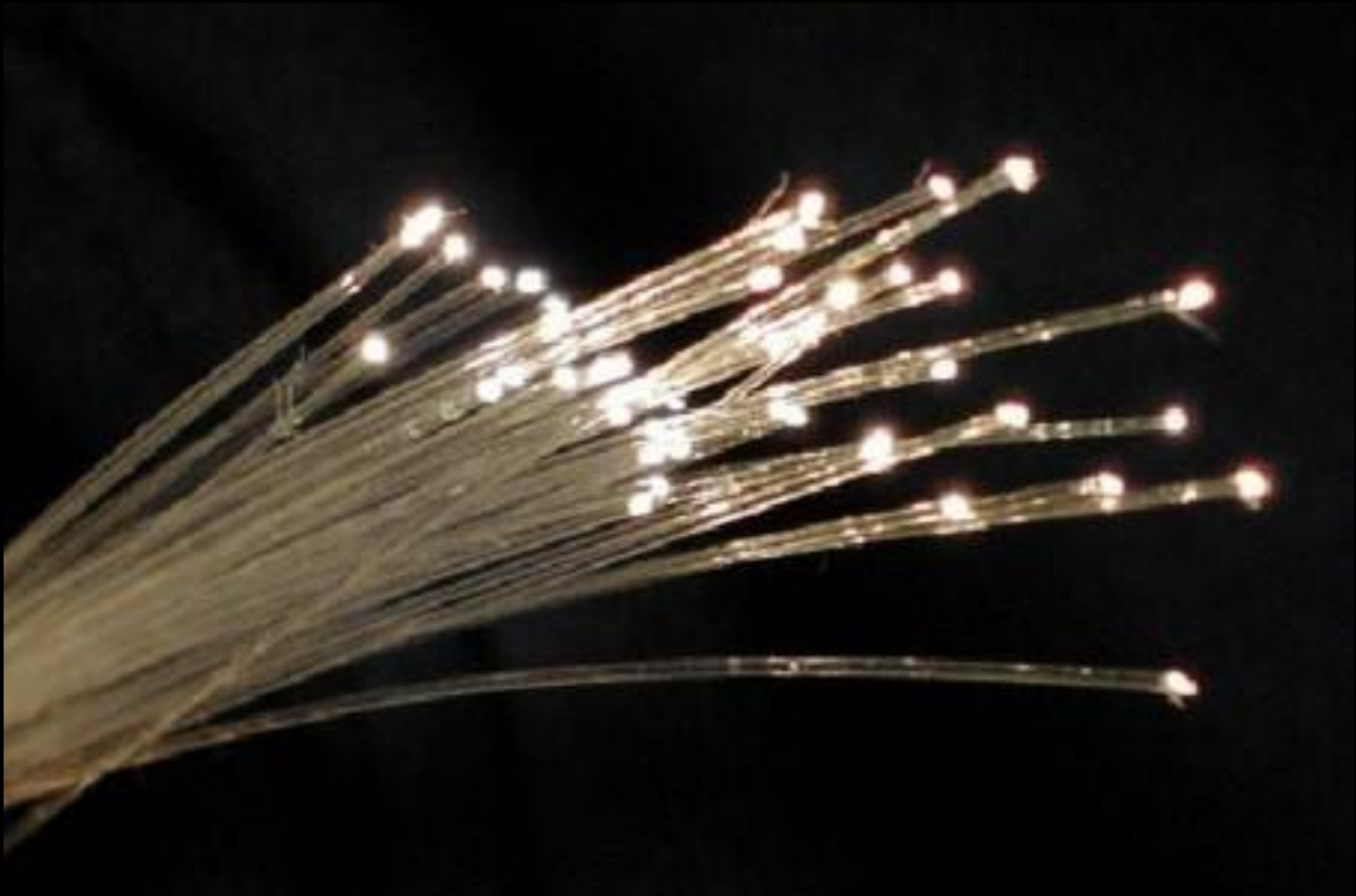


Propiedades ópticas



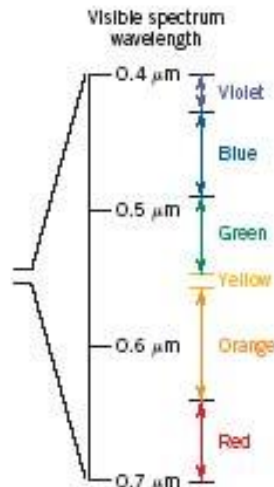
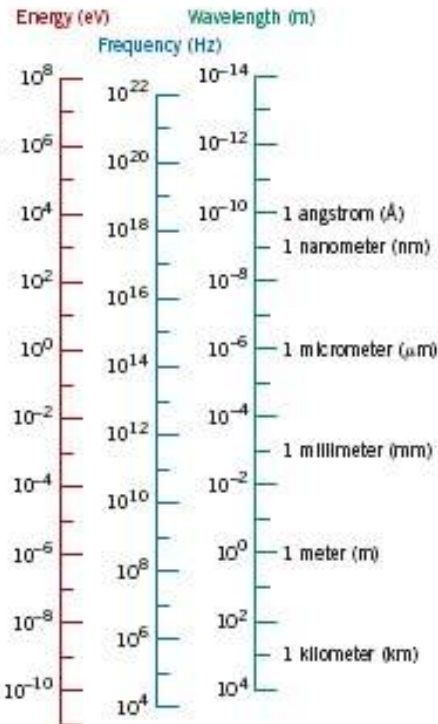
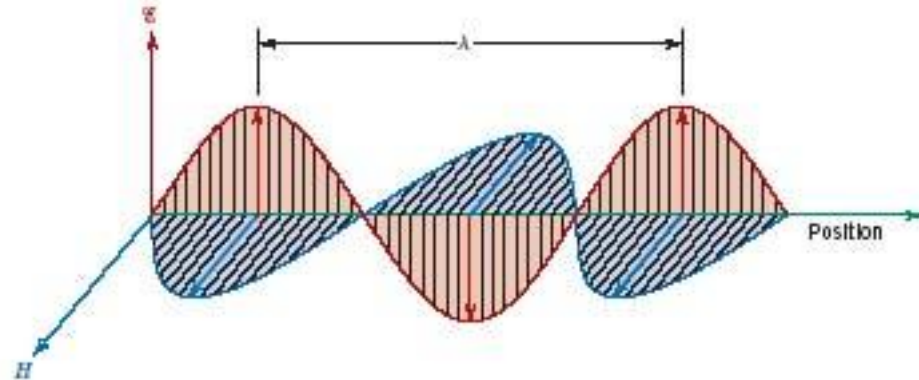
Preguntas a responder

- Qué pasa cuando la luz brilla sobre los materiales?
- Por qué los materiales tienen colores característicos?
- Por qué algunos materiales son transparentes y otros no?
- Aplicaciones ópticas:
 - luminiscencia
 - fotoconductividad
 - celdas solares
 - fibras ópticas para comunicaciones

Propiedades ópticas

