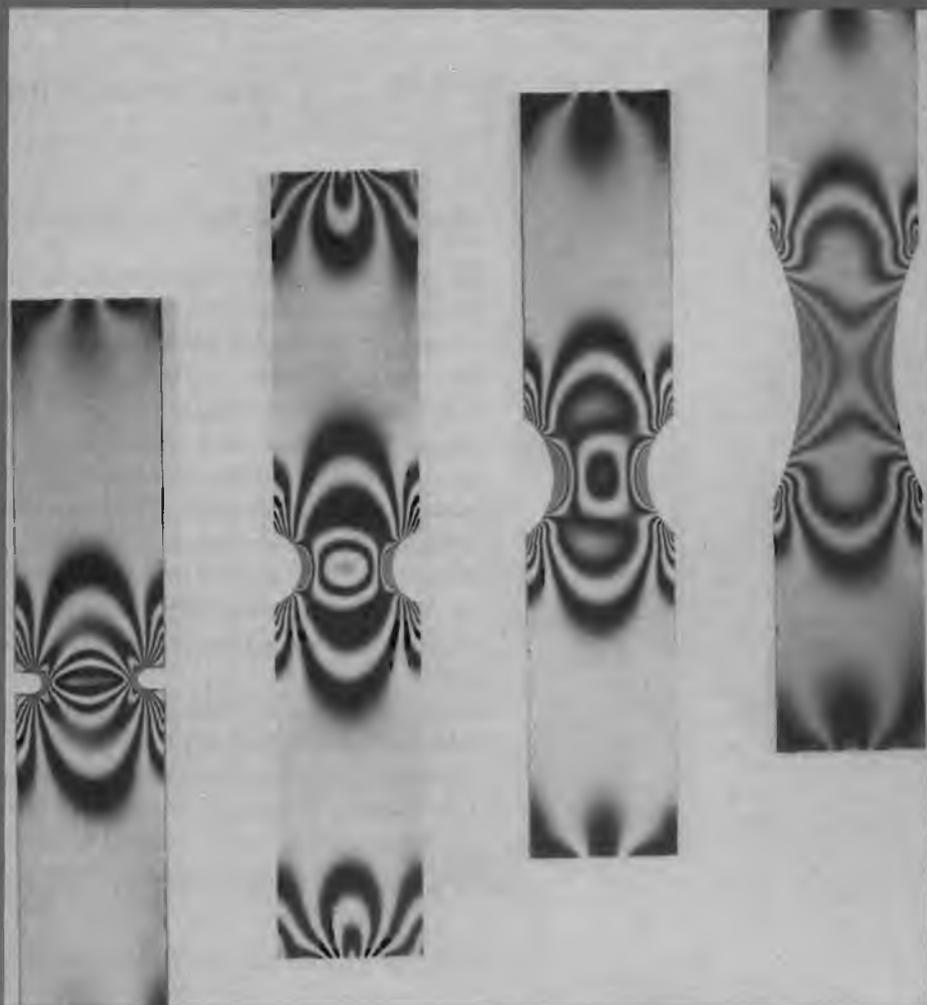


PROPIEDADES ÓPTICAS



Las cuatro probetas entalladas y transparentes mostradas en esta fotografía demuestran el fenómeno de la *fotoelasticidad*. Una probeta fotoelástica se comporta anisotrópicamente, en cuanto a las propiedades ópticas (p.ej., índice de refracción) al deformarse elásticamente. Utilizando luz polarizada y un sistema óptico especial, la distribución de los esfuerzos dentro de las probetas se deduce mediante las orlas de interferencia generadas. Estas orlas en las cuatro probetas fotoelásticas que se muestran en la fotografía indican cómo la concentración y la distribución de esfuerzos varían con la geometría de la entalla cuando se someten a un esfuerzo de tracción axial. (Fotografía cortesía de Measurements Group, Inc., Raleigh, North Carolina, EEUU.)

22.1 INTRODUCCIÓN

"Propiedad óptica" es la respuesta de un material expuesto a una radiación electromagnética y, en particular, a la luz visible. Este capítulo empieza discutiendo algunos conceptos y principios fundamentales relativos a la naturaleza de la radiación electromagnética y a sus posibles interacciones con los materiales sólidos. A continuación se estudia el comportamiento óptico de materiales metálicos y no metálicos en términos de sus características de absorción, de reflexión y de transmisión. En las secciones finales se describen la luminiscencia, la fotoconductividad y la amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (láser) y la utilización práctica de este fenómeno.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

22.2 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

En sentido clásico, se considera que la radiación electromagnética es un tipo de onda que consiste en los componentes de un campo magnético y de un campo eléctrico perpendiculares entre sí y, a su vez, perpendiculares a la dirección de propagación (Figura 22.1). La luz, el calor (o energía radiante), el radar, las ondas de radio y los rayos X son formas de radiación electromagnética. Cada una de estas formas de radiación electromagnética se caracteriza por un determinado intervalo de longitudes de onda y también por la manera en que se generan. El *espectro electromagnético* abarca desde las radiaciones de los rayos γ (emitidos por materiales radiactivos y con longitudes de onda de 10^{-12} m (10^{-3} nm) hasta las ondas de radiofrecuencia, con longitudes de onda de unos 10^5 m, pasando por los rayos X, ultravioletas, visibles e infrarrojos. En la Figura 22.2 se reproduce este espectro en escala logarítmica.

La luz visible abarca una región pequeña del espectro, con longitudes de onda comprendidas entre $0,4 \mu\text{m}$ (4×10^{-7} m) y $0,7 \mu\text{m}$. El color percibido viene determinado por la longitud de onda; por ejemplo, la radiación con una longitud de onda de unos $0,4 \mu\text{m}$ aparece de color violeta, mientras que los colores verde y rojo están asociados a longitudes de onda de $0,50$ y $0,65 \mu\text{m}$, respectivamente. La Figura 22.2 incluye los intervalos espectrales de va-

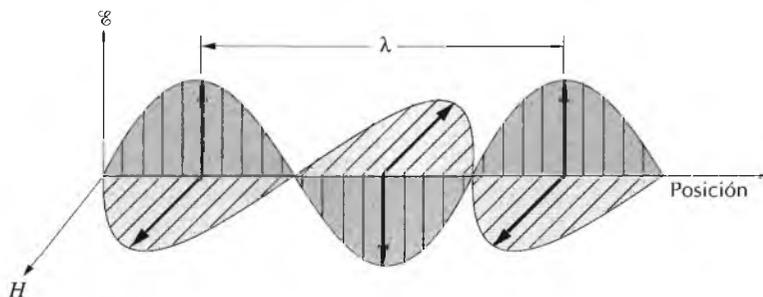


Figura 22.1 Onda electromagnética mostrando el campo eléctrico E y el campo magnético H que la componen y la longitud de onda λ .

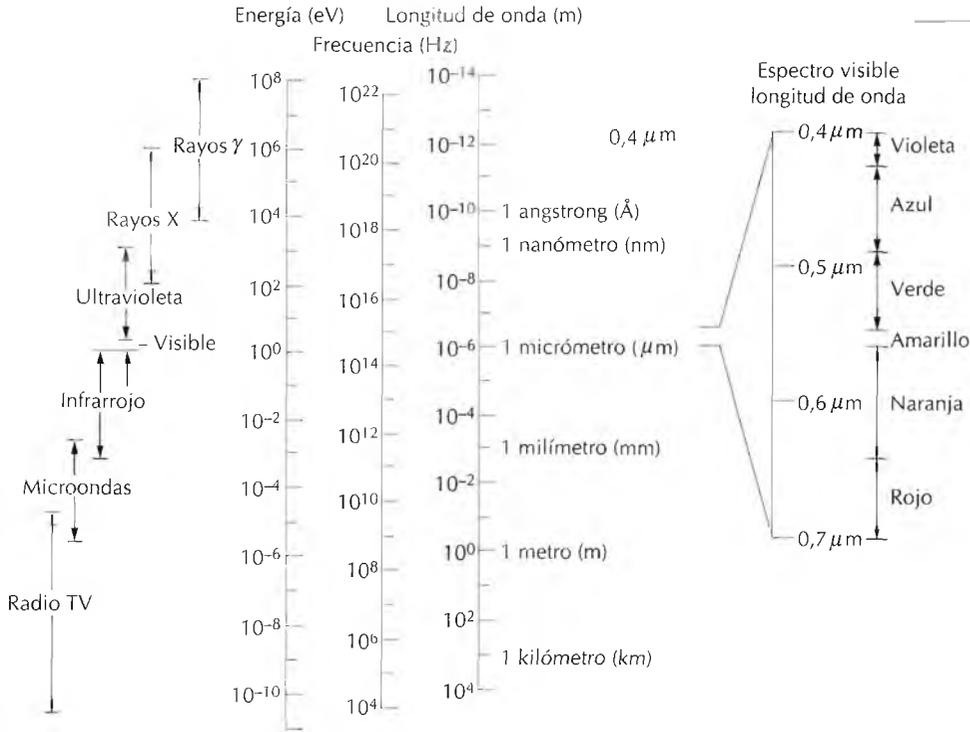


Figura 22.2 Espectro de la radiación electromagnética, incluyendo los intervalos de longitud de onda de varios colores del espectro visible.

rios colores. La luz blanca es simplemente la mezcla de todos los colores. La siguiente discusión se centra en la radiación visible, que es, por definición, la que los ojos detectan.

