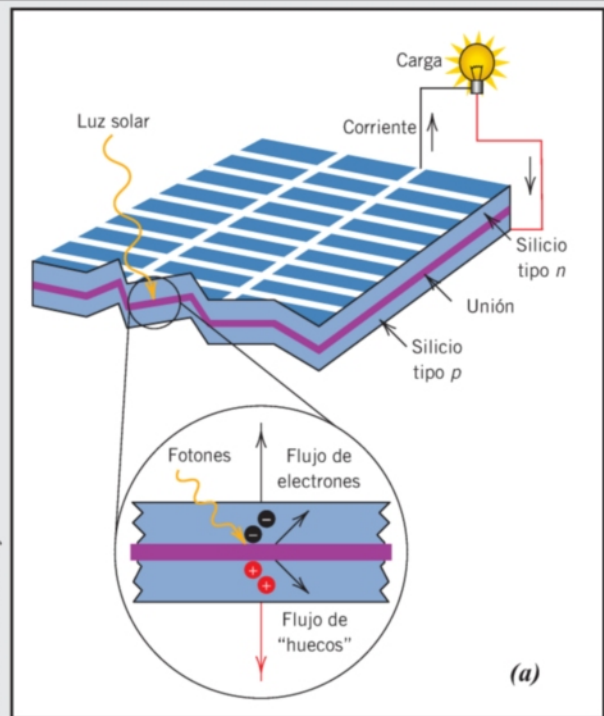


## Capítulo 22 Propiedades ópticas

(a) Diagrama esquemático del funcionamiento de una célula solar fotovoltaica. La célula está fabricada con silicio policristalino que ha sido elaborado para formar uniones  $p$ - $n$  (Secciones 19.11 y 19.15). Los fotones se originan cuando la luz solar excita electrones de la banda de conducción en el lado  $n$  de la unión y crea huecos en el lado  $p$ . Estos electrones y los huecos son arrastrados lejos de la unión en direcciones opuestas y se convierten en parte de una corriente externa.

Cortesía de Research Institute for Sustainable Energy (www.rise.org.au) and Murdoch University



(c) Vivienda con paneles solares.



(c)



(b) Conjunto de células fotovoltaicas de silicio policristalino.

© Gabor Izso / iStockphoto

## ¿POR QUÉ ESTUDIAR *propiedades ópticas de los materiales*?

Cuando los materiales se exponen a radiación electromagnética, es importante poder predecir y modificar su respuesta. Esto sólo es posible si se conocen sus propiedades ópticas y se comprenden los mecanismos responsables de las mismas. Por ejemplo, en la Sección 21.14 para los materiales de fibra óptica

utilizados en las comunicaciones, hay que tener en cuenta que el rendimiento de las fibras ópticas se incrementa introduciendo una variación gradual del índice de refracción (índice gradual) en la superficie exterior de la fibra. Esto se logra adicionando impurezas específicas en concentraciones controladas.

### Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Calcular la energía de un fotón a partir de su frecuencia y el valor de la constante de Planck.
2. Describir brevemente la polarización electrónica resultante de la interacción de la radiación electromagnética con los átomos y citar dos consecuencias de la polarización electrónica.
3. Explicar brevemente por qué los materiales metálicos son opacos a la luz visible.
4. Definir índice de *refracción*.
5. Describir el mecanismo de absorción de fotones por parte de (a) materiales aislantes de alta pureza y semiconductores y (b) materiales aislantes y semiconductores que contienen defectos eléctricamente activos.
6. Para materiales dieléctricos inherentemente transparentes, señalar tres fuentes de dispersión interna que pueden inducir translucidez y opacidad.
7. Describir brevemente la construcción y funcionamiento del láser de rubí y semiconductor.

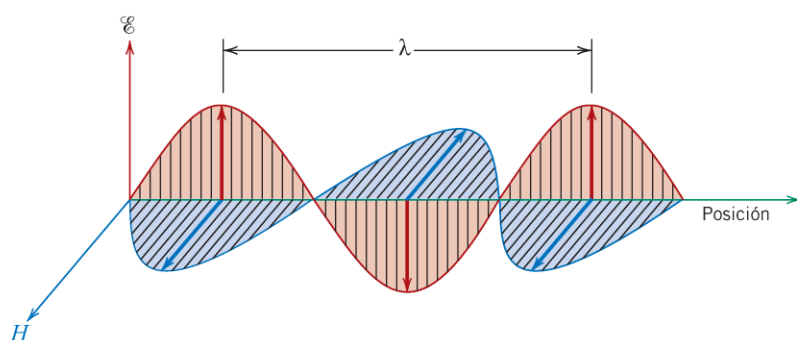
## 22.1 INTRODUCCIÓN

El término *propiedad óptica* hace referencia a la respuesta de un material expuesto a una radiación electromagnética y, en particular, a la luz visible. En este capítulo se comentan algunos conceptos y principios fundamentales relativos a la naturaleza de la radiación electromagnética y a sus posibles interacciones con los materiales sólidos. También se analiza el comportamiento óptico de los materiales metálicos y no metálicos, en términos de sus características de absorción, reflexión y transmisión. En las secciones finales se describen la luminiscencia, la fotoconductividad y la amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación (láser), así como la utilización práctica de este fenómeno y el uso de las fibras ópticas en las comunicaciones.

## Conceptos fundamentales

### 22.2 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

En sentido clásico, se considera que la radiación electromagnética es un tipo de onda compuesta por un campo magnético y 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 ellas se caracteriza por el intervalo de longitudes de onda y también por la forma en que se generan. El *espectro electromagnético* abarca desde las radiaciones de rayos  $\gamma$ , 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, luz ultravioleta, espectro visible e infrarrojos. En la Figura 22.2 se reproduce este espectro a escala logarítmica.



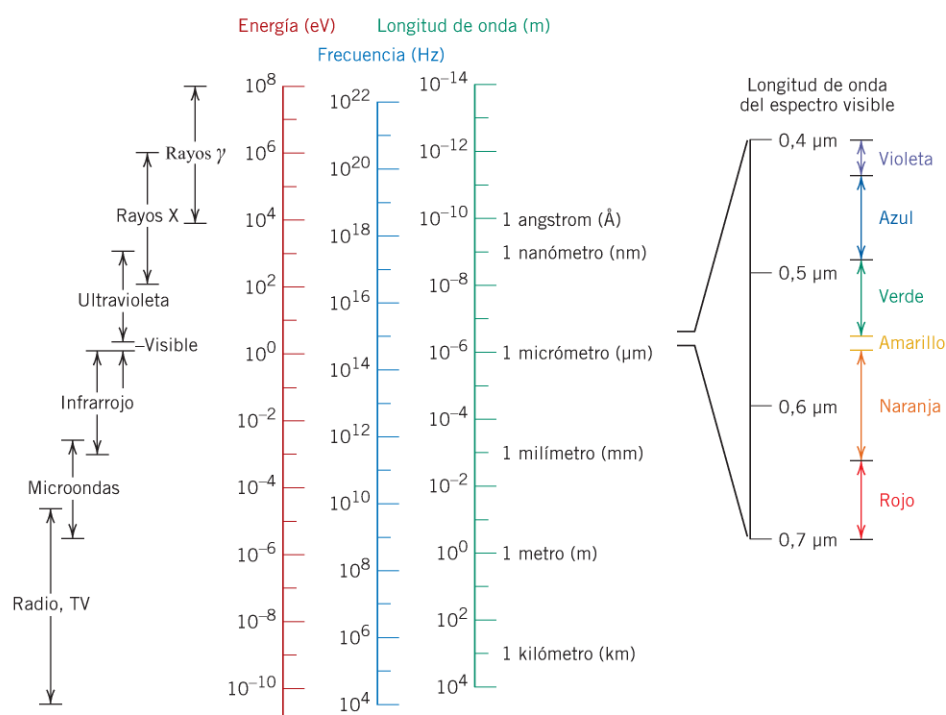
**Figura 22.1** Onda electromagnética mostrando los componentes de campo eléctrico  $\mathcal{E}$  y de campo magnético  $H$  y la longitud de onda  $\lambda$ .

La luz visible abarca una región pequeña del espectro, con longitudes de onda comprendidas entre  $0,4 \mu\text{m}$  ( $4 \times 10^{-7} \text{ m}$ ) y  $0,7 \mu\text{m}$ . El color percibido viene determinado por la longitud de onda; por ejemplo, una 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  $0,65$ , respectivamente. La Figura 22.2 incluye los intervalos espectrales de los 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 detecta el ojo humano.

La radiación electromagnética atraviesa el vacío a la velocidad de la luz:  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Esta velocidad  $c$  está relacionada con la permitividad eléctrica del vacío  $\epsilon_0$  y con la permeabilidad magnética del vacío  $\mu_0$ :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (22.1)$$

Relación entre la velocidad de la luz, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética en el vacío



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



Relación entre la velocidad, la longitud de onda y la frecuencia para una radiación electromagnética

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

Además, la frecuencia  $\nu$  y la longitud de onda  $\lambda$  de la radiación electromagnética son función de la velocidad,

$$c = \lambda \nu \quad (22.2)$$

La frecuencia se expresa en hercios (Hz) y  $1 \text{ Hz} = 1$  ciclo por segundo. Los intervalos de frecuencia para diversas radiaciones electromagnéticas están incluidos 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

fotón

Relación entre energía, frecuencia, velocidad y longitud de onda para un fotón de radiación electromagnética

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

constante de Planck

donde  $h$  es la constante universal llamada **constante de Planck** y su valor es  $6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ . Es decir, la energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la radiación o inversamente proporcional a la longitud de onda. La energía del fotón también está incluida 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.



**Autoevaluación 22.1** Discutir brevemente las similitudes y diferencias entre los fotones y los fonones. *Sugerencia:* Consultar la Sección 20.2.

**Autoevaluación 22.2** La radiación electromagnética se puede tratar desde la perspectiva de la mecánica clásica o desde la mecánica cuántica. Comparar brevemente estos dos puntos de vista.

(Respuestas en [www.reverte.com/microsites/callister2e](http://www.reverte.com/microsites/callister2e)).

## 22.3 INTERACCIONES DE LA LUZ CON LOS SÓLIDOS

La intensidad de un haz incidente en una intercara es igual a la suma de las intensidades de los haces transmitidos, absorbidos y reflejados

Cuando la luz pasa de un medio a otro (p. ej., del aire al interior de un sólido) pueden ocurrir varios fenómenos. Una parte de la luz se transmite a través del medio, otra parte es absorbida y otra parte se refleja en la intercara entre los dos medios. La intensidad  $I_0$  del haz incidente a la superficie del medio sólido debe ser igual a la suma de las intensidades del haz 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 fórmula alternativa a 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 y la reflectancia o reflectividad, es decir, las fracciones de luz incidentes 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.

transparente  
translúcido

opaco

Los materiales capaces de transmitir la luz con relativamente poca absorción y reflexión se denominan **transparentes**, y se puede ver a través de ellos. Si dejan pasar parcialmente la luz se denominan materiales **translúcidos**: la luz se dispersa en su interior de modo que al observar a través de una muestra de uno de estos materiales, 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, de modo que la luz incidente o se absorbe o se refleja. Por otro lado, los materiales aislantes eléctricos pueden fabricarse de manera que sean transparentes. Algunos semiconductores pueden ser transparentes y otros son opacos.

