

Cristales líquidos

Láser

Fibra óptica

Almacenamiento óptico

Fotografía digital

Computación óptica

Computación cuántica

#### Objetivos

- Conocer los fundamentos físicos en que se basa la utilización de los cristales líquidos, fibras ópticas, así como la naturaleza de los distintos tipos de almacenamiento óptico de información.
- Conocer la naturaleza de la emisión láser.
- Describir cualitativamente el funcionamiento de un sensor CCD.
- Conocer algunos avances y tendencias de futuro de la tecnología óptica en los ordenadores.

Los comienzos de la era de la Informática han estado unidos al electromagnetismo: transistores, discos magnéticos, monitores basados en rayos catódicos... Desde finales del siglo XX, están apareciendo cada vez más dispositivos basados en la Óptica y en las propiedades electro-ópticas de los materiales. La fibra óptica para la transmisión más eficiente de la información, el láser para producir fuentes luminosas eficientes, el almacenamiento óptico de información en CD y DVD, la fotografía digital y aplicaciones en computación hacen que la informática esté cada día más relacionada con la Óptica y que, por lo tanto, debamos conocer los fundamentos físicos en que se basan dichas aplicaciones.

## 12.1 Cristales líquidos

### Polarización

La luz es una onda electromagnética transversal, es decir, es la propagación de un campo eléctrico y magnético en dos planos de vibración perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación. Si únicamente consideramos la componente eléctrica, se trata de una onda polarizada linealmente porque únicamente hay un plano de vibración. Una radiación luminosa emitida por un único átomo estaría polarizada linealmente. Sin embargo, cualquier fuente luminosa consta de multitud de ondas producidas por infinidad de átomos emitiendo aleatoriamente, por lo que esta onda no está polarizada, está aleatoriamente polarizada. Si de alguna manera se consigue separar un único plano de vibración, eliminando o absorbiendo los demás, obtenemos una luz polarizada.

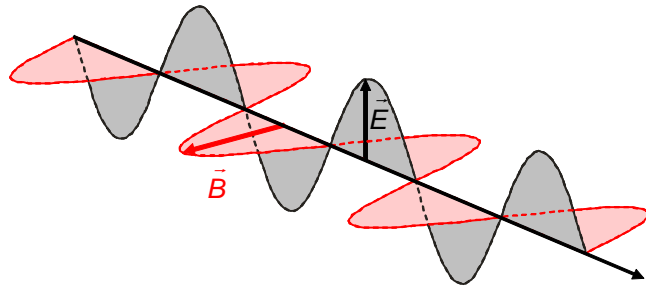


Figura 12-1: Modelo de onda electromagnética

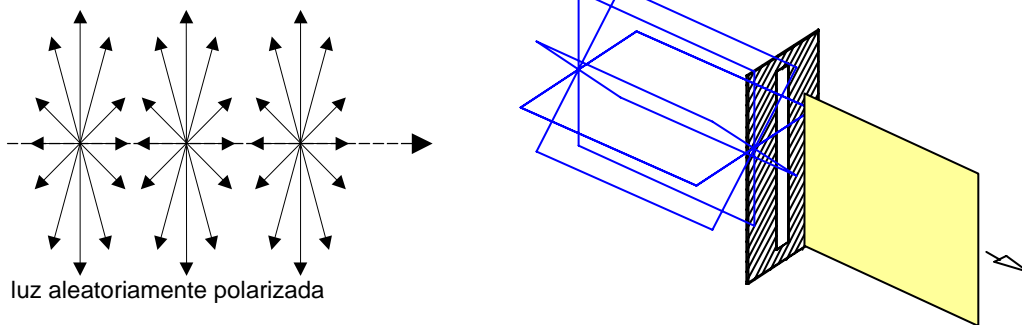


Figura 12-2: Modelo mecánico para ilustrar la polarización de la luz

Existen distintos métodos para polarizar la luz, de los que destacaremos dos: por absorción y por reflexión.

#### a) Por absorción.

Ciertos sólidos poseen una estructura cristalina particular con la propiedad de absorber el campo electromagnético cuando éste incide de modo que presenta el plano de vibración del campo eléctrico alineado con cierta dirección espacial. De esta forma, la componente de la onda electromagnética cuyo campo eléctrico vibra en dicha dirección es absorbida, quedando entonces únicamente la componente perpendicular. Los cristales que poseen esta propiedad se denominan polarizadores. Si la luz incidente está aleatoriamente polarizada, únicamente el 50% de la radiación incidente atraviesa el cristal, y dicha radiación estará linealmente polarizada en una dirección, que coincide con lo que se denomina eje de transmisión del polarizador.

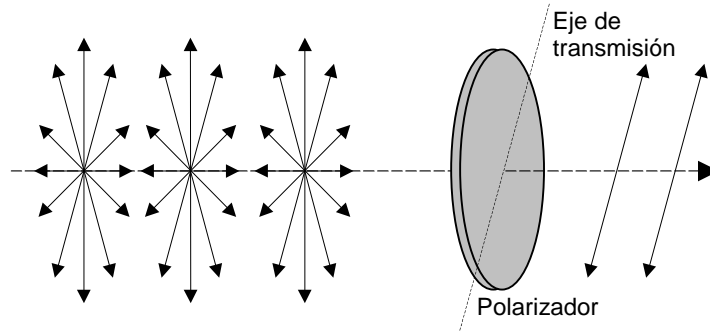


Figura 12-3: Esquema del funcionamiento de un polarizador: únicamente se transmite la componente de la luz cuyo eje de vibración del campo eléctrico coincide con el eje de transmisión del polarizador

Supongamos que se sitúan dos polarizadores consecutivos con los ejes de transmisión formando un ángulo  $\theta$ . La luz, al atravesar el primer polarizador, queda linealmente polarizada en la dirección del eje de transmisión del mismo. Al incidir la luz polarizada en el segundo polarizador, solamente la componente de la vibración del campo en la dirección del segundo es transmitida y la intensidad del haz luminoso viene dada por:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

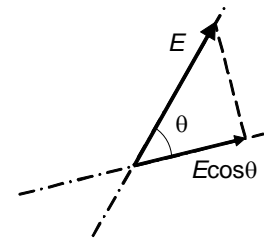


Figura 12-4

ya que la intensidad depende del cuadrado del módulo del campo eléctrico. Esta expresión se conoce como **ley de Malus** y en ésta  $I_0$  es la intensidad incidente en el segundo polarizador y  $\theta$  el ángulo que forman entre sí los dos ejes de transmisión. De esta expresión se deduce que dos polarizadores dispuestos con los ejes de transmisión perpendiculares entre sí, producirán una absorción total.

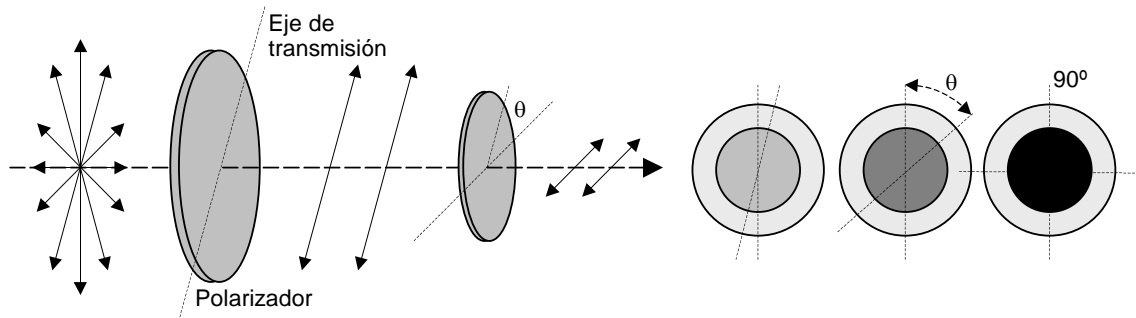


Figura 12-5: Absorción de luz en un polarizador

## b) Por reflexión

Cuando la luz incide en la superficie de un medio transparente, parte se refracta y parte se refleja de forma parcialmente polarizada. Existe un cierto ángulo de incidencia  $i_p$ , denominado ángulo de polarización para el que la luz que se refleja lo hace totalmente polarizada. En este caso la luz reflejada y refractada forman  $90^\circ$ .

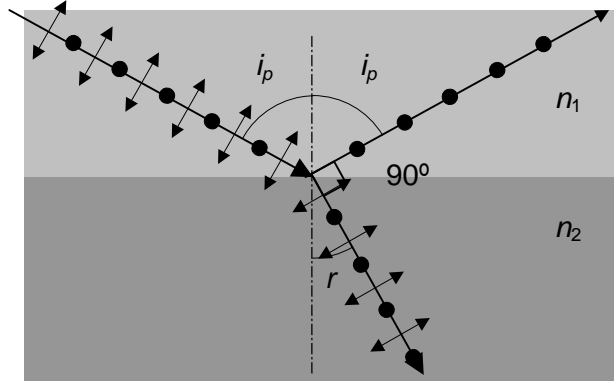


Figura 12-6: Ley de Brewster

Utilizando las leyes de la refracción y la reflexión,

$$n_1 \operatorname{sen} i_p = n_2 \operatorname{sen} r \Rightarrow \frac{\operatorname{sen} i_p}{\operatorname{sen} r} = \frac{\operatorname{sen} i_p}{\operatorname{sen}(90 - i_p)} = \frac{\operatorname{sen} i_p}{\cos i_p} = \operatorname{tg} i_p = \frac{n_2}{n_1}$$

resultado que se conoce como **ley de Brewster**.

Como consecuencia, si la luz incidente estuviera polarizada con el plano de vibración coincidente con el plano de incidencia, no existiría luz reflejada.

### Cristales líquidos

Los cristales líquidos fueron descubiertos por Reinitzer a finales del siglo XIX a partir de compuestos orgánicos derivados del colesterol, pero cayeron en el olvido quizá por la falsa creencia de que la materia se presenta en los tres estados típicos: sólido, líquido y gaseoso. Estas sustancias fluyen y adoptan la forma del recipiente que las contiene como los líquidos, pero sus moléculas son muy alargadas y asimétricas, presentando un elevado momento dipolar eléctrico que tiende a orientar sus moléculas en una dirección, dando lugar a estructuras más o menos ordenadas a diferencia de un líquido convencional.

Existen varios tipos de cristales líquidos de acuerdo con la disposición espacial molecular: nemáticos, esmécticos y colestéricos principalmente. Los cristales nemáticos tienen cierto orden en la orientación de sus moléculas pero un desorden en la posición de sus centros de masa. Las moléculas pueden moverse lateralmente, girar alrededor del eje común o deslizarse paralelamente a él. Son la fase más desordenada de los cristales líquidos.

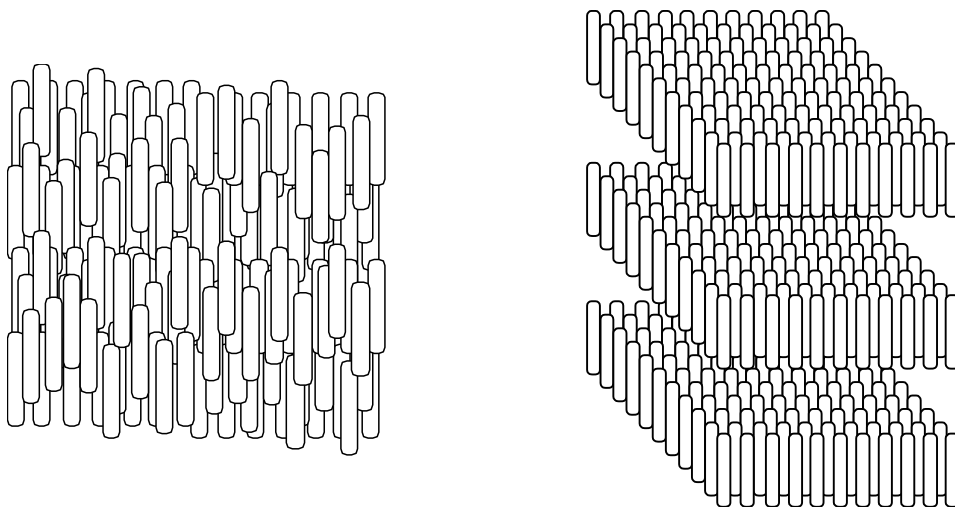


Figura 12-7: Cristales nemáticos y esmécticos

Los cristales esmécticos son la fase más ordenada de los cristales líquidos, además de estar dispuestas las moléculas paralelamente, los centros de masa están alineados y situados en planos paralelos en un estado muy parecido al de un sólido.

Las pantallas de cristal líquido o LCD (*Liquid Crystal Display*) están basadas en las propiedades electro-ópticas de estas sustancias, pudiéndose modificar estas propiedades mediante la aplicación de campos eléctricos externos.

La disposición de las moléculas alineadas en una dirección del espacio produce que esta dirección espacial presente de modo espontáneo unas propiedades ópticas como color, absorción o polarización, diferentes a las de las demás. A esta dirección singular se le denomina **eje óptico**, y lo presentan todos los cristales líquidos de modo espontáneo, independientemente del campo eléctrico aplicado. Así, un rayo luminoso que se propague por el cristal líquido se moverá con velocidades distintas según viaje paralelamente al eje óptico o no. También la polarización se verá afectada, pudiendo ser absorbidos los haces luminosos que no coincidan con la dirección del eje óptico.

De este modo, mediante la aplicación de campos eléctricos externos podemos modificar la dirección del eje óptico, pues un campo eléctrico externo actúa sobre las moléculas dipolares modificando su orientación. Es en este aspecto donde el comportamiento de líquido adquiere relevancia, pues en un sólido las moléculas no podrían moverse. Ésta es la característica en la que se basa la tecnología de formación de imágenes mediante LCD.

### Formación de imágenes

El cristal líquido se dispone entre dos láminas de vidrio en las que se han practicado surcos microscópicos. En una lámina se practican surcos horizontales y en la otra verticales. Las moléculas de cristal líquido se distribuyen orientadas según la disposición de los surcos como consecuencia de fuerzas puramente mecánicas, lo que producirá una disposición helicoidal de las moléculas en la dirección perpendicular al plano de las láminas. Como consecuencia, se va rotando paulatinamente la dirección de polarización hasta que ésta se hace de  $90^\circ$ , todo ello en ausencia de campo eléctrico externo. Como consecuencia, la luz polarizada que atraviesa este cristal líquido girará su eje de polarización  $90^\circ$ .

Si en estas condiciones situamos dos polarizadores desfasados  $90^\circ$  antes y después del cristal líquido, el resultado será favorable al paso de la luz: del primer polarizador obtenemos luz polarizada que atraviesa el cristal líquido girando su dirección de polarización y pudiendo atravesar el segundo polarizador. Si situamos un espejo, la luz se refleja y recorre el camino en sentido contrario encontrando los polarizadores situados de modo favorable al paso.

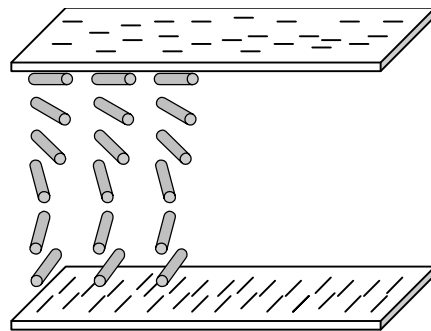


Figura 12-8: Disposición de las moléculas del cristal líquido

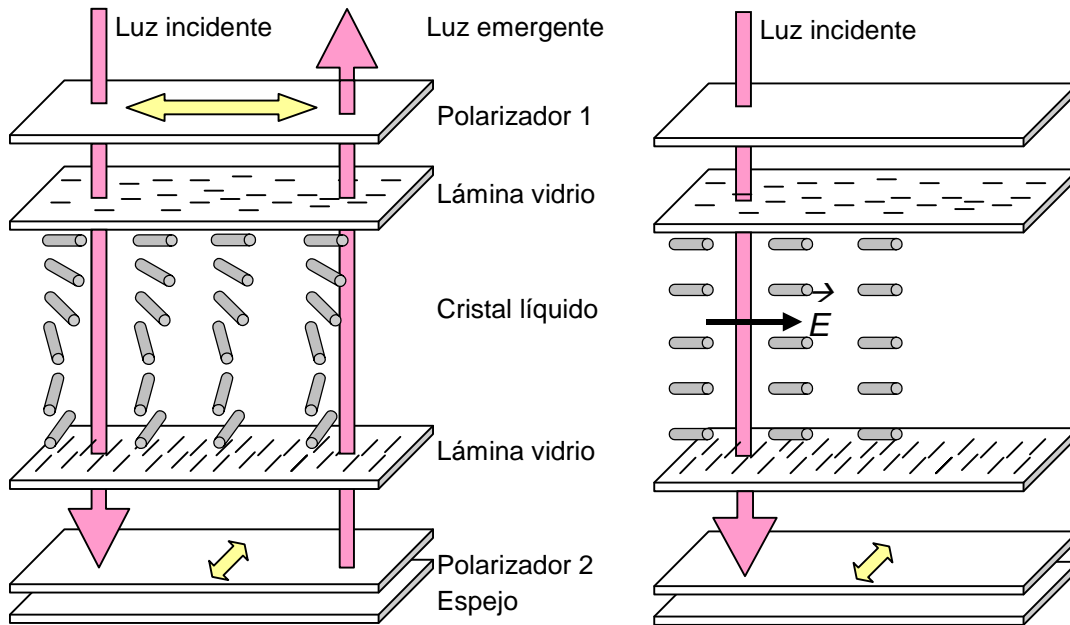


Figura 12-9: Izquierda: sin campo eléctrico la luz incidente es reflejada en el espejo, y posteriormente emitida. Derecha: al aplicar un campo eléctrico cambia la disposición de las moléculas del cristal líquido y la luz es absorbida en el segundo polarizador

De este modo, un observador situado en la dirección del haz reflejado no percibe ninguna zona oscura, pues el haz luminoso se refleja sin sufrir ninguna perturbación.