La radiación electromagnética atraviesa el vacío a la velocidad de la luz: 3×10^8 m/s. Esta velocidad c está relacionada con la permitividad eléctrica del vacío ϵ_0 y la permeabilidad magnética del vacío μ_0 :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \tag{22.1}$$

Existe una relación, pues, entre la constante electromagnética c y las constantes eléctrica y magnética.

Además, la frecuencia ν y la longitud de onda λ de la radiación electromagnética son función de la velocidad,

$$c = \lambda \nu \tag{22.2}$$

La frecuencia se expresa en hercios (Hz) y 1 Hz = 1 ciclo por segundo. Los intervalos de frecuencia de varias radiaciones electromagnéticas se incluyen también en el espectro de la Figura 22.2.

Desde el punto de vista de la mecánica cuántica, la radiación está constituida por grupos o paquetes de energía llamados **fotones**. La energía E de un

fotón está cuantizada; es decir, sólo puede tener valores específicos definidos por la relación

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (22.3)$$

donde h es la constante universal llamada **constante de Planck** y su valor es $6,63 \times 10^{-34}$ J-s. Es decir, la energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la radiación o inversamente proporcional a la longitud de onda. Las energías de los fotones también se incluyen en el espectro electromagnético (Figura 22.2).

La descripción de los fenómenos que implican interacciones entre la materia y la radiación es a veces más fácil si se considera la luz en términos de fotones; en otras ocasiones es mejor interpretarla como una onda. En esta discusión se utilizan ambos enfoques según convenga.

22.3 INTERACCIONES DE LA LUZ CON LOS SÓLIDOS

Cuando la luz pasa de un medio a otro (p.ej., del aire al interior de un sólido) pueden ocurrir varios fenómenos. Parte de la luz se transmite a través del medio, parte es absorbida y parte se refleja en la interfaz de los dos medios. La intensidad I_0 del haz que incide en la superficie del medio sólido debe ser igual a la suma de las intensidades de los haces transmitido, absorbido y reflejado, representadas por I_T , I_A , e I_R , respectivamente:

$$I_0 = I_T + I_A + I_R \quad (22.4)$$

La intensidad de radiación, expresada en vatios por metro cuadrado, corresponde a la energía transmitida por unidad de tiempo a través de la unidad de área perpendicular a la dirección de propagación.

Una forma alternativa de la Ecuación 22.4 es la siguiente:

$$T + A + R = 1 \quad (22.5)$$

donde T , A y R representan, respectivamente, la transmitancia (I_T/I_0), la absorbancia o extinción (I_A/I_0) y la reflectancia o reflectividad (I_R/I_0), es decir, las fracciones de la luz incidente que son transmitidas, absorbidas o reflejadas; la suma debe ser la unidad, ya que toda la luz blanca incidente se transmite, se absorbe o se refleja.

Los materiales capaces de transmitir la luz con relativamente poca absorción y reflexión se denominan **transparentes**; se puede ver a través de ellos. Los materiales se denominan **translúcidos** si dejan pasar parcialmente la luz; esto es, la luz se dispersa en el interior de modo que al observar a través de una muestra de este material los objetos no se distinguen claramente. Los materiales que son impermeables a la transmisión de la luz visible se denominan **opacos**.

Los metales en bruto son opacos respecto al espectro visible; esto es, la luz incidente o se absorbe o se refleja. Por otro lado, los materiales aislantes eléctricos pueden fabricarse de manera que sean transparentes. Además, algunos semiconductores pueden ser transparentes y otros opacos.

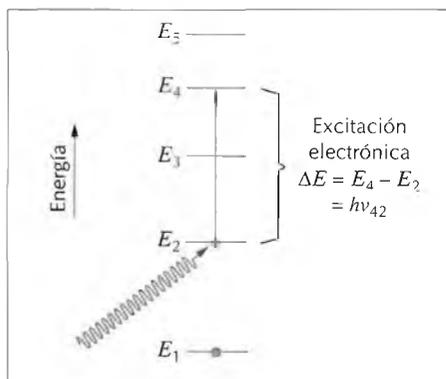


Figura 22.3 Esquema de la absorción de un fotón por la excitación de un electrón desde un estado energético a otro, en un átomo aislado. La energía del fotón ($h\nu_{42}$) debe ser exactamente igual a la diferencia energética entre los dos estados ($E_4 - E_2$).

22.4 INTERACCIONES ATÓMICAS Y ELECTRÓNICAS

Los fenómenos ópticos que tienen lugar dentro de los materiales sólidos implican interacciones entre las radiaciones electromagnéticas y los átomos, los iones y/o los electrones. La polarización electrónica y las transiciones de energía electrónica son las dos interacciones más importantes.

22.4.1 Polarización electrónica

Un componente de una onda electromagnética es simplemente un campo eléctrico que fluctúa rápidamente (Figura 22.1). Este campo eléctrico, dentro del intervalo de frecuencias del espectro visible, interactúa con la nube electrónica que rodea a cada uno de los átomos que se encuentra en su camino, de modo que, con cada cambio de dirección del componente del campo eléctrico, induce una polarización electrónica, o una modificación de la localización de la nube de electrones respecto al núcleo del átomo, tal como se muestra en la Figura 19.30a. Las consecuencias de esta polarización son: (1) parte de la energía de la radiación se absorbe y (2) la velocidad de la onda de luz disminuye al pasar a través del medio. La segunda consecuencia se manifiesta como el fenómeno de refracción, que se discute en la Sección 22.5.

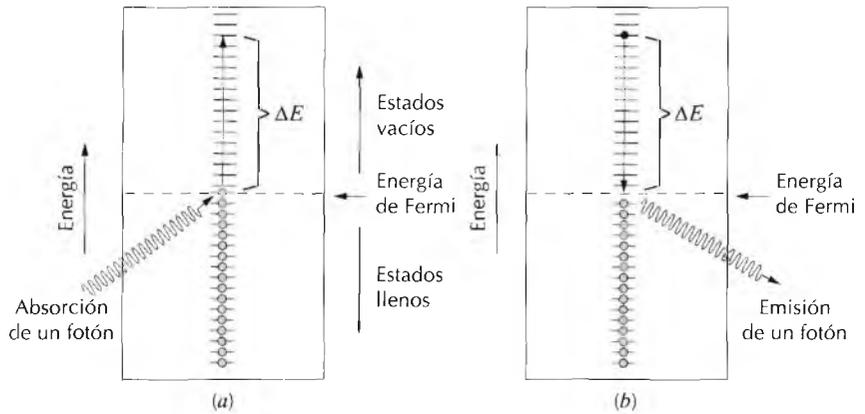
22.4.2 Transiciones electrónicas

La absorción y la emisión de radiación electromagnética representan transiciones de un estado energético a otro. En esta discusión se considera un átomo aislado, cuyo diagrama de energía electrónica se representa en la Figura 22.3. Se puede excitar un electrón desde un estado ocupado de energía E_2 a uno vacante de mayor energía, denominado E_4 , mediante la absorción de un fotón de energía. El cambio energético experimentado por el electrón, ΔE , depende de la frecuencia de la radiación:

$$\Delta E = h\nu \quad (22.6)$$

donde, de nuevo, h es la constante de Planck. Conviene recordar varios conceptos. En primer lugar, como los estados energéticos del átomo son discre-

Figura 22.4 (a) Esquema del mecanismo de absorción de un fotón en un material metálico, donde un electrón se excita hasta un estado energético no ocupado. El cambio energético del electrón ΔE equivale a la energía del fotón. (b) Nueva emisión de un fotón de luz por transición directa de un electrón desde un estado energético elevado a otro inferior.



tos, entre los niveles energéticos sólo existen determinados ΔE ; por tanto, las transiciones electrónicas sólo pueden absorber fotones de frecuencias correspondientes a los posibles ΔE para el átomo. Además, en cada excitación se absorbe toda la energía del fotón.

En segundo lugar, un electrón estimulado no puede permanecer indefinidamente en un **estado excitado**; después de poco tiempo vuelve, a través de varios caminos, al **estado fundamental** o nivel no excitado, emitiendo de nuevo radiación electromagnética. En todo caso, en las transiciones electrónicas de absorción y emisión debe haber conservación de la energía.

Las características ópticas de los materiales sólidos que relacionan las radiaciones electromagnéticas de absorción y de emisión se explican mediante la estructura de bandas electrónicas de los materiales (discutidas en la Sección 19.9).

PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS METALES

Considérense los esquemas de bandas de energía de los electrones que se muestran en las Figura 19.4a y 19.4b; en ambos casos, una banda de alta energía sólo está parcialmente llena de electrones. Los metales son opacos porque la radiación incidente que tiene frecuencias dentro del intervalo correspondiente a la luz visible excita los electrones a estados energéticos no ocupados situados por encima de la energía de Fermi, como indica la Figura 22.4a; consecuentemente, la radiación incidente es absorbida de acuerdo con la Ecuación 22.6. La radiación se absorbe totalmente en una capa externa muy delgada de la muestra, generalmente inferiores a $0,1 \mu\text{m}$; es decir, sólo las películas metálicas de espesor inferior a $0,1 \mu\text{m}$ son capaces de transmitir la luz visible.

Todas las frecuencias propias de la luz visible se absorben en los metales debido a que siempre existen estados vacíos que permiten las transiciones electrónicas, como indica la Figura 22.4a. De hecho, los metales son opacos a toda radiación electromagnética de baja frecuencia, desde las ondas de radiofrecuencia hasta aproximadamente la mitad de las ondas ultravioletas, pasando por el infrarrojo y el visible. Los metales son transparentes a las radiaciones de alta frecuencia (rayos X y γ).