## 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 o los electrones. La polarización electrónica y las transiciones de energía electrónica son las dos interacciones más importantes.

### 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, en 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 19.32a. 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 la refracción, que se comenta en la Sección 22.5.

### Transición electrónica

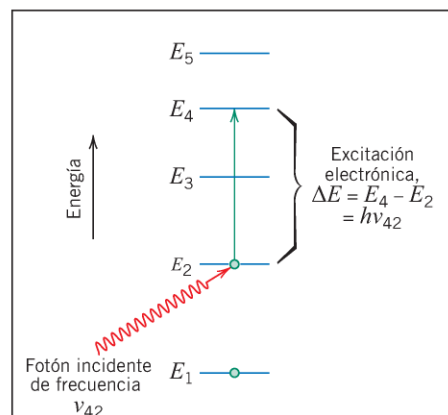
La absorción y la emisión de radiación electromagnética representan transiciones de un estado energético a otro. Si se considera un átomo aislado, cuyo diagrama de energía electrónica se representa en la Figura 22.3, se puede excitar un electrón desde un estado ocupado de energía  $E_2$  a uno vacante de mayor energía,  $E_4$ , mediante la absorción de un fotón de energía. El cambio energético experimentado por el electrón,  $\Delta E$ , 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 discretos, entre los niveles energéticos sólo existen determinados  $\Delta E$ , por tanto, las transiciones electrónicas sólo pueden absorber fotones de frecuencia correspondientes a los  $\Delta E$  posibles para el átomo. Además, en cada excitación se absorbe toda la energía del fotón.

En una transición electrónica, la variación de energía es igual al producto de la constante de Planck y la frecuencia de radiación absorbida (o emitida)

**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 ( $E_4 - E_2$ ).



estado excitado  
estado fundamental

En segundo lugar, un electrón estimulado no puede permanecer indefinidamente en un **estado excitado**; después de un tiempo breve, 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.

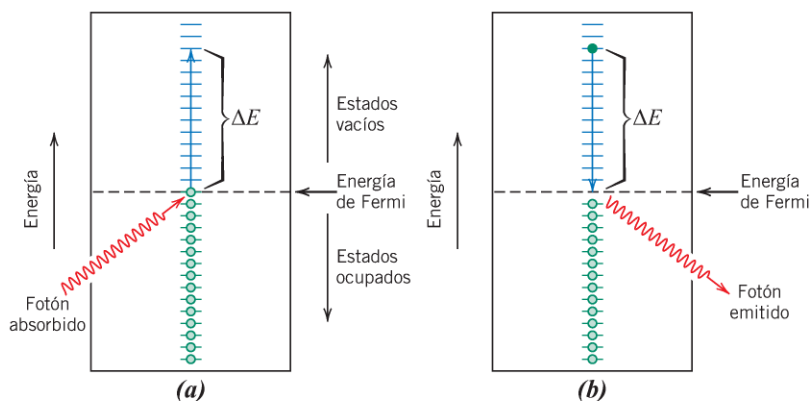
Las características ópticas de los materiales sólidos que relacionan las radiaciones electromagnéticas de absorción y de emisión se explican mediante la estructura de bandas electrónicas de los materiales (Sección 19.5) y los principios relativos a las transiciones electrónicas, se indican en los párrafos precedentes.

## Propiedades ópticas de los metales

Si se consideran los esquemas de bandas de energía electrónica de las Figuras 19.4a y 19.4b, se aprecia que, en ambos casos, una banda de alta energía está sólo parcialmente llena de electrones. Los metales son opacos porque la radiación incidente, que tiene frecuencias dentro del intervalo correspondiente a la luz visible, excita a los electrones a estados energéticos no ocupados situados por encima de la energía de Fermi, como se indica en 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 de la muestra muy delgada, generalmente de espesor inferior a  $0,1 \mu\text{m}$ . Así, 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 la transición electrónica, como se indica en 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

**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  $\Delta E$  equivale a la energía del fotón. (b) Reemisión de un fotón de luz por transición directa de un electrón desde un estado energético elevado a otro inferior.



ondas ultravioletas, pasando por el infrarrojo y el visible. Los metales son transparentes a las radiaciones de alta frecuencia, como rayos X y rayos  $\gamma$ .

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 y sólo una pequeña fracción de la energía del proceso de caída de electrones, se disipa en forma de calor.

Como los metales son opacos y tienen alta reflectancia, el color percibido está determinado por la distribución de longitudes de onda de la radiación reflejada y no absorbida. Una apariencia plateada brillante 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 que para el rayo incidente. El aluminio y la plata son dos metales que presentan este comportamiento reflector. El cobre y el oro se perciben con colores rojizo y amarillo, respectivamente, porque parte de la energía asociada con fotones de luz, con longitudes de onda cortas, no se vuelven a emitir como luz visible.



**Autoevaluación 22.3** ¿Por qué los metales son transparentes a las radiaciones de alta frecuencia, como rayos X y rayos  $\gamma$ ?

(Respuesta en [www.reverte.com/microsites/callister2e](http://www.reverte.com/microsites/callister2e)).

## Propiedades ópticas de los no metales

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

### 22.5 REFRACCIÓN

#### refracción

#### índice de refracción

Definición del *índice de refracción*, como la relación entre las velocidades de la luz en el vacío y en el medio de interés

La luz transmitida en el interior de un material transparente experimenta disminución de la velocidad y, en consecuencia, la dirección de propagación en la intercara cambia o se desvía; 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 desvío) depende de la longitud de onda de la luz. Este efecto se puede apreciar por el conocido fenómeno de 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, como

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

Velocidad de la luz en un medio, en términos de permitividad eléctrica del medio y de la permeabilidad magnética



Índice de refracción de un medio, en términos de la constante dieléctrica del medio y la permeabilidad magnética relativa

Relación entre el índice de refracción y la constante dieléctrica para un material no magnético



Dispersión de la luz blanca al pasar a través de un prisma (© PhotoDisc/Getty Images).

donde  $\epsilon$  y  $\mu$  son, respectivamente, la permitividad y la permeabilidad del medio particular. De la Ecuación 22.7 se deduce que

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

donde  $\epsilon_r$  y  $\mu_r$  son la constante dieléctrica y la permeabilidad magnética relativa, respectivamente. Para materiales ligeramente magnéticos,  $\mu_r \approx 1$  y

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

Por lo tanto, para los materiales transparentes existe una relación entre el índice de refracción y la constante dieléctrica. Como 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.

Dado que 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 de sosa-cal es aproximadamente de 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 90% Pb en peso suelen tener índices de refracción próximos a 2,1.

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

**Tabla 22.1**

Índices de refracción de algunos materiales transparentes.

Material	Índice de refracción promedio
<b>Cerámicos</b>	
Vidrio de sílice	1,458
Vidrio de borosilicato (Pyrex)	1,47
Vidrio de sosa-cal	1,51
Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	1,55
Vidrio óptico Flint	1,65
Espinela (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	1,72
Periclasa (MgO)	1,74
Corindón (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,76
<b>Polímeros</b>	
Politetrafluoroetileno (PTFE)	1,35
Poli (metacrilato de metilo) (PMMA)	1,49
Polipropileno (PP)	1,49
Polietileno (PE)	1,51
Poliestireno (PS)	1,60

refracción de varios vidrios, cerámicas transparentes y polímeros. Para las cerámicas cristalinas se asignan valores promedio, ya que  $n$  es anisotrópico.



**Autoevaluación 22.4** Indicar cuál de los siguientes óxidos, cuando se añade a la sílice fundida ( $\text{SiO}_2$ ), aumenta su índice de refracción:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{MgO}$ . ¿Por qué? Consultar la Tabla 4.4.

(Respuesta en [www.reverte.com/microsites/callister2e](http://www.reverte.com/microsites/callister2e)).

## 22.6 REFLEXIÓN

Definición de reflectividad, en términos de intensidades de haz reflejado e incidente

Cuando la radiación lumínica pasa de un medio a otro, con un índice de refracción diferente, parte de la luz se dispersa en la intercara de los dos medios, aunque éstos sean transparentes. La reflectividad  $R$  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 (normal) a la intercara, se cumple que

Reflectividad (para incidencia normal) en la intercara entre dos medios que tienen índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$

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

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de los dos medios. Si la luz no incide normalmente 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 que

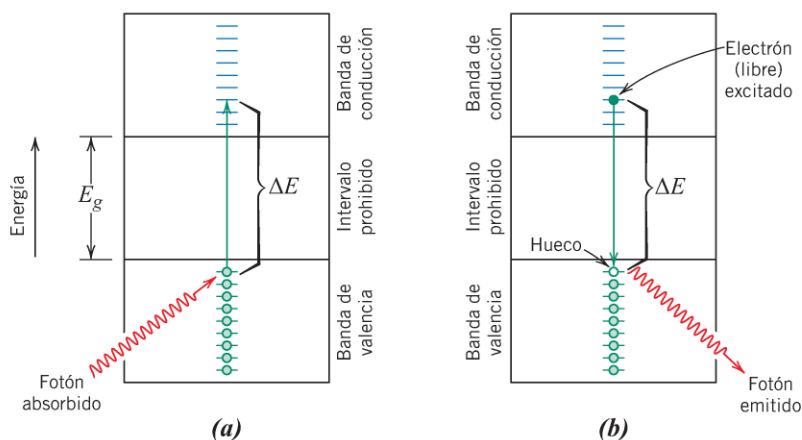
$$R = \left( \frac{n_s - 1}{n_s + 1} \right)^2 \quad (22.13)$$

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 reflectividad. En los vidrios de silicato, la reflectividad es aproximadamente de 0,05. Dado que el índice de refracción de un sólido depende de la longitud de onda de la luz incidente, la reflectividad varía con la longitud de onda. Es conveniente 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 el fluoruro magnésico ( $\text{MgF}_2$ ).

## 22.7 ABSORCIÓN

Los materiales no metálicos pueden comportarse como opacos o transparentes a la luz y, en el caso que sean transparentes, a menudo aparecen coloreados. En este grupo de materiales la radiación lumínica se absorbe, en principio, por tres mecanismos que también repercuten en las características de la 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 entre la banda de conducción y la banda de

**Figura 22.5** (a) Mecanismo de la absorción de un fotón en materiales no metálicos, donde un electrón se excita a través del intervalo prohibido y crea un agujero en la banda de valencia. La energía del fotón absorbido  $\Delta E$  es 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.



valencia, que dependen de la estructura de bandas de energía electrónica del material; las estructuras de bandas de los materiales semiconductores y de los aislantes se comentan en la Sección 19.5.

