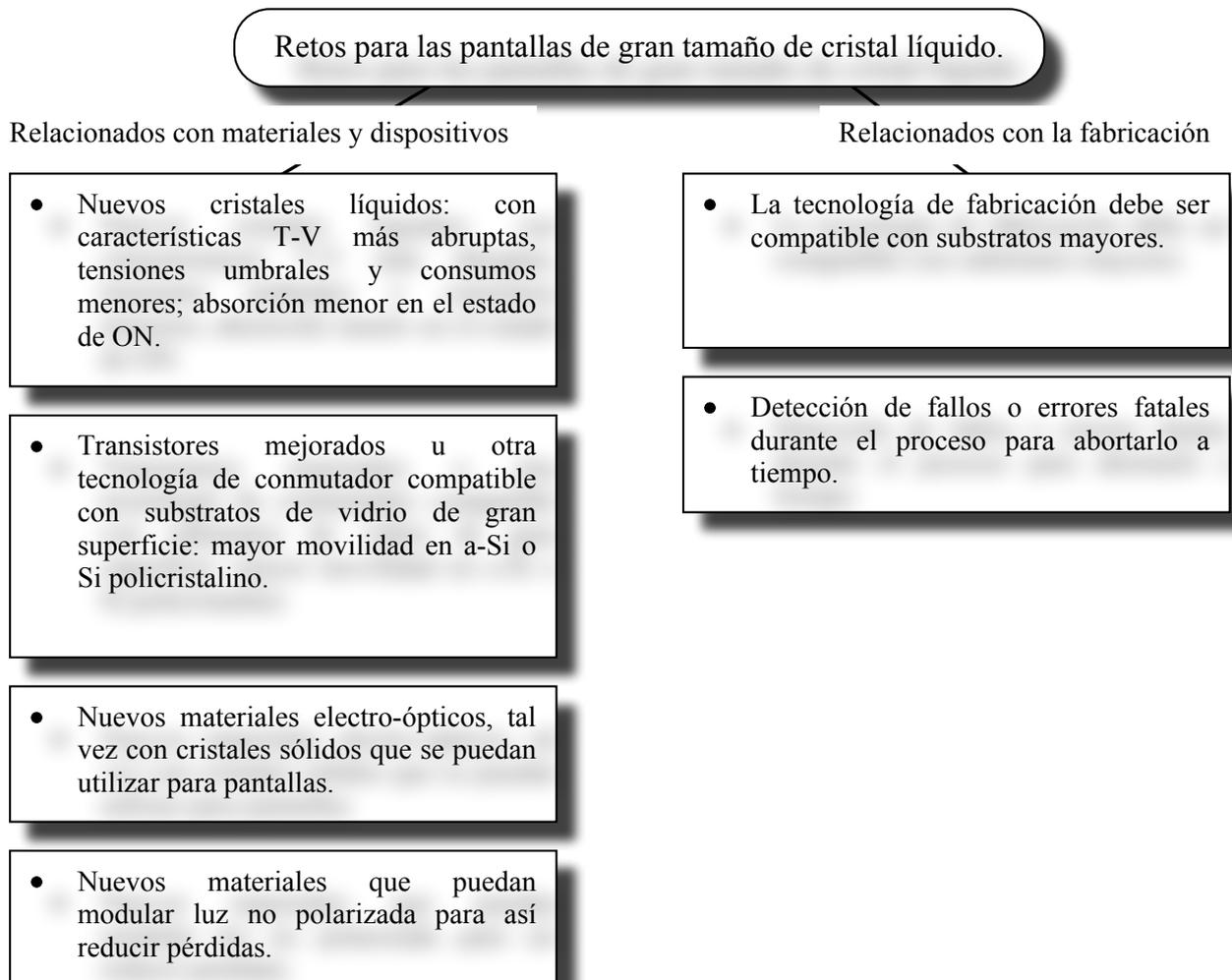


Fig. B.7.29: Retos presentes en la tecnología de visualizadores.

Vamos ahora a comentar brevemente cada uno de estos retos, los cuales caracterizaremos según si están relacionados con los materiales y los dispositivos o con el proceso de fabricación.

Retos relacionados con los materiales y los dispositivos

Las mejoras a acometer en esta área incluyen,

- *Nuevos cristales líquidos*: El comportamiento del cristal líquido es obviamente crítico para el comportamiento de todo el visualizador. Se necesitan materiales con baja tensión umbral V_{th} y una fuerte no-linealidad (Δ/V_{th} pequeña). Se están haciendo grandes esfuerzos para encontrar nuevos materiales para cristal líquido con estas propiedades y altamente estables. Además de una baja Δ/V_{th} los cristales líquidos no deberían absorber ellos mismos la luz. Esta luz absorbida es perdida, por lo que se requiere una luz de fondo más potente.

Otro aspecto importante es la resistividad del material. Para los AMLCD, las células de LCD deben tener una alta constante de tiempo RC de forma que la tensión aplicada permanezca almacenada hasta el siguiente periodo (~20ms).

- *Películas policristalinas y amorfas mejoradas*: Para mejorar el comportamiento de los TFT hay que investigar estos materiales y así poder conseguir controlar la tensión umbral y mejorar la movilidad de los electrones.
- *Nuevos materiales para los visualizadores*: Los cristales líquidos utilizados en la actualidad se deben verter entre las dos placas de vidrio. Si se pudiesen tener cristales sólidos que se evaporasen simplemente sobre el sustrato, el proceso de fabricación se simplificaría considerablemente. En la actualidad no existen materiales de este tipo que puedan competir en costes y consumo con el cristal líquido.
- *Nuevos materiales que tengan una respuesta independiente de la polarización*: La luz de fondo no está polarizada. Como el LCD depende de la selección de una polarización determinada, se desaprovecha mucha luz. Además se necesitan polarizadores tanto delante como detrás de la célula. Si se encontrasen materiales que modulasen la intensidad de la luz independientemente de la polarización de la luz, se mejoraría mucho el rendimiento de los visualizadores.

Retos relacionados con el proceso de fabricación

Los pasos en la fabricación son muy parecidos a los de cualquier circuito integrado. La diferencia radica en el tamaño del sustrato. En los chips de Si el tamaño del sustrato rara vez supera los 15cm. Pero para visualizadores podemos necesitar tamaños de más de 30cm. Si además vamos a aplicar los LCD para televisores, el tamaño será aún mayor que 50cm. Esto requiere la mejora de todas las herramientas actuales para que puedan trabajar con estos tamaños.

Además es conocido que la eficacia del proceso o porcentaje de éxito en la fabricación de sustratos cae con el tamaño de éstos. Por ejemplo, mientras una densidad de defectos de 10^{-2}cm^{-2} proporciona un porcentaje de éxito del 80% para un visualizador de 10cm, este porcentaje de éxito cae al 10% si el tamaño crece hasta 30cm. Hay por tanto que mejorar

también los métodos de test para detectar errores o defectos fatales durante el proceso de fabricación y así abandonarlo antes de acabar todo el proceso.

B.7.6.1. Visualizadores basados en emisores de luz electrónicos o fósforos.

Ya hemos visto algunos de los defectos de la tecnología de cristal líquido en su uso como visualizadores. Una de sus mayores desventajas es la falta de brillo, ya que en ningún caso se produce una emisión de luz a nivel de pixel. Por ello se están buscando en la actualidad otras alternativas basadas en emisores de luz electrónicos o fósforos.

Empleo de fósforos en la fabricación de CRTs y visualizadores de emisión de campo (FED)

Cuando se inyectan electrones y huecos en las bandas de conducción y valencia respectivamente, estos pueden recombinarse para emitir luz. La inyección puede ser debida a una señal eléctrica o a una señal óptica. La idea general de emisión luminosa después de una excitación puede ser extendida a semiconductores con impurezas (materiales inorgánicos) y a materiales orgánicos.

El proceso general de emisión de luz como consecuencia de una excitación puede ser representado por un sistema de tres niveles como el mostrado en una de las siguientes figuras.