La mayor parte de la radiación absorbida se vuelve a emitir desde la superficie en forma de luz visible de la misma longitud de onda y aparece como luz reflejada. La Figura 22.4b muestra la transición electrónica que acompaña a una radiación emitida. La reflectancia de la mayoría de los metales está comprendida entre 0,90 y 0,95; una pequeña fracción de la energía del proceso de caída del electrón se disipa en forma de calor.

Como los metales son opacos y tienen una alta reflectancia, el color percibido está determinado por la distribución de longitudes de onda de la radiación reflejada y no absorbida. Una apariencia blanco plateada indica que el metal es muy reflector en todo el espectro de la luz visible. En otras palabras, la frecuencia y el número de fotones emitidos en el rayo reflejado son aproximadamente iguales a los del rayo incidente. El aluminio y la plata son dos metales que presentan este comportamiento reflector. El cobre y el oro aparecen de colores rojo anaranjado y amarillo, respectivamente, porque parte de la energía asociada con fotones de luz que tienen longitudes de onda corta no se vuelve a emitir como luz visible.

PROPIEDADES ÓPTICAS DE MATERIALES NO METÁLICOS

Los materiales no metálicos pueden ser transparentes a la luz visible, según sus estructuras de bandas de energía de los electrones. Por este motivo conviene considerar los fenómenos de refracción y de transmisión, además de la reflexión y de la absorción.

22.5 REFRACCIÓN

La luz transmitida en el interior de un material transparente experimenta disminución de la velocidad y, en consecuencia, la dirección de propagación cambia, o se desvía, en la intercara; este fenómeno se denomina **refracción**. El **índice de refracción** n de un material se define como la relación entre la velocidad en el vacío c y la velocidad en el medio v , o

$$n = \frac{c}{v} \quad (22.7)$$

La magnitud de n (o grado de desviación) depende de la longitud de onda de la luz. Este efecto se demuestra gráficamente por la conocida dispersión o separación de un haz de luz blanca en sus colores componentes por un prisma de vidrio. Cada color se refracta con distinta magnitud al entrar y al salir del vidrio, separándose los colores. El camino óptico de la luz no depende solamente del índice de refracción; sino que también depende, como se explica más adelante, de la fracción de luz incidente que se refleja en la superficie.

Una expresión parecida a la Ecuación 22.1 define la velocidad de la luz v en un medio:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (22.8)$$

donde ϵ y μ son, respectivamente, la permitividad y la permeabilidad de la sustancia particular. De la Ecuación 22.7 se deduce

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (22.9)$$

donde ϵ_r y μ_r son la constante dieléctrica y la permeabilidad magnética relativa, respectivamente. Para las sustancias ligeramente magnéticas, $\mu_r \cong 1$ y

$$n \cong \sqrt{\epsilon_r} \quad (22.10)$$

Por tanto, para los materiales transparentes existe una relación entre el índice de refracción y la constante dieléctrica. Como ya se ha mencionado, el fenómeno de la refracción está relacionado con la polarización electrónica (Sección 22.4) a frecuencias superiores a las de la luz visible; así, el componente electrónico de la constante dieléctrica puede determinarse a partir de las medidas del índice de refracción utilizando la Ecuación 22.10.

Como el retraso de la radiación electromagnética en un medio se debe a la polarización electrónica, el tamaño de los átomos o iones constituyentes ejerce una considerable influencia en la magnitud de este efecto: generalmente, cuanto mayor sea el tamaño de los átomos o iones, mayor será la polarización electrónica y menor la velocidad, y, por tanto, el índice de refracción será mayor. El índice de refracción de un vidrio sódico se aproxima a 1,5. Las adiciones de grandes cantidades de iones bario y plomo (como BaO y PbO) al vidrio incrementan considerablemente el valor de n . Por ejemplo, los vidrios que contienen un 90% en peso de Pb suelen tener índices de refracción de alrededor de 2,1.

Los índices de refracción de las cerámicas cristalinas de estructura cúbica y los de los vidrios son independientes de la dirección cristalográfica: son isotrópicos. Los cristales no cúbicos tienen un n anisotrópico; esto es, el índice es mayor a lo largo de la dirección que tiene mayor densidad iónica. En la Tabla 22.1 se dan los índices de refracción de varios vidrios, cerámicas

Tabla 22.1 Índice de refracción de algunos materiales transparentes.

<i>Material</i>	<i>Índice de refracción promedio</i>
Cerámicas	
Vidrio de silicato	1,458
Vidrio de sosa y cal	1,51
Vidrio Pyrex	1,47
Vidrio "flint" ópticamente denso	1,65
Corindón (Al_2O_3)	1,76
Periclase (MgO)	1,74
Cuarzo (SiO_2)	1,55
Espínela (MgAl_2O_4)	1,72
Polímeros	
Politetrafluoroetileno	1,35
Polietileno	1,51
Poliestireno	1,60
Poli(metacrilato de metilo)	1,49
Polipropileno	1,49

transparentes y polímeros. Para las cerámicas cristalinas se dan valores medios ya que n es anisotrópico.

22.6 REFLEXIÓN

Cuando la radiación lumínica pasa de un medio a otro que tiene un índice de refracción diferente, parte de la luz se difunde en la intercara de los dos medios, aunque éstos sean transparentes. La reflectancia R representa la fracción de luz incidente que se refleja en la intercara, o

$$R = \frac{I_R}{I_0} \quad (22.11)$$

donde I_0 e I_R son las intensidades de los haces incidente y reflejado, respectivamente. Si la luz incide perpendicularmente a la intercara, se cumple

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (22.12)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los dos medios. Si la luz no incide perpendicularmente a la intercara, el valor de R depende del ángulo de incidencia. Si la luz se transmite desde el vacío o desde el aire al interior de un sólido s , se cumple:

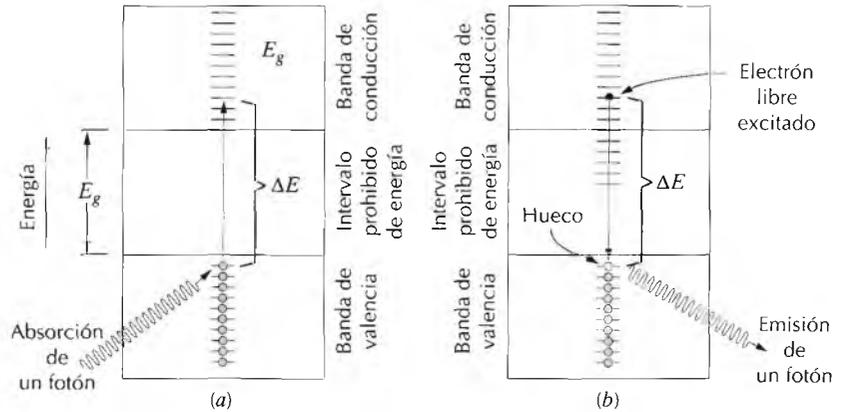
$$R = \left(\frac{n_s - 1}{n_s + 1} \right)^2 \quad (22.13)$$

ya que el índice de refracción del aire es próximo a la unidad. Cuanto mayor es el índice de refracción de un sólido, mayor es la reflectancia. En los vidrios de silicato, la reflectancia se aproxima a 0,05. Como el índice de refracción de un sólido depende de la longitud de onda de la luz incidente, la reflectancia varía con la longitud de onda. Interesa que las lentes y otros instrumentos ópticos tengan muy baja reflexión y por este motivo se suelen recubrir con una delgada película de material dieléctrico, como por ejemplo fluoruro magnésico (MgF_2).

22.7 ABSORCIÓN

Los materiales no metálicos pueden comportarse como opacos o transparentes a la luz; y, en el caso de que sean transparentes, a menudo aparecen coloreados. En principio, la radiación lumínica se absorbe en este grupo de materiales por tres mecanismos que también influyen en sus características de transmisión. Un mecanismo es la polarización electrónica (Sección 22.4). La absorción por polarización electrónica sólo es importante a frecuencias de luz próximas a la frecuencia de relajación de los átomos constituyentes. Los otros dos mecanismos implican transiciones electrónicas que dependen de la estructura de bandas de energía electrónica del material; las estructuras de bandas de los semiconductores y de los aisladores se vieron en la Sección 19.5. En uno de estos mecanismos la absorción es consecuencia de las

Figura 22.5 (a) Mecanismo de absorción de un fotón en materiales no metálicos, donde un electrón se ha excitado a través del intervalo prohibido y ha creado un hueco en la banda de valencia. La energía del fotón absorbido es ΔE , necesariamente mayor que la energía del intervalo prohibido E_g . (b) Emisión de un fotón de luz por transición electrónica directa a través del intervalo prohibido.



excitaciones electrónicas a través del intervalo prohibido de energía; el otro mecanismo está relacionado con transiciones electrónicas a niveles de impurezas o defectos que se encuentran en el intervalo prohibido de energía.