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 (*gap*), como se indica en la Figura 22.5a. De este modo se crea un hueco en la banda de valencia y un electrón libre en la banda de conducción. De nuevo, la energía de excitación  $\Delta E$  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  $E_g$ , es decir, 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 aproximadamente  $0,4 \mu\text{m}$  y, dado 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  $E_g$  para que ocurra absorción de la 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 materiales con intervalos prohibidos de energía superiores a 3,1 eV. Estos materiales, en estado de alta pureza, aparecen transparentes e incoloros.

Condiciones para la absorción de un fotón (de radiación) por una transición electrónica, en términos de frecuencia de la radiación, para un material no metálico

Condiciones para la absorción de un fotón (de radiación) por una transición electrónica, en términos de la longitud de onda de la radiación, para un material no metálico

Máximo intervalo posible de bandas de energía prohibida (*gap*) para la absorción de la luz visible por transición electrónica de la banda de valencia a la banda de conducción



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

Mínimo intervalo posible de bandas de energía prohibida (*gap*) para la absorción de la luz visible por transición electrónica de la banda de valencia a la banda de conducción

$$E_g(\text{mín}) = \frac{hc}{\lambda(\text{máx})} \quad (22.16b)$$

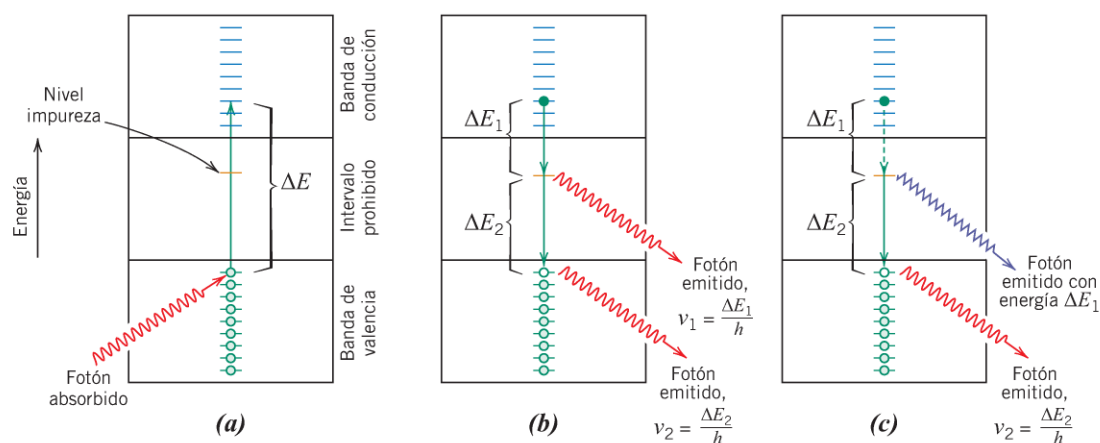
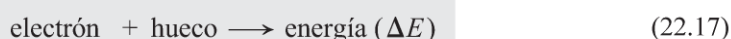
$$= \frac{(4,13 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{7 \times 10^{-7} \text{ m}} = 1,8 \text{ eV}$$

Este resultado significa que los materiales semiconductores, con intervalos prohibidos de energía inferiores a  $1,8 \text{ eV}$ , absorben toda la luz visible por transición electrónica desde la banda de valencia a la banda de conducción, y son opacos. Sólo una fracción del espectro visible es absorbida por materiales cuyo intervalo prohibido de energía está comprendido entre  $1,8$  y  $3,1 \text{ eV}$ ; por consiguiente, estos materiales aparecen coloreados.

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

En sólidos dieléctricos con amplios intervalos de energía prohibida, 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 del interior del intervalo prohibido, o hacia ellos, como se indica en la Figura 22.6a. De nuevo, la energía electromagnética absorbida por excitaciones electrónicas debe ser disipada de alguna manera y, para ello, existen 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

Reacción que describe la recombinación electrón-hueco con generación de energía



**Figura 22.6** (a) Absorción de un fotón de luz por excitación de un electrón, desde un nivel de valencia a un nivel de conducción, para un material con un nivel de impureza situado dentro del intervalo prohibido. (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 fotón y de un fotón por los tránsitos de un electrón primero hasta un nivel de impureza y finalmente hasta su estado fundamental.

Intensidad de la radiación no absorbida, relación entre el coeficiente de absorción y la distancia que la luz atraviesa a través del medio absorbente

que se representa esquemáticamente en la Figura 22.5b. También pueden ocurrir transiciones electrónicas en varias etapas, que implican niveles energéticos debidos a las impurezas situadas 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 reacción absorbida neta es independiente de la naturaleza 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, según

$$I'_T = I'_0 e^{-\beta x} \quad (22.18)$$

donde  $I'_0$  es la intensidad de la radiación incidente no reflejada y  $\beta$  es el *coeficiente de absorción* (en  $\text{mm}^{-1}$ ), característico del material particular; además,  $\beta$  varía con la longitud de onda de la radiación incidente. El parámetro distancia  $x$  se mide desde la superficie de incidencia de la radiación hasta el interior del material. Los materiales con valores elevados de  $\beta$  se consideran altamente absorbentes.

### PROBLEMA RESUELTO 22.1

#### Cálculo del coeficiente de absorción del vidrio

La fracción de luz no reflejada que se transmite a través de un vidrio de 200 mm de espesor es 0,98. Calcular el coeficiente de absorción de este material.

#### Solución

Para resolver este problema se ha de determinar el valor de  $\beta$  en la Ecuación 22.18. Primero se reordena esta expresión como

$$\frac{I'_T}{I'_0} = e^{-\beta x}$$

Tomando logaritmos en ambos miembros de esta ecuación, se tiene que

$$\ln\left(\frac{I'_T}{I'_0}\right) = -\beta x$$

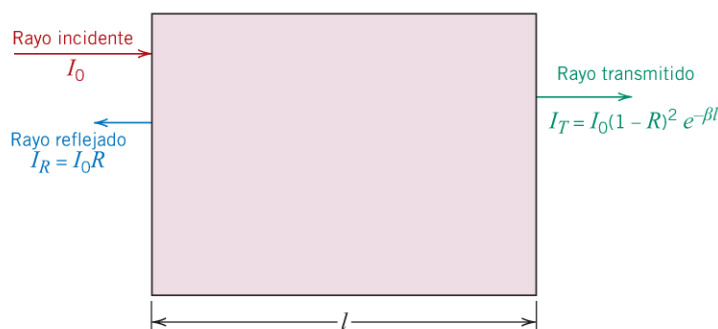
Por último, la solución para  $\beta$ , si  $I'_T/I'_0 = 0,98$  y  $x = 200$  mm, es

$$\begin{aligned} \beta &= -\frac{1}{x} \ln\left(\frac{I'_T}{I'_0}\right) \\ &= -\frac{1}{200 \text{ mm}} \ln(0,98) = 1,01 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1} \end{aligned}$$



**Autoevaluación 22.5** Los semiconductores elementales de silicio y germanio, ¿son transparentes a la luz visible? ¿Por qué sí o por qué no? *Sugerencia:* Consultar la Tabla 19.3.

(Respuesta en [www.reverte.com/microsites/callister2e](http://www.reverte.com/microsites/callister2e)).



**Figura 22.7** Transmisión de la luz a través de un medio transparente, en el que hay reflexión en las caras anterior y posterior, así como absorción en el medio interno. (Adaptación de R. M. Rose, L. A. Shepard y J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol.4, *Electronic Properties*. Copyright ©1966 por John Wiley & Sons, New York. Reproducción autorizada por John Wiley & Sons, Inc.).

## 22.8 TRANSMISIÓN

Intensidad de la radiación transmitida a través una muestra de espesor  $l$ , teniendo en cuenta las pérdidas por absorción y por reflexión

Los fenómenos de absorción, reflexión y transmisión también se pueden aplicar al paso de la luz a través de un sólido transparente, como se indica en la Figura 22.7. Cuando un rayo incidente de intensidad  $I_0$  incide en la cara frontal de una muestra de espesor  $l$  y coeficiente de absorción  $\beta$ , la intensidad transmitida a la cara opuesta  $I_T$  es:

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

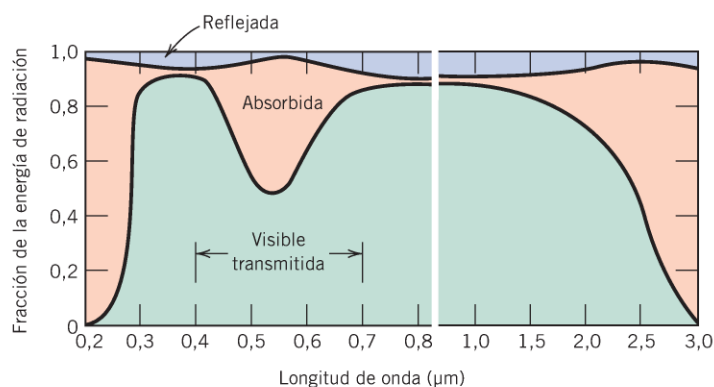
donde  $R$  es la reflectancia. En esta expresión se supone que existe el mismo medio en la cara frontal que en la cara opuesta. La deducción de la Ecuación 22.19 es un problema propuesto.

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 transmisividad  $T$  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 se demuestra en la Figura 22.8, para la región visible del espectro en 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 el espesor es de  $0,55 \mu\text{m}$ , las fracciones respectivas son de 0,50, 0,48 y 0,02.

## 22.9 COLOR

color

Los materiales transparentes aparecen coloreados porque absorben selectivamente determinados intervalos de longitud de onda de la luz; el **color** resulta de la combinación de longitudes de onda transmitidas. Si la absorción es uniforme para todas las longitudes



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



de onda de la luz visible, el material aparece incoloro como por ejemplo en los vidrios inorgánicos de alta pureza, en los diamantes y en los 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. Parte de esta 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 absorbida. En consecuencia, el color depende de la distribución de frecuencias de los rayos de luz transmitida y reemitida.

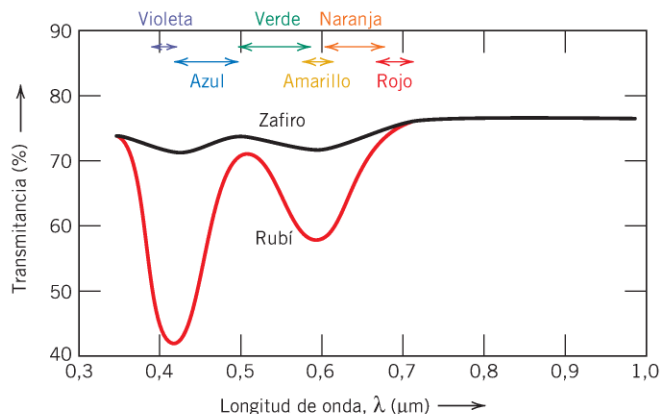
Por ejemplo, el sulfuro de cadmio (CdS) tiene un intervalo prohibido de unos 2,4 eV; por tanto, absorbe fotones con energía superior a 2,4 eV, que corresponden a las regiones azul y violeta del espectro visible; parte de esta energía es irradiada de nuevo como luz con otra longitud de onda. La luz visible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

En cerámicos aislantes, determinadas impurezas introducen niveles electrónicos en el interior de los intervalos prohibidos, como se ha comentado. 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 las Figuras 22.6b y 22.6c. 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 0,5%-2% de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). El ion  $\text{Cr}^{3+}$  sustituye al ion  $\text{Al}^{3+}$  en la estructura cristalina del  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y, además, introduce niveles energéticos dentro del amplio intervalo prohibido de energía del zafiro. La radiación de luz se absorbe por transiciones electrónicas desde la banda de valencia a la banda de conducción, y parte de esa radiación es reemitida a determinadas longitudes de onda como consecuencia de transiciones electrónicas hacia y desde estos niveles de impurezas. En la Figura 22.9 se indica la transmitancia en función de la longitud de onda para el zafiro y para el rubí. En el zafiro, la transmitancia 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 característico color rojo intenso.