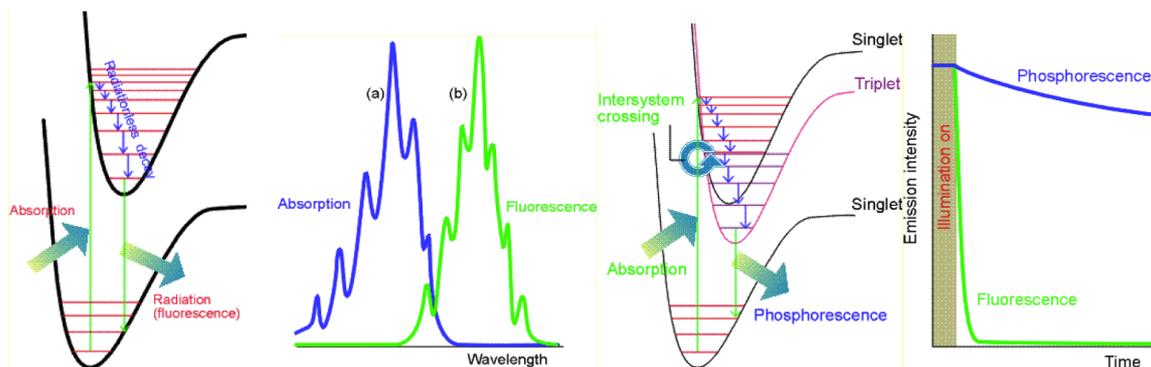


Fig. B.7.30: Características principales de fluorescencia y fosforescencia. La absorción en cualquier caso implica mayor energía que la emisión y por tanto el espectro de emisión está a una frecuencia menor que el de absorción. En la fosforescencia la pérdida de energía se produce por encontrar el sistema niveles de energía todavía menores (tripleto) desde donde se produce la emisión. En cualquier caso la fosforescencia se alarga habitualmente en el tiempo frente a la fluorescencia.

Tanto la fluorescencia como la fosforescencia se caracterizan por disponer de electrones en niveles excitados (generalmente llevados allí por absorción de fotones, habitualmente del espectro ultravioleta) que dentro del nivel excitado (singleto) pierden energía en forma de fonones, hasta que finalmente se recombinan, emitiendo de nuevo un fotón, pero de menor energía (mayor longitud de onda).

En la fosforescencia se solapan dos niveles de energía, de un singleto y de un tripleto, permitiendo una pérdida de energía todavía mayor al electrón excitado. El electrón habitualmente puede quedar atrapado un tiempo en estos estados excitados por lo que la diferencia principal entre fluorescencia y fosforescencia, a parte del proceso en sí, es la duración en el tiempo. La fosforescencia se extiende mucho más en el tiempo comparada con la fluorescencia.

Los fósforos utilizados en aplicaciones comerciales están formados bien por materiales orgánicos, bien por materiales inorgánicos. Estos últimos son los empleados en los tubos de rayos catódicos (CRT) y pantallas de TV. En la mayor parte de los fósforos inorgánicos, la longitud de onda de emisión está determinada por las impurezas introducidas en el material. Estas impurezas provocan la aparición de estados energéticos bien definidos en la banda prohibida. Cuando, debido a la excitación, se generan electrones y huecos, el portador (electrón o hueco) es atrapado en el nivel energético del defecto desde el cual se inicia el proceso de recombinación radiante. Un importante fósforo inorgánico es el basado en el semiconductor ZnS que tiene una anchura de la banda prohibida de alrededor de 3,8eV. Cuando este material es dopado con impurezas de cobre, el nivel energético intermedio generado es aprovechado para emitir luz verde, mientras que si se dopa con plata es posible generar luz azul. Estos materiales son muy empleados en tecnología de pantallas de TV, junto con otro tipo de fósforo para producir el rojo y así generar visualizadores en color. En la siguiente tabla se muestra el color de respuesta de algunos fósforos importantes utilizados en la tecnología moderna de visualizadores.

Material (Activation)	Emission Color
Zinc Sulfide (silver)	Blue
Yttrium Silicate (cerium)	Purplish blue
Zinc sulfide (copper)	Green
Zinc orthosilicate (manganese)	Yellowish green
Gadolinium oxysulfide (terbium)	Yellowish green
Zinc cadmium sulfide (silver)	Green
Yttrium oxysulfide (europium)	Red

Fig. B.7.31: Características de algunos fósforos utilizados en tecnología de visualizadores para pantallas. Las impurezas utilizadas son especificadas entre paréntesis.

El uso de fósforos ya se aplica en los propios CRT (como se ha comentado previamente), donde recubren el fondo de la pantalla. Estos visualizadores basados en fósforos prometen mayor contraste y ángulos de visión mucho mejores. Las tecnologías más avanzadas se basan en polímeros que se pueden fabricar a la medida para emitir luz. Las investigaciones siguen en busca de una matriz direccionable de pixels de polímeros emisores de luz.

El inconveniente mayor que presentan es la necesidad de excitar a los fósforos con la inyección de portadores. Para ello se requiere el empleo de una "cañón" emisora de electrones lo que hace que el sistema sea excesivamente voluminoso. En un CRT convencional, el haz de electrones es emitido desde un cátodo y después de pasar por regiones en que se focaliza o se desvía, incide sobre la pantalla de fósforo. En los CRTs se tiene o bien un único cañón de electrones (pantalla blanco y negro) o tres cañones (para color) lo cual requiere que el cátodo esté situado a determinada distancia de la pantalla. Además, el sistema debe estar contenido en un alto vacío para evitar la dispersión ("scattering") de los electrones. Esto requiere el uso de fuertes y pesadas cubiertas para la pantalla.

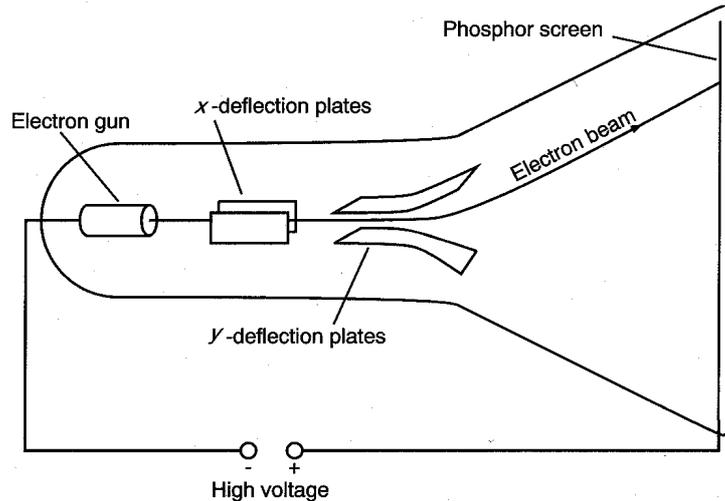


Fig. B.7.32: Diagrama esquemático del CRT.

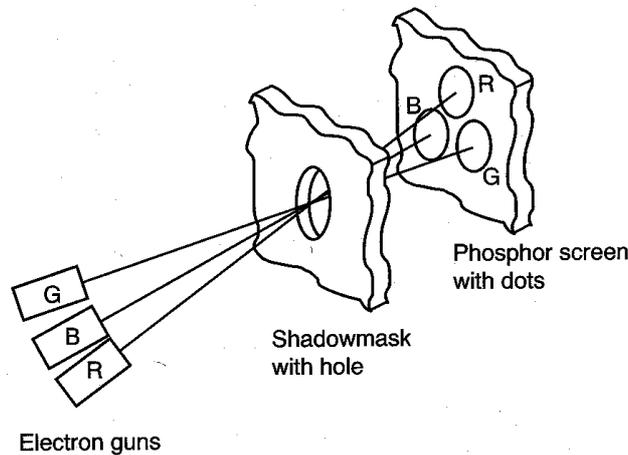


Fig. B.7.33: Color en un CRT.

Para generar una imagen en un CRT se ha de realizar una exploración o escaneo de toda la pantalla, el cual se realiza por líneas. Los CRTs convencionales tienen 625 líneas en Europa y 525 en América, aunque existen visualizadores de alta definición de 1125 líneas. La imagen sobre la pantalla debe ser renovada al menos 45 veces por segundo para evitar el parpadeo. Sin embargo, la necesidad de renovar la pantalla por completo a esa velocidad puede ser evitada utilizando un sistema de escaneo que divide la pantalla en dos mitades entrelazadas. En la primera mitad, se renuevan las líneas 1, 3, 5,... y en la segunda, las líneas 2, 4, 6,... Esto superpone de forma efectiva las imágenes de dos escaneos consecutivos, y el cerebro lo trata como si la imagen hubiese sido renovada a dos veces la velocidad a la cual lo ha sido en realidad. Esto significa que la imagen completa necesita únicamente ser renovada al menos 22 veces y media por segundo. En la práctica estas velocidades son de 25 veces por segundo en Europa y de 30 veces por segundo en América. El brillo de la pantalla puede ser controlado cambiando la cantidad de electrones incidentes. El máximo brillo está limitado por el hecho de que para alta incidencia la pantalla de fósforo puede llegar a degradarse. El fósforo también se degrada cuando la pantalla es iluminada durante largo tiempo. Estos daños pueden ser temporales o permanentes y son la razón del empleo de los "salvapantallas" que producen una imagen que se mueve constantemente o apagan la pantalla.