En cambio, si mediante electrodos se aplica en alguna zona del cristal líquido un campo eléctrico de tal modo que las moléculas se orienten de acuerdo con la dirección del primer polarizador, la luz atravesará el cristal líquido sin girar su eje óptico y por lo tanto no atravesará el segundo polarizador y no alcanzará el espejo, formándose de esta manera una imagen oscura al observador.

De esta manera, para formar imágenes, se constituyen celdas independientes en el cristal que pueden polarizarse eléctricamente aplicando una diferencia de potencial externa y cambiar de este modo la orientación de sus moléculas. Las celdas polarizadas eléctricamente no dejarán pasar la luz y formarán una imagen oscura, y las celdas no polarizadas sí dejarán pasar la luz y darán lugar a una imagen luminosa. Entre medio, se puede variar el grado de polarización eléctrica para conseguir diferentes tonos de grises. Este es el funcionamiento básico de las pantallas de cristal líquido (LCD) que se utilizan en calculadoras, relojes, pantallas indicadoras, etc., y que se ilustra en la Figura 12-10.

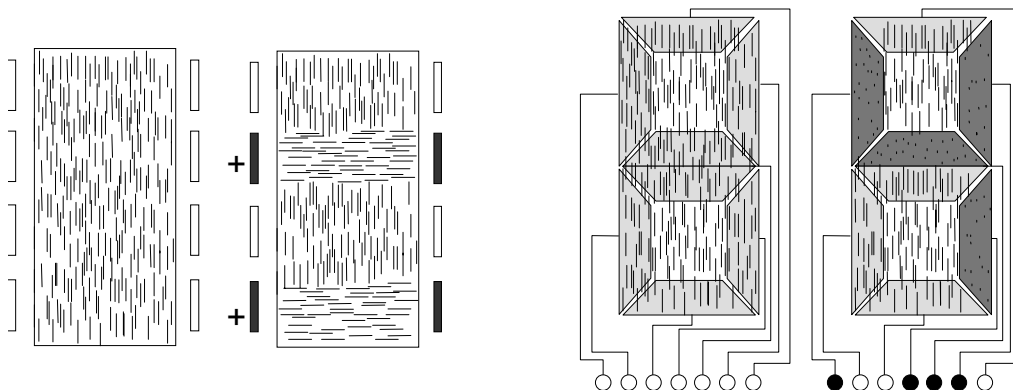


Figura 12-10: En las celdas que se ha aplicado tensión eléctrica las moléculas se orientan (izqda). Para formar una imagen se aplica tensión eléctrica a las celdas de cristal líquido

## Aplicaciones

La aplicación de los cristales líquidos está en la fabricación de pantallas de visualización de caracteres alfanuméricos en calculadoras, pantallas indicadoras, monitores y televisiones planas. Aplicando un voltaje adecuado a las celdas, éstas cambian las propiedades de su eje óptico volviéndose opacas o transparentes a la luz reflejada. La principal ventaja de estas pantallas reside en su bajo consumo, y sus desventaja, la necesidad de iluminación externa.

## Pantallas TFT

El control directo de cada celda de una pantalla de segmentos tal y como se ha descrito anteriormente es difícilmente extrapolable a una gran pantalla formada por un gran número de píxeles. En estos casos, el campo eléctrico en cada píxel se controla mediante un pequeño transistor de tipo TFT (Thin-Film Transistor), dando lugar a las denominadas pantallas TFT-LCD o también llamadas simplemente pantallas TFT. El TFT es un transistor de efecto de campo con finas láminas en los contactos metálicos situado en la superficie del cristal líquido y mediante el cual se controla la luminosidad de cada píxel mediante el voltaje de la fuente y la puerta. Además, estas pantallas incorporan una fuente de iluminación en la parte trasera.

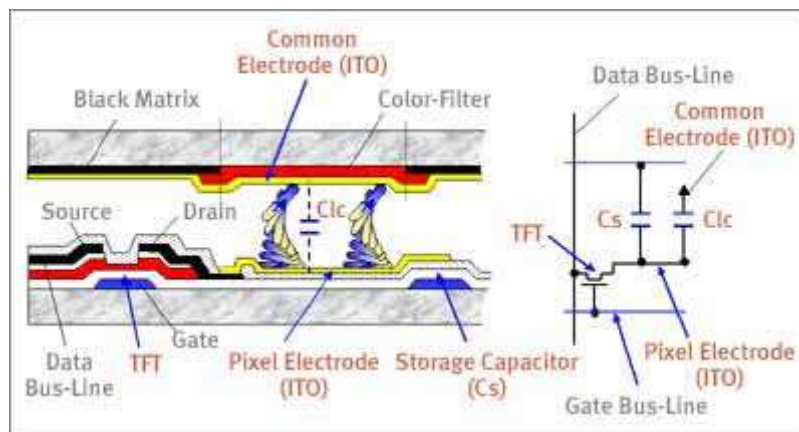


Figura 12-11: Esquema de un píxel TFT LCD [Plasma,2007]

La Figura 12-11 muestra el esquema de un píxel en una matriz TFT-LCD. La fuente (source) del TFT está conectada al bus de datos, mientras que la puerta (gate) está conectada al bus de direccionamiento. La información de intensidad de color viene a través del bus de datos y si la puerta está a un voltaje mayor al voltaje umbral, la información será cargada en los condensadores de almacenamiento (Cs) y del cristal líquido (Clc). Por encima del cristal líquido hay una matriz de máscara para establecer el color de píxel y ocultar las regiones donde está situado el TFT.

El esquema de la matriz de píxeles está representado básicamente en la Figura 12-12. La matriz de píxeles está direccionada línea a línea a través del bus de puertas, esto es, todas las puertas de los TFT de una misma línea comparten la misma conexión. Por otra parte, las fuentes de los TFT de una misma columna comparten también la misma conexión. Estableciendo el voltaje de

una línea a nivel alto, todas las puertas de TFT de esa línea se “abren”, permitiendo que la información de iluminación que está en el bus de datos se cargue en paralelo en los correspondientes píxeles, atravesando el TFT de fuente a drenaje.

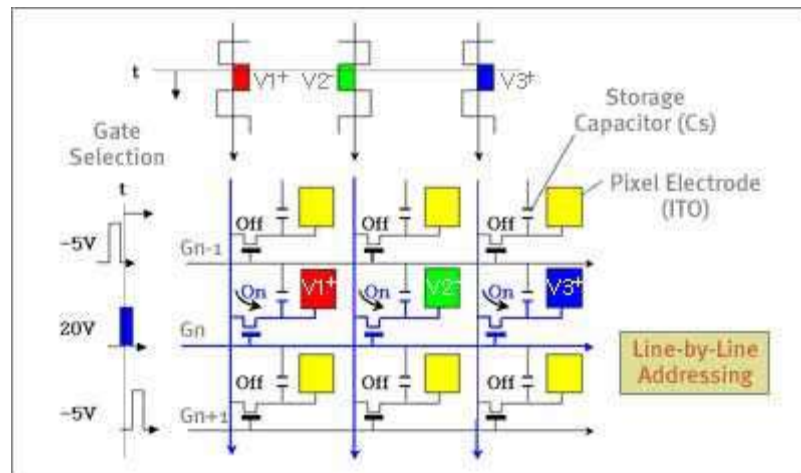


Figura 12-12: Carga de la información de iluminación en los píxeles de la columna n. De forma sincronizada, el bus de direccionamiento activa las puertas ( $G_n$ ) de los TFT de la columna, mientras el voltaje correspondiente a la información de iluminación, cargado en el bus de datos, atraviesa la fuente de cada TFT y carga los condensadores de almacenamiento ( $C_s$ ) y del cristal líquido (ITO). [Plasma,2007]

## Pantallas OLED

El término OLED es un acrónimo del *Organic LED (LED orgánico)*, que en esencia se trata de un LED basado en moléculas orgánicas, en lugar de materiales semiconductores, normalmente polímeros aunque también se utilizan otros materiales orgánicos de moléculas pequeñas.

Las pantallas OLED se basan en la propiedad de estos materiales orgánicos de emitir luz cuando se someten a una diferencia de potencial. El esquema de un píxel en este tipo de pantallas viene representado en la Figura 12-13, y está constituido por cuatro capas: el ánodo y el cátodo conectados a una diferencia de potencial; entre ellos se sitúa una capa de polímero conductor, y otra de polímero emisor, siendo este último el responsable de la emisión luminosa. El espesor de estas cuatro capas es muy pequeño: alrededor de  $0,5 \mu\text{m}$ .

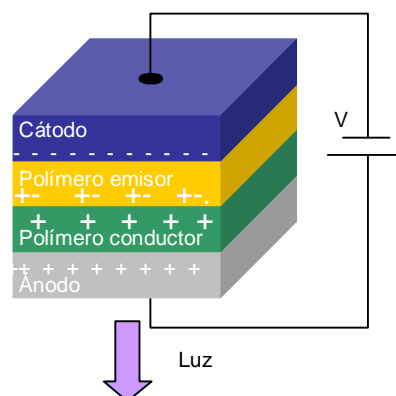


Figura 12-13: Esquema de un píxel de una pantalla OLED

Como polímeros conductores se puede utilizar polyanilina (PANI:PSS) o polyethylenedioxythiophene (PDOT:PSS), y como polímeros emisores de luz se



utiliza polyphenylenevinylene (R-PPV) o polyfluorene (PF). Se pueden obtener diferentes colores de emisión variando la estructura química de los materiales.

El diagrama de bandas de energía viene esquematizado en la figura siguiente: se inyectan electrones por el cátodo, y huecos por el ánodo. Los huecos se mueven a través del polímero conductor hasta el polímero emisor, donde se recombinan con los electrones del cátodo, produciendo la emisión de luz.

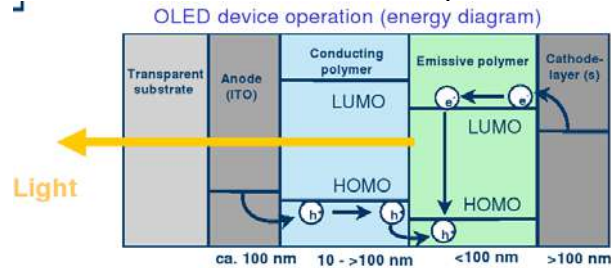


Figura 12-14: esquema de bandas de energía

El control de cada uno de estos píxeles se realiza habitualmente mediante transistores TFT, al igual que los monitores TFT-LCD comentados anteriormente. Las pantallas que combinan la tecnología OLED con la TFT se suelen denominar también AMOLED (OLED de Matriz Activa).

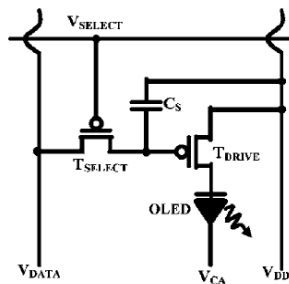


Figura 12-15: Ejemplo del circuito de control de un píxel de una pantalla AMOLED mediante dos transistores TFT

Una ventaja adicional que tienen este tipo de pantallas respecto a las TFT-LCD es la posibilidad de emitir la luz por la parte superior, situando la matriz TFT detrás del polímero emisor, evitando así las “zonas de sombra” producidas por la matriz TFT (ver Figura 12-15) inevitable en las pantallas TFT-LCD. De esta forma se pueden conseguir pantallas más grandes, y con mayor brillo y resolución.

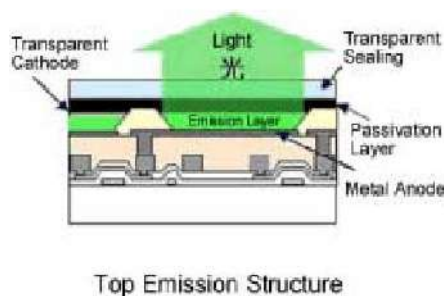


Figura 12-16: Disposición de los diferentes elementos en una pantalla OLED de emisión superior

Esta disposición de los elementos se denomina estructura de emisión superior. De abajo hacia arriba en la figura, se sitúan los elementos en el siguiente orden: sustrato, matriz TFT, ánodo metálico, capa orgánica (polímero conductor y emisor), cátodo transparente y cubierta transparente. Como se puede apreciar en la figura, la emisión de la luz se realiza a través del cátodo transparente, controlado mediante la matriz TFT que queda en la parte trasera, obteniéndose una mayor eficacia del proceso.

Al igual que el resto de pantallas, el color se consigue mediante la combinación de los tres colores básicos: rojo, verde y azul. Mientras que en la mayoría de pantallas el color se basa en un emisor blanco, y filtros de colores para seleccionar el color deseado (ver Figura 12-17-b), en este caso también se pueden utilizar OLED de colores (Figura 12-17-a) o también OLED azul combinado con un medio capaz de cambiar el color (Figura 12-17-c).

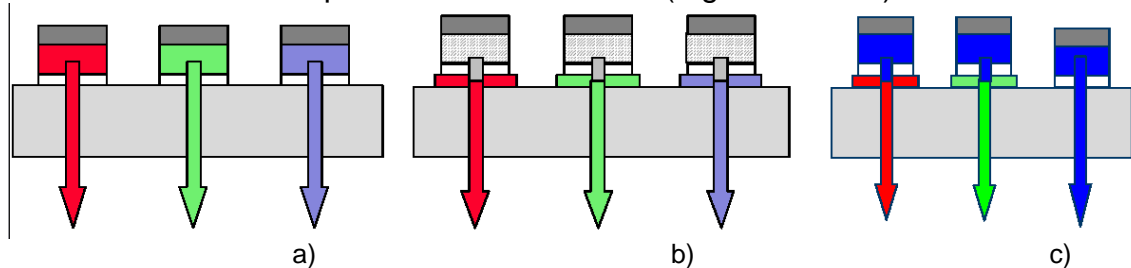


Figura 12-17: Tres métodos para conseguir una pantalla en color mediante LED orgánicos: a) emisores de los tres colores básicos. b) emisores blancos combinados con filtros de colores. c) emisores azules seguidos de un medio con la capacidad de cambiar el color a rojo o verde.

Hoy por hoy, el principal inconveniente de este tipo de pantallas radica en la corta vida útil de los LED orgánicos emisores de color azul combinado con la falta de emisores de color blanco eficientes. Sin embargo, estamos seguros que en pocos años se podrá resolver este inconveniente, y este tipo de pantallas invadirán el mercado, desbancando por completo a los actuales monitores TFT basados en cristales líquidos, e incluso la tecnología de plasma, puesto que las pantallas OLED pueden superar ambas tecnologías a un coste menor, logrando alta luminosidad, gran contraste, pequeño tamaño y peso, mayor ángulo de visión, bajo consumo de energía y mayor rango de colores. Incluso con esta tecnología se pueden realizar pantallas flexibles.

En la actualidad existen investigaciones para desarrollar una nueva versión del LED orgánico que no sólo emita luz, sino que también recoja la energía solar para producir electricidad. De momento no hay ninguna fecha para su comercialización, pero ya se está hablando de cómo hacerlo para su fabricación masiva. Con esta tecnología se podrían construir todo tipo de pequeños aparatos eléctricos que mediante su propia pantalla se podrían auto-abastecer de energía.

## 12.2 Láser

El *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation* (LÁSER) junto con la fibra óptica y los dispositivos optoelectrónicos constituyen el campo innovador de la óptica actual orientada al diseño de dispositivos de diverso tipo: almacenamiento y transmisión de información, computación, etc.

## Absorción y emisión de luz

Los átomos y las moléculas tienen niveles de energía definidos por el estado de excitación de sus electrones. Estos niveles de energía no son niveles aleatorios, sino que se trata de niveles bien definidos, pudiendo ocurrir transiciones electrónicas entre niveles. Esta idea constituyó uno de los grandes avances de la Ciencia a principios del siglo XX, explicándose de modo satisfactorio las emisiones y absorciones de energía por la materia.

Así, cuando suministramos energía a la materia (ya sea en forma de calor, radiación, campos eléctricos...), los electrones son llevados a unos niveles de energía mayores: un electrón dado absorbe energía tomando un fotón y permanece en el nivel excitado. La energía absorbida viene dada por la ecuación de Planck.

$$E = E_n - E_m = hf$$

donde  $E_m$  es la energía del nivel inicial,  $E_n$  la del nivel final,  $h$  es la constante de Planck ( $6,62 \cdot 10^{-34}$  Js) y  $f$  es la frecuencia del fotón.

Posteriormente, en un lapso de tiempo muy corto, el electrón vuelve al nivel original devolviendo la energía en forma de radiación, emitiendo un fotón con una frecuencia  $f$ , proceso que se denomina emisión espontánea.

El proceso absorción – emisión espontánea es más complejo que el esquema expuesto anteriormente, pues hay que considerar que en una muestra dada hay gran número de electrones y un número de niveles electrónicos mayor por lo que se podrán producir gran cantidad y variedad de “saltos” electrónicos en ambos sentidos.