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:  $\text{Cu}^{2+}$ , azul-verde;  $\text{Co}^{2+}$ , azul-violeta;  $\text{Cr}^{3+}$ , verde;  $\text{Mn}^{2+}$ , amarillo y  $\text{Mn}^{3+}$ , púrpura. Estos vidrios de colores también se utilizan como vitrificantes (esmaltes) y recubrimientos decorativos de productos cerámicos.

**Figura 22.9** Transmisión de la radiación lumínica, en función de la longitud de onda, para el zafiro (monocristal de óxido de aluminio) y para 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 un intervalo específico de longitudes de onda. (Adaptación de “The Optical Properties of Materials”, por A. Javan. Copyright © 1967 por Scientific American, Inc. Reservados todos los derechos).





**Autoevaluación 22.6** Comparar los factores que determinan los colores característicos de los metales y no metales transparentes.

(Respuesta en [www.reverte.com/microsites/callister2e](http://www.reverte.com/microsites/callister2e)).

## 22.10 OPACIDAD Y TRANSLUCIDEZ EN DIELECTRICOS

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 opacos debido a refracciones y reflexiones internas. Un rayo de luz transmitido se desvía (cambia de dirección) y aparece difuso como consecuencia de los fenómenos de dispersión múltiple. La opacidad aparece cuando la dispersión es tan grande que ningún rayo incidente se transmite a la cara opuesta.

La dispersión interna ocurre de varias maneras. Las muestras policristalinas con índice de refracción anisotrópico suelen aparecer translúcidas. En los límites de grano tienen lugar 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 vitrocerámicas (Sección 14.11), que pueden contener fase cristalina y fase amorfa, aparece muy transparente si el tamaño de los cristales es más pequeño que la longitud de onda de la luz visible y cuando los índices de refracción de las dos fases son casi idénticos (lo cual es posible mediante el ajuste de la composición).

Las piezas cerámicas suelen tener pequeños poros uniformemente distribuidos, causados por el 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 materiales poliméricos (sin aditivos y sin impurezas) muestran una relación directa entre grado de translucidez y cristalinidad. En los límites entre regiones amorfas y cristalinas ocurren dispersiones de la luz visible, a causa de la diferencia de índices de



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



refracción. En materiales polímeros altamente cristalinos el grado de dispersión es elevado y se comportan como translúcidos y, a veces, como opacos. Los polímeros muy amorfos son completamente transparentes.

## Aplicaciones de fenómenos ópticos

### 22.11 LUMINISCENCIA

#### luminiscencia

La **luminiscencia** es el fenómeno que experimentan algunos materiales capaces de absorber energía y luego volverla a emitir 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 cae a un estado energético inferior si  $1,8 \text{ eV} < h\nu < 3,1 \text{ eV}$ . La energía absorbida se aporta como radiación electromagnética de alta energía (que causa transiciones desde la banda valencia a la banda conducción) mediante la luz ultravioleta, mediante electrones de alta energía o mediante 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 nueva emisión dura menos de un segundo, el fenómeno se denomina **fluorescencia** y si dura más se denomina **fosforescencia**. Algunos sulfuros, óxidos, wolframatos y un número reducido de materiales orgánicos son fluorescentes o fosforescentes. Generalmente los materiales puros no presentan estos fenómenos, pero sí los materiales que contienen impurezas en concentraciones controladas.

#### fluorescencia

#### fosforescencia

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 incide en el recubrimiento fluorescente, emite luz blanca. Las lámparas (o bombillas) de los *fluorescentes compactos*, LFC (*Compact Fluorescence Lights*, CLF), están reemplazando a las bombillas incandescentes convencionales. Estas bombillas de CFL se construyen a partir de un tubo curvado o doblado para que encaje en el espacio anteriormente ocupado por la bombilla incandescente y se pueda instalar en los accesorios correspondientes. Los fluorescentes compactos emiten la misma cantidad de luz visible, consumen entre un quinto y un tercio de la energía eléctrica y tienen tiempos de vida mucho más largos que las bombillas incandescentes. Sin embargo, son más caros y el reciclaje es más complicado, ya que contienen mercurio.

### 22.12 FOTOCONDUCTIVIDAD

#### fotoconductividad

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 (Ecuación 19.13). La energía térmica asociada con las vibraciones de red puede excitar a los electrones y generar huecos y/o electrones libres (Sección 19.6). Como consecuencia de las 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, aumenta la conductividad.

Este fenómeno se utiliza en los fotómetros fotográficos, que miden una corriente fotoconducida, ya que su magnitud es función directa de la intensidad de 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 habitualmente 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 del de los diodos emisores de luz. Se utiliza una unión *p-n* en la cual los electrones y los huecos fotoexcitados se alejan de la unión, en direcciones opuestas, y formar parte de una corriente externa, como ilustra el diagrama (a) del inicio del capítulo.



## CONTENIDOS INNOVADORES

## Diodos emisores de luz (LED)

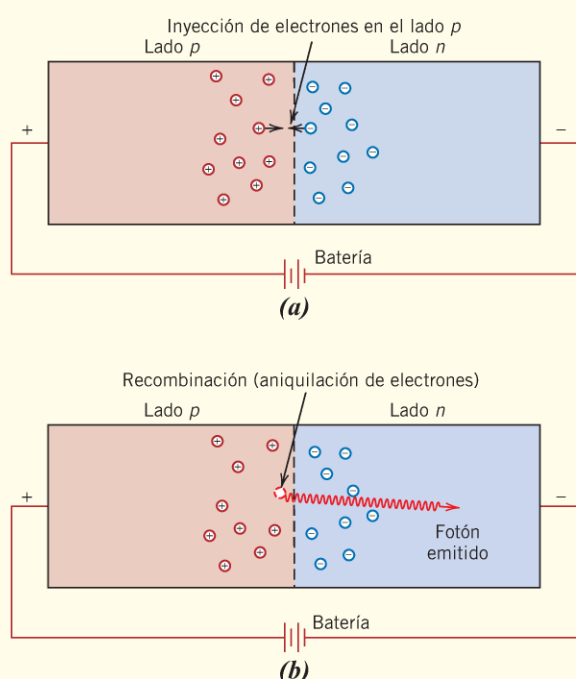
En la Sección 19.15 se comentan las uniones  $p$ - $n$  de los semiconductores y cómo pueden ser utilizados como diodos o como rectificadores de una corriente eléctrica.<sup>1</sup> En algunas situaciones, cuando un potencial de polarización directa de magnitud relativamente alta se aplica a través de un diodo con una unión  $p$ - $n$ , se emite luz visible (o radiación infrarroja). Esta conversión de la energía eléctrica en energía de la luz se denomina **electroluminiscencia**, y el dispositivo que lo produce se denomina **diodo emisor de luz (LED, Light-emitting diode)**. El potencial de polarización directa atrae electrones en el lado  $n$  hacia la unión, donde algunos de ellos pasan (o se “inyecta”) al lado  $p$  (Figura 22.11a). Aquí, los electrones son los portadores de carga minoritarios y por lo tanto se “recombinan” (o son aniquilados) con los huecos en la región

cerca de la unión, de acuerdo con la Ecuación 22.17, donde la energía se convierte en fotones de luz (Figura 22.11b). Un proceso análogo se produce en el lado  $p$ , los huecos viajan hacia la unión y se recombinan con los electrones mayoritarios en el lado  $n$ .

Los semiconductores de silicio y germanio elementales no son adecuados para los LED, debido a la naturaleza y estructura del intervalo prohibido de energía. Por el contrario, algunos de los compuestos semiconductores III-V tales como el arseniuro de galio (GaAs) y fosfuro de indio (InP) y aleaciones compuestas de estos materiales (p. ej.,  $\text{GaAs}_x\text{P}_{(1-x)}$ , donde  $x$  es un pequeño número menor que la unidad) se utilizan con frecuencia. La longitud de onda (es decir, el color) de la radiación emitida está relacionada con el intervalo prohibido del semiconductor (que normalmente es el mismo para ambos lados  $p$ - $n$  del diodo). Por ejemplo, los colores rojo, naranja y amarillo aparecen en el sistema de GaAs-InP. Los LED azules y verdes también se han desarrollado utilizando aleaciones semiconductoras (Ga,In)N. Por lo tanto, con este complemento de colores, se pueden fabricar pantallas con todos los colores utilizando LED.

Aplicaciones importantes de semiconductores LED incluyen relojes digitales y pantallas de relojes iluminados, ratones ópticos (dispositivos informáticos de entrada) y escáneres de películas. Los controles remotos electrónicos (para televisores, reproductores de DVD, etc.) también usan LED que emiten un haz infrarrojo; estas señales codificadas se reciben en los detectores de los dispositivos receptores. Además, los LED están siendo utilizados como fuentes de luz, ya que son más eficientes energéticamente que las bombillas incandescentes, generan muy poco calor y tienen una vida de servicio más larga (porque no hay filamento que se pueda fundir). La mayoría de las nuevas señales de control de tráfico utilizan LED en lugar de bombillas de incandescencia.

En la Sección 19.17 se ha mencionado que algunos materiales poliméricos pueden ser semiconductores (tanto de tipo  $n$  como  $p$ ). Como consecuencia, es posible fabricar diodos emisores de luz a partir de polímeros, de los cuales hay dos tipos: (1) los *diodos emisores de luz orgánicos* (OLED, *Organic light-emitting diodes*), que tienen pesos moleculares



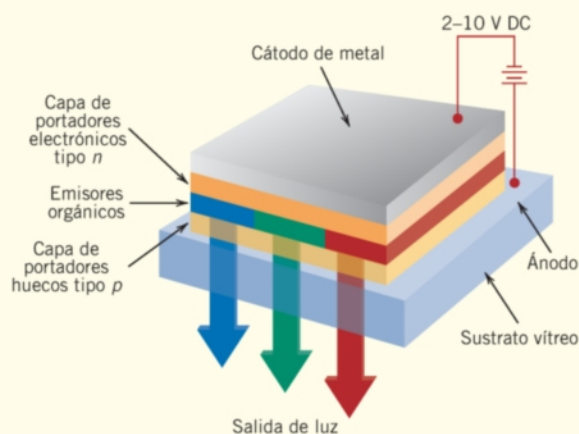
**Figura 22.11** Diagrama esquemático de un semiconductor  $p$ - $n$  de conexiones polarizadas que muestra (a) la inyección de un electrón desde el lado  $n$  al lado  $p$ , y (b) la emisión de un fotón de luz, por recombinación del electrón con un hueco.