La absorción de un fotón de luz puede ocurrir por promoción o excitación de un electrón desde la banda de valencia casi llena hasta un estado vacío de la banda de conducción, pasando por el intervalo prohibido de energía, como indica la Figura 22.5a. De este modo se crea un hueco en la banda de valencia y también un electrón libre en la banda de conducción. De nuevo, la energía de excitación ΔE se relaciona con la frecuencia del fotón absorbido mediante la Ecuación 22.6. Estas excitaciones con absorción sólo se generan si la energía del fotón es superior a la energía del intervalo prohibido de energía, E_g , esto es, si

$$h\nu > E_g \quad (22.14)$$

o, en función de la longitud de onda

$$\frac{hc}{\lambda} > E_g \quad (22.15)$$

La longitud de onda mínima de la luz visible, $\lambda(\text{mín.})$, es de unos $0,4 \mu\text{m}$ y puesto que $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ y $h = 4,13 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$, la energía máxima del intervalo prohibido de energía, $E_g(\text{máx.})$, para que ocurra absorción de luz visible es

$$\begin{aligned} E_g(\text{máx.}) &= \frac{hc}{\lambda(\text{mín.})} \\ &= \frac{(4,13 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{4 \times 10^{-7} \text{ m}} \\ &= 3,1 \text{ eV} \end{aligned} \quad (22.16a)$$

Esto significa que la luz visible no es absorbida por aquellos materiales que tengan intervalos prohibidos de energía superiores a $3,1 \text{ eV}$; estos materiales, en estado de alta pureza, aparecen transparentes y coloreados.

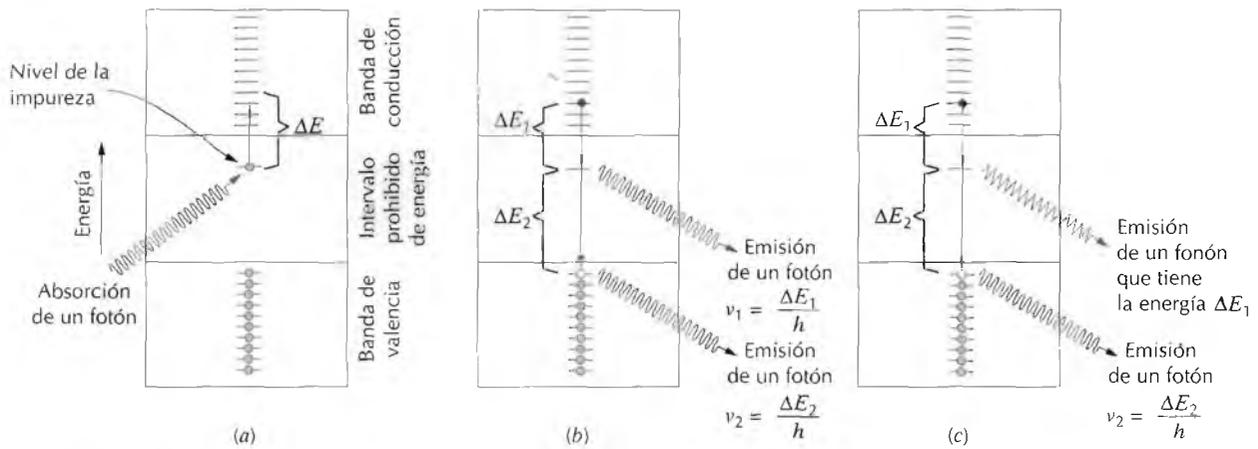


Figura 22.6 (a) Mecanismo de excitación de un electrón, desde un nivel de la impureza situado dentro del intervalo prohibido, por absorción de un fotón de luz. (b) Emisión de dos fotones debido a la caída de un electrón primero al estado de la impureza y finalmente al estado fundamental. (c) Generación de un fonón y de un fotón por transición de un electrón primero hasta el nivel de la impureza y finalmente hasta el estado fundamental.

La longitud de onda máxima de la luz visible, $\lambda(\text{máx.})$, es de unos $0,7 \mu\text{m}$ y el cálculo de la energía mínima del intervalo prohibido de energía, $E_g(\text{mín.})$, para que tenga lugar absorción de la luz visible se realiza mediante la siguiente expresión:

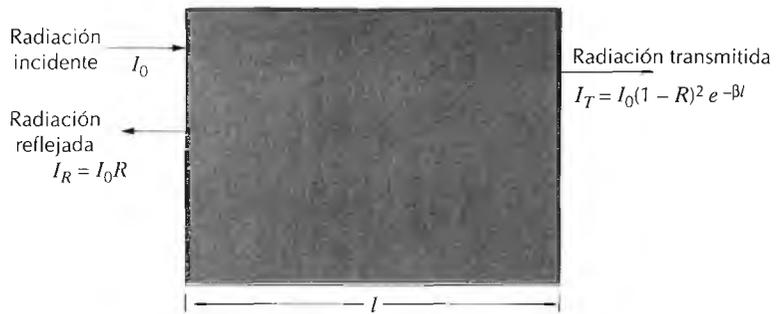
$$\begin{aligned}
 E_g(\text{mín.}) &= \frac{hc}{\lambda(\text{máx.})} \\
 &= \frac{(4,13 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{7 \times 10^{-7} \text{ m}} \\
 &= 1,8 \text{ eV}
 \end{aligned}
 \tag{22.16b}$$

Este resultado significa que los materiales semiconductores que tienen intervalos prohibidos de energía inferiores a 1,8 eV absorben toda la luz visible por transiciones electrónicas desde la banda de valencia a la banda de conducción y estos materiales son opacos. Sólo una fracción del espectro visible es absorbido por materiales cuyo intervalo prohibido de energía está comprendido entre 1,8 y 3,1 eV; por consiguiente, estos materiales aparecen coloreados.

Los materiales no metálicos son opacos a alguna longitud de onda, que depende de la magnitud de E_g . Por ejemplo, el diamante, con un intervalo prohibido de energía de 5,6 eV, es opaco a radiaciones cuya longitud de onda es menor que $0,22 \mu\text{m}$.

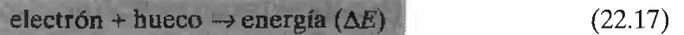
En sólidos dieléctricos con elevada energía de intervalo prohibido, la absorción de la radiación lumínica también tiene lugar por transiciones electrónicas distintas del salto banda de valencia-banda de conducción. Si hay impurezas u otros defectos eléctricamente activos, dentro del intervalo prohibido pueden introducirse niveles de energía, tales como los niveles dador y aceptor (Sección 19.11), excepto que estén en el centro del intervalo prohibido. La radiación lumínica de determinadas longitudes de onda se absorben como consecuencia de las transiciones electrónicas desde estos niveles

Figura 22.7 Transmisión de la luz a través de un medio transparente, donde se refleja en las caras anterior y posterior y donde el medio la absorbe. (Adaptada de R. M. Rose, L. A. Shepard y J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol.4, *Electronic Properties*. Copyright 1966 de John Wiley & Sons, Nueva York. Reproducida con permiso de John Wiley & Sons, Inc.)



del interior del intervalo prohibido, o hacia ellos, como indica la Figura 22.6a.

De nuevo, la energía electromagnética absorbida por excitaciones electrónicas debe ser disipada de alguna manera, y para ello son posibles varios mecanismos. Para las excitaciones desde la banda de valencia a la banda de conducción, la disipación puede ocurrir por la recombinación de electrones y huecos de acuerdo con la reacción



Esta reacción se representa esquemáticamente en la Figura 22.5b. También pueden ocurrir transiciones electrónicas en varias etapas, que implican niveles energéticos, debidos a las impurezas, situados en el interior del intervalo prohibido. Como indica la Figura 22.6b, una posibilidad es la emisión de dos fotones: uno debido a la caída del electrón desde el estado de la banda de conducción al nivel de la impureza y otro originado por el salto hasta la banda de valencia. Un mecanismo alternativo consiste en considerar que una transición genera un fonón (Figura 22.6c) mientras que la energía asociada se disipa en forma de calor.

La intensidad de la radiación absorbida neta es independiente del carácter del medio y de la longitud del camino dentro del medio. La intensidad de la radiación transmitida o no absorbida I_T decrece de modo continuo con la distancia x recorrida por la luz:

$$I_T = I_0 e^{-\beta x} \quad (22.18)$$

donde I_0 es la intensidad de la radiación incidente no reflejada y β el *coeficiente de absorción* (en mm^{-1}), es característico del material particular; además, β varía con la longitud de onda de la radiación incidente. El parámetro distancia x se mide desde la superficie donde incide la radiación hasta el interior del material. Los materiales con valores elevados de β se consideran altamente absorbentes.

22.8 TRANSMISIÓN

Los fenómenos de absorción, reflexión y transmisión también se pueden aplicar al paso de la luz a través de un sólido transparente, como indica la Figura 22.7. Cuando un rayo incidente de intensidad I_0 incide en la cara fron-

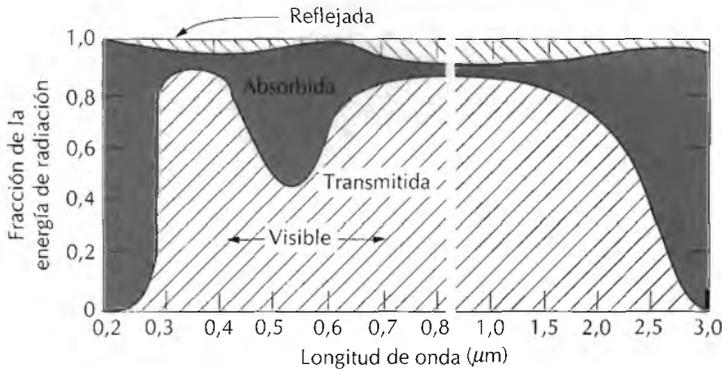


Figura 22.8 Variación con la longitud de onda de las fracciones transmitida, absorbida y reflejada de la luz incidente a través de un vidrio verde. (De W.D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2ª edición. Copyright 1976 de John Wiley & Sons, Nueva York. Reproducida con permiso de John Wiley & Sons, Inc.)

tal de una muestra de espesor l y coeficiente de absorción β , la intensidad transmitida a la cara opuesta I_T es:

$$I_T = I_0(1 - R)^2 e^{-\beta l} \quad (22.19)$$

donde R es la reflectancia. En esta expresión se supone que existe el mismo medio en la cara frontal que en la cara opuesta. La deducción de la Ecuación 22.19 es un problema propuesto.