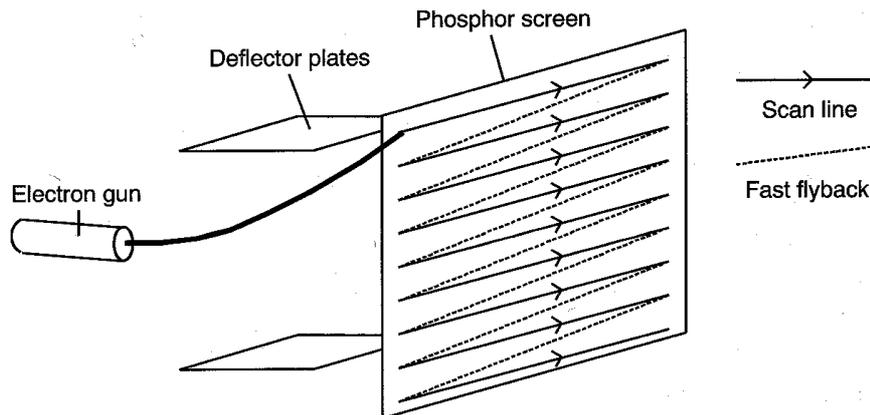


Fig. B.7.34: Creación de una imagen en un CRT.

En el **visualizador de emisión de campo (FED)**, cada pixel de fósforo tiene su propia fuente de electrones. La emisión de electrones se consigue por una tensión aplicada entre la puerta y la placa de base. Las consideraciones del circuito de alimentación son similares a las de un LCD.

La emisión de electrones se consigue a partir de la extracción de electrones del interior de un material que son llevados a un estado de libertad o de "vacío" fuera del material. Se están investigando varios tipos de puntas emisoras, desde micro puntas metálicas, de silicio y de diamante. La corriente de electrones se debe al efecto túnel de los electrones desde la punta emisora al nivel de vacío. El emisor tiene forma muy afilada para conseguir un alto rendimiento de emisión. Un gran número de puntas podría ser empleado para excitar un único pixel.

Aunque los FED parecen muy atractivos frente a los AMLCD aún hay que resolver algunos problemas como son un alto rendimiento de las puntas y una larga vida con bajo consumo energético. La fabricación de las puntas y su integración con el pixel también es algo que queda por desarrollar. La nueva generación de FED se denomina SED y ya consigue una reducción del consumo de un 33% frente a monitores de plasma y un 50% frente a monitores de CRT.

Visualizador de plasma

En la actualidad ya está comercializándose también el visualizador de plasma. En estos visualizadores se aplica una tensión entre 2 electrodos transparentes en la pantalla de vidrio delantera. Estos electrodos están separados por una capa dieléctrica de MgO y rodeados por una mezcla de gases de Neon y Xenon. Cuando la tensión aplicada alcanza el nivel de ruptura se produce una descarga de plasma en la superficie del dieléctrico lo que provoca una emisión de luz ultravioleta. Esta luz ultravioleta excita los fósforos depositados en el fondo de la celda que a su vez emiten luz visible. Cada celda tiene fósforos rojos, azules y verdes. La intensidad de la luz se consigue variando el número y la anchura de los pulsos de tensión aplicados a cada color durante un barrido. El mecanismo es PWM digital y evita la necesidad de una conversión digital-analógica. El resultado es una pantalla fina (40mm) de poco peso, alto brillo y un gran ángulo de visión ($>160^\circ$). Aunque su gran problema es su rápido agotamiento, lo que ha hecho que pierda mercado frente a las pantallas de LCD.

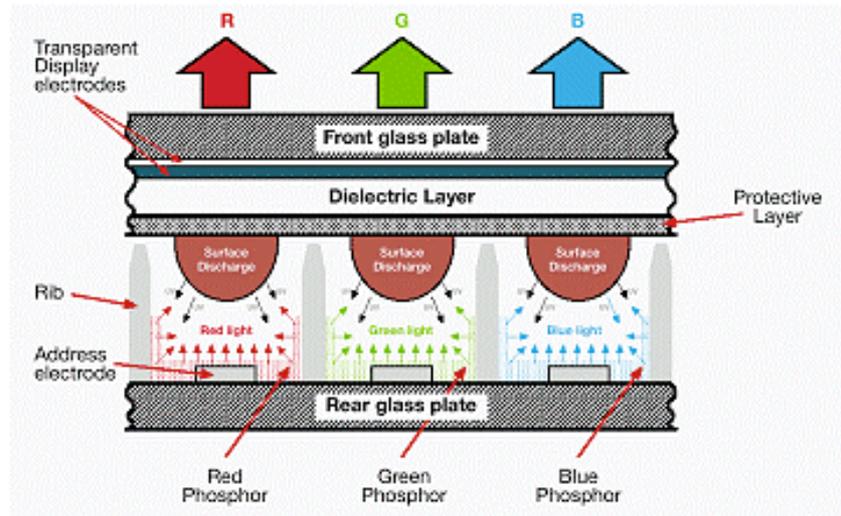


Fig. B.7.35: Celda básica de un visualizador de plasma de Fujitsu.

B.7.7. La necesidad de la modulación de la luz a alta velocidad

La célula de cristal líquido que acabamos de ver es esencialmente una válvula de luz o un modulador de luz. Sin embargo, aunque este dispositivo es muy útil en aplicaciones de visualizadores (monitores), no puede ser utilizado en aplicaciones de comunicaciones ópticas. Esto es debido a las limitaciones en el tiempo de respuesta. En aplicaciones de visión la respuesta del ojo humano es la que pone el límite a la mayor velocidad de respuesta necesaria (entre 20ms y 30ms). El cristal líquido tiene un tiempo de respuesta que varía de microsegundos a milisegundos y, por tanto, es bastante adecuado para tales aplicaciones. Sin embargo, para comunicaciones ópticas la respuesta del dispositivo debería ser tan rápida como fuese posible. La razón es que en dichas aplicaciones se necesita mandar millones de bits de información de un ordenador a otro a través de una misma línea. Además, aunque la respuesta de nuestro ojo es lenta, nosotros somos capaces de procesar información en paralelo de forma muy eficiente. De esa forma, podemos seguir una película de video con bastante facilidad aunque una hora de película pueda tener varios gigabits de datos. En comunicaciones ópticas la fibra óptica es capaz de transmitir datos a velocidades del orden de terabits por segundo. Para aprovechar plenamente este enorme ancho de banda (gran velocidad de transmisión), debemos ser capaces de desarrollar dispositivos de modulación a alta velocidad.

En los últimos capítulos hemos visto materiales que pueden detectar y generar luz pero ninguno de ellos es inteligente a la hora de procesar la información. La inteligencia aparece a partir de manipular la información, es decir, conmutar, modular y realizar operaciones matemáticas y lógicas. En el dominio de la electrónica son los flip-flops, registros y puertas lógicas (todos ellos basados en la tecnología del transistor) los que realizan estas operaciones y crean los mecanismos inteligentes como son los ordenadores.

Supongamos una señal óptica portadora de bits de datos y que viaja desde Nueva York a Tokio. Obviamente no existe una fibra óptica dedicada únicamente a tal comunicación y la señal luminosa debe pasar por varios repetidores e intercambiadores conforme va viajando. La función de los repetidores es compensar la pérdida de potencia óptica sufrida en la transmisión. En la actualidad los repetidores convierten el pulso óptico en un pulso eléctrico,

lo amplifican y luego lo reconvierten en una señal óptica ya realizada. Lo mismo hacen los intercambiadores conmutados. Por tanto todas las modificaciones de la información la realizan los mismos circuitos electrónicos que tenemos en nuestros ordenadores. Todo esto quiere decir, aunque resulte embarazoso para los defensores de un procesamiento óptico, que actualmente no existen componentes fotónicos que puedan competir con el transistor en la manipulación de datos. Sin embargo, los componentes fotónicos inteligentes están mejorando de forma rápida y están empezando a tener impacto sobre la tecnología. Aún queda bastante tiempo antes de que estos dispositivos encuentren su lugar en el interior de nuestros ordenadores, pero en un futuro cercano los veremos en sistemas de comunicación a alta velocidad.