<sup>1</sup>En la Figura 19.21 se muestra la distribución esquemática de electrones y huecos a ambas caras de una unión sin potencial eléctrico aplicado, con polaridad directa y con polaridad inversa. En la Figura 19.22 se muestra la relación característica corriente-voltaje para una unión  $p$ - $n$ .

relativamente bajos; y (2) *diodos emisores de luz de polímero* de alto peso molecular (PLED, *Polymer light-emitting diodes*). Para estos tipos de LED, los polímeros amorfos se utilizan en forma de capas delgadas que se intercalan junto con contactos eléctricos (ánodos y cátodos). A fin de que la luz sea emitida desde el LED, uno de los contactos debe ser transparente. La Figura 22.12 es una ilustración esquemática que muestra los componentes y configuración de un OLED. Se consigue una amplia variedad de colores utilizando OLED y PLED, y se puede producir más de un solo color o a partir de cada dispositivo (que no es posible con semiconductores LED). Así, combinando colores es posible la generación de luz blanca.

Aunque los semiconductores LED suelen tener tiempos de vida más largos que los emisores orgánicos, los OLED/PLED tienen diversas ventajas. Además de la posibilidad de generación de múltiples colores, son más fáciles de fabricar (por “impresión” en sustratos con impresoras de inyección de tinta), son relativamente baratos, tienen perfiles más delgados y pueden generar imágenes a todo color y de alta resolución. Las pantallas OLED están siendo comercializadas para su uso en cámaras digitales, teléfonos

móviles y componentes de audio de coche. Las aplicaciones potenciales incluyen pantallas más grandes para los televisores, ordenadores y carteleros. Además, con la combinación adecuada de materiales, estas pantallas también pueden ser flexibles. Cuesta imaginar una pantalla de ordenador o de televisor que pueda enrollarse como una pantalla de proyección, o un dispositivo de iluminación que pueda colocarse alrededor de una columna arquitectónica, envolviéndola, o montado sobre una pared de la sala para proporcionar un fondo de pantalla siempre cambiante.



**Figura 22.12** Diagrama esquemático que muestra los componentes y configuración de un diodo emisor de luz orgánico (OLED, *Organic light-emitting diode*). (Reproducción autorizada por la publicación *Silicon Chip*).



Fotografía que muestra una pantalla de LED de grandes dimensiones situada en la esquina de Broadway con la calle 43 en la ciudad de New York.



### Autoevaluación 22.7

El seleniuro de zinc ( $\text{ZnSe}$ ), semiconductor que tiene un intervalo prohibido (*gap*) de 2,58 eV, ¿es fotoconductor cuando se expone a la radiación de luz visible? ¿Por qué sí o por qué no?

(Respuesta en [www.reverte.com/microsites/callister2e](http://www.reverte.com/microsites/callister2e)).



## 22.13 LÁSERES

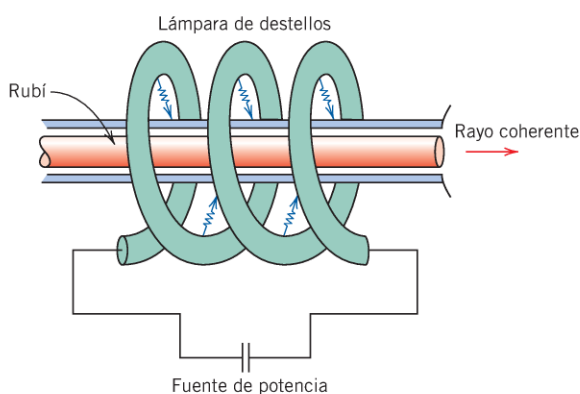
### láser

Todas las transiciones electrónicas radiactivas, es decir, las que generan radiación electromagnética, que se han comentado en apartados previos, son *espontáneas*: un electrón cae desde un estado energético superior a otro inferior sin provocación externa. Estas transiciones ocurren independientemente unas de otras y en instantes aleatorios, produciendo una radiación incoherente, ya que las ondas de luz están desfasadas unas respecto a las otras. En un láser, sin embargo, se genera luz coherente provocada por transiciones electrónicas iniciadas por estímulos externos. La palabra **láser** viene del acrónimo *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).

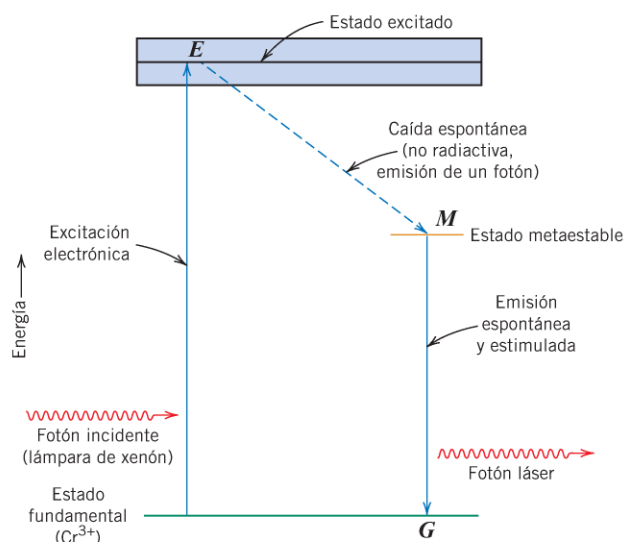
Aunque existen diferentes variedades de láser, el principio de su funcionamiento se explica utilizando el láser de rubí en estado sólido. El rubí es un monocristal de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (zafiro) con adición de, aproximadamente, un 0,05% de iones  $\text{Cr}^{3+}$ . Estos iones aportan al rubí un característico color rojo (Sección 22.9) 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 reflectante y el otro parcialmente transparente.

El rubí se ilumina con una lámpara de xenón (Figura 22.13). Antes de la exposición a la luz, prácticamente todos los iones  $\text{Cr}^{3+}$  ocupan el estado fundamental y los electrones están situados en los estados de menor energía (Figura 22.14). 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  $\text{Cr}^{3+}$  hasta los estados de energía más elevados. Estos electrones pueden caer al estado fundamental por dos caminos diferentes. Algunos caen directamente y las emisiones de fotones asociadas no forman parte del rayo láser. Otros electrones caen a un estado intermedio metaestable (trazo *EM*, Figura 22.14), donde pueden permanecer durante unos 3 ms (milisegundos) antes de la emisión espontánea (trazo *MG*). En términos de los procesos electrónicos, 3 ms es un tiempo relativamente largo, lo que significa que pueden ocuparse gran número de estos estados metaestables. Esta situación se indica en la Figura 22.15b.

La emisión inicial y espontánea de fotones a causa de unos pocos de estos electrones es el estímulo que dispara una avalancha de emisiones de los electrones que ocupan posiciones metaestables (Figura 22.15c). Algunos de los fotones, que se desplazan paralelamente

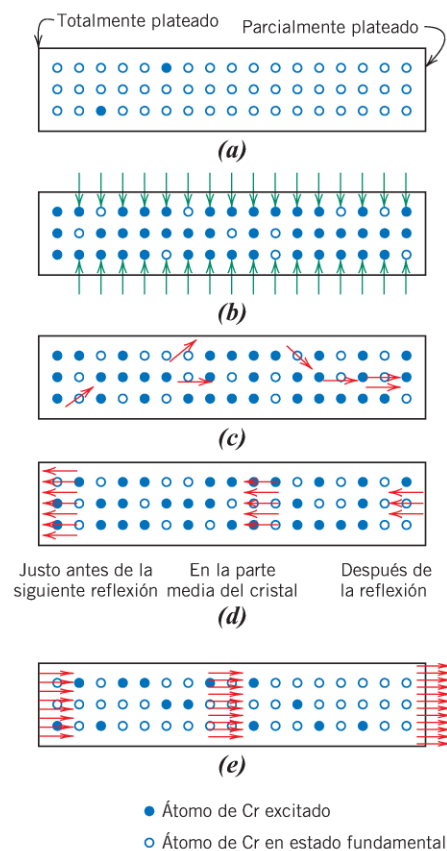


**Figura 22.13** Esquema de un láser de rubí y de una lámpara de destellos de xenón. (De R. M. Rose, L. A. Shepard y J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol.4, *Electronic Properties*. Copyright ©1966 por John Wiley & Sons, New York. Reproducción autorizada por John Wiley & Sons, Inc.).



**Figura 22.14** Diagrama de energía para el láser de rubí, mostrando los caminos de excitación y de caída electrónica.

**Figura 22.15** Representación esquemática de la amplificación de la luz por emisión estimulada para un láser de rubí. (a) Iones cromo antes de la excitación. (b) Electrones de algunos átomos de cromo que 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 por John Wiley & Sons, New York. Reproducción autorizada por John Wiley & Sons, Inc.).



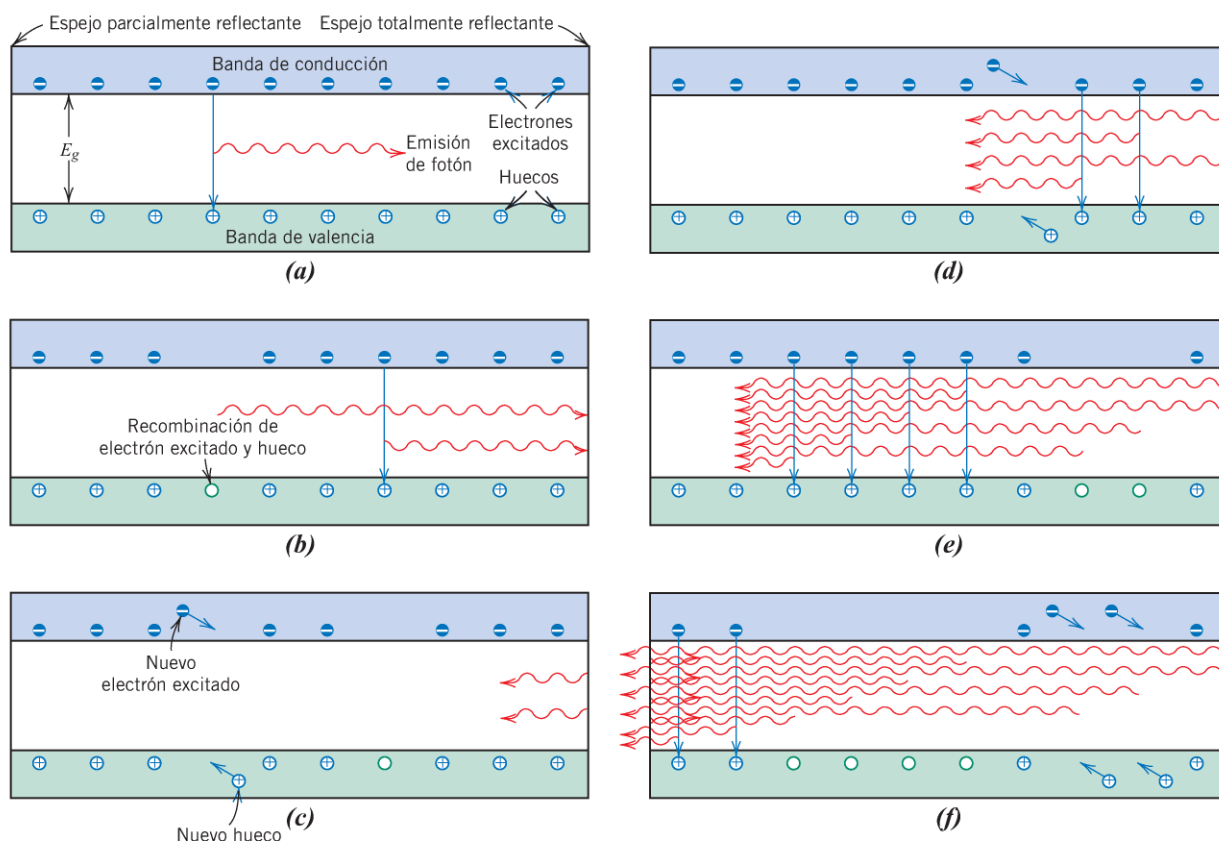
al eje de la barra de rubí, cruzan el extremo parcialmente plateado y los que inciden en el extremo totalmente plateado se reflejan. Los fotones que no son emitidos en esta dirección axial se pierden. El rayo de luz cruza repetidamente la barra de rubí y su intensidad se incrementa a medida que aumenta 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 22.15e). Este rayo rojo monocromático tiene una longitud de onda de  $0,6943 \mu\text{m}$ .