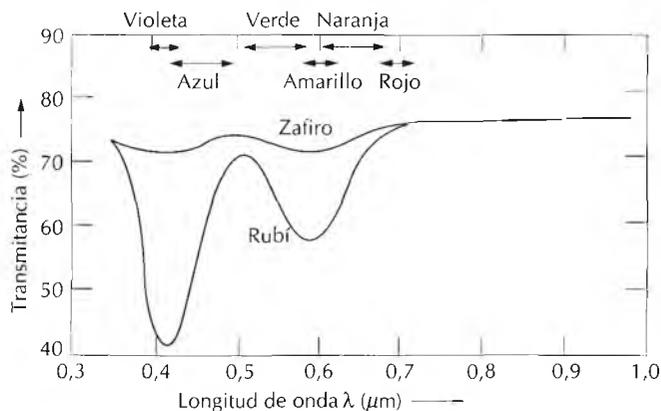
De este modo, la fracción de luz incidente que se transmite a través de un material transparente depende de las pérdidas que ocurren por absorción y por reflexión. De nuevo, la suma de la reflectancia R , de la absorbancia A y de la transmitancia T es la unidad, según la Ecuación 22.5. Además, cada una de las variables R , A y T dependen de la longitud de onda de la luz, como demuestra la Figura 22.8 en la región visible del espectro de un vidrio verde. Por ejemplo, con una luz de $0,4 \mu\text{m}$ de longitud de onda, las fracciones transmitida, absorbida y reflejada son aproximadamente 0,90, 0,05 y 0,05, respectivamente. Sin embargo, si la longitud de onda es de $0,55 \mu\text{m}$, las respectivas fracciones son 0,50, 0,48 y 0,02.

22.9 COLOR

Los materiales transparentes aparecen de color porque absorben selectivamente determinados intervalos de longitud de onda de la luz; el **color** resulta de la combinación de las longitudes de onda transmitidas. Si la absorción es uniforme para todas las longitudes de onda de la luz visible, el material aparece incoloro; como por ejemplo los vidrios inorgánicos de alta pureza y los diamantes y zafiros monocristalinos y de alta pureza.

En general, la absorción selectiva ocurre por excitación de electrones. Una de estas situaciones implica a materiales semiconductores que tienen intervalos prohibidos dentro de la gama de energías de los fotones de la luz visible (1,8 a 3,1 eV). De este modo, la fracción de luz visible con energía superior a E_g es absorbida selectivamente por la transición electrónica desde la banda de valencia a la banda de conducción. Desde luego, parte de la radiación absorbida es emitida de nuevo cuando los electrones excitados vuelven a caer a sus estados energéticos originales más bajos. No es necesario que la frecuencia de la radiación reemitida coincida con la de la frecuencia

Figura 22.9 Transmisión de la radiación lumínica en función de la longitud de onda para el zafiro (monocristal de óxido de aluminio) y el rubí (óxido de aluminio con cierta proporción de óxido de cromo). El zafiro aparece incoloro, mientras que el rubí es rojo debido a la absorción selectiva de determinados intervalos de longitudes de onda. (Adaptada de "The Optical Properties of Materials", por A. Javan. Copyright 1967 de Scientific American, Inc. Reservados todos los derechos.)



de la radiación absorbida; la frecuencia y la energía asociada pueden ser inferiores en los casos de transiciones múltiples radiativas (Figura 22.6b) o no radiativas (Figura 22.6c). En consecuencia, el color depende de la distribución de frecuencias de los rayos de luz transmitida y reemitida.

Por ejemplo, el sulfuro de cadmio (CdS) tiene un intervalo prohibido de unos 2,4 eV; por tanto, absorbe fotones con energías superiores a 2,4 eV, que corresponden a las porciones azul y violeta del espectro visible; parte de esta energía es irradiada de nuevo como luz con otra longitud de onda. La luz visible no absorbida consiste en fotones con energías comprendidas entre 1,8 y 2,4 eV. El sulfuro de cadmio adquiere un color amarillo-naranja debido a la composición del haz de luz transmitido.

En las cerámicas aislantes, determinadas impurezas introducen niveles electrónicos en el interior de los intervalos prohibidos, como ya se ha dicho. Los fotones con menor energía que la del intervalo prohibido pueden ser absorbidos como consecuencia de las excitaciones electrónicas que implican átomos o iones de impurezas, como se muestra en la Figura 22.6a; desde luego, existe la posibilidad de que ocurra alguna reemisión. De nuevo, el color del material es función de la distribución de las longitudes de onda del haz transmitido.

Por ejemplo, el óxido de aluminio monocristalino y de alta pureza, o zafiro, es incoloro. El rubí, de color rojo brillante, es un zafiro impurificado con un 0,5 a 2% de óxido de cromo (Cr_2O_3). El ion Cr^{3+} sustituye al ion Al^{3+} en la estructura cristalina del Al_2O_3 , y, además, introduce niveles energéticos dentro del amplio intervalo prohibido de energía del zafiro. Como consecuencia de las transiciones electrónicas hacia los niveles energéticos introducidos por estas impurezas, o las transiciones desde estos mismos niveles, se absorben determinadas longitudes de onda. La Figura 22.9 indica la transmisión en función de la longitud de onda para el zafiro y para el rubí. En el zafiro, la transmisión en el espectro visible es relativamente constante, como corresponde a un material incoloro. Sin embargo, en el rubí aparecen fuertes picos de absorción (o mínimos) en la región del azul-violeta (a unos $0,4 \mu\text{m}$) y en la del amarillo-verde (a unos $0,6 \mu\text{m}$). La luz no absorbida o transmitida mezclada con la luz emitida de nuevo da al rubí su color característico.

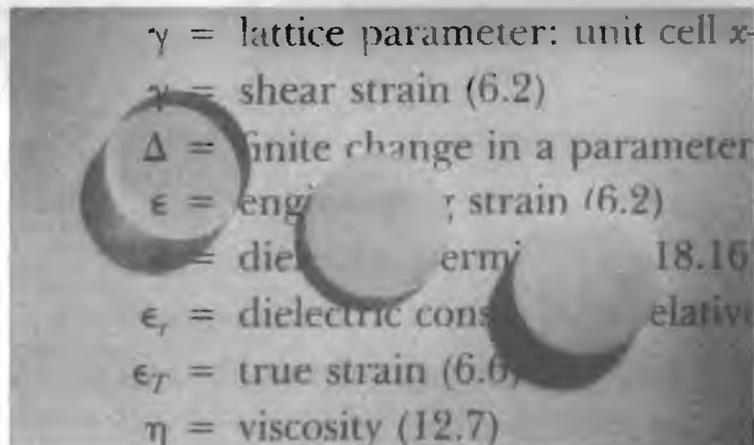


Figura 22.10 Transmisión de la luz a través de tres muestras de óxido de aluminio. De izquierda a derecha: monocristalino de zafiro, transparente; un material policristalino denso (no poroso), translúcido; y un material policristalino que contiene aproximadamente 5% de porosidad, que es opaco. (Muestras preparadas por P. A. Lessing y fotografiadas por J. Telford.)

Los vidrios inorgánicos están coloreados porque incorporan iones de tierras raras o de metales de transición mientras permanecen en estado fundido. Algunos ejemplos representativos de iones relacionados con su color son los siguientes: Cu^{2+} , azul-verdoso; Co^{2+} , azul-violeta; Cr^{3+} , verde; Mn^{2+} , amarillo; y Mn^{3+} , púrpura.

22.10 OPACIDAD Y TRANSLUCIDEZ DE MATERIALES AISLADORES

El grado de translucidez o de opacidad de los materiales dieléctricos intrínsecamente transparentes depende en gran parte de sus características de reflexión interna y transmitancia. Muchos materiales dieléctricos que son intrínsecamente transparentes pueden convertirse en translúcidos o incluso en opacos debido a refracciones y reflexiones internas. Un rayo de luz transmitido es desviado (cambia de dirección) y aparece difuso como consecuencia de los fenómenos de dispersión múltiple. La opacidad resulta cuando la dispersión es tan grande que ningún rayo incidente se transmite a la superficie opuesta.

La dispersión interna ocurre de varias maneras. Las muestras policristalinas con índice de refracción anisotrópico suelen aparecer translúcidas. En los límites de grano ocurren los fenómenos de reflexión y refracción, que generan desviaciones de los rayos incidentes como consecuencia de pequeñas diferencias del índice de refracción n entre granos vecinos con distinta orientación cristalográfica.

La dispersión de la luz también ocurre en materiales bifásicos cuando una fase se encuentra finamente dispersa dentro de la otra. De nuevo, se produce dispersión del rayo debido a la diferencia de valores del índice de refracción en las dos fases; cuanto mayor es la diferencia, más eficaz es la dispersión.