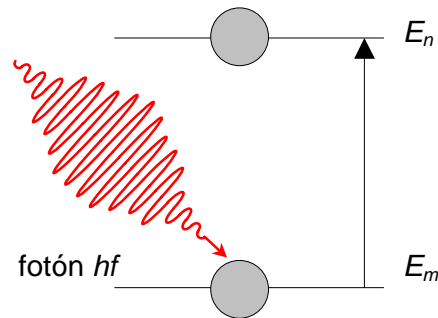


Figura 12-18: Absorción de un fotón, produciendo la excitación de un electrón del nivel  $m$  al  $n$

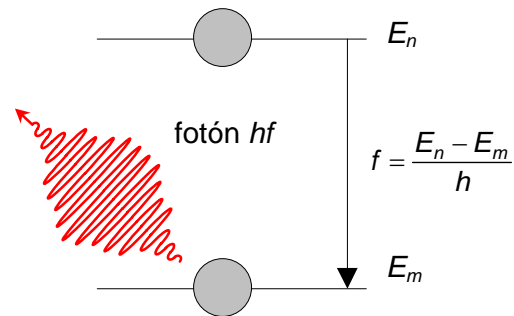


Figura 12-19: Des-excitación del electrón del nivel  $n$  al  $m$ , produciéndose la emisión de un fotón, cuya frecuencia está relacionada con la diferencia de energía entre los niveles energéticos del electrón

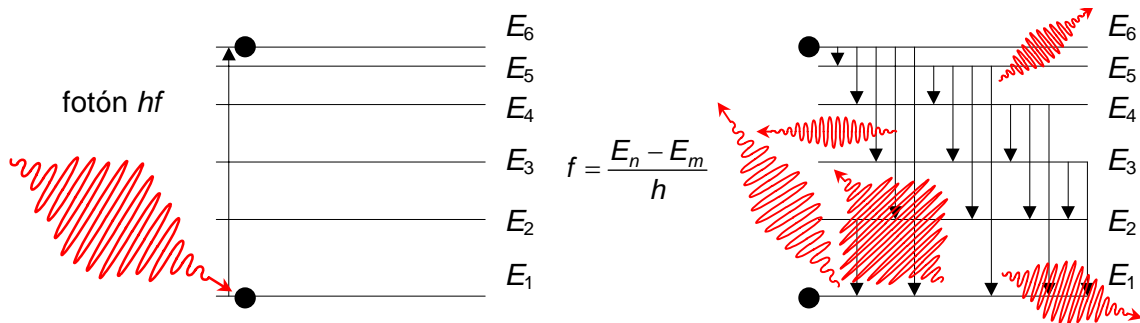


Figura 12-20: Excitación de un electrón desde un nivel energético  $E_1$  a otro  $E_n$ , y diferentes formas posibles de volver a su estado fundamental  $E_1$

Por lo tanto no vamos a obtener un único tipo de fotón, sino un espectro con diferentes frecuencias correspondientes a distintos saltos posibles. Esto significa que un átomo dado sólo emitirá un conjunto de radiaciones posibles,

las correspondientes a sus “saltos” de niveles posibles, constituyendo estas radiaciones (líneas en el espectro) su marca particular. Este es el proceso que explica, por ejemplo, la emisión de espectros discontinuos de luz por los gases incandescentes en un tubo de gas sometido a una elevada diferencia de potencial.

Por otra parte, en un conjunto elevado de átomos tendremos que una cantidad apreciable de electrones se encontrará en su nivel fundamental (no excitado), otra cantidad menor se encontrará en el primer nivel excitado y otra en el segundo. En situación de equilibrio energético la sustancia está absorbiendo energía y emitiéndola con sus poblaciones de electrones en equilibrio en diversos niveles.

### Emisión estimulada

Cuando un átomo está en un estado excitado puede tener lugar una transición a un estado de energía más bajo en forma espontánea, con la consecuente emisión de radiación como se ha visto antes. A. Einstein descubrió en 1917 que si un átomo excitado se encuentra en un campo de radiación electromagnética, también puede ocurrir otro proceso de emisión, que es estimulado por el campo. Si el fotón de la radiación incidente tiene una energía igual a la diferencia de energías entre los niveles en los que ocurrirá la transición, y si el sistema tiene un gran número de átomos en estados excitados, el sistema podrá emitir otro fotón adicional, obteniéndose 2 fotones: el que llegó y el inducido, **ambos de la misma frecuencia y en la misma dirección y en la misma polarización**. Además, los dos fotones producidos incidirán sobre otros átomos excitados, induciendo nuevas emisiones de fotones, todos ellos de la misma frecuencia, en un proceso en cadena.

Conviene subrayar que para que haya emisión estimulada se han de producir dos condiciones:

- Fotón incidente con la energía correspondiente a la transición.
- Elevado número de electrones en niveles excitados, lo que se denomina inversión de población

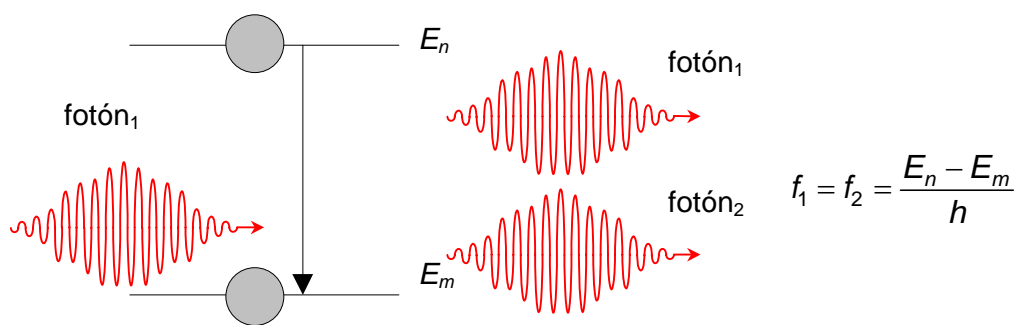


Figura 12-21: Emisión estimulada

### Amplificación e inversión de población

Para que tenga lugar el efecto láser, es necesario que exista una elevada población de átomos con sus niveles energéticos excitados, lo que se denomina “inversión de población”. No basta con un reducido grupo de átomos, sino que se necesita una población significativa para que tenga lugar un proce-

so en cadena. El proceso por el que se consigue la inversión de población se denomina *bombeo*.

El número de átomos  $N_2$  en un nivel de energía excitado  $E_2$  y el número de átomos  $N_1$  en un nivel de energía mínimo  $E_1$  cumple la estadística de Maxwell-Boltzmann, dada por la expresión:

$$N_2 = N_1 e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$$

donde  $k$  es la constante de Boltzmann. En esta expresión se observa que al aumentar la temperatura, aumenta el número de átomos excitados, lo que sería un bombeo producido por el aumento de la temperatura, pero que puede obtenerse también por una elevada diferencia de potencial o mediante radiación.

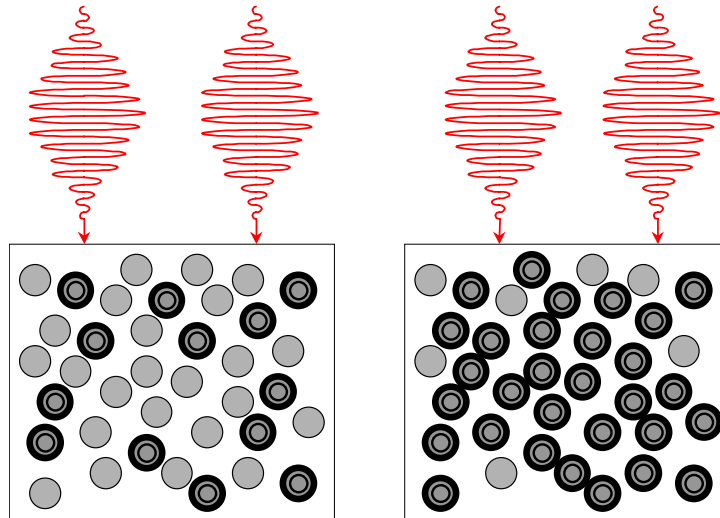


Figura 12-22: Bombeo. Los círculos de línea más gruesa representan los átomos excitados

Mediante el bombeo se consigue, por tanto, la inversión de población, es decir que un elevado número de átomos de la muestra estén excitados. Un esquema del proceso está mostrado en la figura: se le suministra energía a la muestra para conseguir una elevada población de átomos excitados. Este bombeo puede realizarse mediante luz intensa (bombeo óptico) o mediante una descarga eléctrica si el medio es gaseoso, o mediante una inyección de cargas en un láser semiconductor.

En esta situación, bastará un fotón con la energía correspondiente al salto de niveles para desencadenar el proceso de emisión estimulada; se emitirán dos fotones iguales que desencadenarán dos procesos, así en un proceso en cadena.

Sin embargo, las emisiones de los átomos tienen lugar al azar en el tiempo y en dirección. Los distintos átomos emiten los fotones de forma independiente entre sí, la radiación emitida no está en fase; las ondas están desfasadas, y cuando se suman ondas que no están en fase, la amplitud de éstas no es elevada.

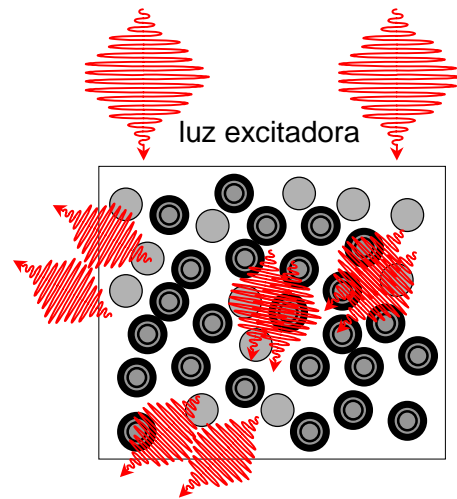


Figura 12-23: Emisión estimulada

### La cavidad LÁSER

Para conseguir un haz de ondas en una dirección y en fase se utiliza un recinto donde está el medio entre dos espejos, uno de ellos semitransparente. La muestra se excita con luz por ejemplo, lográndose la inversión de población. Los fotones producidos se reflejarán múltiples veces produciendo nuevas emisiones. Los fotones emitidos en direcciones diferentes a las del eje de la cavidad saldrán de la misma, y no continuarán el proceso de emisión estimulada. Por otra parte, al interferir las ondas con sus reflejadas se formará una onda estacionaria si la longitud del recinto es un múltiplo entero de la semilongitud de onda. De este modo, se consigue un haz coherente (en fase) en una dirección que abandona la cavidad por el espejo semitransparente.

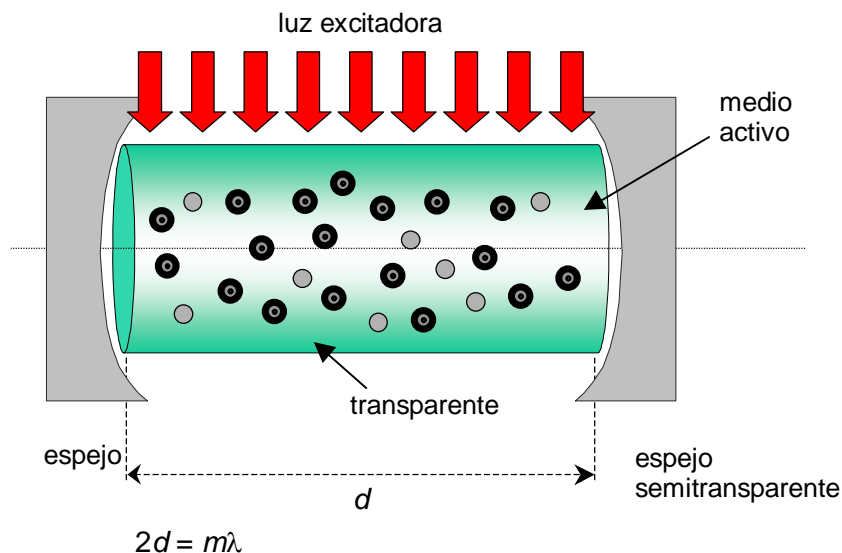


Figura 12-24: Cavidad láser

### Tipos de LÁSER

- Láser de Helio-Neón: El láser de helio-neón fue el primer láser de gas que se construyó. Los centros activos de este láser son los átomos de neón, pero la excitación de éstos se realiza a través de los átomos de helio. Una

mezcla típica de He-Ne para estos láseres contiene siete partes de helio por una parte de neón.

- Láser de CO<sub>2</sub>: El láser de dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, es el ejemplo más importante de los láseres moleculares. El medio activo en este láser es una mezcla de dióxido de carbono, nitrógeno (N<sub>2</sub>) y helio (He), aunque las transiciones láser se llevan a cabo en los niveles energéticos del CO<sub>2</sub>.
- Láser de semiconductores: Los láseres de semiconductores son los láseres más eficientes, baratos y pequeños que es posible obtener en la actualidad. Desde su invención en 1962 se han mantenido como líderes en muchas aplicaciones científico-tecnológicas y su continua producción masiva nos da un inicio de que esta situación se prolongará por mucho tiempo.
- Láser de Nd-Yag: Son los más utilizados para el bombeo de láseres líquidos.
- Láseres líquidos o de colorante
- Láseres de excímeros

Láser	$\lambda$ (nm)	Aplicaciones
Rubí	694 (rojo)	Holografía, médicas
Alejandrita	755 (rojo)	Médicas
He – Ne	633 (rojo)	Lectores de código de barras
Dióxido de carbono	1060 (IR)	Espectroscopía, materiales, médicas
Ar <sup>+</sup>	514,5 (verde)	Médicas
He – Cd	442 (azul)	Estereolitografía
Nd:YAG	1064 (IR)	Cortado y tratado de superficies, médicas
Ho:YAG	2090 (IR)	Médicas
Er:YAG	2940 (IR)	Médicas
GaN	405 (azul)	DVD, CD-ROM
AlGaInP	670 (rojo)	
AlGaAs	830 (rojo)	Impresoras láser

## Aplicaciones

Muchas son las aplicaciones directas del láser en la informática, las telecomunicaciones y la teledetección: lectura de los discos compactos, comunicaciones terrestres, computadoras láser, comunicaciones por infrarrojos, telémetro láser, radares láser, retículos de difracción, fotografía, mediciones de precisión, estereolitografía, en la cirugía, tanto plástica, como cardiovascular y dermatológica, en odontología, traumatología, etc.

## 12.3 Fibra óptica

### Introducción

La idea de transmitir información mediante la luz tiene sus orígenes en 1889 con la invención del fonógrafo por Graham Bell; éste consistía en la transmisión de mensajes vocales mediante la luz. La idea cayó rápidamente en el olvido por el problema de la atenuación de la intensidad con la distancia. En 1960 se inventó y construyó el láser que volvió a dar fuerza a la idea; sin embargo subsistía el problema de las pérdidas de luminosidad producidas por la

atmósfera. Fue en los años 20 cuando se recuperó la idea gracias a la obtención de vidrios flexibles, los cuales permitían que la luz circulase a través de éstos en distancias muy reducidas. Actualmente la fibra óptica se ha convertido en una de las tecnologías más avanzadas que se utilizan como medio de transmisión por lograr una mayor velocidad y disminuir casi en su totalidad los ruidos y las interferencias.

Entre los aspectos positivos más reseñables citaremos los siguientes:

- Compactas, ligeras, con bajas pérdidas de señal, amplia capacidad de transmisión y un alto grado de fiabilidad debido a que son inmunes a las interferencias electromagnéticas de radio-frecuencia.
- No conducen señales eléctricas.
- Capacidad de tolerar altas diferencias de potencial, no existen problemas respecto a cortocircuitos.
- Gran ancho de banda, lo cual reduce el costo por canal: es considerable el ahorro en volumen en relación con los cables de cobre (cable coaxial).

### Refracción

Cuando una onda luminosa se propaga entre dos medios transparentes, parte del haz luminoso se refleja en la superficie de separación y parte cambia de dirección. El cambio de dirección es producido por el cambio de velocidad que experimenta la onda luminosa al cambiar de medio. Se define el índice de refracción de un medio como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en ese medio. El índice de refracción es una característica de cada sustancia.

$$n = \frac{c}{v}$$

Material	Índice de refracción
Aire (a 1 atmósfera)	1,000278
Hielo	1,31
Cuarzo	1,55
Diamante	2,42
Vidrio flint medio	1,62
Sal	1,54

La relación entre la dirección del haz incidente y el haz refractado viene dada por la ley de Snell o ley de la refracción.

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_2}{n_1}$$

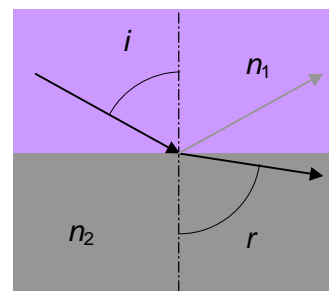


Figura 12-25: Ley de la refracción

siendo  $i$  el ángulo de incidencia,  $r$  el ángulo de refracción, y  $n_i$  el índice de refracción del medio.

Además de refractado, el haz incidente es parcialmente reflejado en la superficie de separación. Sin embargo, si el índice de refracción del primer medio es mayor que el del segundo,  $n_1 > n_2$ , y por tanto  $i > r$ , habrá un ángulo de incidencia denominado **ángulo límite**,  $i_L$ , para el que el rayo refractado emerge con un ángulo de  $90^\circ$ , es decir no se refracta. Para este ángulo, o ángulos ma-



yores, toda la luz es reflejada, y no hay luz refractada. Este fenómeno se denomina **reflexión total**, y en él está basada la transmisión de luz por la fibra óptica. Para obtener el ángulo límite simplemente hacemos  $r = 90^\circ$  en la ley de Snell.

$$\text{sen } i_L = \frac{n_2}{n_1}$$

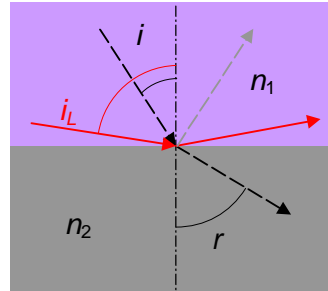


Figura 12-26: Reflexión total y ángulo límite

### Ejemplo 1

Calcula el ángulo límite para la reflexiones internas del diamante respecto el aire, si su índice de refracción es 2,42.

*Solución:*

$$i_L = \arcsen \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{2,42} = 24,4^\circ$$

¿Tiene este resultado alguna relación con las características ópticas singulares del diamante?

### Estructura de un cable de fibra óptica

El **núcleo**, es la zona interior de la fibra óptica y es donde se produce la propagación de la onda lumínica. Esta propagación se produce porque el índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento con lo que el haz lumínico se puede propagar de dos maneras diferentes, según el tipo de fibra óptica:

- La primera forma de propagación consiste en una serie de refracciones sucesivas en la zona fronteriza del núcleo y el revestimiento a causa de la diferencia de los índices de refracción (fibras de salto de índice).
- Y la segunda forma de propagación consiste en una serie de reflexiones en el interior del núcleo de la fibra óptica, esto se debe a la distribución del índice de refracción del núcleo a lo largo de su sección (fibras de gradiente de índice).

El **revestimiento**, es la capa central entre el núcleo y el recubrimiento, y es donde se produce la reflexión de la onda lumínica ya que el índice de refracción del revestimiento es menor que el del núcleo.