En comunicaciones ópticas, el contenido de la información es codificado empleando dispositivos fotónicos a través de la variación de algún aspecto de la señal óptica de salida de o bien un LED o bien un diodo láser (LD). La propiedad de la luz que es modulada depende de la aplicación particular y de la tecnología disponible en cada momento, y puede ser por ejemplo la amplitud de la señal óptica, la fase de esta señal, la anchura de los pulsos enviados, etc. Independientemente de la codificación empleada, está claro que la modulación de la luz es un punto crítico en tecnología optoelectrónica. En dicho aspecto los componentes fotónicos están en desventaja frente a los electrónicos.

En los dispositivos electrónicos (MOSFET, MESFET, MODFET, BJT, HBT, etc) la señal eléctrica la modulamos fácilmente con una señal de base o de puerta, donde la base o puerta es una parte integrante del dispositivo. Las dimensiones del dispositivo son bastante pequeñas y se permiten frecuencias de modulación de hasta 20GHz en tecnologías avanzadas de silicio y de varios cientos de GHz en heteroestructuras avanzadas. Comparados con los componentes electrónicos, los componentes fotónicos tienen un tamaño mucho más grande. Ya hemos visto las limitaciones del LED en aplicaciones de alta velocidad. El diodo láser puede, en principio, superar alguno de los problemas pero aún así, sigue estando limitado a frecuencias de 20GHz a 30GHz. Además el diodo láser (LD) no tiene una simple "puerta" mediante la cual modular la señal óptica.

Existen dos esquemas para modular las señales ópticas en LEDs o LDs. La primera es la modulación directa en la que un circuito electrónico es diseñado para modular la corriente inyectada en el dispositivo. Como la luz está controlada por la corriente inyectada, podemos obtener la modulación deseada. Para tal fin se suele emplear un FET o un HBT. Debido a la diferencia en la estructura del LD y del transistor no es una tarea sencilla fabricar estos dispositivos sobre un mismo chip. Por tanto, tales circuitos se fabrican a partir de una tecnología híbrida (OEIC). En la actualidad se están llevando a cabo investigaciones que tienen como propósito la integración en un mismo sustrato de transistor y fuente luminosa y desarrollar de esa forma la tecnología OEIC.

La modulación directa del diodo láser es simple lo que la hace muy atractiva. Sin embargo, hay que tener en cuenta que tal simplicidad sólo existe si se compara con otras formas de modulación de dispositivos ópticos. Si se compara con dispositivos electrónicos, la modulación no es tan simple ni tan fácil de implementar. Los problemas de la modulación directa incluyen las frecuencias superiores de modulación que no pueden superar los 40GHz y el desplazamiento en la frecuencia de emisión.

Modulación directa	Modulación externa
+ Circuito relativamente simple y compacto.	- Circuito "grande" para estándares microelectrónicos.
	- Disposición de elementos complicada.
	- Difícil de ajustar.
- La velocidad del dispositivo se controla por procesos internos del láser; e.d. recombinación e-h, longitud de la cavidad.	+ Las velocidades del dispositivo son bastante rápidas y se controlan mediante las propiedades del modulador.
- La frecuencia de emisión se puede alterar con la corriente de funcionamiento.	+ Frecuencia de emisión inalterada
- Aunque se puede alterar fácilmente la intensidad de salida, no es tan fácil de modular la fase, la amplitud o la frecuencia.	+ La fase se puede alterar

Fig. B.7.36: Ventajas y desventajas de la modulación interna o externa de diodos láser.

El otro esquema de modulación de un diodo láser (LD) es la modulación externa. Ésta ofrece otras ventajas y desventajas. La desventaja más importante es que el modulador es grande comparado con otros dispositivos electrónicos y normalmente no es una parte de un circuito integrado sencillo. También su fabricación se hace con materiales no compatibles con la tecnología de semiconductores. Aunque recientemente se están empezando a utilizar sistemas basados en pozos cuánticos en cuya composición intervienen los mismos semiconductores que se utilizan en diodos láser.

En la modulación externa la luz de salida pasa a través de un material cuyas propiedades ópticas pueden ser modificadas por medios externos. Dependiendo de los medios empleados, podemos tener moduladores electro-ópticos, acusto-ópticos o magneto-ópticos. El efecto electro-óptico es el más utilizado en aplicaciones de alta velocidad y es el más compatible con la electrónica moderna.

B.7.7.1. Características de los moduladores

El modulador óptico es un dispositivo que utilizamos para codificar información en una señal óptica alterando su amplitud, fase o intensidad. Dependiendo de la aplicación, los moduladores se deben caracterizar según varios aspectos importantes para poder seleccionarlos. Básicamente son: el rendimiento de modulación, ancho de banda de la modulación, pérdidas de inserción, consumo y aislamiento entre canales.

- *Rendimiento de modulación:* Para definir el rendimiento de modulación, η , debemos conocer el tipo de modulación a utilizar. Para la modulación de intensidad donde la intensidad varía entre su valor máximo, I_{max} , y mínimo, I_{min} , el rendimiento vale,

$$\eta = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}} \quad (B.7.24)$$

La profundidad de modulación se define en decibelios como,

$$\text{contraste} = 10 \log \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (\text{B.7.25})$$

Si el modulador se utiliza para modulación de fase, el rendimiento vale como se comentó en el tema dedicado a la propagación de la luz en un medio,

$$\eta = \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (\text{B.7.26})$$

donde ϕ es el valor extremo del cambio de fase producido debido a la modulación.

- *Ancho de banda de la modulación:* Como con otros dispositivos electrónicos u optoelectrónicos, cuando aumenta la frecuencia de funcionamiento, el rendimiento de modulación cae. La frecuencia a la cual el rendimiento de modulación cae 3dB con respecto a su valor a baja frecuencia se llama el ancho de banda de la modulación. El ancho de banda puede estar limitado por elementos parásitos (constantes de tiempo RC) o constantes de tiempo intrínsecas (por ejemplo, tiempo de tránsito de portadores) del dispositivo.
- *Pérdidas de inserción:* Cuando se acopla una señal óptica a un modulador habrá pérdidas de potencia. Si P_{out} es la potencia de salida de un sistema óptico cuando no hay modulador y P_{in} es la potencia transmitida por el sistema con el modulador y ajustado para máxima transmitancia, las pérdidas de inserción serán,

$$\text{Pérdidas}(dB) = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (\text{B.7.27})$$

Las pérdidas de inserción aparecen por la dispersión, reflexión y absorción que aparecen al colocar el modulador.

- *Consumo de potencia:* El consumo de potencia, como su nombre indica, es el consumo de potencia durante el proceso de modulación. Se define mediante la potencia por unidad de ancho de banda necesaria para la modulación de intensidad.
- *Aislamiento:* En muchos casos el modulador tiene varios canales. Se puede utilizar el modulador para transmitir una señal óptica desde una entrada a N salidas diferentes. El aislamiento describe la intensidad óptica que aparece en el canal de entrada j cuando es enviada una señal a través del canal i,

$$\text{Aislamiento}(dB) = 10 \log \frac{I_i}{I_j} \quad (\text{B.7.28})$$

En la mayoría de los sistemas ópticos se requiere un aislamiento de más de 40dB.

Después de definir estas características de todos los moduladores, veamos ahora algunos moduladores y sus principios físicos de funcionamiento.

B.7.8. Moduladores electro-ópticos

Un modulador electro-óptico puede modular la amplitud, la frecuencia o la fase de una señal óptica a partir del efecto electro-óptico, en el que modificamos las características ópticas de un cristal a partir de un campo eléctrico. Existen muchos cristales que poseen estas propiedades. Entre ellos el fosfato de dihidrógeno potasio (KDP), perosquitas ferroeléctricas como el LiNbO_3 y LiTaO_3 y semiconductores como el GaAs y CdTe.

En general el índice de refracción de un cristal no es isótropo y se describe por su elipsoide de índices. La ecuación del elipsoide de índices a lo largo de sus ejes principales x_i , es

$$\sum_{i=1}^3 \frac{x_i^2}{n_{ri}^2} \tag{B.7.29}$$

donde n_{ri} son los índices de refracción principales.