Las piezas cerámicas suelen tener pequeños poros, uniformemente distribuidos, debido al proceso de fabricación, y estos poros, también actúan dispersando la luz.

La Figura 22.10 muestra las diferencias en las características de transmisión óptica de muestras de óxido de aluminio monocristalino, policristalino

denso (no poroso) y policristalino poroso (5% de porosidad). Mientras los monocristales son totalmente transparentes, los materiales policristalinos densos son translúcidos y los porosos son opacos.

Los polímeros intrínsecos (sin aditivos y sin impurezas) muestran una relación directa entre el grado de translucidez y la cristalinidad. En los límites entre regiones amorfas y cristalinas ocurren dispersiones de la luz visible, como siempre a causa de la diferencia de índices de refracción. En las muestras altamente cristalinas el grado de dispersión es elevado y se comportan como translúcidas y, a veces, como opacas. Los polímeros muy amorfos son completamente transparentes.

APLICACIONES DE FENÓMENOS ÓPTICOS

22.11 LUMINISCENCIA

La **luminiscencia** es el fenómeno que experimentan algunos materiales capaces de absorber energía y de volver a emitirla en forma de luz visible. Los fotones de luz emitida se generan por transiciones electrónicas en el sólido. Se absorbe energía al promover un electrón a un estado excitado; se emite luz visible cuando el electrón cae a un estado energético inferior si $1,8 \text{ eV} < h < 3,1 \text{ eV}$. La energía absorbida se aporta como radiación electromagnética de energía superior (que causa transiciones desde la banda valencia a la banda conducción) tal como la luz ultravioleta, o de otras fuentes tales como electrones de alta energía o energías térmica, mecánica o química. Además, la luminiscencia se clasifica según el tiempo que dura la emisión de luz después de la absorción. Si la emisión dura menos de un segundo, el fenómeno se denomina **fluorescencia** y si dura más se denomina **fosforescencia**. Algunos sulfuros, óxidos, wolframatos y unos pocos materiales orgánicos son fluorescentes o fosforescentes. Generalmente los materiales puros no presentan estos fenómenos, pero sí los materiales que contienen impurezas en concentraciones controladas.

La luminiscencia tiene muchas aplicaciones. Las lámparas de fluorescencia constan de un tubo de vidrio cuya superficie interna está recubierta de silicatos o wolframatos especialmente preparados. Dentro del tubo hay vapor de mercurio que, al producirse una descarga eléctrica, genera luz ultravioleta. Cuando esta luz ultravioleta incide en el reubrimiento, se emite luz blanca. También es posible detectar rayos X y rayos γ . Las imágenes de la pantalla de televisión se deben a fenómenos luminiscentes. La parte interior de la pantalla está recubierta con un material que fluoresce cuando un rayo procedente del tubo incide en la pantalla. Ciertas cerillas emiten luz visible o resplandecen cuando se les aplica un rayo de radiación no visible.

Se utilizan algunas uniones rectificadoras *p-n*, descritas en la Sección 19.14, para producir luz visible en un proceso denominado **electroluminiscencia**. Cuando se aplica un potencial conectado con polaridad directa a través del dispositivo, los electrones y los huecos se aniquilan mutuamente recombinándose según la Ecuación 22.17. En ciertas circunstancias, la energía producida aparece como luz visible. Estos diodos que producen luz visible son los *diodos emisores de luz* (LED), utilizados en pantallas digitales. El color característico de un LED depende del material semiconductor que se utilice.

La conductividad de los materiales semiconductores depende del número de electrones de la banda de conducción y también del número de huecos de la banda de valencia, de acuerdo con la Ecuación 19.6. La energía térmica asociada con las vibraciones de red puede excitar a los electrones y generar huecos y/o electrones libres, según se describe en la Sección 19.6. Como consecuencia de transiciones electrónicas inducidas por fotones en las cuales se absorbe luz, se pueden generar transportadores de carga adicionales; este incremento de conductividad se denomina **fotoconductividad**. De este modo, cuando se ilumina una muestra de material fotoconductor, la conductividad aumenta.

Este fenómeno se utiliza en los fotómetros fotográficos. Se mide la corriente fotoinducida ya que su magnitud es función directa de la intensidad de la luz incidente o de la velocidad a la que los fotones de luz golpean el material. Desde luego, la radiación de luz visible debe inducir transiciones electrónicas en el material semiconductor; el sulfuro de cadmio se utiliza corrientemente en fotómetros.

La luz del sol se convierte directamente en energía eléctrica en las células solares, que también emplean semiconductores. En cierto aspecto, el funcionamiento de estos dispositivos es el inverso de los diodos emisores de luz. Se utiliza una unión *p-n* en la cual los electrones y huecos fotoexcitados se alejan de la unión, en direcciones opuestas, y forman parte de una corriente externa.

22.13 LÁSERES

Todas las transiciones electrónicas radiativas, es decir, las que generan radiación electromagnética, vistas hasta ahora son espontáneas; esto es, un electrón cae desde un estado energético superior a otro inferior sin provocación externa. Estas transiciones ocurren independientemente una de otras y en instantes aleatorios, produciendo una radiación incoherente; esto es, las ondas de luz están desfasadas unas respecto a las otras. En los láseres, sin embargo, se genera luz coherente por transiciones electrónicas iniciadas por estímulos externos. En efecto, la palabra **láser** viene del acrónimo inglés de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.

Aunque existen diferentes variedades de láseres, el principio de la operación se explica utilizando el láser de rubí en estado sólido. El rubí es un monocristal de Al_2O_3 (zafiro) al que se le ha adicionado aproximadamente un 0,05% de iones Cr^{3+} . Estos iones aportan al rubí un característico color rojo (Sección 22.4) y también estados electrónicos esenciales para la función láser. El láser de rubí tiene forma de barra, con sus extremos planos, paralelos y muy pulidos. Estos extremos se recubren con plata, de modo que uno sea totalmente reflejante y el otro parcialmente transparente.

El rubí se ilumina con una lámpara de xenón (Figura 22.11). Antes de la exposición a la luz, prácticamente todos los iones Cr^{3+} ocupan el estado fundamental; esto es, los electrones están situados en los estados de menor energía (Figura 22.12). Sin embargo, los fotones de longitudes de onda de $0,56 \mu\text{m}$ de la lámpara de xenón excitan los electrones de los iones Cr^{3+} hasta los estados de energía más elevados. Estos electrones pueden caer al estado fundamental por dos diferentes caminos. Algunos caen directamente y las

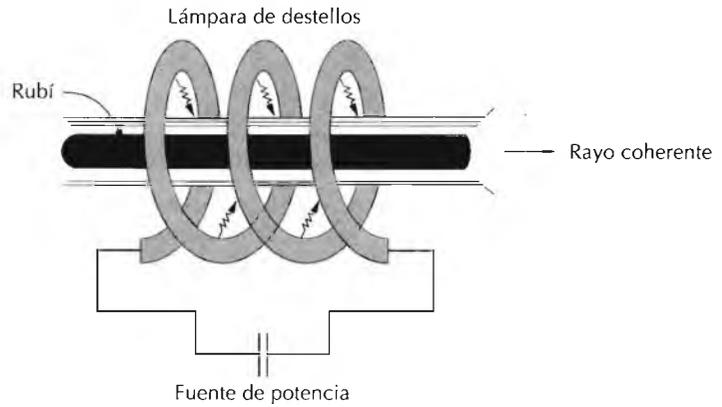


Figura 22.11 Esquema de un láser de rubí y de una lámpara de destellos de xenón. (De R. M. Rose, L. A. Shepard y J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol.4, *Electronic Properties*. Copyright 1966 John Wiley & Sons, Nueva York. Reproducido con autorización de John Wiley & Sons, Inc.)

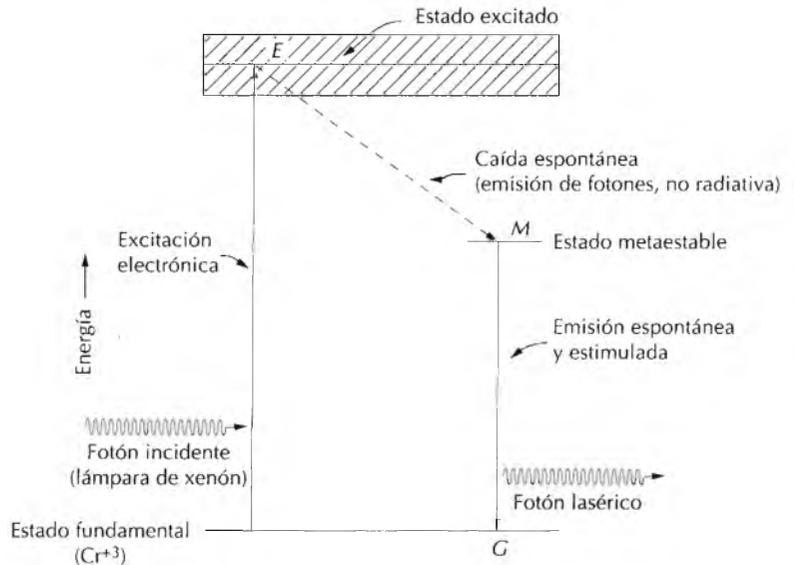


Figura 22.12 Diagrama de energía para el láser de rubí, mostrando los caminos de la excitación y de la caída electrónica.

emisiones de fotones asociadas no forman parte del rayo láser. Otros electrones caen a un estado intermedio metaestable (camino EM , Figura 22.12), donde pueden permanecer durante unos 3 ms antes de la emisión espontánea (camino MG). En términos de los procesos electrónicos, 3 ms es un tiempo relativamente largo, lo que significa que gran número de estos estados metaestables pueden ocuparse. Esta situación se indica en la Figura 22.13b.