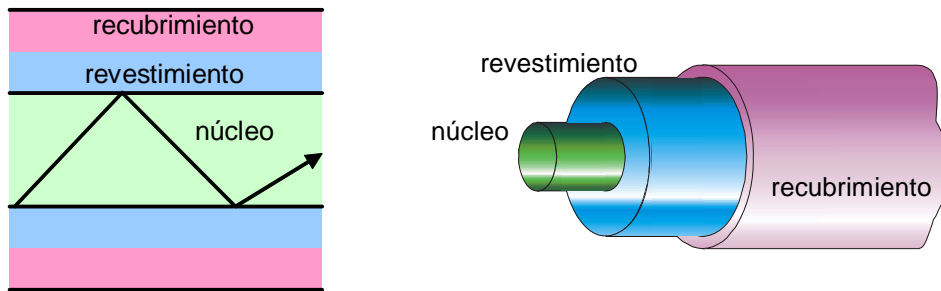


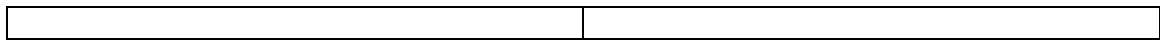
Figura 12-27: Estructura de un cable de fibra óptica

El **recubrimiento**, es la capa más externa del cable, que desempeña la función de evitar que la luz exterior penetre en el núcleo produciendo interferencias en el cable de fibra óptica, esto se debe a que el índice de refracción del recubrimiento es mayor que el de revestimiento.

Las ondas electromagnéticas que conforman la luz tienden a viajar a través de una región que posea un índice de refracción alto, por eso el centro de la hebra de vidrio, el núcleo (cristal de silicio) es de esa clase de materiales. Algunas fibras de vidrio tienen un diámetro de núcleo de únicamente 50 micras, y tiene un índice de refracción de tipo gradual. Con esto se consigue un núcleo que posee un ancho de banda algo mayor que el que tendría otro cuyo índice de refracción fuera idéntico en todas partes.

Una vez se tiene el núcleo y con el fin de retener la luz dentro de él, se necesita recubrirlo con alguna clase de material, de un índice de refracción diferente. Si no se hiciera, no se obtendrían las reflexiones necesarias. De este modo, se forma un revestimiento sobre el núcleo (silicona), que tiene un índice de refracción menor que el del núcleo. Finalmente, para hacerlo más robusto y prevenir daños a la cubierta, se suele formar un recubrimiento sobre el revestimiento que generalmente es de algún tipo de material plástico (poliuretano), el cual posee un índice de refracción mayor que el del revestimiento.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Una banda de paso muy ancha, lo que permite flujos muy elevados.</li> <li>• Pequeño tamaño, ocupa poco espacio.</li> <li>• Gran ligereza, nueve veces menos pesado que el cable coaxial.</li> <li>• Una inmunidad total a las perturbaciones de origen electromagnético, lo que indica buena transmisión de la información.</li> <li>• Gran seguridad, no produce radiaciones.</li> <li>• No produce interferencias.</li> <li>• Insensibilidad a los parásitos.</li> <li>• Una atenuación lineal pequeña, lo que permite salvar distancias importantes sin elementos activos intermedios.</li> <li>• Gran resistencia mecánica, al calor, al frío y a la corrosión.</li> <li>• Facilidad para localizar los cortes, localiza rápidamente la avería, y reduciendo así los costes de mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipos terminales aún demasiado costosos, debido a la alta tecnología usada en equipos de montaje, instalación y comprobación de líneas y tendidos de fibra óptica.</li> <li>• La especialización del personal encargado de realizar las soldaduras y empalmes.</li> <li>• La temperatura, las fibras ópticas se pueden utilizar, con garantía, en un intervalo entre <math>-10^{\circ}\text{C}</math> y <math>+50^{\circ}\text{C}</math>.</li> <li>• Fragilidad de las fibras.</li> <li>• Disponibilidad limitada de conectores.</li> <li>• Dificultad de reparar un cable de fibras roto en el campo.</li> </ul>



En el interior de la fibra, la luz se transmite mediante múltiples reflexiones totales en la superficie de separación entre el núcleo y el revestimiento. Para que pueda producirse reflexión total en la superficie interna del núcleo, éste debe tener un índice de refracción mayor que el del revestimiento. De este modo, los rayos luminosos se transmiten por el interior del núcleo experimentando múltiples reflexiones totales con la superficie interna de éste sin experimentar casi atenuación, pues hay una ausencia total de refracción y por lo tanto de fugas por el revestimiento. Cada uno de los caminos que la luz experimenta por el interior del núcleo se denomina **modo**.

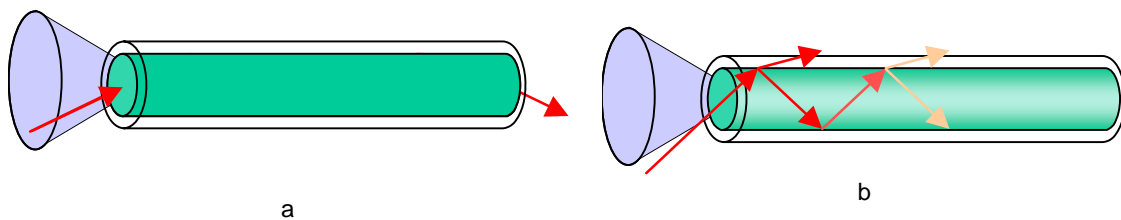


Figura 12-28: En a el haz luminoso incide con un ángulo inferior al límite y no hay refracción entre núcleo y revestimiento. En b el ángulo es superior al límite y parte del haz se refracta, atenuándose rápidamente.

### Apertura numérica

Los rayos luminosos deben entrar en la fibra con un ángulo menor que cierto valor denominado ángulo de aceptación  $\theta_a$ ; si el ángulo es mayor se refractará por el revestimiento. Su valor puede obtenerse así:

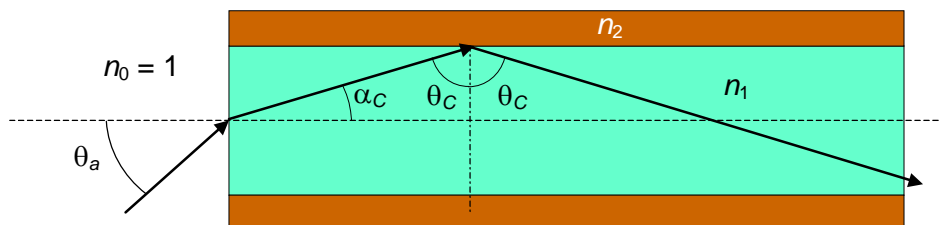


Figura 12-29: Apertura numérica

$$\frac{\text{sen } \theta_a}{\text{sen } \alpha_c} = n_1; \text{ sen } \theta_a = n_1 \text{ sen } \alpha_c = n_1 \cos \theta_c = n_1 \sqrt{1 - \text{sen}^2 \theta_c}$$

$$\text{sen } \theta_a = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Al este valor se le denomina **apertura numérica**

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

### Ejemplo 2

Calcula la apertura numérica y el ángulo de aceptación correspondiente

a un cable de fibra óptica con un núcleo de índice de refracción 1,45 y un revestimiento con índice de refracción 1,42.

*Solución:*

$$AN = \text{sen } \theta_a = \sqrt{1,45^2 - 1,42^2} = 0,293$$

$$\theta_a = \text{arcsen}(0,293) = 17,06^\circ$$

## Tipos de fibra

Cada una de las trayectorias de los rayos luminosos a lo largo de la fibra se denomina modo. Así se dice que hay fibras multimodo o fibras monomodo.

a) De salto de índice. Se trata de una fibra multimodo, donde la transmisión de la luz va chocando continuamente contra las paredes del revestimiento siendo reflejada de nuevo hacia el núcleo, es el más económico pero también es el que más pérdidas tiene y ancho de banda más estrecho. Son las más utilizadas en enlaces de distancias cortas, de menos de 1 km, y su aplicación más importante está en las redes locales.

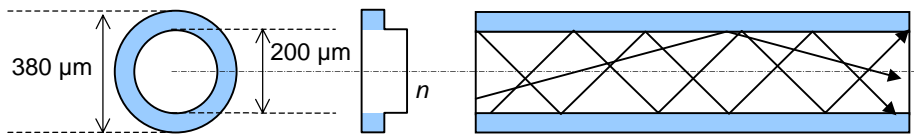


Figura 12-30: Esquema de una fibra óptica de salto de índice

b) De gradiente de índice. En este tipo de fibras el revestimiento no mantiene un índice de refracción constante, sino que va aumentando progresivamente desde el centro del núcleo hacia fuera, ésta técnica produce una refracción gradual a medida que los rayos van penetrando en el recubrimiento, presenta un mayor ancho de banda y menor pérdida de información que la anterior. Son las empleadas para distancias menores de 10 km.

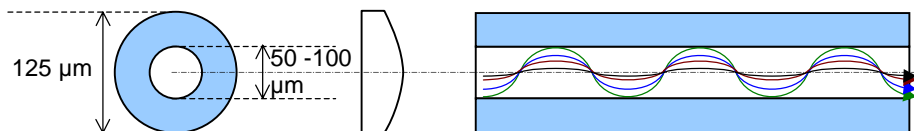


Figura 12-31: Esquema de una fibra óptica de gradiente de índice

c) Fibra monomodo. Consiste en hacer el núcleo tan fino que sólo un rayo de luz viaje a través de la fibra, es el más caro, tiene mayor ancho de banda que los dos anteriores, y como es evidente posee pérdidas menores. Es el mejor para distancias largas pero es de difícil manejo y mantenimiento.

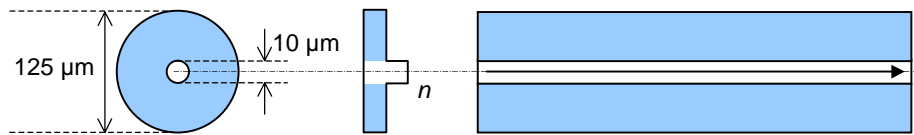


Figura 12-32: Esquema de una fibra óptica monomodo

## Atenuación y distorsión

La señal luminosa situada va a experimentar pérdidas de energía y modificaciones al desplazarse por la línea. Vamos a analizar las distintas causas.

**Atenuación.** Se debe a causas intrínsecas como la composición del vidrio, impurezas, imperfecciones, etc, y extrínsecas como el mal cableado, las curvas excesivas, empalmes incorrectos, etc. Todos estos factores provocan que la señal pierda energía. Para evitar que la señal se debilite se colocan repetidores, dispositivos que le vuelven a dar energía a la señal. Un repetidor de fibra es aquel que toma una señal de luz, la convierte a señal eléctrica, la regenera y la transforma en un dispositivo de emisión de luz para que se siga propagando.

Se define la atenuación como la pérdida de potencia óptica en una fibra, se mide en decibelios, dB y dB/km, y viene definida por:

$$\alpha = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_e}$$

siendo  $P_s$  la potencia a la salida, y  $P_e$  la potencia a la entrada.

Así, un pérdida del 50% de la potencia de entrada equivale a -3 dB, siendo normales pérdidas de 2,5 dB/km.

**Difusión.** Cuando la luz atraviesa un medio material, parte de la energía del haz luminoso interactúa con las moléculas del medio, originándose una nueva emisión de luz. Este fenómeno es conocido como **difusión de Rayleigh** y ocasiona pérdidas de energía. La energía difundida, y por tanto perdida, es inversamente proporcional a la longitud de onda:

$$\text{pérdidas} \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

hecho que origina que la luz azul se difunda más que la luz roja, y que explica entre otras cosas que el cielo sea azul. Por esta causa, es más conveniente usar una longitud de onda grande (roja o infrarroja) para introducir luz en la fibra. Así por ejemplo, para el cuarzo, la atenuación por difusión es de 4,8 dB/km para una luz de 630 nm, mientras que para 1300 nm es de solo 0,3 dB/km.

**Dispersión cromática.** Es el fenómeno que se produce debido a la variación del índice de refracción con la longitud de onda y a la diferente velocidad de propagación de los distintos modos.

La velocidad de propagación o el índice de refracción depende de la longitud de onda, y como consecuencia, aunque por la fibra viaje una señal de luz monocromática de longitud de onda  $\lambda$ , ésta va a tener un cierta anchura de banda  $\Delta\lambda$ , y aunque ésta sea muy pequeña, va a ocasionar una diferente velocidad de propagación de las diferentes longitudes de onda que viajan por la fibra y por lo tanto una dispersión de la señal.

Si la dispersión cromática es alta, los pulsos ópticos tienden a expandirse en el tiempo y provocar interferencia, lo cual puede producir una velocidad de transmisión de bits inadecuada.



Figura 12-33

## Aplicaciones

Las aplicaciones de la fibra óptica han revolucionado las grandes redes de comunicaciones, siendo el medio de conexión entre los grandes nodos, para largas distancias y redes metropolitanas de banda ancha. Esto posibilita servicios de internet, teléfono y televisión a nivel global. Otras aplicaciones directas en informática son la creación de buses de datos de fibra óptica, redes industriales tolerantes a fallos, etc.

## 12.4 Almacenamiento óptico

Actualmente el almacenamiento óptico de información se efectúa en los discos ópticos, nombre que incluye distintos tipos; los CD-ROM que son grabados en el momento de su fabricación y no pueden ser borrados, los WORM que son grabados por el usuario pero no pueden ser borrados, los WMRA, basados en varias tecnologías, que pueden ser borrados y reescritos múltiples veces y los DVD.

### Interferencias de ondas

Cuando dos ondas de la misma frecuencia concurren en un punto, la onda resultante tiene una amplitud que depende de la diferencia de fase entre las dos ondas. En particular, si la diferencia de fase es 0 o un número entero de múltiplos de  $360^\circ$ , las ondas están en fase y la amplitud resultante es la suma de las amplitudes de las ondas. Se trata de una interferencia constructiva. En cambio, si la diferencia de fase es  $180^\circ$  o un número impar entero de múltiplos de  $180^\circ$ , las ondas están desfasadas y la amplitud resultante es la resta de las amplitudes de las ondas. Se trata de una interferencia destructiva.

En muchas ocasiones, las interferencias son producidas por las diferentes distancias que una onda y su reflejada recorren en cierta trayectoria. Así, la interferencia resultante entre una onda y su reflejada tras recorrer ésta última una distancia que sea un múltiplo entero impar de longitudes de onda será constructiva, ya que las dos ondas concurren en fase. En cambio, si la diferencia de las dos distancias es un múltiplo entero de medias longitudes de onda, las dos ondas concurrirán en oposición de fase y la interferencia será destructiva.

En esta propiedad se basa la lectura de información óptica en los discos compactos. La información se graba en discos reflectantes en forma de diminutas hendiduras, leyéndose desde abajo, grabándose en forma de salientes (pits) y no salientes (lands). La altura de los salientes es siempre la misma,  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda del láser, de este modo la onda que va a la zona sin saliente recorre  $\frac{1}{4}$  de longitud de onda, se refleja y recorre otro  $\frac{1}{4}$ , lo que nos devuelve una onda desfasada media longitud de onda, respecto de la que incide en un saliente, produciéndose de esta forma una interferencia destructiva entre las dos ondas.

## Los discos ópticos

El almacenamiento de información por medios ópticos se realiza mediante la grabación de la información en discos mediante diversas tecnologías, de tal modo que no es posible englobar todos ellos en un mismo apartado. Según la tecnología usada en la lectura/escritura distinguiremos varios tipos:

- a) CD-ROM
- b) WORM
- c) WMRA
- d) DVD

No obstante presentan algunos aspectos comunes. Sobre un soporte de plástico, policarbonato, se graba la información en formato binario según una tecnología determinada en una secuencia que forma una espiral continua o pistas concéntricas. La información es grabada/leída por un haz de luz láser.

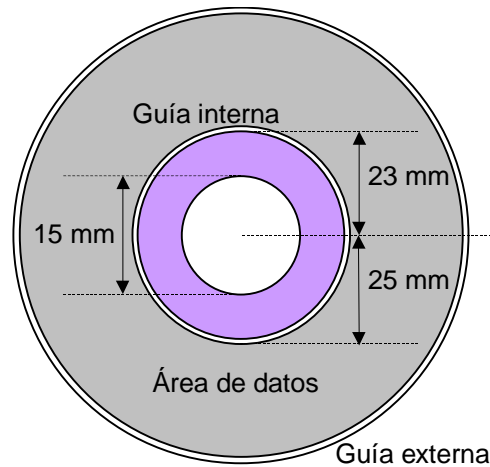


Figura 12-34: Esquema de un disco óptico

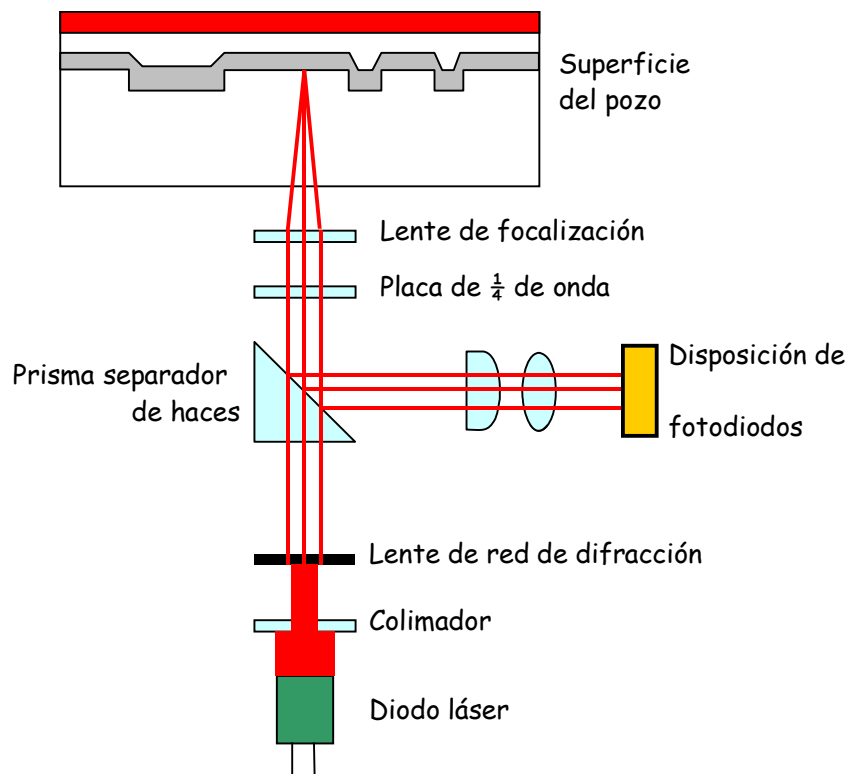


Figura 12-35: Esquema del sistema de lectura de un disco óptico

A continuación, veamos con más detalle cada uno de los distintos tipos de disco.