Algunos materiales semiconductores, como el arseniuro de galio, se utilizan también como láseres en la fabricación de CD musicales y en la industria de las modernas telecomunicaciones. Un requisito de estos materiales semiconductores es que la longitud de onda  $\lambda$  asociada con la energía  $E_g$  del intervalo prohibido debe corresponder a la luz visible, según una modificación de la Ecuación 22.3,

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

El valor de  $\lambda$  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; por consiguiente, aparecen huecos en la banda de valencia. Este fenómeno se indica en la Figura 22.16a, 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 se emite un fotón de luz cuya longitud de onda viene dada por la Ecuación 22.20 (Figura 22.16a). Estos fotones estimularán la recombinación de otro par electrón excitado-hueco, Figura 22.16b-f y la producción de fotones adicionales, con la misma longitud de onda y en fase con el fotón



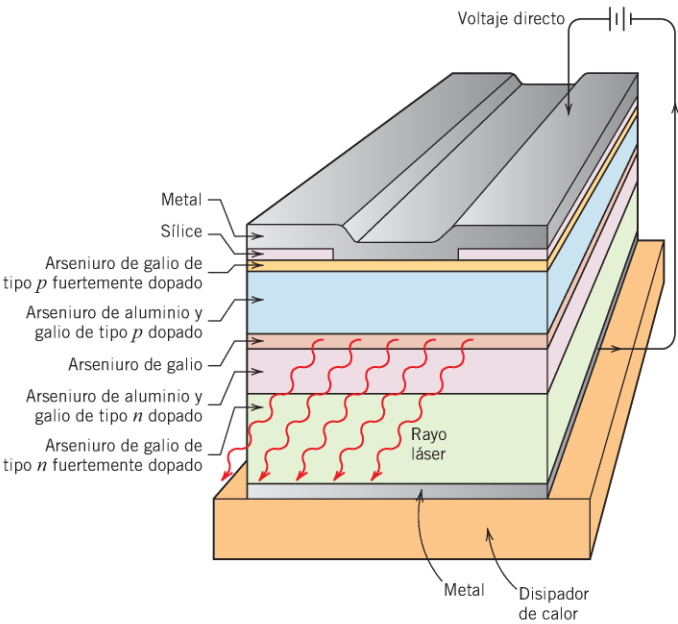


**Figura 22.16** Láser semiconductor. Representación esquemática de la recombinación estimulada de electrones excitados de la banda de conducción con huecos de la banda de valencia generando un rayo láser. (a) Un electrón excitado se recombina con un hueco; la energía asociada a esta recombinación se 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) tienen la misma longitud de onda y están en fase, alcanzan el espejo totalmente reflectante del extremo y se reflejan hacia el interior del semiconductor láser. 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 reflectante del extremo del material semiconductor. (Adaptación de “Photonic Materials”, por J. M. Rowell. Copyright © 1986 por Scientific American, Inc. Reservados todos los derechos).

original. De este modo resulta un rayo monocromático y coherente. Como en el caso del láser de rubí (Figura 22.15), un extremo del láser semiconductor es totalmente reflectante; en este extremo el rayo se refleja dentro del material y estimula otras recombinaciones. El otro extremo del láser es parcialmente reflectante: 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 materiales semiconductores de diferentes composiciones que se disponen en forma de sándwich entre un metal conductor y un disipador de calor (Figura 22.17). Las composiciones de las capas se seleccionan para concentrar los electrones excitados, los huecos y el rayo láser en la lámina central de arseniuro de galio.

**Figura 22.17** Diagrama esquemático que muestra la Sección de las capas de un láser semiconductor de GaAs. Huecos, electrones excitados y rayo láser están confinados en la capa de GaAs por las capas vecinas tipo *n* y *p* de GaAlAs. (Adaptación de “Photonic Materials”, por J. M. Rowell. Copyright ©1986 por Scientific American, Inc. Reservados todos los derechos).



En la construcción de láseres, para aplicaciones diversas, se pueden utilizar otras sustancias, entre ellas gases y vidrios. En la Tabla 22.2 se listan varios láseres comunes y sus características. Dado que los rayos de láser 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 pueden utilizar para medir distancias con alta precisión.

**Tabla 22.2** Características y aplicaciones de diversos tipos de láser

Láser	Longitud de onda (μm)	Intervalo medio de potencia	Aplicaciones
Dióxido de carbono	10,6	Milivatios a decenas de kilovatios	Tratamiento térmico, soldadura, corte, marcado
Nd:YAG	1,06 0,532	Milivatios a cientos de vatios Milivatios a vatios	Soldadura, taladrado, corte
Nd:vidrio	1,05	Vatios <sup>a</sup>	Soldadura pulsante, taladrado
Diodos	Visible e infrarrojo	Milivatios a kilovatios	Lectores de códigos de barras, CDs y DVDs, comunicaciones ópticas
Argón-ion	0,5415 0,488	Milivatios a decenas de vatios/ Milivatios a vatios	Cirugía, mediciones de distancias, holografías
Fibra	Infrarrojo	Vatios a kilovatios	Telecomunicaciones, espectroscopía, armas de energía dirigida
Excimer	Ultravioleta	Vatios a centenares de vatios <sup>b</sup>	Cirugía ocular, micromecanizado, microlitografía

<sup>a</sup>Aunque los láser de cristal producen potencias medias relativamente bajas, casi siempre se ejecutan en modo pulsante y sus potencias de pico pueden alcanzar niveles de gigavatios.  
<sup>b</sup>Excimers son también láseres pulsantes, capaces de alcanzar picos de potencia de decenas de megavatios.

**Fuente:** Adaptación de C. Breck, J. J. Ewing y J. Hecht, *Introduction to Laser Technology*, 4ª edición. Copyright © 2012 por John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ. Reproducción autorizada por John Wiley & Sons, Inc.

## 22.14 LA FIBRA ÓPTICA EN LAS COMUNICACIONES

El reciente desarrollo de la tecnología de la fibra óptica ha originado una verdadera revolución en el campo de las comunicaciones. Prácticamente todas las telecomunicaciones se transmiten a través de este medio en lugar de a través de cables de cobre. La transmisión en un cable de conductor metálico es electrónica (con electrones), mientras que al usar fibras ópticamente transparentes, la transmisión de señales es *fotónica* y utiliza fotones de radiación electromagnética o de luz. El uso de sistemas de fibra óptica ha mejorado la velocidad de transmisión, la densidad de la información y la distancia de la transmisión, con una reducción en la tasa de error; además, con las fibras no hay interferencias electromagnéticas. El ancho de banda (velocidad de transferencia de datos) de las fibras ópticas es increíble; en 1 s, una fibra óptica puede transmitir 15,5 terabits de datos a través de una distancia de 7000 km; a este ritmo se tardarían aproximadamente 30 s para transmitir todo el catálogo de iTunes desde New York a Londres. Además, una sola fibra es capaz de transmitir 250 millones de conversaciones telefónicas por segundo. Para ello se necesita tan sólo 0,1 kg de fibra óptica, mientras que se precisarían 30 000 kg de cobre para transmitir la misma cantidad de información.

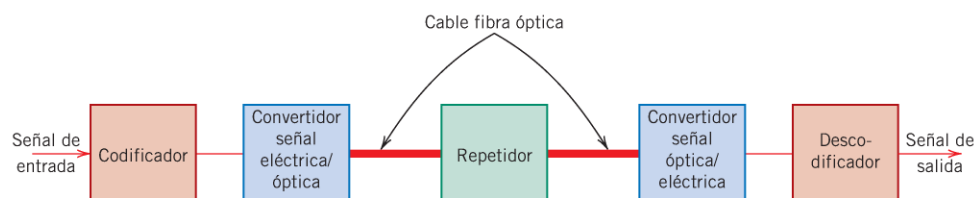
Este apartado se centra en las características de las fibras ópticas, si bien vale la pena hacer primero una breve reseña sobre los componentes y el funcionamiento del sistema de transmisión. En la Figura 22.18 se presenta un diagrama esquemático que muestra estos componentes. La información (p. ej., una conversación telefónica) en formato electrónico en primer lugar debe ser digitalizada en bits, es decir, traducida al lenguaje 1 y 0; esto se realiza en el codificador. Justo al lado está el convertidor para transformar esta señal eléctrica en una señal óptica (fotónica) (Figura 22.18). Este convertidor es normalmente un semiconductor láser que emite luz monocromática y coherente. La longitud de onda normalmente se encuentra entre 0,78 y 1,6  $\mu\text{m}$ , que está en la región infrarroja del espectro electromagnético; las pérdidas por absorción son escasas dentro de esta gama de longitudes de onda. La señal del impulso de salida de este convertidor de láser es en forma de señal de luz; un 1 binario está representado por un impulso de alta energía (Figura 22.19a), mientras que un 0 corresponde a un impulso de baja energía (o ausencia) (Figura 22.19b). Estos impulsos fotónicos o señales se introducen en el cable y se transportan a través de la fibra óptica (a veces llamada *guía de ondas*) al extremo de recepción. Para las transmisiones largas, pueden ser necesarios *repetidores*; éstos son los dispositivos que amplifican y regeneran la señal. Por último, en el extremo receptor, la señal fotónica se reconvierte en una señal electrónica que se descodifica (no digitalizada).