La emisión inicial y espontánea de fotones por unos pocos de estos electrones es el estímulo que dispara una avalancha de emisiones de los electrones que ocupan posiciones metaestables (Figura 22.13c). Algunos de los fotones que se desplazan paralelamente al eje de la barra de rubí cruzan el extremo parcialmente plateado y los que inciden en el extremo totalmente plateado se reflejan. Los fotones que no son emitidos en esta dirección axial

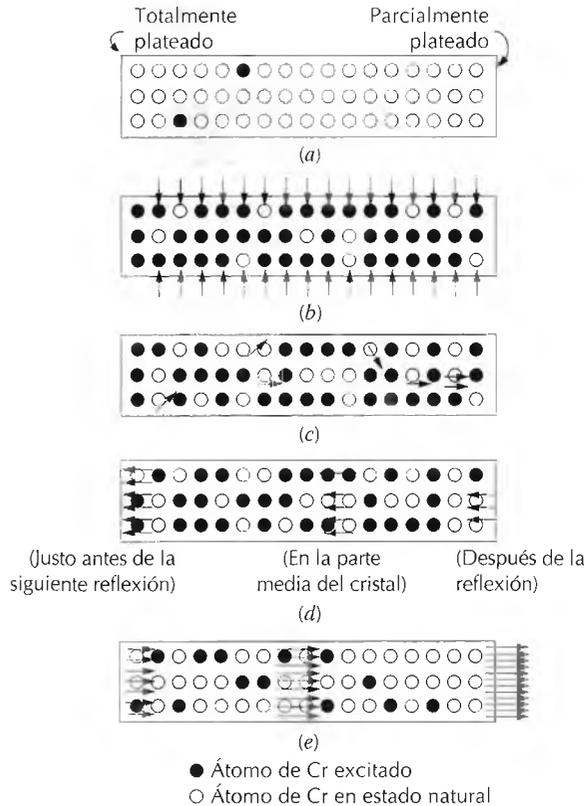


Figura 22.13 Representación esquemática de la emisión estimulada y de la amplificación de la luz por un láser de rubí. (a) Los iones cromo antes de la excitación. (b) Los electrones de algunos átomos de cromo se excitan a estados de energía superior mediante la lámpara de destellos de xenón. (c) La emisión desde estados electrónicos metaestables se inicia o se estimula mediante fotones emitidos espontáneamente. (d) Después de la reflexión en los extremos recubiertos de plata, los fotones continúan estimulando la emisión a medida que van pasando de un extremo al otro de la barra. (e) Finalmente, a través del extremo parcialmente plateado, se emite un intenso rayo de luz coherente. (De R. M. Rose, L. A. Shepard y J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol.4, *Electronic Properties*. Copyright 1966 de John Wiley & Sons, Nueva York. Reproducido con autorización de John Wiley & Sons, Inc.)

se pierden. El rayo de luz cruza repetidamente la barra de rubí y su intensidad se incrementa a medida que aumenta la estimulación de las emisiones. Finalmente, del extremo parcialmente plateado de la barra sale un rayo de luz láser de corta duración, de alta intensidad, coherente y altamente colimado (Figura 22.13e). Este rayo rojo monocromático tiene una longitud de onda de $0,6943 \mu\text{m}$.

Materiales semiconductores como el arseniuro de galio también se utilizan como láseres y se emplean para fabricar discos compactos musicales y en la industria de las modernas telecomunicaciones. Un requisito de estos materiales semiconductores es que la longitud de onda λ asociada con la energía E_g del intervalo prohibido debe corresponder a la luz visible; esto es, a partir de una modificación de la Ecuación 22.3,

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (22.20)$$

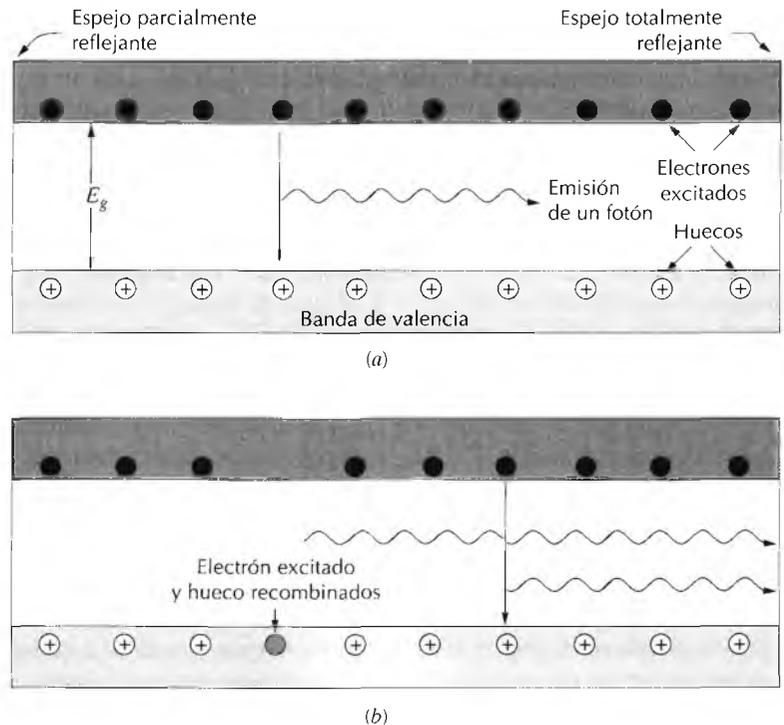
el valor de λ debe estar comprendido entre $0,4$ y $0,7 \mu\text{m}$. El voltaje aplicado al material excita los electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción, pasando por el intervalo prohibido; correspondientemente, aparecen huecos en la banda de valencia. Este fenómeno se indica en la Figura 22.14a, donde se muestran las bandas de energía, en una región del material semiconductor, con varios huecos y electrones excitados. Unos pocos electrones y huecos se recombinan espontáneamente. En cada recombinación

ción se emite un fotón de luz cuya longitud de onda viene dada por la Ecuación 22.20 (Figura 22.14a). Estos fotones estimularán la recombinación de otro par electrón excitado-hueco, Figura 22.14b-f y la producción de fotones adicionales que tienen la misma longitud de onda y están todos en fase con el fotón original. De este modo resulta un rayo monocromático y coherente. Como en el caso del láser de rubí (Figura 22.13), un extremo del láser semiconductor es totalmente reflejante; en este extremo el rayo se refleja dentro del material y estimula otras recombinaciones. El otro extremo del láser es parcialmente reflejante: deja escapar algunos rayos. Además, con este tipo de láser se produce un rayo continuo, siempre que se asegure un voltaje aplicado de valor constante; es decir, una fuente constante de huecos y electrones excitados.

El láser semiconductor está formado por varias capas de material semiconductor de diferentes composiciones que se colocan entre un metal conductor y un disipador de calor; en la Figura 22.15 se ha esquematizado una disposición típica. Las composiciones de las capas se eligen para concentrar los electrones excitados, los huecos y el rayo láser en la lámina central de arseniuro de galio.

Para construir láseres se pueden utilizar otras sustancias, incluyendo gases y vidrios. Las aplicaciones de los láseres son diversas. Como los rayos láseres se pueden focalizar para producir calor localizado, se utilizan en algunos procedimientos quirúrgicos y para cortar, soldar y mecanizar metales. Los láseres también se utilizan como fuentes de luz para sistemas de comunicación óptica. Además, debido a que el haz es altamente coherente, se puede utilizar para medir distancias con alta precisión.

Figura 22.14 Láser semiconductor. Representación esquemática de la recombinación estimulada de electrones excitados de la banda de conducción con huecos de la banda de valencia generando un rayo láser. (a) Un electrón excitado se recombina con un hueco; la energía asociada a esta recombinación se emite en forma de fotón de luz. (b) El fotón emitido en (a) estimula otra recombinación de un electrón excitado con un hueco, generando la emisión de otro fotón de luz. (c) Los dos fotones emitidos en (a) y (b), que tienen la misma longitud de onda y están en fase, alcanzan el espejo totalmente reflejante del extremo y se reflejan hacia atrás, hacia el interior del semiconductor láser. (continúa en la página siguiente.)