## Tipos

### a) Los CD-ROM (*Compact Disk-Read Only Memory*).

Son los primeros que aparecieron en la década de 1990 y se caracterizan porque no es posible reescribir en ellos. En cambio tienen algunas ventajas:

- Ausencia de fricción por el cabezal de lectura.
- Resistencia a las temperaturas altas y bajas.
- Autocorrección de errores mediante algoritmos.
- Integridad de los datos.
- Bajo coste de producción y distribución.
- Su fácil manejo, acceso aleatorio, variedad de tipos de archivo de datos en que es posible guardar.
- Su portabilidad.

La estampación de la información se hace siguiendo una espiral continua de salientes y valles por una sola cara. Esta superficie se recubre con una capa fina de aluminio, que al ser reflectante, permite al láser de la cabeza lectora leer los datos. El aluminio sufre, a veces, problemas de corrosión, por este motivo, algunos fabricantes lo han sustituido por oro o platino. La integridad de los datos está protegida por una cobertura de acrílico, es decir, de laca, para reducir la posibilidad de que alguno de los pozos se llene o se creen otros nuevos. Por último, la parte de arriba es la superficie en la que se puede escribir o imprimir la etiqueta.

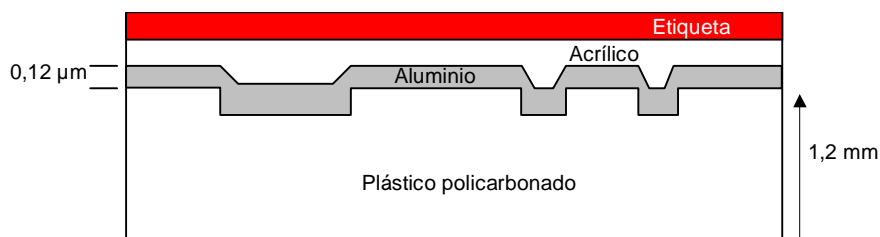


Figura 12-36: Esquema transversal de un disco óptico

La información se graba en sistema binario en una pista con forma de espiral desde el interior del disco hacia la parte externa. Los ceros y unos se graban en forma de llanuras y salientes, de tal modo que un “uno” consiste en la transición de una llanura a un saliente o viceversa. La ausencia de transiciones indica una serie continua de “ceros”. De este modo se consigue minimizar el tiempo necesario para escribir en el disco.

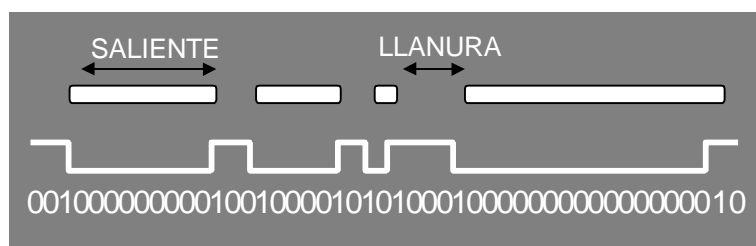


Figura 12-37: Esquema de salientes/llanuras para la representación de información binario en un disco óptico



Se fabrican mediante la creación de un molde con un láser de alta potencia para producir los valles y los salientes. Los discos así creados son leídos por un dispositivo emisor/lector basado en luz láser de menor potencia, que emite un haz de luz monocromática con una longitud de onda dependiente de la separación de pistas. Un fotodiodo lector mide la intensidad reflejada. Las variaciones de intensidad luminosa reflejada como consecuencia de las interferencias son interpretadas como transiciones entre valles y salientes y por lo tanto como "unos". La ausencia de cambios de intensidad son "ceros". De este modo se minimiza el tiempo consumido en crear valles y así se escribe más deprisa.

Las llanuras tienen un ancho de  $0,6 \mu\text{m}$ , y su profundidad es de  $200 \text{ nm}$  (para un láser de  $850 \text{ nm}$ ). La longitud de los salientes y llanuras es del orden de los  $0,9 \mu\text{m}$  a  $3,2 \mu\text{m}$ . La distancia entre dos pistas adyacentes es del orden de  $1,6 \mu\text{m}$  (400 pistas por milímetro).

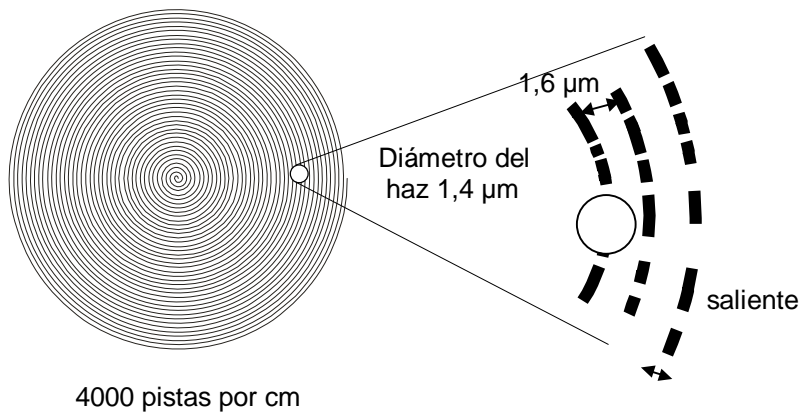


Figura 12-38: Esquema de la pista de un disco óptico, con sus dimensiones aproximadas

La densidad

de información o cantidad de bits por unidad de longitud (bits/cm) se mantiene constante en todo el disco, lo que requiere que el disco no gire a velocidad angular constante, sino en función de la distancia al centro de donde se halle la información: a mayor distancia al centro menor velocidad angular para que la velocidad lineal o velocidad de adquisición de datos sea constante. Esta velocidad es de  $1,2 \text{ m/s}$ .

### b) Los WORM (*Write Once Read Many*)

Los WORMs (*Write Once Read Many*) son discos ópticos en los que sólo se puede escribir una vez. A diferencia del CD-ROM, el usuario puede grabar en el disco aunque no puede borrarlo. Se les conoce en el mercado como CD-R (*Compact Disc Recordable*).

El disco tiene una película de pigmento orgánico (ftalocianina o cianina) que es opaco cuando no ha sido alterado. En el proceso de grabación, el haz láser incide sobre el pigmento que se decolora para siempre como consecuencia del calor en un proceso irreversible. De este modo se simulan salientes y valles como si se tratase de un CD-ROM a base de crear zonas decoloradas o no y que posteriormente, en el proceso de lectura, reflejarán el haz láser lector de distinto modo, pues las zonas decoloradas producen una reflexión similar a la de un saliente.

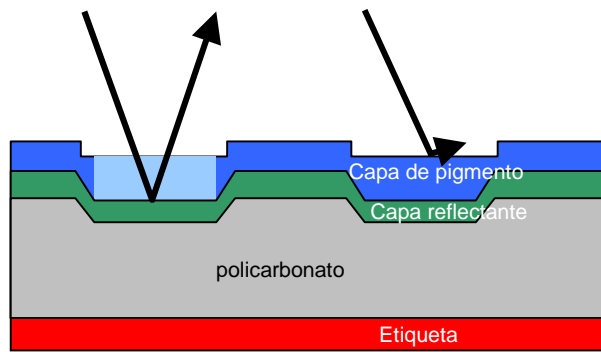


Figura 12-39: Esquema de un disco óptico WORM

### c) Los WMRA (*Write Many Read Always*)

Estos discos aparecieron a fines de la década de 1990, pudiéndose escribir y borrar en ellos de modo ilimitado. En el mercado se conocen como discos CD-RW (CD *ReWritable*). Se basan en dos tecnologías principalmente: la magneto-óptica y de cambio de fase.

Los primeros están formados por una fina capa de material ferromagnético y reflectante, protegida entre 2 capas de policarbonato transparente. La información se almacena en el material ferromagnético en pistas concéntricas, a diferencia de los ópticos que tienen las pistas en espiral. Por este motivo, y para leer/escribir la información a velocidad constante, los discos giran con velocidad angular constante, igual que los discos magnéticos.

La escritura está basada en la utilización de un haz de láser que calienta un material ferromagnético por encima de la **temperatura de Curie**. Recordemos que en un material ferromagnético se

Material Ferromagnético	Temperatura de Curie
Hierro	1043 °C
Cobalto	1403 °C
Níquel	630 °C
Gadolinio	290 °C
EuS (Sulfuro de Europio)	17 °C

forman dominios magnéticos microscópicos donde los momentos dipolares magnéticos están alineados de forma permanente. En una situación así, es necesario un campo magnético coercitivo  $B_C$  para perder la magnetización. Si se aumenta la temperatura, la agitación térmica puede destruir la alineación de los dominios, lo que ocurre por encima de una temperatura determinada, denominada temperatura de Curie o temperatura para la cual el material ferromagnético pierde su magnetización.

De este modo, en el proceso de grabación se calienta la zona por encima de la temperatura de Curie seguida de un enfriamiento en un campo magnético, invirtiendo así un dominio magnético para indicar un “uno” y dejándolo igual para marcar un “cero”. Para poder hacer esto, se necesita llevar todos los dominios a cero, lo que significa que para grabar datos, es necesaria una pasada previa de borrado, calentando a la temperatura de Curie antes de la escritura.

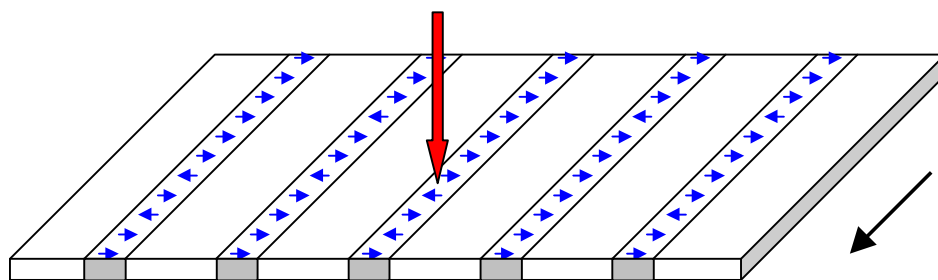


Figura 12-40

La lectura de los datos almacenados está basada en el **efecto Kerr**. Cuando un haz luminoso pasa por una región del espacio con un campo magnético o eléctrico, algunas propiedades ópticas se ven alteradas, en particular la dirección del plano de polarización. Cuando el haz luminoso del láser lector incide en una zona magnetizada en una dirección (un “uno”) es reflejada con su plano de polarización con una orientación diferente a si está magnetizada en otra dirección.

La **tecnología de cambio reversible de fase** está basada en la propiedad que poseen ciertas aleaciones de telurio, indio, plomo, etc, de pasar del estado amorfo al cristalino si se alcanza la “temperatura transición” (100 °C ó más); y de volver de cristalino a amorfo, si se alcanza la “temperatura de fusión” y se deja enfriar.

Para escribir un uno, el láser de baja potencia calienta la zona hasta la temperatura de transición. Si el estado de la zona era amorfo, pasa a cristalino; y si era cristalino, queda igual. Un “cero” se escribe calentando la zona hasta la temperatura de fusión, usando el láser con alta potencia. Al enfriarse pasa al estado amorfo, y si estaba en ese estado volverá al mismo.

La lectura de las pistas así grabadas se realiza recorriéndolas con el láser con una potencia bastante menor. La luz láser reflejada es interpretada por los cambios de intensidad. Una zona en estado cristalino refleja el 70% de la luz incidente, y en estado amorfo el 18%.

Hay que subrayar que esta tecnología es completamente óptica, sin magnetismo, requiriéndose un solo proceso para escribir, a diferencia de la magneto-óptica, donde se necesita borrar (escribir todos ceros) y luego escribir los unos.

#### **d) Los DVD (*Digital Versatile/Video Disk*)**

La tecnología de los DVD es una prolongación de la de los CD consistente básicamente en la miniaturización. Sin extendernos en detalles, se fabrican DVD basados en la tecnología de salientes y valles, así como basados en la utilización de pigmentos, sobre todo la ftalocianina. El láser utilizado es lógicamente de longitud de onda menor, puesto que la capacidad de resolución es directamente proporcional a la longitud de onda de la luz: un láser de longitud de onda menor es capaz de resolver salientes/valles de menor tamaño, y por tanto se puede condensar más la información.

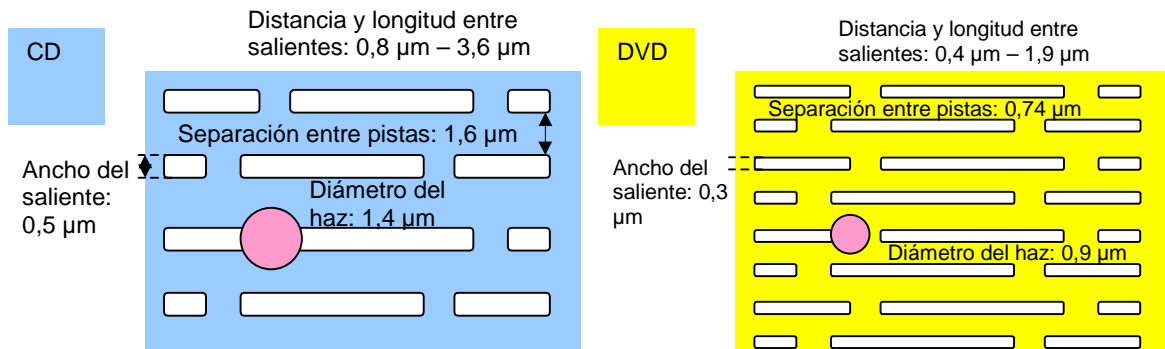


Figura 12-41: Esquema comparativo de las dimensiones de un CD y un DVD

## 12.5 La fotografía digital: el sensor CCD

Tanto las cámaras digitales (fotográficas o de video) como los escáneres son dispositivos cuya finalidad es la digitalización de las imágenes del mundo real.

La tecnología para la digitalización de la imagen en las cámaras digitales es el sensor CCD [Kodak,2001], aunque algunas cámaras réflex-digital y web-cams están basadas en sensores CMOS [Wikipedia,2007].

El Dispositivo de Carga Acoplado (CCD, Charged Coupled Device) es un dispositivo fotosensible inventado por W.S. Boyle y G.E. Smith en los laboratorios BELL en 1969. Si bien el propósito inicial fue crear un nuevo circuito de memoria para ordenadores, su utilidad más extendida deriva de la observación astronómica, ya que en 1976 J. Janesick y B. Smith obtuvieron imágenes digitales de Júpiter, Saturno y Urano con un sensor CCD acoplado a un telescopio de 62 pulgadas. En la actualidad, el sensor CCD se ha convertido en la tecnología básica de la adquisición de imágenes en formato digital.

### La arquitectura CCD

Las cámaras digitales están provistas de una matriz de detectores (o píxeles, ver Figura 12-42) que pueden capturar la imagen entera en un mismo instante. La arquitectura más simple es el dispositivo Full-Frame (FF) Transfer and Frame-Transfer (ver Figura 12-43). El CCD FF consiste en un registro de desplazamiento CCD paralelo, un registro de desplazamiento CCD serie y un amplificador de señal como salida.

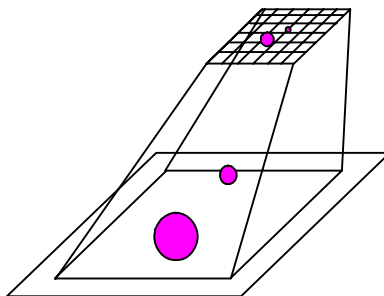


Figura 12-42: Esquema de la matriz CCD capturando la escena

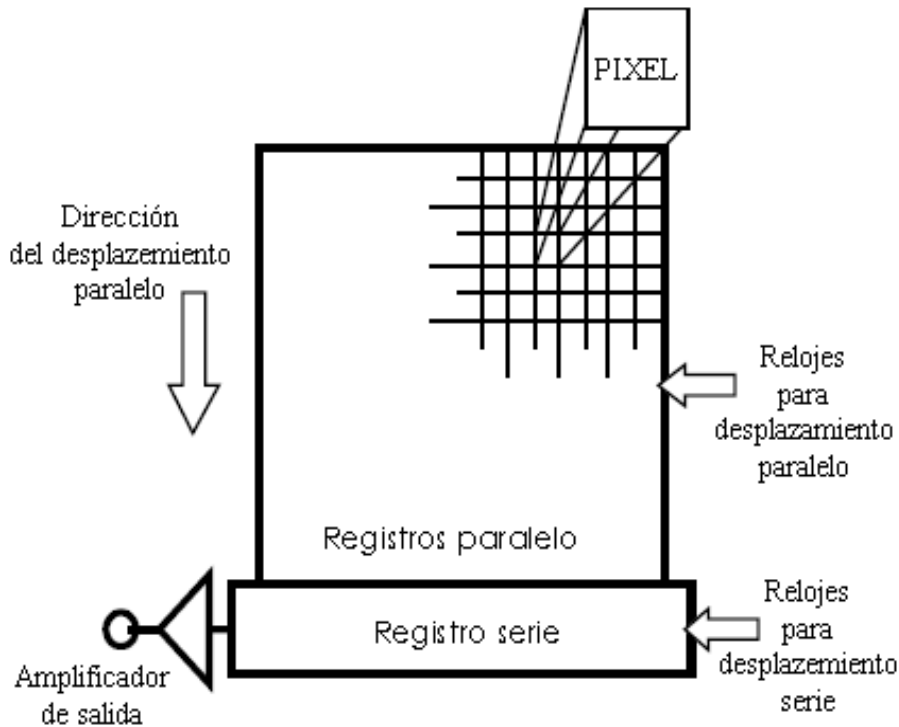


Figura 12-43: Esquema básico de un CCD-FF

La imagen es proyectada en el plano de la matriz, y el CCD la cuantifica en elementos discretos, definidos por el número de detectores (o píxeles). Una vez adquirida la imagen, la información debe ser procesada y llevada hasta el almacenamiento permanente del dispositivo. La información correspondiente a las filas es desplazada en paralelo hacia el registro de desplazamiento CCD serie, que a continuación desplazará la fila de información al amplificador de salida como una cadena de información en serie. Así pues, la información de la última fila de píxeles entra en el registro serie, y cada fila de píxeles queda almacenada en la siguiente fila de píxeles. Este proceso de desplazamiento paralelo-serie se repite hasta que todas las filas han sido transferidas por el amplificador de salida, quedando la información disponible para su procesamiento por el resto de sistema y la matriz CCD libre para un nuevo disparo.