El centro de este sistema de comunicación es la fibra óptica, que guía los pulsos de luz a través de largas distancias atenuación (sin pérdida de potencia significativa) de la señal y sin distorsión del impulso. Los componentes de la fibra son el núcleo, el revestimiento y el recubrimiento o cubierta (Figura 22.20). La señal pasa a través del núcleo, mientras que el revestimiento que lo rodea obliga a los rayos de luz a seguir viajando dentro del núcleo; la cubierta exterior protege el núcleo y el revestimiento de posibles daños de abrasión y presiones externas.

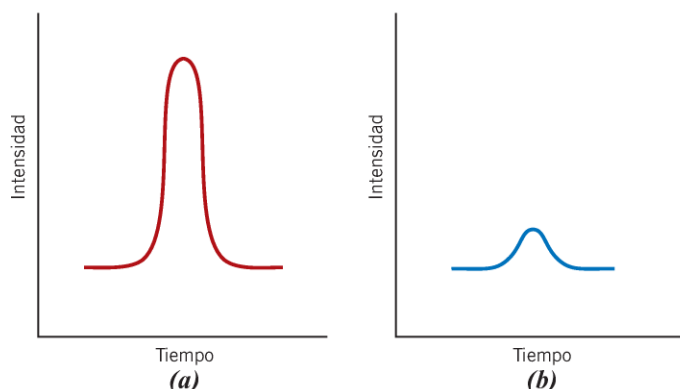
En la fabricación de fibra de vidrio se utiliza principalmente sílice de alta pureza y los diámetros de las fibras suelen estar, aproximadamente, entre 5 y 100  $\mu\text{m}$ . Las fibras suelen estar libres de defectos y, por tanto, son notablemente resistentes; durante su producción, las fibras continuas se ensayan para asegurar que cumplan los estándares mínimos de resistencia.

La contención de la luz dentro del núcleo de la fibra es posible por la reflexión interna total, es decir, cualquier rayo de luz que viaja en ángulos oblicuos al eje de la fibra

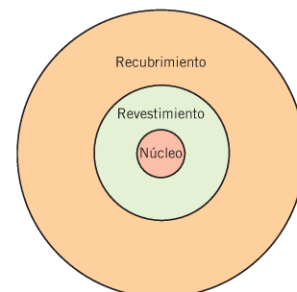
**Figura 22.18**  
Diagrama esquemático de los componentes de un sistema de comunicaciones de fibra óptica.







**Figura 22.19** Esquema de codificación digital para comunicaciones ópticas. (a) Impulso de fotones de alta energía que corresponde a un 1 en el formato binario. (b) Impulso de fotones de baja energía que representa un 0.

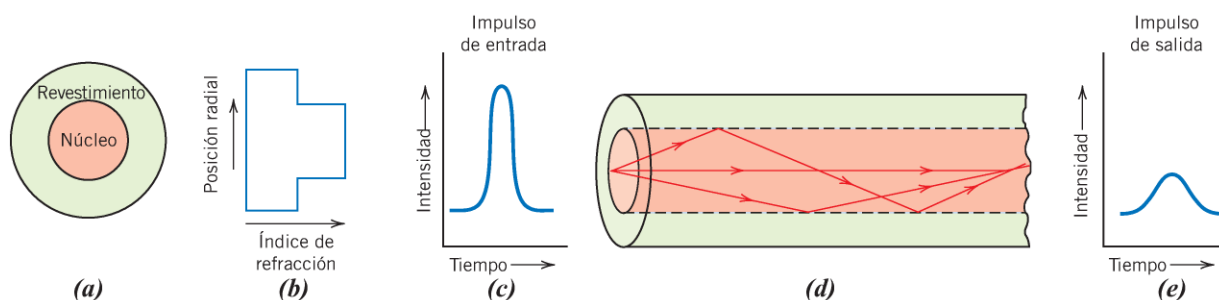


**Figura 22.20** Esquema de la Sección transversal de una fibra óptica.

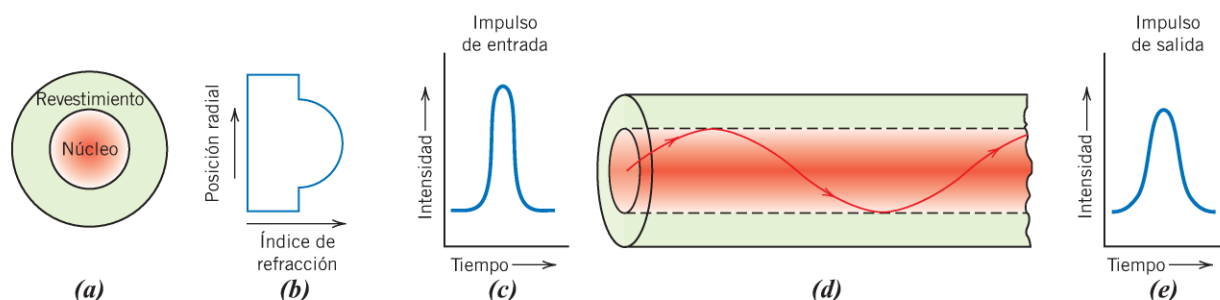
se refleja de nuevo en el núcleo. La reflexión interna se lleva a cabo variando el índice de refracción de los materiales del núcleo y del revestimiento. En este sentido, se utilizan dos tipos de diseños. Con uno de ellos, denominado de *índice escalonado*, el índice de refracción del revestimiento es ligeramente menor que el del núcleo. El perfil del índice y el modo de reflexión interna se muestran en las Figuras 22.21b y 22.21d. Para este diseño, el impulso de salida es más amplio que el de entrada (Figuras 22.21c y 22.21e), un fenómeno que no es deseable porque limita la velocidad de transmisión. El ensanchamiento del pulso se debe a que varios rayos de luz, aunque se introduzcan aproximadamente en el mismo instante, llegan a la salida en diferentes momentos, con trayectorias diferentes y, por tanto, con una variedad de longitudes de trayectoria.

El ensanchamiento del pulso se evita en gran medida con el diseño denominado de *índice gradual*. Aquí, a la sílice se le añaden impurezas de tipo óxido de boro ( $B_2O_3$ ) o dióxido de germanio ( $GeO_2$ ), de tal manera que el índice de refracción del vidrio varía parabólicamente a través de la Sección (Figura 22.22b). Por tanto, la velocidad de la luz en el núcleo varía con la posición radial, siendo mayor en la periferia que en el centro. En consecuencia, los rayos de luz que circulan a través de la periferia del núcleo van más rápidos en esta región del material que tiene menor índice y llegan a la salida aproximadamente al mismo tiempo que los rayos no desviados que pasan a través de la porción central del núcleo.

Se fabrican fibras excepcionalmente puras y de alta calidad con las más avanzadas y sofisticadas técnicas de procesamiento, que no se comentan aquí. Se deben eliminar impurezas y otros defectos que podrían absorber, dispersar y atenuar el haz de luz. La presencia de cobre, hierro y vanadio es especialmente perjudicial; en la práctica sus concentraciones



**Figura 22.21** Diseño de fibra óptica de índice de refracción escalonado. (a) Sección transversal de la fibra. (b) Perfil radial del índice de refracción de la fibra. (c) Impulso luminoso de entrada. (d) Reflexión interna de los rayos de luz. (e) Impulso luminoso de salida. (Adaptación de S. R. Nagel, *IEEE Communications Magazine*, vol. 25, N° 4, p. 34, 1987).



**Figura 22.22** Diseño de fibra óptica de índice de refracción gradual. (a) Sección transversal de la fibra. (b) Perfil radial del índice de refracción de la fibra. (c) Impulso luminoso de entrada. (d) Reflexión interna de un rayo de luz. (e) Impulso luminoso de salida. (Adaptación de S. R. Nagel, *IEEE Communications Magazine*, vol. 25, N° 4, p. 34, 1987).

se reducen a partes por mil millones. Asimismo, los contenidos de agua e iones hidroxilo, como contaminantes, son extremadamente bajos. La uniformidad de las dimensiones de la sección transversal de la fibra y la redondez del núcleo son críticos; las tolerancias de estos parámetros son de  $1\ \mu\text{m}$  sobre  $1\ \text{km}$  de longitud. Además, si las burbujas dentro del vidrio y los defectos superficiales han sido virtualmente eliminados, la atenuación de la luz en este material es imperceptiblemente pequeña. Por ejemplo, la pérdida de potencia a través de una longitud de  $16\ \text{km}$  de fibra óptica de vidrio es equivalente a la pérdida de potencia a través de una ventana de vidrio ordinario de  $25\ \text{mm}$  de espesor.

## RESUMEN

### Radiación electromagnética

- El comportamiento óptico de un material sólido depende de sus interacciones con la radiación electromagnética de longitud de onda correspondiente a la región visible del espectro (de  $0,4\ \mu\text{m}$  a  $0,7\ \mu\text{m}$ ).
- Desde el punto de vista de la mecánica cuántica, la radiación está constituida por fotones (grupos o paquetes *cuantizados* de energía), de modo que sólo puede tener valores específicos de energía.
- La energía del fotón es igual al producto de la constante de Planck por la frecuencia de la radiación (Ecuación 22.3).

### Interacciones de la luz con los sólidos

- Los posibles fenómenos interactivos que puedan ocurrir cuando la luz pasa de un medio a otro son refracción, reflexión, absorción y transmisión.
- Considerando el grado de transmitancia de la luz, los materiales se pueden clasificar como
  - Transparentes*, en los que la luz se transmite a través del material con relativamente poca absorción y reflexión.
  - Translúcidos*, en los que la luz pasa parcialmente y una fracción se dispersa en el interior del material.
  - Opacos*, en los que toda la luz es dispersada o reflejada, de modo que no se transmite a través del material.

### Interacciones atómicas y electrónicas

- Una posible interacción entre la radiación electromagnética y la materia es la polarización electrónica, por la que el campo eléctrico, componente de la onda de luz, induce modificaciones en la nube electrónica que rodea al núcleo atómico (Figura 19.32a).
- La absorción y la refracción de la luz son dos consecuencias de la polarización electrónica.
- La radiación electromagnética puede ser absorbida causando la excitación de electrones de un estado energético a otro de mayor energía (Figura 22.3).

**Propiedades ópticas de los metales**

- Los metales aparecen opacos como consecuencia de la absorción y posterior emisión de la radiación lumínica en 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 (Figura 22.4a). La nueva emisión (reemisión) tiene lugar cuando se producen transiciones electrónicas en dirección inversa (Figura 22.4b).
- El color de un metal se debe a la composición espectral de la luz reflejada.

**Refracción**

- La radiación lumínica experimenta refracción en materiales transparentes; es decir, su velocidad disminuye y el rayo de luz se desvía en la interfaz.
- El fenómeno de la refracción es consecuencia de la polarización electrónica de los átomos o iones, inducida por el campo eléctrico componente de la onda de luz. Cuanto más grande es el átomo o el ion, mayor es el índice de refracción.

**Reflexión**

- Cuando la luz pasa de un medio transparente a otro con diferente índice de refracción, parte de la luz se refleja en la interfaz.
- El grado de reflectancia depende de los índices de refracción de ambos medios y del ángulo de incidencia. Para incidencia normal (perpendicular), la reflectividad se calcula según la Ecuación 22.12.