Cuando se aplica un campo eléctrico a lo largo de una dirección particular, los índices de refracción se ven afectados. Sin embargo, debido a la anisotropía del cristal, los distintos índices se ven afectados de forma diferente. En cristales uniáxicos, hay dos ejes, x_1 y x_2 , a lo largo de los cuales el índice de refracción es el mismo, es decir n_{ro} , y uno a lo largo del cual el índice de refracción vale n_{re} . Estos son los índices de refracción ordinario y extraordinario respectivamente.

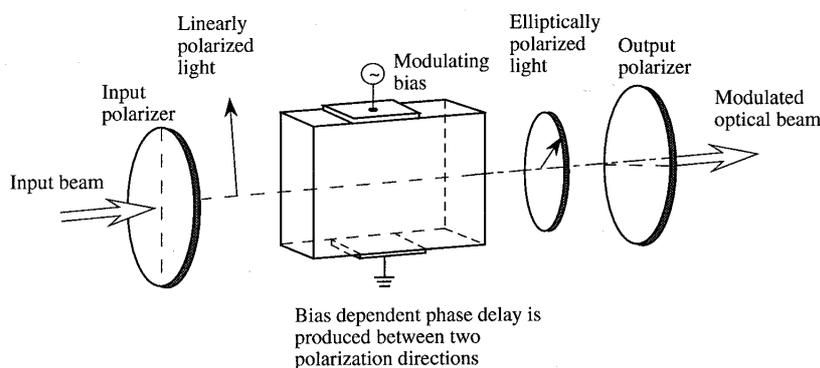


Fig. B.7.37: Uso de un dispositivo electro-óptico para modular una señal óptica. La tensión aplicada introduce un desfase entre las dos componentes de diferente polarización de la luz y así la luz emergente estará modulada.

Cuando una luz linealmente polarizada entra en el modulador se descompone en dos componentes. En general ambas direcciones tienen un índice de refracción diferente y aparece un desfase ϕ entre ambas componentes cuando se han propagado un tramo L . Consideremos una señal de entrada linealmente polarizada que vendrá dada por,

$$E_x = \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{i\omega t} \tag{B.7.30}$$

$$E_y = \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{i\omega t} \tag{B.7.31}$$

Después de pasar por el modulador la onda emergerá con una polarización general dada por,

$$E_x = \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{i(\omega t + \theta_1)} \quad (\text{B.7.32})$$

$$E_y = \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{i(\omega t + \theta_2)} \quad (\text{B.7.33})$$

La diferencia de fase viene dada por $\phi = \theta_2 - \theta_1$. Si ϕ vale $\pi/2$, el rayo emergente estará polarizado circularmente y si ϕ vale π , polarizado linealmente y girado 90° con respecto al rayo de entrada. Si el rayo de salida pasa por un polarizador de 90° con respecto al polarizador de la entrada, la relación de intensidades es,

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (\text{B.7.34})$$

Por tanto si podemos controlar ϕ mediante un campo eléctrico, podremos modular la intensidad. Para GaAs la fase dependiente del campo eléctrico vale,

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \cdot n_{ro}^3 \cdot r_{41} \cdot \frac{V}{d} \quad (\text{B.7.35})$$

donde λ es la longitud de onda de la luz, L es la longitud del dispositivo, n_{ro} el índice de refracción ordinario del GaAs, r_{41} el coeficiente electro-óptico para el GaAs, V la tensión transversal aplicada y d el grosor del modulador.

Un análisis similar para materiales del tipo KDP muestra que el desfase entre ambas componentes de la onda a la salida es,

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot L \cdot n_{ro}^3 \cdot r_{63} \cdot E \quad (\text{B.7.36})$$

donde r_{63} es el coeficiente electro-óptico de KDP y E el campo eléctrico aplicado (V/d). Si se utilizan polarizadores cruzados, la máxima transmitancia se da cuando el cambio de fase son 180° ya que $\sin^2(\phi/2)=1$.

Material	λ (μm)	r_{ij} (10^{-12} m/V)
GaAs	0,8 - 1,0	$r_{41} = 1,2$
Cuarzo	0,6	$r_{11} = -0,47$ $r_{41} = -0,2$
LiNbO ₃	0,5	$r_{13} = -9,0$; $r_{22} = 6,6$ $r_{42} = -30$
KDP	0,5	$r_{41} = 8,6$; $r_{63} = 9,5$

Fig. B.7.38: Coeficientes electro-ópticos de algunos materiales.

Debe tenerse en cuenta que el campo eléctrico se puede aplicar de forma transversal o longitudinal al modulador. Cuando se aplica un campo transversal, el efecto es llamado efecto Kerr. Por otra parte, cuando el campo aplicado es longitudinal el efecto es llamado efecto Pockel.

De las expresiones vistas parece claro que si tenemos un material con un gran coeficiente electro-óptico podremos conseguir una modulación grande con un componente más corto para el mismo campo eléctrico aplicado. Aunque los coeficientes electro-ópticos de la mayoría de los materiales son bastante pequeños ($\sim 10^{-12}$ m/V) de forma que para valores de polarización reales se necesitan longitudes muy grandes (de milímetros o más).

Estos tamaños tan grandes hacen estos moduladores incompatibles con los ordenes de magnitud manejados en la microelectrónica actual. Algunas mejoras se están consiguiendo con estructuras basadas en pozos cuánticos.

Materiales electro-ópticos y grabación de imágenes

El efecto electro-óptico que acabamos de describir no sólo es útil para moduladores, si no que además sirve para grabar imágenes ópticamente. Los materiales ferroeléctricos que tienen un efecto electro-óptico acentuado se utilizan para grabar imágenes, obtener contraste de imágenes, etc. El material más utilizado para estas aplicaciones es el PLZT policristalino cerámico. Al ser policristalino este material se puede fabricar en grandes dimensiones y a bajo coste.

Ya vimos que los materiales ferroeléctricos tienen una polarización espontánea o dipolo eléctrico diferente de cero. Cuando les aplicamos un campo eléctrico su dipolo eléctrico o polarización cambia al modificarse la orientación de las moléculas. En particular si aplicamos un campo eléctrico llamado campo eléctrico coercitivo podemos anular su polarización. El campo coercitivo necesario puede ser alterado si se crea un campo interno mediante portadores fotogenerados. Este es el principio para la grabación de imágenes ópticas.

El dispositivo fotoferroeléctrico para crear imágenes (PFE) consiste en una fina capa (0,1mm a 0,3mm) de PLZT cerámico con electrodos transparentes aplicados a sus caras mayores. Se ilumina con la imagen a almacenar una de las caras del material con luz del ultravioleta cercano y a la vez se le aplica una tensión al dispositivo. Cuando iluminamos el material fotosensible PLZT se produce una fotogeneración de portadores con una concentración local proporcional a la intensidad local de la imagen con la que iluminamos. Los portadores (electrones y huecos) se separan debido al campo eléctrico y quedan atrapados en defectos del material. Entonces, un campo eléctrico local se superpone al externo cambiando el campo coercitivo y, por tanto, la polarización local del material. Esto da lugar a variaciones locales de las tensiones mecánicas internas en la placa PLZT. La imagen es por tanto grabada sobre la placa y puede ser vista a través de un dispositivo de proyección.

Por medio de técnicas de fabricación avanzadas se pueden conseguir cerámicas de PLZT cuyo tamaño de grano es del orden de $2\mu\text{m}$. Estas placas pueden almacenar imágenes con resoluciones de hasta 100 líneas por centímetro. Las imágenes se pueden borrar iluminando la placa uniformemente con luz del ultravioleta cercano y aplicando a la vez un pulso de tensión para llevar la polarización ferroeléctrica a su estado remanente inicial.

B.7.9. Moduladores interferométricos

Acabamos de ver como el cambio de fase producido por el efecto electro-óptico se puede utilizar para modular señales. A parte de la configuración que hemos visto podemos

utilizar otras que no necesitan polarizadores y modulan la señal por medio de efectos interferométricos.

B.7.9.1. Moduladores de Fabry-Perot

El modulador de Fabry-Perot (llamado también el etalón) consiste en dos espejos semi transparentes que encierran un material electro-óptico. Si n_r es el índice refracción del material electro-óptico y L su longitud, la transmisión a través del etalón es máxima (λ_0 es la longitud de onda en el vacío y q un entero) cuando,

$$L = q \cdot \frac{\lambda_0}{2n_r} \tag{B.7.37}$$

El coeficiente de transmisión de un etalón con una reflectividad R en sus espejos vale,

$$T = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \cdot \sin^2\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_r \cdot L}{\lambda_0}\right)} \tag{B.7.38}$$

De esta expresión se deduce que la selectividad del etalón aumenta con R , como se muestra en la siguiente figura. En esta figura se muestra la variación del coeficiente de transmisión en función del cambio que experimenta la fase de la onda en una vuelta completa, es decir $2 \cdot \pi \cdot n_r \cdot L / \lambda_0$. Como vemos tenemos picos de transmisión para desfases de 0° , 180° y 360° .