### El condensador MOS, base del CCD

Los píxeles son utilizados tanto para la detección de la escena (captura de la luz) como para el desplazamiento de la información a través de las columnas de la matriz. A continuación estudiaremos los fundamentos físicos de la generación de fotoelectrones y su desplazamiento hasta la puesta de salida del dispositivo CCD. Para ello estudiaremos la estructura del fotocondensador MOS y su utilidad cuando situamos varios en un vector.

La **estructura MOS** (ver Figura 12-44 a) consiste en una lámina de metal apilado verticalmente encima de un semiconductor de tipo p separados por un material altamente dieléctrico. Para caracterizar su comportamiento, conectamos la estructura MOS a un potencial variable  $V$  aplicado en el electrodo su-

perior y un potencial de referencia en otro electrodo situado en la parte inferior del semiconductor [Wie,1997].

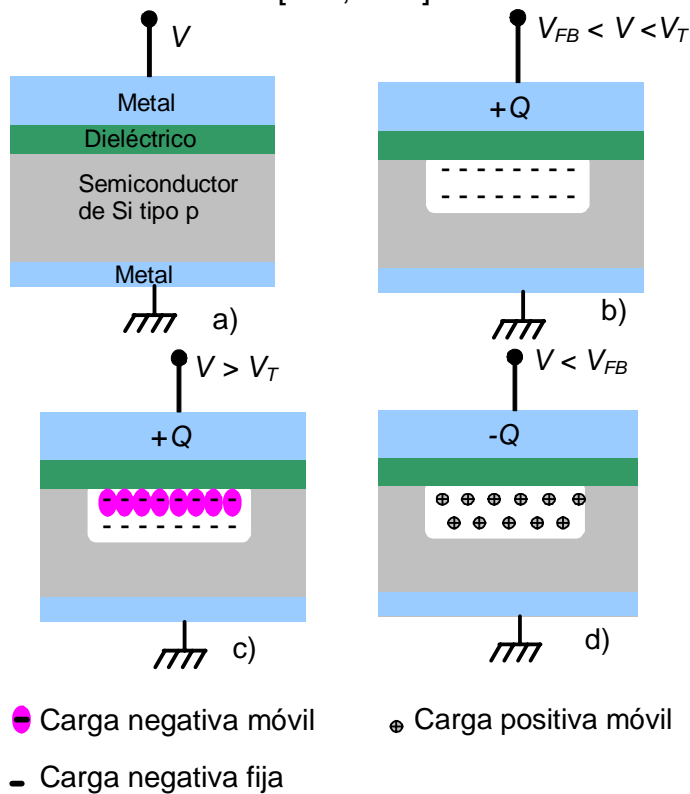


Figura 12-44: a) estructura MOS; b) condición de capa agotada: sin cargas libres; c) condición de inversión: capa de carga negativa; d) condición de acumulación: capa de huecos

es la base del confinamiento y desplazamiento de la carga producida en cada píxel en los CCDs.

Si se sigue aumentando el voltaje  $V$  por encima de un umbral  $V_T$  ( $V > V_T$ , ver Figura 12-44: a) estructura MOS; b) condición de capa agotada: sin cargas libres; c) condición de inversión: capa de carga negativa; d) condición de acumulación: capa de huecos c), se acumula una carga negativa cercana al dieléctrico. Debido a la aparición de portadores de carga negativa (electrones), a esta región se la denomina *capa de inversión*.

Cuando se aplica un  $V < 0$  (ver Figura 12-44 d), el metal acumula carga negativa  $-Q$ , que atraerá a los huecos del semiconductor situado al otro lado del dieléctrico. Se genera así la llamada *capa de acumulación*.

### Exposición, contención y desplazamiento de la imagen

La incidencia de un fotón en el material semiconductor crea un par electrón-hueco si la energía del fotón es mayor que la energía de discontinuidad. Las cargas positivas (huecos) serán arrastradas hacia el fondo del semiconductor, mientras que los **fotoelectrones** (electrones libres recién creados) formarán una carga localizada en las cercanías de la interfaz con el dieléctrico, denominada canal n. El número de fotoelectrones creados en el canal n del MOS es directamente proporcional a la intensidad de la luz en el rango de longitudes de onda del color del píxel durante tiempo de exposición. Esta carga se traducirá a un valor discreto de la intensidad en la escena para ese píxel.

Cuando se aplica de un voltaje  $V$ , tal que  $V_{FB} < V < V_T$  (ver Figura 12-44 b), el metal se carga positivamente con una carga  $+Q$  que repele las cargas positivas libres (huecos) del semiconductor p. Como consecuencia, la región del semiconductor cercana al dieléctrico quedará vacía de cargas móviles por lo que se le denomina *capa agotada*. La carga de esta capa corresponderá a la de los iones negativos del dopado  $p$ , y la anchura de la misma puede aumentar con el aumento del voltaje  $V$ . Cuanto mayor es el voltaje aplicado en el metal, menores se harán los niveles de energía en la capa agotada [Wie,1997]. Este principio

Un CCD está compuesto por una **matriz de condensadores MOS** que comparten la capa del semiconductor con electrodo situado en su parte inferior conectado a tierra. Si el electrodo superior de un MOS se conecta a un voltaje  $V_1 > V_{FB}$ , se establecerá una *capa agotada* donde pueden contenerse los fotoelectrones. Además, si este MOS tiene adyacentes MOS conectados a  $V_0$ , tal que  $V_0 < V_1$ , los niveles de energía en el canal  $n$  serán menores que aquellos situados a su alrededor, por lo que la carga quedará confinada por unas barreras de potencial que permiten su tratamiento controlado (ver Figura 12-45).

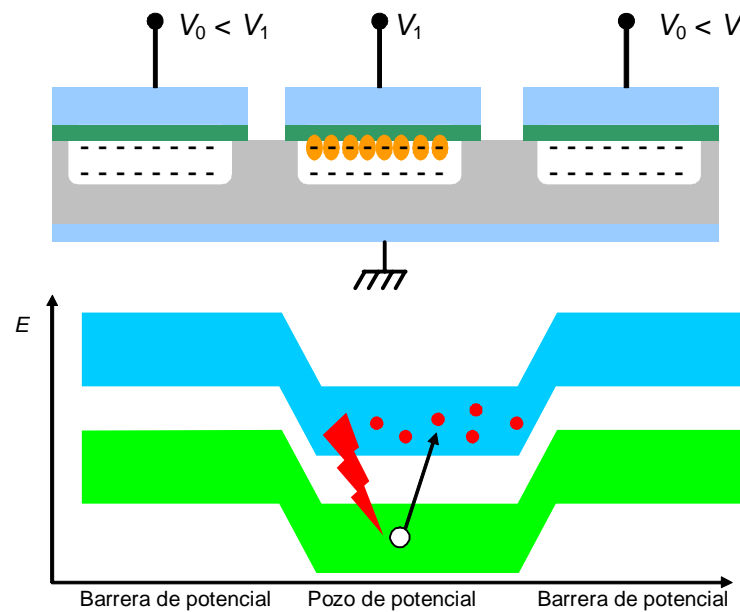


Figura 12-45: Confinamiento de los fotoelectrones en el pozo de potencial del canal  $n$  creado mediante los diferentes niveles de energía respecto a los MOS adyacentes. Los círculos rojos representan los fotoelectrones generados por la luz incidente en el semiconductor

Supongamos ahora que cuatro condensadores MOS están dispuestos en un vector (i.e. en una fila del CCD, ver Figura 12-46). Aplicamos al segundo de ellos una tensión  $V_1$  mayor que la del resto, que ponemos a  $V_0$ , obteniéndose en el segundo MOS una carga correspondiente a los fotoelectrones creados por la incidencia de la luz. A continuación, cambiamos el voltaje del tercer MOS a  $V_1$  con lo que bajamos la barrera de potencial y la carga puede difundirse a la región de este tercer condensador. Si ahora bajamos el voltaje del segundo MOS a  $V_0$  toda la carga quedará confinada en el tercer MOS, por lo que se habrán desplazado los fotoelectrones una posición a la derecha.

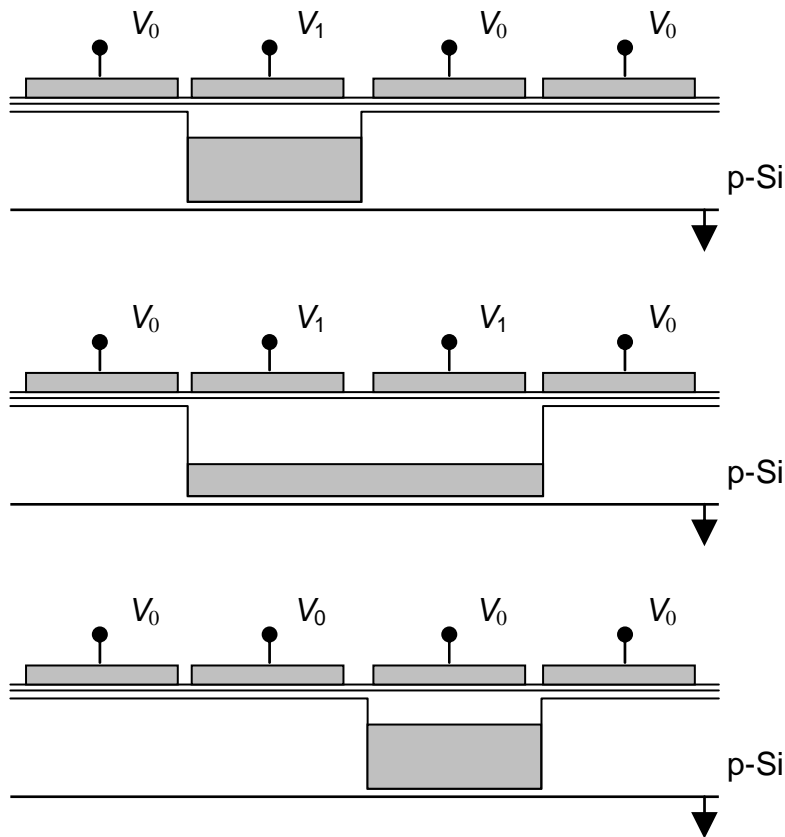


Figura 12-46: Desplazamiento de la carga hacia la derecha provocado por la modificación de las bandas de energía mediante los voltajes  $V_0$  y  $V_1$ . Las bandas de energía respecto al eje  $x$  están representadas por la línea gruesa negra, y la carga por el sombreado gris

El desplazamiento descrito anteriormente se implementa en el esquema **4-Phase CDD** mostrado en la Figura 12-47. Cada píxel está compuesto por 4 MOS. La captura de la imagen se realiza en los 2 primeros MOS, mientras las barreras de potencial son creadas por los MOS del vecino de la izquierda y los propios de la derecha. Los trenes de pulsos controlados por 4 relojes, van modificando los voltajes  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  y  $V_4$  de todos los píxeles del vector, realizando un desplazamiento completo de las cargas ( $Q_0$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$ ) en 4 ciclos de reloj. La repetición de los 4 ciclos tantas veces como columnas tiene la matriz, vaciará el CCD, pudiendo realizar una nueva adquisición.



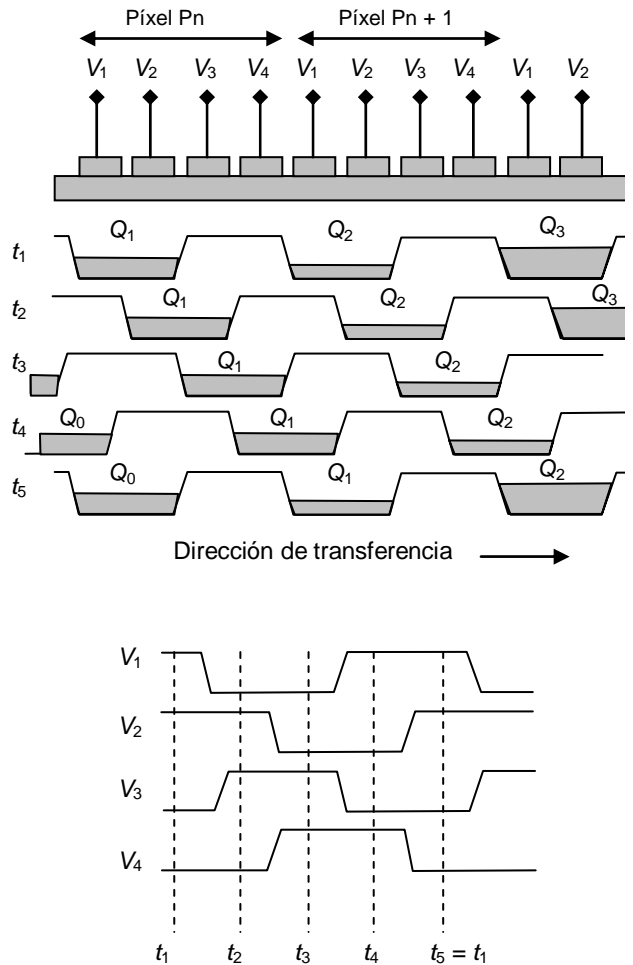


Figura 12-47: Desplazamiento de las cargas mediante el esquema 4-EPhase CCD

### El color digital

Un CCD no pueden distinguir por si mismo **colores**. Para generar una imagen en color, debe separarse la información de la imagen en 3 colores siguiendo el esquema del sistema primario de colores (RGB) o secundario (CMY) para poder recomponer el color de cada punto de la escena. Cada píxel se especializará en un color mediante filtros anteriores al CCD, que corregirán también la eficiencia cuántica de los sensores según la longitud de onda mediante tratamientos antirreflectantes o sustancias fluorescentes. La separación en 3 colores puede hacerse de varias formas: color secuencial, 3-chips o la máscara Bayer. Esta última (ver Figura 12-48), proporciona una trama para cada conjunto de cuatro píxeles de forma que un píxel registra luz roja, otro luz azul y dos píxeles se reservan para la luz verde (color más sensible al ojo humano). El resultado final incluye información sobre la luminosidad en cada píxel pero con una resolución en color menor que la resolución de iluminación.

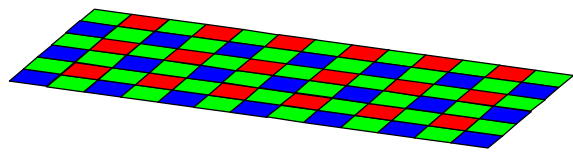


Figura 12-48: Máscara Bayer para la digitalización en color de imágenes

## Anti-blooming

Cuando se produce una sobre-iluminación en un píxel, la carga de fotoelectrones rebosa las barreras de potencial y produce un resplandor (blooming) en los píxeles adyacentes. Para evitar este fenómeno, algunos CCDs incorporan un sistema de drenaje de carga (ver Figura 12-49), que hace caer en un sumidero la carga sobrante del píxel. Un voltaje de drenaje definirá la profundidad del sumidero, y el voltaje de la puerta el nivel de saturación admitido.

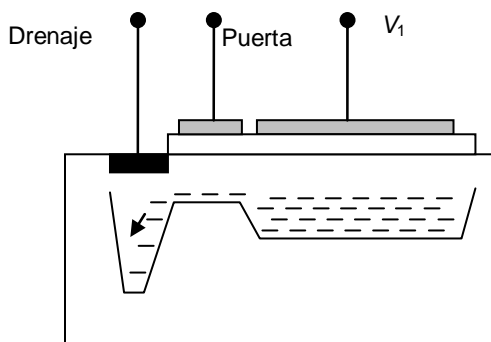


Figura 12-49: Sistema anti-blooming mediante el drenaje de carga

El CCD se ha convertido en la actualidad en uno de los componentes más utilizados en la industria de bienes de consumo (cámaras fotográficas, cámaras de video, escáneres, impresoras digitales, webcams, etc). El comportamiento de la estructura Metal-Oxido-Semiconductor (MOS) permite la implementación en dispositivos integrados de matrices de millones de sensores que, al mismo tiempo, realizan el desplazamiento controlado y eficiente de la información de la escena capturada para su digitalización.

## 12.6 Computación óptica

La computación óptica es una de las áreas de investigación en óptica más activas. Ya existen algunos dispositivos ópticos que se pueden utilizar en computación digital y, concretamente, para la creación de redes neuronales. Aunque todavía no son comparables en utilidad a sus equivalentes electrónicos, se está trabajando en el desarrollo de componentes ópticos para conseguir en el futuro el ordenador óptico. Para que la computación óptica se convierta en la alternativa o complemento de la electrónica se requiere la conmutación a alta velocidad de señales ópticas, que viajen cortas distancias y con bajas tasas de error.

Existen actualmente varios campos de trabajo. La computación óptica analógica se basa en el procesamiento de las señales mediante la óptica de Fourier [Saleh2001 pág 109]. El área de la interconexión óptica se encuentra en un estado bastante avanzado, utilizándose comercialmente la interconexión de máquina a máquina. El procesador digital óptico es el área de trabajo menos desarrollada.

La tecnología óptica integrada tiene como objeto el diseño de circuitos ópticos integrados de dimensiones reducidas, que actúan directamente sobre señales fotónicas alterando su amplitud, fase, frecuencia o polarización, sin

necesidad de una conversión electrónica intermedia. Así se pueden construir componentes elementales como acopladores direccionales, conmutadores, combinadores de señal, moduladores o filtros de longitud de onda.