**Absorción**

- Intrínsecamente, los materiales puros no metálicos pueden ser transparentes u opacos. La opacidad aparece en materiales con un intervalo prohibido relativamente estrecho ( $E_g < 1,8$  eV) 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 (Figura 22.5).  
Los materiales no metales transparentes tienen un intervalo prohibido mayor que 3,1 eV.  
Los materiales no metálicos con un intervalo prohibido entre 1,8 y 3,1 eV, sólo absorben una fracción del espectro visible y aparecen coloreados.
- Los materiales transparentes absorben parte de la luz como consecuencia de la polarización electrónica.
- Para materiales aislantes con amplio intervalo de bandas de energía prohibida, y que contienen impurezas, se producen tránsitos electrónicos a los estados electrónicos de las impurezas situadas en el intervalo prohibido, emitiendo fotones de menor energía que la del intervalo prohibido (Figura 22.6).

**Color**

- Los materiales transparentes aparecen coloreados como consecuencia de los rangos específicos de longitud de onda de la luz que son absorbidos selectivamente (por lo general por excitaciones de electrones).
- El color percibido es el resultado de la distribución de la longitud de onda del haz transmitido.

**Translucidez y opacidad en aislantes**

- 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 presentarse en:
  - (1) materiales policristalinos con índice de refracción anisotrópico
  - (2) materiales bifásicos
  - (3) materiales con pequeños poros
  - (4) polímeros altamente cristalinos

**Luminiscencia**

- En la luminiscencia, la energía se absorbe como consecuencia de excitaciones electrónicas y se vuelve a emitir como luz visible.



Si este intervalo de tiempo dura menos de 1 s, el fenómeno se llama *fluorescencia*. Para intervalos mayores se usa el término *fosforescencia*.

### Fotoconductividad

- La *electroluminiscencia* es el fenómeno por el cual la luz es emitida como resultado de la recombinación de electrones libres y huecos inducida en un diodo de polarización directa (Figura 22.11).
- El dispositivo que experimenta electroluminiscencia es el diodo emisor de luz (LED, *Light-emitting diode*).
- La *fotoconductividad* implica que la conductividad eléctrica de algunos semiconductores se incrementa por transiciones electrónicas fotoinducidas, que generan nuevos electrones libres y huecos.

### Láser

- En los láseres se producen rayos de luz coherentes y de elevada intensidad por transiciones electrónicas estimuladas.
- En el láser de rubí, el rayo se genera por electrones que caen desde los estados excitados metaestables al estado fundamental del  $\text{Cr}^{3+}$ .
- El rayo láser de un semiconductor se genera por la recombinación de electrones excitados de la banda de conducción con los huecos de la banda de valencia.

### Fibra óptica en comunicaciones

- El uso de tecnologías de fibra óptica en las telecomunicaciones modernas proporciona una transmisión de información libre de interferencias, rápida e intensa.
- Una fibra óptica está compuesta por los elementos siguientes:  
Un núcleo a través del cual se propagan los pulsos de luz  
El revestimiento, que proporciona una reflexión interna total y la contención del haz de luz dentro del núcleo  
El recubrimiento (*coating*) que protege de daños el núcleo y el revestimiento.

## Términos y conceptos importantes

Color	Estado fundamental	Láser
Constante de Planck	Fluorescencia	Luminiscencia
Diodos emisores de luz (LED, <i>Light emitting diode</i> )	Fosforescencia	Opaco
Electroluminiscencia	Fotoconductividad	Refracción
Estado excitado	Fotón	Translúcido
	Índice de refracción	Transparente

## REFERENCIAS

- |  |  |
|--|--|
| Fox, M., <i>Optical Properties of Solids</i> , 2nd edition, Oxford University Press, Oxford, 2010.                             | Rogers, A., <i>Essentials of Photonics</i> , 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2008.               |
| Gupta, M. C. y J. Ballato, <i>The Handbook of Photonics</i> , 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.                    | Saleh, B. E. A. y M. C. Teich, <i>Fundamentals of Photonics</i> , 2nd Edition, Wiley, Hoboken, NJ, 2007. |
| Hecht, J., <i>Understanding Lasers: An Entry-Level Guide</i> , 3rd edition, Wiley-IEEE Press, Hoboken/Piscataway, NJ, 2008.    | Svelto, O., <i>Principles of Lasers</i> , 5th edition, Springer, New York, 2010.                         |
| Kingery, W. D., H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, <i>Introduction to Ceramics</i> , 2nd edition, Wiley, New York, 1976, Chapter 13. |  |

## CUESTIONES Y PROBLEMAS

**Radiación electromagnética**

- 22.1** La luz visible con longitud de onda de  $6 \times 10^{-7}$  m se ve de color naranja. Calcular la frecuencia y la energía de un fotón de esta longitud de onda.

**Interacciones de la luz con los sólidos**

- 22.2** En términos de apariencia y transmitancia de la luz, distinguir entre materiales opacos, translúcidos y transparentes.

**Interacciones atómicas y electrónicas**

- 22.3 (a)** Describir brevemente el fenómeno de la polarización electrónica por radiación electromagnética.  
**(b)** Citar dos consecuencias de la polarización electrónica en materiales transparentes.

**Propiedades ópticas de los metales**

- 22.4** Explicar brevemente por qué los metales son opacos a la radiación electromagnética teniendo energías fotónicas dentro de la región visible del espectro.

**Refracción**

- 22.5** En los materiales iónicos, ¿cómo influye el tamaño de los iones en la extensión de la polarización electrónica?
- 22.6** Un material, ¿puede tener un índice de refracción inferior a la unidad? ¿Por qué sí o por qué no?
- 22.7** Calcular la velocidad de la luz en el fluoruro de calcio ( $\text{CaF}_2$ ) que tiene una constante dieléctrica  $\epsilon_r$  de 2,056 (a frecuencias del espectro visible) y una susceptibilidad magnética  $\chi_m$  de  $-1,43 \times 10^{-5}$ .
- 22.8** Los índices de refracción de la sílice fundida y del vidrio de sosa-cal para la luz visible son de 1,460 y 1,53, respectivamente. Para cada uno de estos materiales, determinar, utilizando los datos de la Tabla 19.5, la fracción de constante dieléctrica relativa a 60 Hz debida a la polarización electrónica. Despreciar los efectos de la polarización de orientación.
- 22.9** Utilizando los datos de la Tabla 22.1, calcular las constantes dieléctricas del vidrio de borosilicato (Pyrex), de la periclasa ( $\text{MgO}$ ), del poli(metacrilato de metilo) (PMMA) y del polipropileno (PP), y comparar estos valores con los de la Tabla siguiente. Explicar brevemente las discrepancias.

Material	Constante dieléctrica (1 MHz)
Vidrio de borosilicato (Pyrex)	4,7
Periclasa ( $\text{MgO}$ )	9,7
Poli(metacrilato de metilo) (PMMA)	2,8
Polipropileno (PP)	2,35

- 22.10** Describir brevemente el fenómeno de la dispersión en un medio transparente.

**Reflexión**

- 22.11** Se desea que la reflectividad de la luz que incide perpendicularmente a la superficie de un medio transparente sea inferior a 6,0%. Indicar cuáles de estos materiales serían buenos candidatos (Tabla 22.1): vidrio de sílice, vidrio Pyrex, corindón, espinela, poliestireno (PS) y politetrafluoretileno (PTFE). Justificar la respuesta.
- 22.12** Explicar brevemente por qué las pérdidas por reflexión del material transparente se minimizan con recubrimientos superficiales.
- 22.13** El índice de refracción del corindón ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) es anisotrópico. Suponer que la luz visible pasa de un grano a otro, con distinta orientación cristalográfica, incidiendo normalmente al límite de grano. Calcular la reflectividad en el límite entre dos granos con índices de refracción de 10,12 y 8,25 cm, respectivamente, en la dirección de propagación de la luz.

**Absorción**

- 22.14** El telururo de zinc tiene un intervalo prohibido de energía de 2,23 eV. ¿En qué intervalo de longitud de onda de la luz visible es transparente?
- 22.15** Explicar brevemente por qué la magnitud del coeficiente de absorción ( $\beta$  en la Ecuación 22.18) depende de la longitud de onda de la radiación.
- 22.16** La fracción de radiación no reflejada que se transmite a través de un material transparente de 10 mm de espesor es 0,90. Si el espesor se incrementa a 20 mm ¿qué fracción de luz se transmite?

**Transmisión**

- 22.17** Deducir la Ecuación 22.19 a partir de otras expresiones de este capítulo.
- 22.18** La transmitancia  $T$  de un material transparente de 20 mm de espesor a una luz que incide normalmente es de 0,85. Si el índice de refracción de este material es 1,6, calcular el espesor del material que tiene una transmitancia de 0,75. Considerar todas las pérdidas por reflexión.

**Color**

- 22.19** Explicar brevemente qué determina el color característico de **(a)** un metal y **(b)** un material no metálico transparente.
- 22.20** Explicar brevemente por qué algunos materiales transparentes aparecen coloreados mientras que otros son incoloros.

**Opacidad y translucidez en aislantes**

- 22.21** Describir brevemente tres mecanismos de absorción en materiales no metálicos.
- 22.22** Explicar brevemente por qué los polímeros amorfos son transparentes mientras que los polímeros predominantemente cristalinos son opacos o translúcidos.

**Luminiscencia****Fotoconductividad****Láser**

- 22.23 (a)** Describir brevemente el fenómeno de la luminiscencia.
- (b)** ¿Cuál es la diferencia entre fluorescencia y fosforescencia?
- 22.24** Describir brevemente el fenómeno de la fotoconductividad.

**22.25** Explicar brevemente el funcionamiento del fotómetro fotográfico.

**22.26** Describir cómo funciona un láser de rubí.

**22.27** Calcular la diferencia energética entre los estados electrónicos metaestable y fundamental para el láser de rubí.

**Fibras ópticas en comunicaciones**

**22.28** Al final de la Sección 21.14 se indica que la intensidad de la luz absorbida que pasa a través una longitud de 16 km de fibra óptica de vidrio es equivalente a la intensidad de la luz absorbida a través de un vidrio normal de ventana de 25 mm de espesor. Calcular el coeficiente de absorción  $\beta$  del vidrio de fibra óptica si el valor de  $\beta$  para el vidrio de ventana es  $5 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$ .

**PROBLEMA DE DISEÑO****Interacciones atómica y electrónica**

**22.D1** El arseniuro de galio (GaAs) y el fosfuro de galio (GaP) son compuestos químicos semiconductores que, a temperatura ambiente, forman soluciones sólidas en todas las proporciones y las energías de los intervalos prohibidos son 1,42 y 2,25 eV, respectivamente. El intervalo prohibido de la aleación se incrementa

linealmente con las adiciones de GaP (% mol). Se utilizan aleaciones de estos dos materiales para elaborar diodos emisores de luz, generada por tránsitos electrónicos desde la banda de conducción a la banda de valencia. Determinar la composición de la aleación GaAs-GaP que emite luz naranja con una longitud de onda de 0,60  $\mu\text{m}$ .