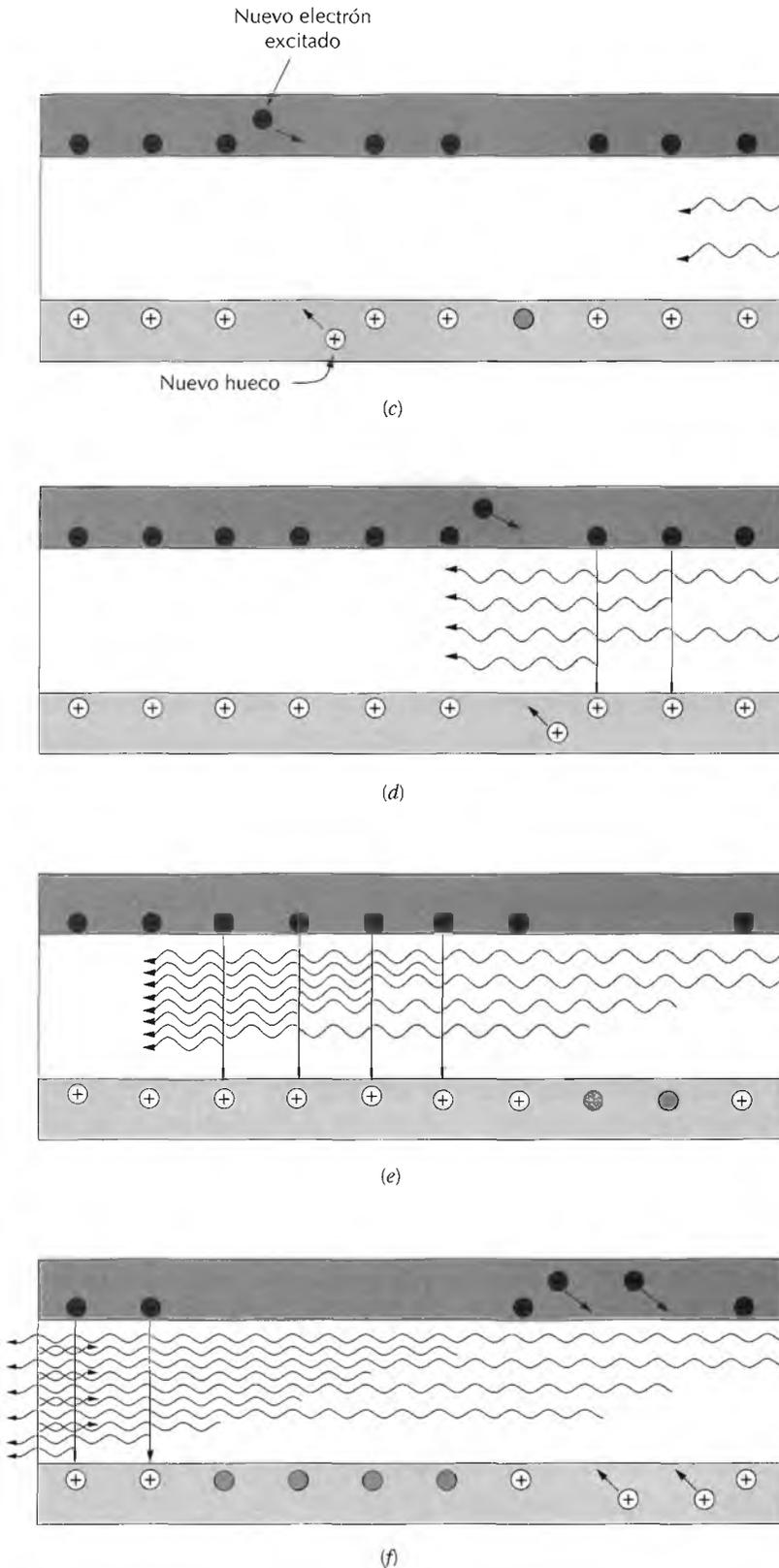


Figura 22.14 (Continuación) Además, la corriente que circula por el semiconductor excita nuevos electrones y genera nuevos huecos. (d) y (e) En el semiconductor se estimulan más recombinaciones de electrones excitados con huecos, generando fotones de luz adicionales que forman parte del rayo láser monocromático y coherente. (f) Una parte de este rayo láser se escapa a través del espejo parcialmente reflejante del extremo del material semiconductor. (Adaptado de "Photonic Materials", por J. M. Rowell. Copyright 1986 de Scientific American, Inc. Reservados todos los derechos.)

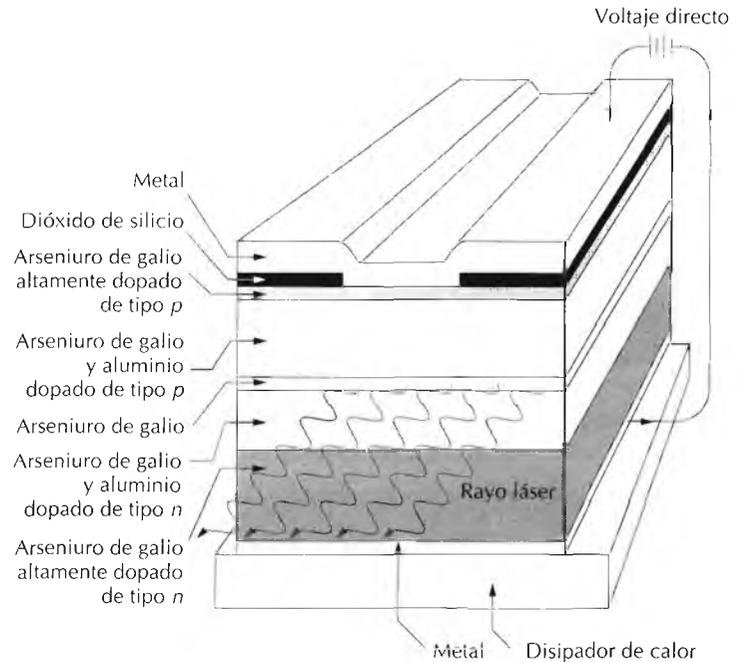


Figura 22.15 Diagrama esquemático mostrando la sección de las capas de un semiconductor de GaAs. Huecos, electrones excitados y rayo láser confinados en la capa GaAs por las capas vecinas tipo *n* y *p* de GaAlAs. (Adaptado de "Photonic Materials", por J.M.Rowell. Copyright 1986 por Scientific American, Inc.. Reservados todos los derechos)

RESUMEN

El comportamiento óptico de un material sólido es una función de sus interacciones con las radiaciones electromagnéticas de longitud de onda correspondiente a la región visible del espectro. Estas interacciones incluyen fenómenos de refracción, reflexión, absorción y transmisión de la luz incidente.

Los metales aparecen opacos como consecuencia de la absorción y posterior emisión de la radiación lumínica dentro de una delgada capa superficial. La absorción tiene lugar por excitación de los electrones desde los estados energéticos ocupados a los niveles energéticos vacíos situados por encima del nivel de Fermi. La nueva emisión tiene lugar cuando se producen transiciones electrónicas en dirección inversa. El color de un metal se debe a la composición espectral de la luz reflejada.

Intrínsecamente, los materiales no metálicos pueden ser o bien transparentes o bien opacos. La opacidad aparece en materiales con un intervalo prohibido relativamente estrecho, en los que la absorción de la energía de un fotón es suficiente para generar la transición electrónica desde la banda de valencia a la banda de conducción. Los no metales transparentes tienen un intervalo prohibido mayor que 3 eV.

La radiación lumínica experimenta refracción en los materiales transparentes; esto es, la velocidad disminuye y el rayo de luz se desvía en la intercara. El índice de refracción es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en un medio particular. El fenómeno de la refracción es consecuencia de la polarización electrónica de los átomos o iones inducida por el componente del campo eléctrico de la onda de luz.

Cuando la luz pasa de un medio transparente a otro que tiene diferente índice de refracción, parte de la luz se refleja en la intercara. El grado de reflexión depende de los índices de refracción de ambos medios y del ángulo de incidencia.

Los materiales transparentes absorben parte de la luz como consecuencia de la polarización electrónica y de las transiciones electrónicas a los estados electrónicos introducidos en el intervalo prohibido por las impurezas. Estos materiales aparecen coloreados debido a la selectiva absorción de los tramos de longitud de onda de la luz.

Los materiales transparentes se convierten en translúcidos u opacos si el rayo de luz incidente experimenta reflexión y/o refracción en el interior. La translucidez y la opacidad como resultado de la dispersión interna pueden ocurrir en: (1) materiales policristalinos con índice de refracción anisotrópico, (2) materiales bifásicos, (3) materiales con poros pequeños y (4) polímeros altamente cristalinos.

Este capítulo concluye discutiendo otros tres fenómenos ópticos: luminiscencia, fotoconductividad y ampliación de la luz por radiación de emisión estimulada (láseres). En la luminiscencia, la energía se absorbe como consecuencia de excitaciones electrónicas y se vuelve a emitir como luz visible. La conductividad eléctrica de algunos semiconductores se incrementa por transiciones electrónicas fotoinducidas que generan nuevos electrones libres y huecos. Los láseres producen rayos de luz coherentes y de elevada intensidad mediante transiciones electrónicas estimuladas.

TÉRMINOS Y CONCEPTOS IMPORTANTES

Absorción	Fosforescencia	Reflexión
Color	Fotoconductividad	Refracción
Constante de Planck	Fotón	Translúcido
Electroluminiscencia	Índice de refracción	Transmisión
Estado excitado	Láser	Transparente
Estado fundamental	Luminiscencia	
Fluorescencia	Opaco	

BIBLIOGRAFÍA

- AZAROFF, L. V. y J. J. BROPHY, *Electronic Processes in Materials*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1963, Capítulo 14. Reimpreso por TechBooks, Fairfax, VA.
- JAVAN, A., "The Optical Properties of Materials," *Scientific American*, Vol. 217, No. 3, September 1967, pp. 238–248.
- KINGERY, W. D., H. K. BOWEN, y D. R. UHLMANN, *Introduction to Ceramics*, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 1976, Capítulo 13.
- RALLS, K. M., T. H. COURTNEY, y J. WULFF, *Introduction to Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1976, Capítulo 27.
- ROWELL, J. M., "Photonic Materials," *Scientific American*, Vol. 255, No. 4, October 1986, pp. 146–157.