### Conmutadores, biestables e interconectores

A continuación se introducen algunos dispositivos de procesamiento de señales luminosas: conmutadores ópticos, electroópticos y magnetoópticos, biestables ópticos (conmutadores con memoria, donde la salida en un instante depende de la entrada en dicho instante y en los anteriores) e interconectores ópticos en microelectrónica.

### Conmutadores electroópticos

Un conmutador establece y elimina conexiones en los sistemas de transmisión y procesamiento de señales. El conmutador más sencillo, de una entrada y una salida (1x1), puede utilizarse como elemento para construir conmutadores que actúan sobre N entradas y N salidas (ver Figura 12-50: Conmutadores 1x1, de una entrada y una salida (a); 1x2, de una entrada y dos salidas (b); 2x2, de dos entradas y dos salidas (c) y NxN, de N entradas y N salidas) Las señales ópticas pueden conmutarse mediante conmutadores electrónicos: la luz se convierte en señal eléctrica mediante fotodetectores y, una vez realizada la conmutación, convertida en luz de nuevo mediante LEDs o láseres. Pero todas estas operaciones introducen retrasos y gastos energéticos que pueden evitarse mediante la conmutación óptica directa.

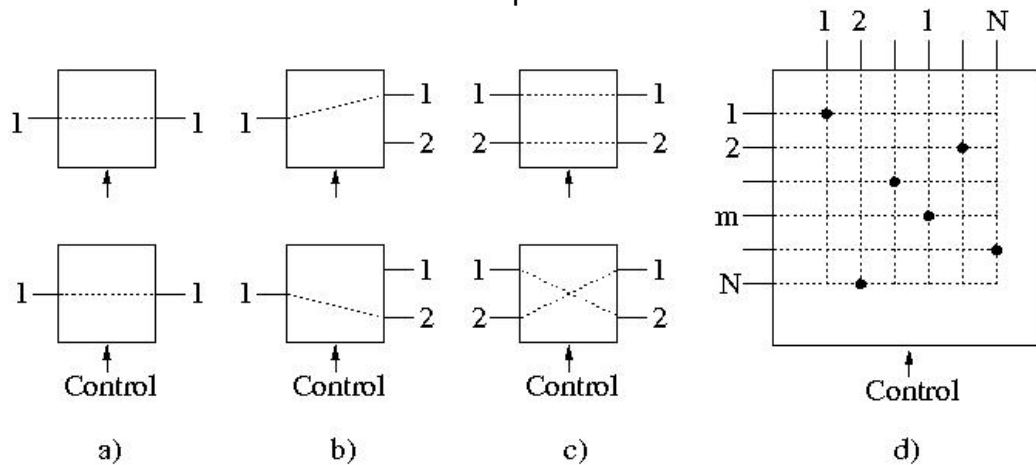


Figura 12-50: Conmutadores 1x1, de una entrada y una salida (a); 1x2, de una entrada y dos salidas (b); 2x2, de dos entradas y dos salidas (c) y NxN, de N entradas y N salidas

La conmutación óptica puede conseguirse mediante moduladores o deflectores, los primeros modifican la intensidad y los segundos la dirección del haz luminoso. Los conmutadores electroópticos se basan en materiales electroópticos, en los que el índice de refracción del material varía en presencia de un campo eléctrico (efecto Pockels y efecto Kerr [Soleh2001]). De esta manera, colocando un cristal de electroóptico en una de las ramas de un interferómetro (<http://es.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%B3metro>) o entre dos filtros polarizadores cruzados, el sistema resultante funciona como un conmutador 1x1. La conmutación electroóptica de más señales se puede realizar de forma integrada mediante sustratos como el  $\text{LiNbO}_3$  con regiones o guías de índice de re-

fracción mayor funcionando como fibras ópticas, formadas por difusión de titanio. (ver Figura 12-51)

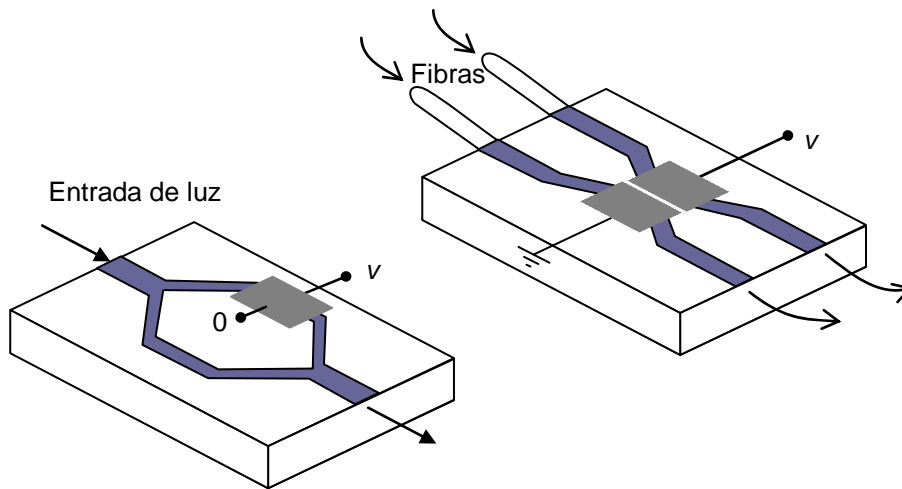


Figura 12-51: Conmutador 1x1 formado por un interferómetro Mach-Zehnder en óptica integrada (a) y conmutador 2x2 formado por un acoplador direccional electroóptico integrado

El acoplador direccional de la Figura 12-51 está formado por dos guías acopladas ópticamente (a corta distancia una de la otra). El índice de refracción se ajusta mediante un campo eléctrico para que la luz se mantenga por la misma guía o bien se transfiera a la guía próxima. Este dispositivo funciona como un conmutador 2x2 que alcanzan frecuencias mayores de 20 GHz y con tensiones de pocos voltios. Conmutadores mayores pueden construirse mediante combinaciones del anterior de forma integrada. Los principales problemas a resolver de esta tecnología son las relativamente grandes dimensiones de los acopladores ópticos, las pérdidas en la conexión con fibras ópticas y la necesidad de usar luz polarizada.

### Conmutadores magnetoópticos

Los materiales magnetoópticos modifican sus propiedades ópticas ante la aplicación de campos magnéticos. Por ejemplo, los materiales con efecto Faraday rotan el estado de polarización de la luz de forma proporcional a la componente del campo magnético en la dirección de propagación de la luz. Colocando dicho material entre polarizadores cruzados, la transmisión luminosa se controla mediante el campo magnético aplicado, formando un conmutador magnetoóptico 1x1.

Ya se utilizan actualmente materiales magnetoópticos en los discos magnetoópticos. En este sistema, el estado de magnetización del material se modifica al aplicar un haz de láser intenso. Para la lectura del disco se utiliza un haz polarizado de menor potencia.

Los conmutadores magnetoópticos están formados comúnmente por una lámina del material magnetoóptico, sobre la que actúan los campos magnéticos generados por corrientes que circulan por conductores sobre la superficie. Cambiando la dirección de magnetización se consigue que la luz pase o no. De esta manera se consiguen matrices de conmutadores 1000x1000 y mayores, con tamaños de celda en torno a 10  $\mu\text{m}$  y tiempos de conmutación de 100 ns. (ver Figura 12-52)

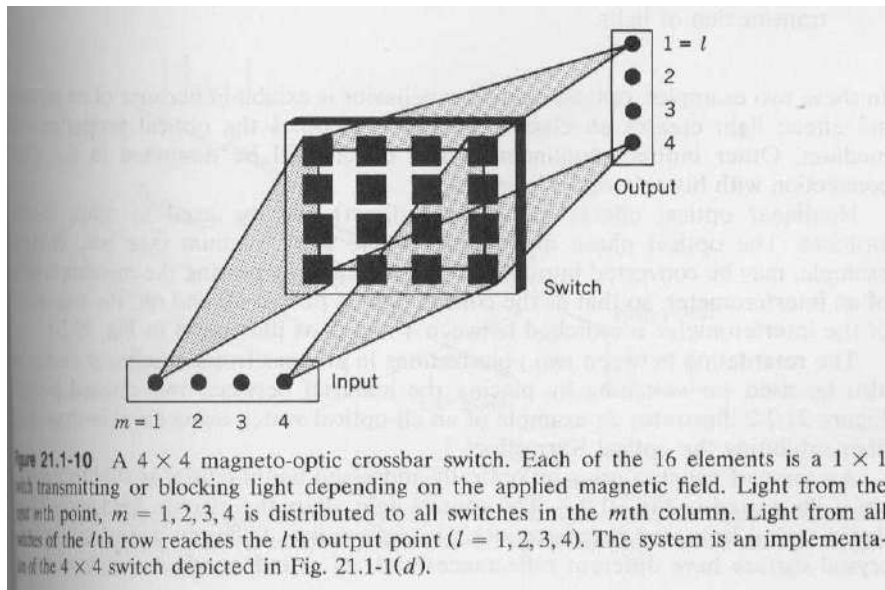


Figura 12-52: Conmutador magnetoóptico 4x4. Cada uno de los 16 elementos es un conmutador 1x1 que transmite la luz o no, dependiendo del campo magnético aplicado. Las señales de entrada  $m=1,2,3,4$  se distribuyen a los conmutadores de la columna  $m$ . La luz de los conmutadores de la fila  $l=1,2,3,4$  llega al punto de salida  $l$

### Conmutadores ópticos

En los conmutadores puramente ópticos el control de la luz se realiza mediante un material óptico no lineal, en el que la presencia de los campos electromagnéticos de la luz altera a nivel atómico o molecular sus características ópticas, bien variando el índice de refracción con la intensidad luminosa o bien modificando el coeficiente de absorción de la luz. Los primeros son elementos no lineales dispersivos, como en el efecto Kerr producido por el propio campo eléctrico de la onda luminosa y los segundos son elementos no lineales disipativos, en los que el coeficiente de absorción es función de la intensidad luminosa.

Otros efectos indirectos que pueden utilizarse en determinados materiales se basan en la generación de campos eléctricos en el material por migración de cargas inducida por la luz. Dichos campos eléctricos modifican las propiedades ópticas del material.

La modulación de la fase de la luz producida por efecto Kerr en un material puede convertirse en modulación de la intensidad colocando la celda Kerr en un interferómetro para convertirlo en un conmutador. (ver Figura 12-53) También se puede utilizar como conmutador óptico una fibra óptica anisótropa no lineal situada entre dos polarizadores cruzados. Cuando incide luz polarizada como señal de entrada, la presencia de la luz de control introduce un desfase que produce la rotación de dicha luz polarizada y la transmisión a través del segundo polarizador. Si no se aplica la luz de control no hay desfase en la de señal y no llega luz a la salida. Un filtro a la salida elimina la luz de control, de longitud de onda diferente a la de señal. Figura 12-53)

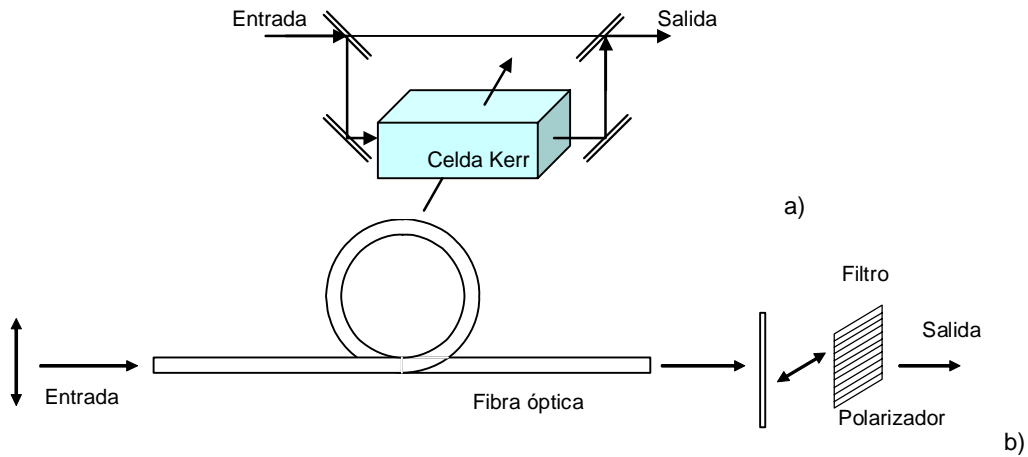


Figura 12-53: a) Conmutador óptico formado por un interferómetro de Mach-Zehnder y un material que presenta efecto Kerr. b) Fibra óptica anisótropa y no lineal utilizada como conmutador óptico. En presencia de la luz de control, la fibra produce un desfase de media longitud de onda de forma que la luz linealmente polarizada de entrada gira  $90^\circ$  y es transmitida por el polarizador de salida. Si no existe luz de control, la fibra no induce desfase en la señal y ésta es bloqueada por el polarizador de salida. El filtro es necesario para bloquear la luz de control, dejando pasar la luz de la señal, de distinta longitud de onda

### Biestables ópticos

Los dispositivos ópticos biestables pueden utilizarse como puertas lógicas ópticas y flip-flops, de manera similar a sus equivalentes electrónicos que forman parte de los circuitos de un ordenador. Un sistema biestable presenta a la salida uno de los dos valores correspondientes a sus dos estados estables posibles. El cambio de un estado a otro se consigue mediante la alteración de la entrada del sistema. Por ejemplo, cuando la entrada alcanza un determinado umbral, el sistema y su salida pueden cambiar del estado bajo al alto. Y cuando la entrada se reduce por debajo de otro valor crítico, el estado cambia al bajo, formando un ciclo de histéresis. (ver Figura 12-54). Este sistema se comporta como un flip-flop, su estado depende de su historia pasada. Dichos elementos se utilizan como conmutadores, circuitos secuenciales y elementos de memoria. Por ejemplo, se puede construir una puerta lógica AND a partir de la suma de dos pulsos de entrada seleccionando adecuadamente la relación entre los niveles de entrada y el nivel umbral, de manera que el sistema cambie al estado alto solamente cuando los dos pulsos aparecen simultáneamente, sumándose.

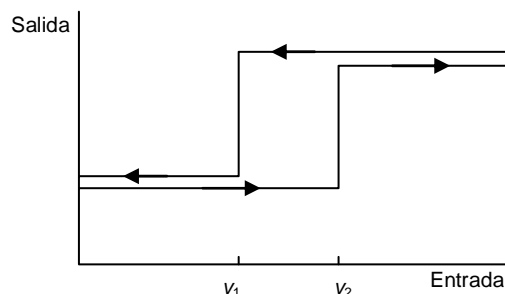
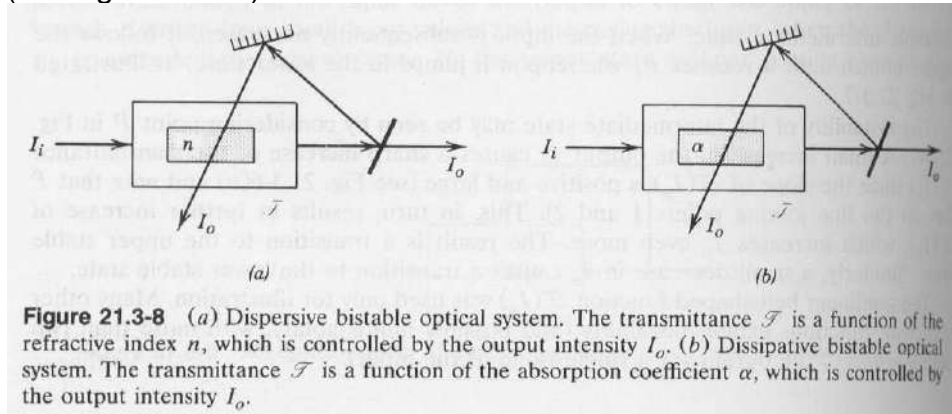


Figura 12-54: Relación entre entrada y salida en un sistema biestable

Se requieren dos características para que un sistema pueda funcionar como biestable: no linealidad y realimentación. Si la salida de un sistema óptico

no lineal se redirige a la entrada de dicho sistema como señal de control, el sistema se comportará como un biestable óptico. La transmisión de luz depende de la intensidad luminosa de salida. Los elementos ópticos no lineales que pueden utilizarse con este fin son similares a los utilizados para la conmutación óptica: elementos no lineales dispersivos, en los que el índice de refracción  $n$  depende de la intensidad luminosa (efecto Kerr) y elementos no lineales disipativos, en los que el coeficiente de absorción  $\alpha$  es función de la intensidad luminosa. (ver Figura 12-55)



**Figure 21.3-8** (a) Dispersive bistable optical system. The transmittance  $\mathcal{T}$  is a function of the refractive index  $n$ , which is controlled by the output intensity  $I_o$ . (b) Dissipative bistable optical system. The transmittance  $\mathcal{T}$  is a function of the absorption coefficient  $\alpha$ , which is controlled by the output intensity  $I_o$ .

Figura 12-55: a) Sistema óptico biestable dispersivo. La transmitancia  $\mathcal{T}$  es función del índice de refracción  $n$ , controlado a su vez por la intensidad luminosa de salida  $I_o$ . b) Sistema óptico biestable disipativo. La transmitancia  $\mathcal{T}$  es función del coeficiente de absorción  $\alpha$ , controlado a su vez por la intensidad luminosa de salida  $I_o$ .

Los materiales utilizados son los que exhiben efecto Kerr (vapor de sodio, nitrobenzono) aunque el coeficiente de no linealidad es bajo y, por tanto, se necesitan largas trayectorias de la luz, con lo cual el tiempo de respuesta se alarga. Algunos materiales semiconductores como el GaAs presenta una no linealidad más acusada, por lo que se obtienen tiempos de respuesta más cortos, del orden de picosegundos y pueden ser asociados en gran número sobre una superficie.

### Interconectores ópticos

Tanto los sistemas de procesamiento digital de señales como los de computación contienen un gran número de puertas lógicas, conmutadores y elementos de memoria, que se encuentran interconectados entre sí. En los sistemas electrónicos, las interconexiones se realizan utilizando cables conductores, coaxiales o canales de conducción en circuitos integrados de semiconductores.