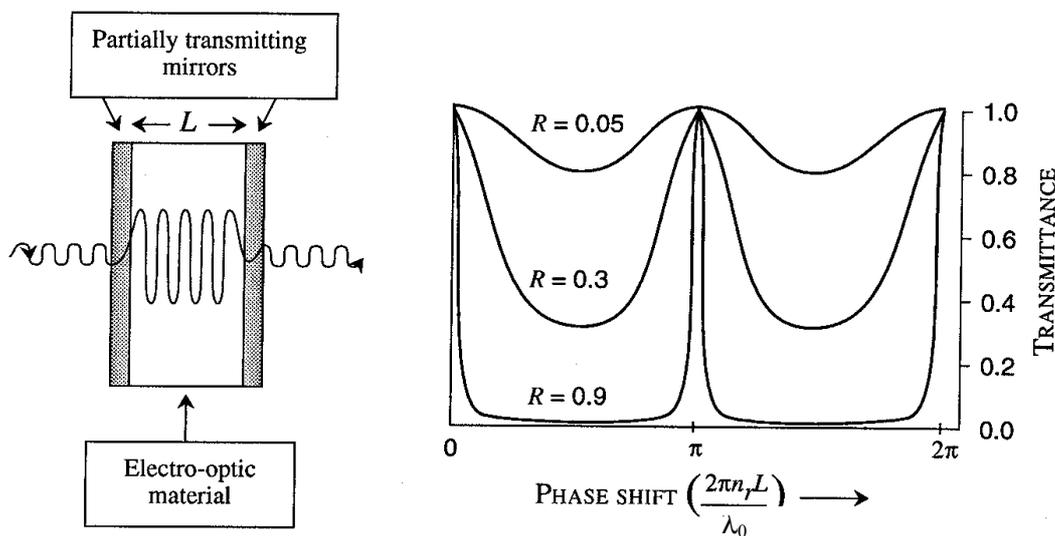


Fig. B.7.39: Modulador de Fabry-Perot. En algunas estructuras construidas por crecimiento epitaxial las superficies parcialmente reflectantes son reflectores distribuidos de Bragg. También se muestra el coeficiente de transmisión de la cavidad de Fabry-Perot en función del cambio de fase. R es la reflectividad del espejo.

El principio de funcionamiento del modulador de Fabry-Perot es la variación de n_r con un campo eléctrico. Esto modificará el cambio de fase y finalmente variará la transmisión de la señal óptica. Lo que se busca es que el dispositivo varíe su transmitancia entre T_{\max} y T_{\min} por medio de un campo eléctrico.

La diferencia en frecuencia entre dos máximos sucesivos en la transmisión de la estructura de Fabry-Perot se llama el rango de espectro libre, FSR, y vale,

$$FSR = \frac{c}{2n_r L} \tag{B.7.39}$$

Un parámetro importante del etalón es la precisión (F) que da la relación entre el FSR y la anchura máxima de cualquier pico de transmisión medida a la mitad del máximo. Su valor es,

$$F = \frac{\pi \cdot \sqrt[4]{R_1 R_2}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}} \tag{B.7.40}$$

donde R_1 y R_2 son los coeficientes de reflexión de los espejos delantero y trasero del etalón. Estos moduladores han llegado a modular señales de hasta 10GHz con relaciones de contraste de hasta 10dB.

B.7.9.2. Moduladores de Mach-Zender

La modulación de fase por efecto electro-óptico se puede utilizar para modular la intensidad en un interferómetro de Mach-Zender. El principio consiste en dividir una señal proveniente de una guía de onda monomodo en dos, con una relación 50:50. Esta división se consigue con un acoplador en Y o divisor que, por razones obvias, es llamado acoplador de 3dB (la potencia óptica en cada rama es la mitad de la de la inicial). Los dos rayos resultantes viajarán por guías diferentes (en general de diferente longitud) para luego volverse a unir para producir la salida.

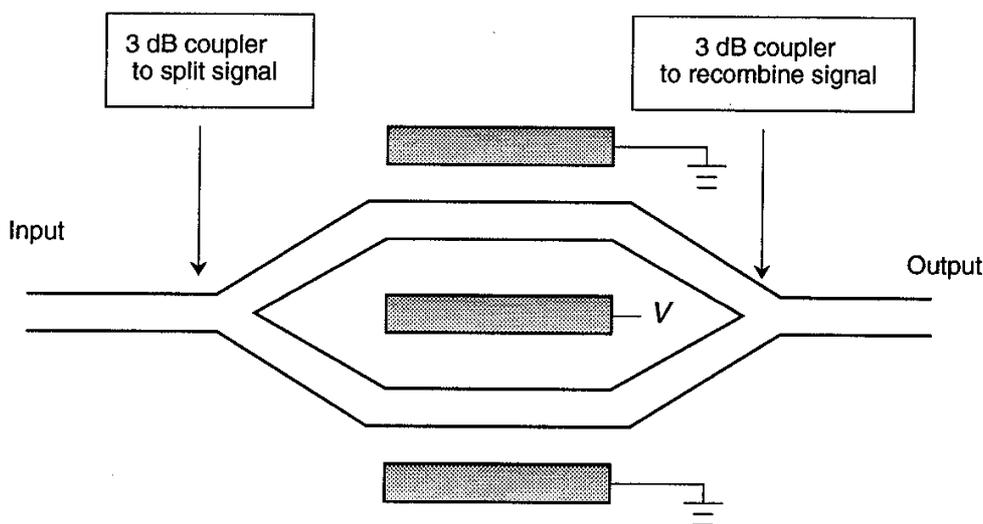


Fig. B.7.40: Interferómetro de Mach-Zender usado como modulador. Se utilizan dos acopladores de 3dB para separar y unir luego la señal entrante.

Si los caminos ópticos de ambos trazados son múltiplos enteros de la longitud de onda, las dos ondas llegarán al segundo acoplador de 3dB en fase e interferirán constructivamente produciendo una alta intensidad óptica. Si se utiliza un campo eléctrico para crear una

diferencia de fase entre ambas ondas se podrá reducir la intensidad de la onda. Si la diferencia de fase total entre las dos ondas viajando por los dos caminos diferentes es 180° la intensidad resultante será mínima.

Debido a las pérdidas de señal óptica debidas a los acopladores, los moduladores de Mach-Zender sufren de rendimientos bastante bajos.

B.7.10. El acoplador direccional

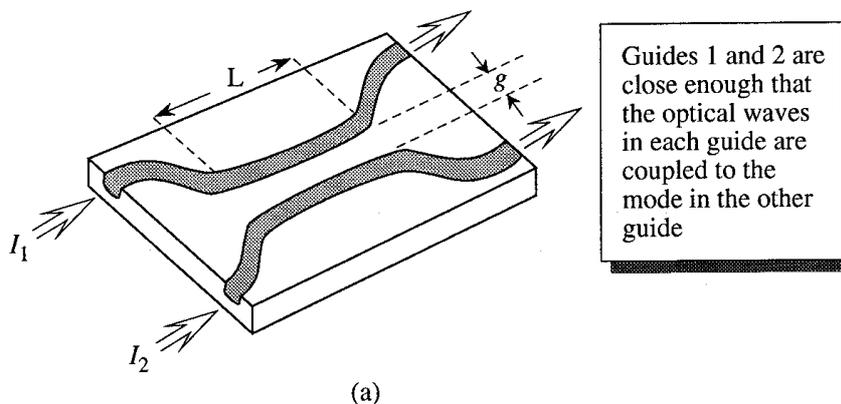
En la sección anterior hemos visto como el efecto electro-óptico se puede utilizar para modular una señal óptica. Alterando el índice de refracción del material podemos introducir una modulación de fase, una modulación de la polarización o, a través de interferencias de dos rayos, una modulación de la intensidad. El mismo concepto se puede aplicar para aplicaciones de conmutación. Uno de los conmutadores más importantes es el acoplador direccional. Su funcionamiento ya lo hemos visto en temas anteriores y aquí nos vamos a restringir a explicar su uso como modulador o conmutador de luz.