La luz tiene propiedades de onda y de partícula

- Radiación electromagnética
- Fotones



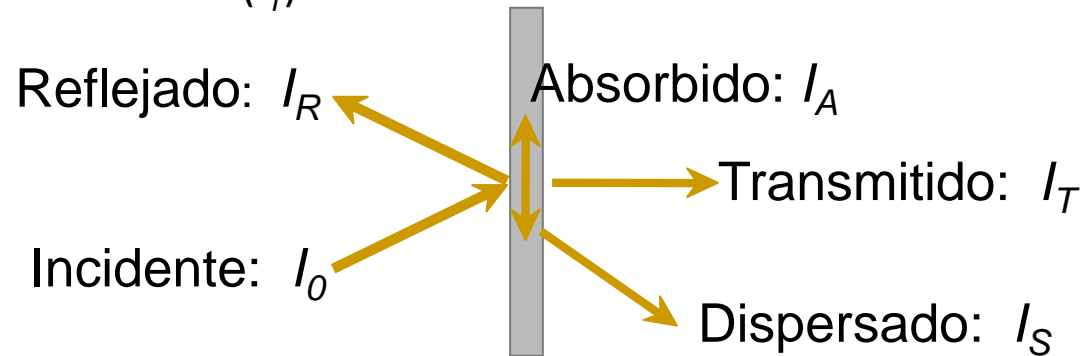
$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

- ΔE = energía
- λ = longitud de onda
- ν = frecuencia
- h = Constante de Planck ($6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
- c = velocidad de la luz ($3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$)

Interacción de luz con la materia

Cuando la luz pasa de un medio a otro pueden ocurrir varios fenómenos:

- parte de la luz se transmite por el medio (I_T)
- parte se absorbe (I_A)
- parte se refleja (I_R)



$$I_0 = I_T + I_A + I_R$$

Donde I_0 es la intensidad del rayo incidente

O bien: $T + A + R = 1$

Donde $T = I_T / I_0$ es la transmitividad

$A = I_A / I_0$ es la absorptividad

$R = I_R / I_0$ es la reflectividad

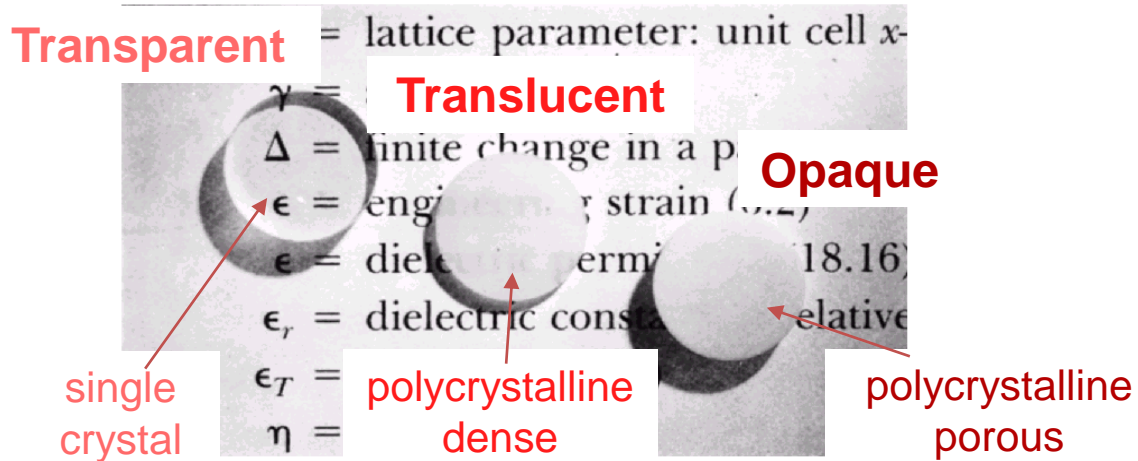
Los materiales pueden ser

Transparentes: transmiten la mayor parte de la luz y tienen poca absorción y reflexión

Traslúcidos: La luz se transmite difusamente, la luz es dispersada en el interior

Opacos: No permiten la transmisión de la luz

- Clasificación óptica de los materiales:



Interacciones atómicas y electrónicas

Los fenómenos ópticos que ocurren en los materiales involucran interacciones entre la radiación Electromagnética y los átomos, los iones y/o los electrones.

Dos de las interacciones más importantes son la **polarización** electrónica y las **transiciones** de energía de los electrones.

Polarización electrónica

El campo eléctrico interactúa con la nube electrónica de cada átomo e induce una polarización



(a)

2 consecuencias:

1. Parte de la energía de radiación se absorbe
2. Las ondas de luz se retardan en velocidad cuando pasan a través del medio → refracción

Transiciones electrónicas

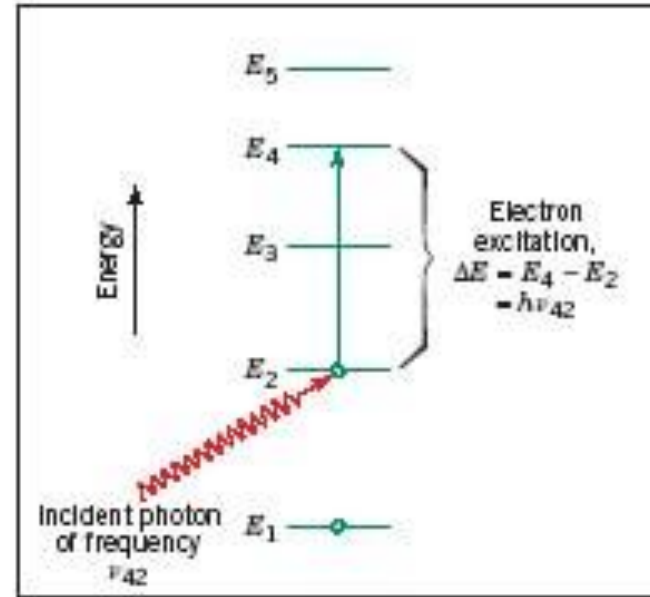
Se excita un electrón de un estado E_2 a un estado E_4 mediante la absorción de un fotón