De forma análoga, las interconexiones ópticas se pueden realizar mediante guías de onda ópticas, con acopladores ópticos integrados o acopladores de fibra óptica con microlentes. Las interconexiones ópticas se utilizan también en microelectrónica mediante los transductores adecuados (fuentes de luz y fotodetectores).

También se pueden realizar interconexiones ópticas en el espacio, a diferencia de las interconexiones electrónicas que requieren materiales conductores o el vacío, en cuyo caso los haces electrónicos no se pueden cruzar sin interactuar (fuerza eléctrica repulsiva).

Las interconexiones producidas en un buen sistema óptico pueden llevar la información de  $1000 \times 1000$  puntos independientes por  $\text{mm}^2$  en el plano objeto a otros  $1000 \times 1000$  puntos por  $\text{mm}^2$  en el plano imagen. Para realizar esta in-

terconexión eléctrica se necesitarían un millón de cables, con sus aislamientos, por  $\text{mm}^2$ . Sistemas ópticos sencillos como lentes o prismas pueden formar interconexiones básicas de distintos tipos, pero si se requiere un diagrama de interconexión arbitrario en general, se puede conseguir mediante hologramas generados por ordenador, formados por segmentos de redes de difracción con diferentes periodicidades y orientaciones (ver Figura 12-56).

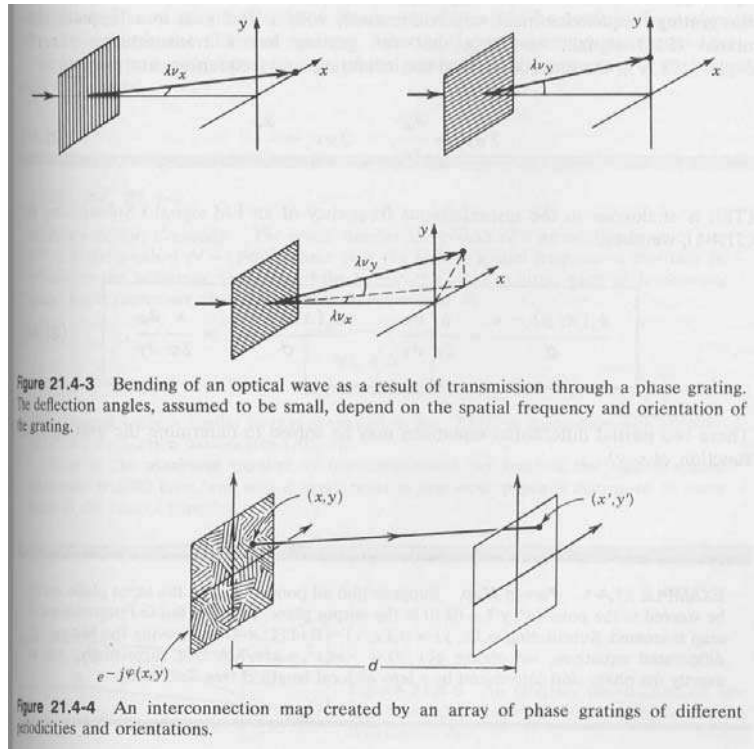


Figura 12-56: a) Desvío de la onda luminosa como resultado de su transmisión a través de una red de difracción. Los ángulos de deflexión (pequeños) dependen de la periodicidad espacial y la orientación de la red; b) Mapa de interconexión formado por una matriz de redes con diferentes periodicidades y orientaciones

Interconexiones de este tipo reconfigurables en el tiempo se construyen mediante dispositivos magnetoópticos y acusticoópticos, pero la densidad de interconexiones es menor. Los hologramas dinámicos son en la actualidad objeto de investigación.

El gran éxito de la fibra óptica para las comunicaciones entre ordenador y ordenador hace que se esté estudiando también para comunicaciones entre placas y entre chip y chip. Asimismo, dichas interconexiones y las conexiones internas en chips pueden realizarse en el espacio (ver Figura 12-57), evitando los retrasos y el gran volumen de las interconexiones eléctricas.



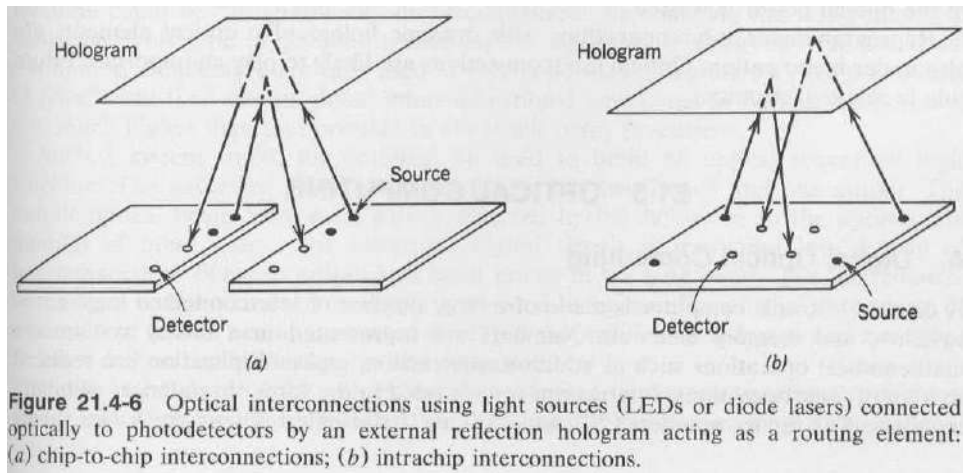


Figura 12-57: Interconexiones ópticas mediante fuentes de luz (LEDs o diodos láser) conectadas ópticamente a fotodetectores mediante un holograma de reflexión externo: a) conexiones de chip a chip; b) conexiones de chip internas

La interconexión óptica ofrece varias ventajas sobre la electrónica, como una mayor densidad de interconexiones libres de interferencia, un tiempo de propagación menor, mayor anchura de banda e independencia de las impedancias de entrada-salida.

## Aplicaciones

### Computación óptica digital

La computación óptica digital puede realizarse imitando el ordenador digital electrónico, con elementos de memoria, conmutadores y puertas, interconexiones y guías de onda ópticas. Aunque funcionan a gran velocidad, existen problemas de integración y disipación de potencia que, por ahora, no los hacen prácticos. Pero los ordenadores ópticos ofrecen posibilidades diferentes a las de los electrónicos: por ejemplo, es posible utilizar interconexiones ópticas tridimensionales y utilizar también niveles de paralelismo mucho mayores. Como ejemplo, podría construirse una máquina de lógica secuencial óptica mediante una matriz de puertas NOR y un mapa de interconexiones holográfico (ver Figura 12-58). Sus aplicaciones principales serían en tareas con un grado de paralelismo grande, como el procesamiento de imágenes y la inteligencia artificial.

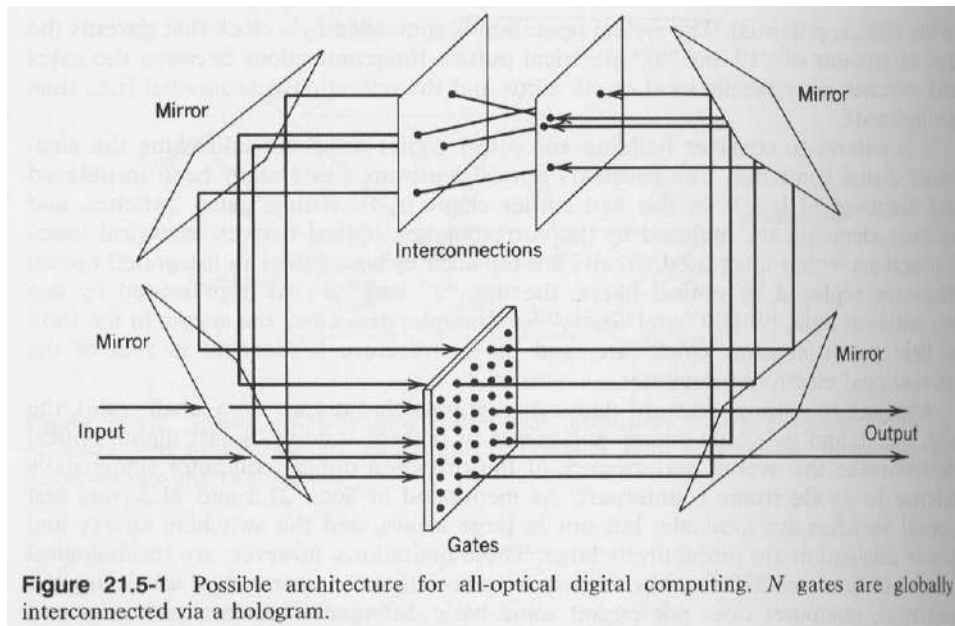


Figura 12-58: Arquitectura de un sistema óptico de computación digital. Las  $N$  puertas están interconectadas mediante un holograma

### Computación óptica analógica

La computación óptica analógica se utiliza actualmente en procesamiento de imágenes, de señales de radar, visión e inteligencia artificial y redes neuronales. Estos sistemas funcionan combinando las operaciones elementales de adición y multiplicación, utilizando como variables la intensidad luminosa, la transmitancia y reflectancia, o bien la transmitancia, reflectancia y la amplitud en óptica coherente, que además permite usar hologramas como moduladores y elementos de conexión.

Los procesadores ópticos analógicos son por naturaleza bidimensionales y permiten por tanto manipular matrices de datos o imágenes, tanto de forma discreta como continua. Además de las operaciones de adición y multiplicación se pueden realizar otras más complejas como transformadas de Fourier, convoluciones, transformaciones geométricas como ampliar, reducir, rotar, invertir, desplazar...

El avance de la computación óptica depende del desarrollo de dispositivos moduladores y detectores de alta resolución y velocidad, robustos y que permitan su integración y miniaturización.

### 12.7 Computación cuántica

Por último, se trabaja con fotones aunque también con otras partículas como electrones o núcleos en la denominada computación o informática cuántica. La aplicación de la teoría cuántica a la informática y las comunicaciones está produciendo ya algunos resultados importantes.

La ciencia de la informática cuántica es un campo emergente desde los años ochenta, con un gran potencial al combinar la mecánica cuántica con el ordenador. En los noventa se demostró que un ordenador cuántico podría factorizar números grandes de manera muy rápida y, por otro lado, la necesidad

de seguridad en las comunicaciones llevó a investigar métodos de comunicación cuánticos seguros. Además, el límite cuántico del continuo aumento de transistores por pulgada en los ordenadores clásicos según la ley de Moore, junto con el desarrollo de nuevos dispositivos en física como las trampas de iones, cavidades ópticas, etc. hicieron crecer este campo de investigación de la computación cuántica.

Los ordenadores actuales procesan la información clásica codificada en bits y cada bit contiene un 1 o un 0. La computación se produce manipulando dichos bits, es decir, transportando dichos bits desde la memoria hasta un conjunto de puertas lógicas y devolviendo los resultados a la memoria. Los ordenadores cuánticos procesan un vector de bits cuánticos o qbits. Un qbit es un sistema cuántico que puede existir en una superposición coherente de dos estados distinguibles (el 1 y el 0) y que puede ser entrelazado con otros sistemas similares. El ordenador cuántico funciona manipulando dichos qbits, es decir, llevando los qbits desde la memoria a un conjunto de puertas lógicas cuánticas y devolviendo el resultado a la memoria.

Los dos estados distinguibles de un qbit podrían ser, por ejemplo, estados de polarización de un fotón, estados electrónicos de un átomo o de partículas con dos estados de spin (arriba y abajo, normalmente expresados como  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ ).

El entrelazamiento entre qbits es una especie de correlación entre estados que no tiene paralelismo en física clásica. Dos subsistemas están entrelazados cuando el estado del sistema conjunto está más definido o es menos aleatorio que el estado de cada uno de los subsistemas componentes por separado.

Consideremos en primer lugar un ordenador clásico que opera con un registro de 3 bits. En un instante determinado, los bits del registro pueden estar en un estado definido, como el 100. En un ordenador cuántico, los qbits pueden estar en una superposición de todos los estados clásicos permitidos. El estado del registro vendría descrito por la función de onda

$$|\Psi\rangle = a|000\rangle + b|001\rangle + c|010\rangle + d|011\rangle + e|100\rangle + f|101\rangle + g|110\rangle + h|111\rangle$$

donde los coeficientes  $a, b, c, \dots$  son números complejos, cuyos módulos al cuadrado son las probabilidades de encontrar los qbits en dicho estado. Por ejemplo,  $|b|^2$  es la probabilidad de que la medida del registro resulte 001. Es importante remarcar que dichos coeficientes son números complejos y sus fases pueden producir interferencias constructivas o destructivas.

En un registro cuántico de  $n$  qbits, el estado queda especificado por  $2^n$  números complejos (en un registro de 3 qbits,  $2^3 = 8$  números), de forma que el número de estados clásicos codificados en un registro cuántico crece exponencialmente con el número de qbits. Para  $n = 300$  resultan  $10^{90}$  números, cantidad mayor que la de átomos en el universo observable.

El funcionamiento del ordenador cuántico de 3 qbits sería como sigue: el contenido del registro se puede considerar como un vector complejo de dimensión 8. El algoritmo de inicialización debe definir el estado inicial de dicho vector. En cada paso de la ejecución del programa dicho vector es modificado al multiplicarlo por una matriz unitaria. La matriz viene determinada por el dispositivo físico que actúa sobre el sistema de qbits. Una vez finalizado el algoritmo, el vector de dimensión 8 resultante debe ser leído mediante la realización de una medida cuántica del registro de 3 qbits. Según las leyes de la mecánica

cuántica, el resultado de la medida es una secuencia aleatoria de 3 bits y, además, el estado del registro se destruye en la operación de medida. Pero dicha secuencia aleatoria lleva información sobre el resultado ya que, mediante sucesivas repeticiones de todo el proceso, los valores de las medidas se distribuyen en torno al resultado buscado, que puede así ser determinado con una alta probabilidad.

Dos obvias propiedades de la información clásica son que puede ser leída y copiada sin perturbarla y que el estado de un sistema compuesto queda definido especificando el estado de cada una de sus partes. Pero la información que lleva un sistema cuántico no cumple con tales principios. De hecho, la información cuántica puede utilizarse para realizar tareas que serían imposibles o muy complicadas clásicamente. Algunos ejemplos son:

- Los supercomputadores de hoy en día tardarían miles de millones de años en encontrar los factores primos de un número con unos cientos de dígitos, mientras que un ordenador cuántico, si fuera construido, podría hacerlo en segundos.
- Un ordenador clásico requiere un tiempo proporcional a  $N$  para encontrar un elemento determinado en un conjunto de  $N$  elementos, mientras que un ordenador cuántico puede hacerlo en un tiempo proporcional a la raíz cuadrada de  $N$ .
- Si dos procesadores intercambiaran información cuántica en lugar de clásica se reduciría la comunicación requerida para realizar ciertas tareas de computación distribuida.
- Un ordenador cuántico podría simular la evolución de un sistema cuántico de muchos cuerpos y las teorías cuánticas de campos eficientemente y con precisión, sin realizar aproximaciones injustificadas.
- En el intercambio de información cuántica, la privacidad de los protocolos criptográficos queda asegurada por principios de física cuántica. Por el contrario, la seguridad de los sistemas criptográficos de clave pública, ampliamente utilizados en la actualidad, depende de que descifrar un mensaje sea un proceso muy largo (como factorizar un primo), suposición que no estaría garantizada con la llegada de los ordenadores cuánticos.

Aunque algunas aplicaciones sencillas de la informática cuántica podrían desarrollarse en breve, el ordenador cuántico todavía está lejos. Sin embargo, la tecnología de la criptografía cuántica está más avanzada y próxima a la comercialización.

## Bibliografía

1. [Plasma,2007] Plasma.com. Learn About LCD TV and TFT LCD Displays
2. [http://www.plasma.com/classroom/what\\_is\\_tft\\_lcd.htm](http://www.plasma.com/classroom/what_is_tft_lcd.htm)
3. [Montoto,2005] Luis Montoto. Fundamentos físicos de la Informática y las comunicaciones. Ed. Thomson. 2005
4. [Kodak,2001] Charge-coupled device (CCD) Image Sensors. Eastman Kodak Company. Image Sensor Solutions. 2001. Rochester, New York. <http://www.kodak.com/ezipres/business/ccd/global/plugins/acrobat/en/supportdocs/chargeCoupledDevice.pdf>

5. [CMOS,2007] Sensor CMOS. Wikipedia, the free encyclopedia. [http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor\\_CMOS](http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_CMOS)
6. [Wie,1997] MOS Capacitor with Bias (multimedia material). <http://jas.eng.buffalo.edu/education/mos/mosCap/biasBand10.html>
7. [Saleh,2001] B.E.A. Saleh, M.C. Teich, *Fundamentals of photonics*, Wiley, 1991
8. [IC,2001] *Investigación y Ciencia*, marzo 2001
9. [Meléndez,1996] A. Beléndez, *Fundamentos de óptica para ingeniería informática*, Universidad de Alicante, 1996
10. [Chaimowicz,1990] J. Chaimowicz, *Ondas luminosas*, Paraninfo, 1990
11. [Capmany,1994] J. Capmany, J. Cascón, *Efecto electroóptico: introducción a la óptica integrada y los dispositivos fotónicos integrados*, SPUPV, 1994
12. [Quantum,2007] *Quantum computer*, de Wikipedia, la enciclopedia libre. [NSF, 1999] *Quantum information science, Report of the NSF Workshop*, 1999
13. *Overview of OLED Display Technology*, Homer Antoniadis, Osram Opto Semiconductors.
14. *All-organic active matrix flexible display*, Lisong Zhou, Alfred Wanga, Sheng-Chu Wu, Jie Sun, Sungkyu Park, and Thomas N. Jackson. APPLIED PHYSICS LETTERS 88, 083502, 2006.
15. *2.4-in. monochrome small molecular OLED display for mobile application*. Sun Woong Kim, Byong Hoon Hwang, Joo Hyeon Lee, Jae Ik Kang, Kyoung Wook Min, Woo Young Kim. *Current Applied Physics* 2 (2002) 335–338.
16. *OLED*, de Wikipedia, la enciclopedia libre.