El acoplador direccional en su constitución básica acopla dos señales ópticas de entrada I_1 e I_2 a dos salidas O_1 y O_2 . El dispositivo debe ser capaz de conectar una señal entrante a una de las dos salidas, O_1 u O_2 . Este dispositivo es muy importante en comunicaciones ópticas, ya que permite direccionar señales.

Ya vimos que su funcionamiento se basa en que la potencia de la señal pasa de una guía a otra conforme va avanzando. La transferencia completa de potencia se dará cuando la señal se haya propagado una distancia,

$$L = \frac{\pi}{2K} \tag{B.7.41}$$

donde K es el coeficiente de acoplamiento debido al solape en los modos de ambas guías.



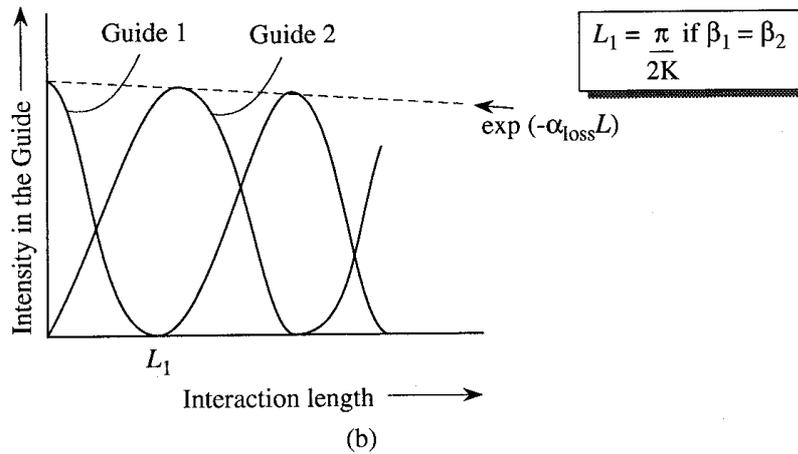


Fig. B.7.41: (a) Acoplador direccional donde dos guías están separadas por un gap g a lo largo de una distancia L . (b) Transferencia de energía óptica de una guía a otra cuando la señal entra inicialmente por la guía 1.

Si las guías no están en fase ($\beta_1 \neq \beta_2$), no toda la luz se acoplará de una guía a otra. Si escribimos,

$$2\Delta = |\beta_1 - \beta_2| \neq 0 \tag{B.7.42}$$

Se puede demostrar que si $A_1(0)=1$, $A_2(0)=0$ donde A_1 y A_2 son los campos en ambas guías (la señal entra inicialmente por la guía 1), se obtiene,

$$\frac{P_2(z)}{P_1(0)} = \frac{K^2}{K^2 + \Delta^2} \sin^2 \left(\sqrt{K^2 + \Delta^2} z \right) \tag{B.7.43}$$

Si $\Delta^2 \gg K^2$, no habrá acoplamiento de luz.

El funcionamiento del acoplador direccional se basará en variar Δ con un campo eléctrico. Para el caso de que $\Delta = 0$, la longitud a partir de la que se produce la primera transferencia de energía es,

$$L_1 = \frac{\pi}{2K} \tag{B.7.44}$$

Si aplicamos una tensión para que varíe Δ a Δ_{sw} de forma que se cumpla,

$$\sqrt{K^2 + \Delta_{sw}^2} \cdot L_1 = \pi \tag{B.7.45}$$

entonces no habrá luz que emerja por la guía 2 y la luz re-emergerá por la guía 1 como se muestra en la siguiente figura (a).

La conmutación se controla a través del coeficiente de acoplamiento K , la intensidad o fuerza que tenga el efecto electro-óptico y la tensión de polarización aplicada (dependencia que aparece a través de Δ). Para que la tensión a aplicar sea pequeña, el material debe tener un efecto electro-óptico grande. El coeficiente de acoplamiento depende exponencialmente de la

separación g de ambas guías de onda, ya que el acoplamiento se debe a las ondas evanescentes en cada guía.

Para que la tensión aplicada sea baja se suele aplicar una configuración tipo "push-pull" para los electrodos como se muestra en (b). El desplazamiento total Δ es entonces el doble y viene dado por,

$$\Delta = \frac{\pi \cdot n_{ro}^3 \cdot r_{eff} \cdot (2 \cdot E_y)}{2 \cdot \lambda} \quad (B.7.46)$$

donde r_{eff} es el coeficiente electro-óptico efectivo. Para GaAs el valor utilizado es r_{41} . El factor $2E_y$ es debido a la configuración "push-pull" de los electrodos.

Para acopladores direccionales de materiales como LiNbO₃, GaAs, LiTaO₃, etc; el tamaño del dispositivo es bastante grande, ya que el efecto electro-óptico no es tan grande. Normalmente los dispositivos requieren una longitud de interacción de alrededor de 1cm y una tensión de 5V a 10V. El uso de pozos cuánticos está permitiendo estructuras de menor tamaño debido al efecto electro-óptico mejorado relacionado con las características excitónicas que veremos en un apartado posterior.

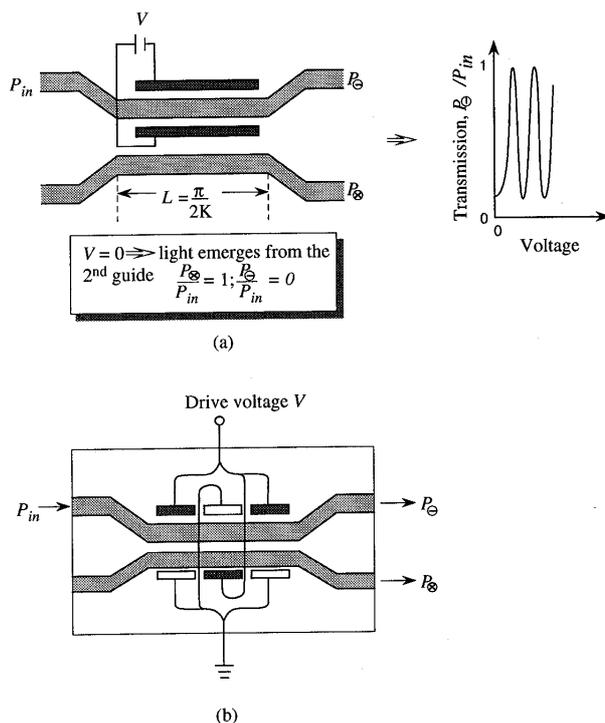


Fig. B.7.42: (a) Acoplador direccional de longitud tal que la transferencia completa se produce en ausencia de tensión aplicada. Si varía la tensión aplicada se puede modificar el acoplo de luz. (b) Electrodo en "push-pull" en un acoplador direccional para doblar el desfase entre las guías.

B.7.11. Dispositivos avanzados de modulación y conmutación

En la anterior sección hemos visto como el coeficiente electro-óptico en la mayor parte de los materiales es bastante pequeño, por lo que o bien los dispositivos son bastante grandes o bien se requieren altas tensiones. El uso de estructuras basadas en pozos cuánticos

está permitiendo mejorar esta situación. Los pozos cuánticos se consiguen a partir de colocar una estructura de banda prohibida estrecha entre dos de banda prohibida ancha.

B.7.11.1. Motivaciones de los pozos cuánticos

Con la fabricación de los primeros pozos cuánticos a mitad de los años 70 se llevó a cabo la fabricación y el estudio de gran cantidad de nuevos dispositivos. Muchos de los conceptos estudiados han tenido utilidad en la implementación de dispositivos electrónicos y optoelectrónicos. Vamos a examinar las motivaciones que llevan al empleo de estructuras basadas en pozos cuánticos en el área de moduladores ópticos.

Modificación de la densidad de estados

Sabemos que la densidad de estados en un sistema 2D (pozo cuántico) tiene un comportamiento como la función escalón. Dentro de las bandas de conducción y de valencia existen unas subbandas con densidades de estados tipo variando en forma escalonada. Esto contrasta con la densidad de estados 3D que crece monótonamente en los límites de sus bandas. Como los procesos ópticos como por ejemplo la absorción dependen de la densidad de estados, estos procesos se modifican en los pozos cuánticos.

Efectos del excitón

Para explicar la absorción vimos que el fotón es absorbido generando un par electrón-hueco. El caso es que electrón y hueco son partículas de carga opuesta, por lo que una pregunta que uno puede hacerse es si la atracción eléctrica entre ellos puede llegar a alterar el proceso de absorción óptica. En realidad esa atracción juega un papel importante en interacciones luz-semiconductor. Para hacernos una idea de las implicaciones de esta interacción electrón-hueco vamos a ver lo que sucede en un átomo. En este hay una interacción electrón-protón que conduce a unos niveles energéticos posibles para el electrón (conocidos por los símbolos 1s, 2s, 2p, etc.). En la absorción óptica estos niveles dan lugar a la presencia de picos en la representación de la absorción en función de la energía.

Un fenómeno similar ocurre con los pares electrón-hueco. Estos pares electrón-hueco atraídos por su interacción de tipo eléctrico son llamados excitones. Estos excitones causan picos en el espectro de absorción como se muestra esquemáticamente en la siguiente figura. En pozos cuánticos, la intensidad de estos picos es mucho mayor que en materiales de mayores dimensiones, debido al fuerte solape entre las funciones de onda de electrón y hueco.

Modificación de las propiedades ópticas por campos aplicados

Otra importante característica de las estructuras de pozo cuántico es que en presencia de un campo eléctrico, las propiedades ópticas (coeficiente de absorción, índice de refracción) del material pueden variar mucho, como se muestra en la siguiente figura. Este gran cambio que experimenta el coeficiente de absorción puede ser utilizado para la modulación de la luz.

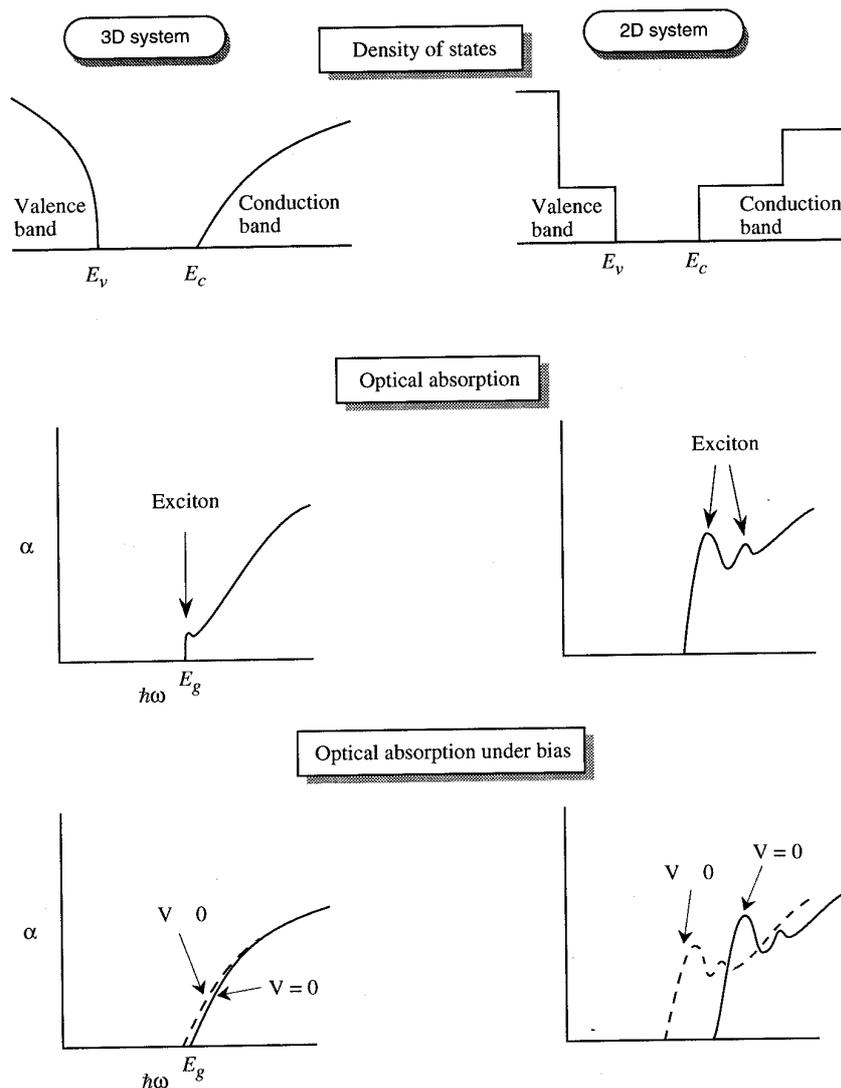
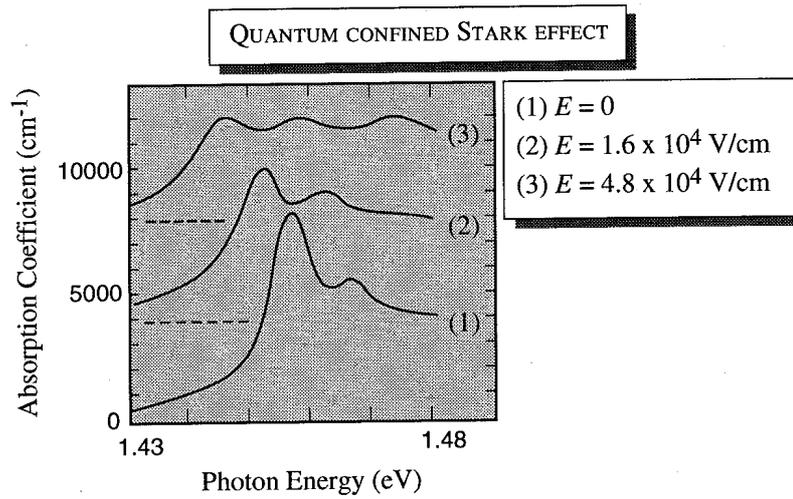


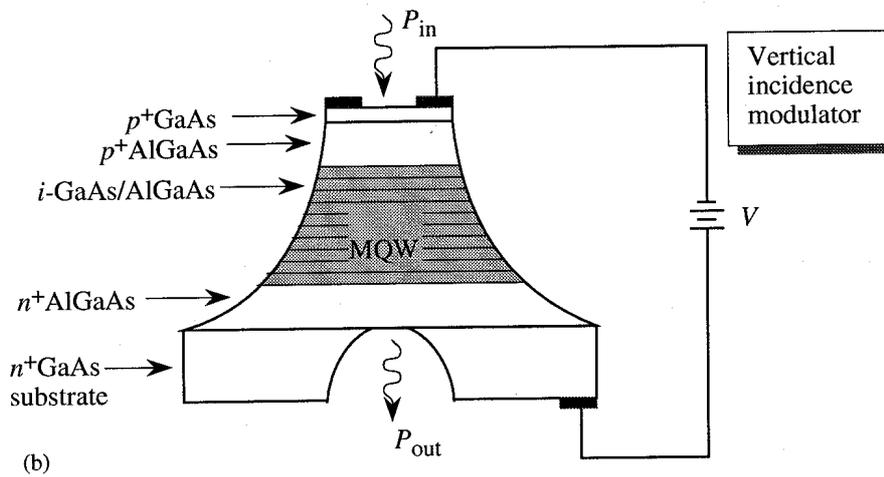
Fig. B.7.43: Las diferencias entre sistemas tridimensionales (3D) y bidimensionales (2D) se aprovechan para diseñar mejores moduladores ópticos. Los efectos del excitón son muy importantes en pozos cuánticos y el espectro de absorción se puede modificar fácilmente mediante un campo eléctrico.

B.7.11.2. Moduladores de electro-absorción

Cuando se aplica un campo eléctrico a un pozo cuántico, el espectro de absorción se desplaza hacia frecuencias inferiores. Como resultado si la luz de frecuencia $\hbar\omega$ incide sobre el dispositivo, la luz transmitida puede ser modulada por medio de este campo eléctrico. El desplazamiento del espectro de absorción se llama el efecto cuántico de confinado de Stark (QCSE). La respuesta de los dispositivos QCSE puede ser muy rápida (del orden de los 10ps) y por tanto se pueden conseguir modulaciones de alta velocidad. En la siguiente figura se muestra un diodo p-i-n de pozo cuántico múltiple, el cual puede ser utilizado como modulador de electro-absorción.



(a)



(b)

Fig. B.7.44: (a) Desplazamiento de la absorción óptica con el campo aplicado. (b) Modulador de efecto cuántico confinado de Stark. Al aplicar la polarización, la intensidad luminosa de salida puede ser modulada.