$$\Delta E = h\nu$$

Niveles de energía discretos

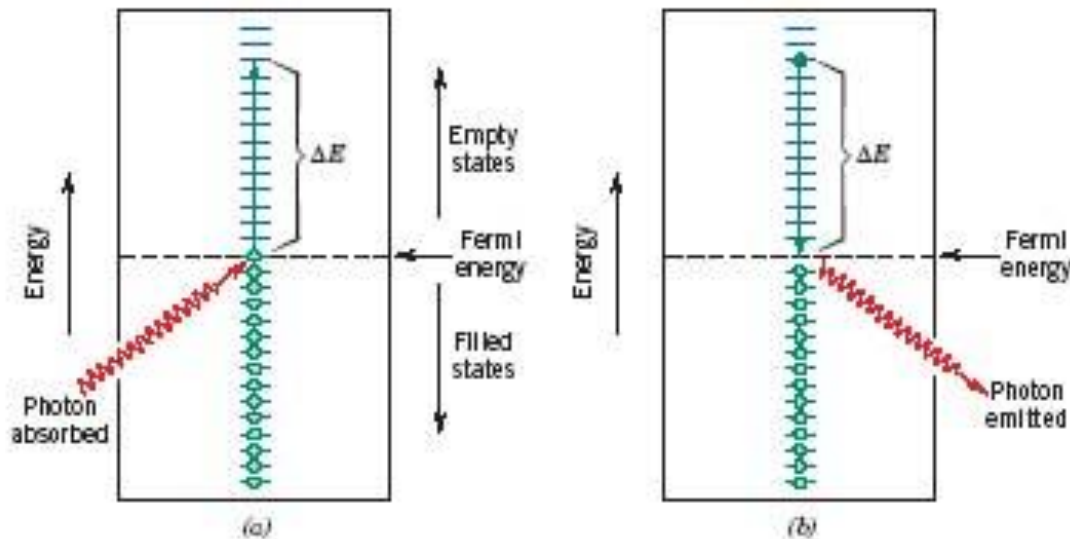
Un electrón no puede permanecer

En un estado excitado indefinidamente \rightarrow decae a su estado base emitiendo un fotón



Propiedades ópticas de metales

- Los metales son **opacos** porque la radiación incidente que tiene frecuencias dentro del intervalo visible excita a los electrones hacia estados de energía desocupados arriba del nivel de Fermi. Por lo tanto la radiación incidente es absorbida por el metal.
- La absorción total se lleva a cabo dentro de la capa más externa (<0.1 micra), películas metálicas menores a 0.1 micras pueden transmitir la luz visible.
- Los metales absorben todas las frecuencias de la luz visible debido al continuo de estados desocupados que permiten las transiciones.
- La mayor parte de la radiación absorbida se reemite desde la superficie en forma de luz visible de la misma longitud de onda \rightarrow luz reflejada.



Propiedades ópticas de no metales

Algunos materiales pueden ser transparente a la luz visible debido a su estructura de bandas electrónicas.

Refracción: es la disminución de la velocidad de la luz que se transmite en el interior de materiales transparentes



Índice de refracción, n

- La luz transmitida distorsiona la nube electrónica.



- La luz viaja más lento dentro de un material que en el vacío

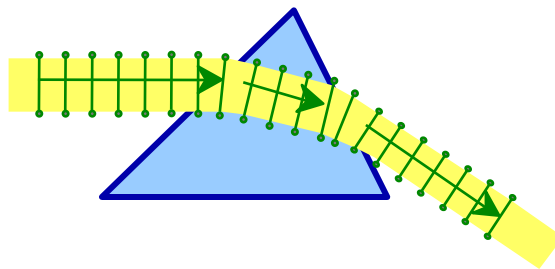
$$n = \text{índice de refracción} \equiv \frac{c \text{ (velocidad de la luz en el vacío)}}{v \text{ (velocidad de la luz en el medio)}}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad \begin{array}{l} \epsilon\text{-permitividad} \\ \mu\text{-permeabilidad} \end{array}$$

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

ϵ_r -constante dieléctrica
 μ_r -permeabilidad magnética relativa

--iones grandes y pesados pueden disminuir la velocidad de la luz
 (e.g., lead)
 --La luz puede "doblarse"



- Nota: $n = f(\lambda)$

vidrios típicos ca. 1.5 -1.7

Plásticos 1.3 -1.6

Diamante 2.41

Reflexión

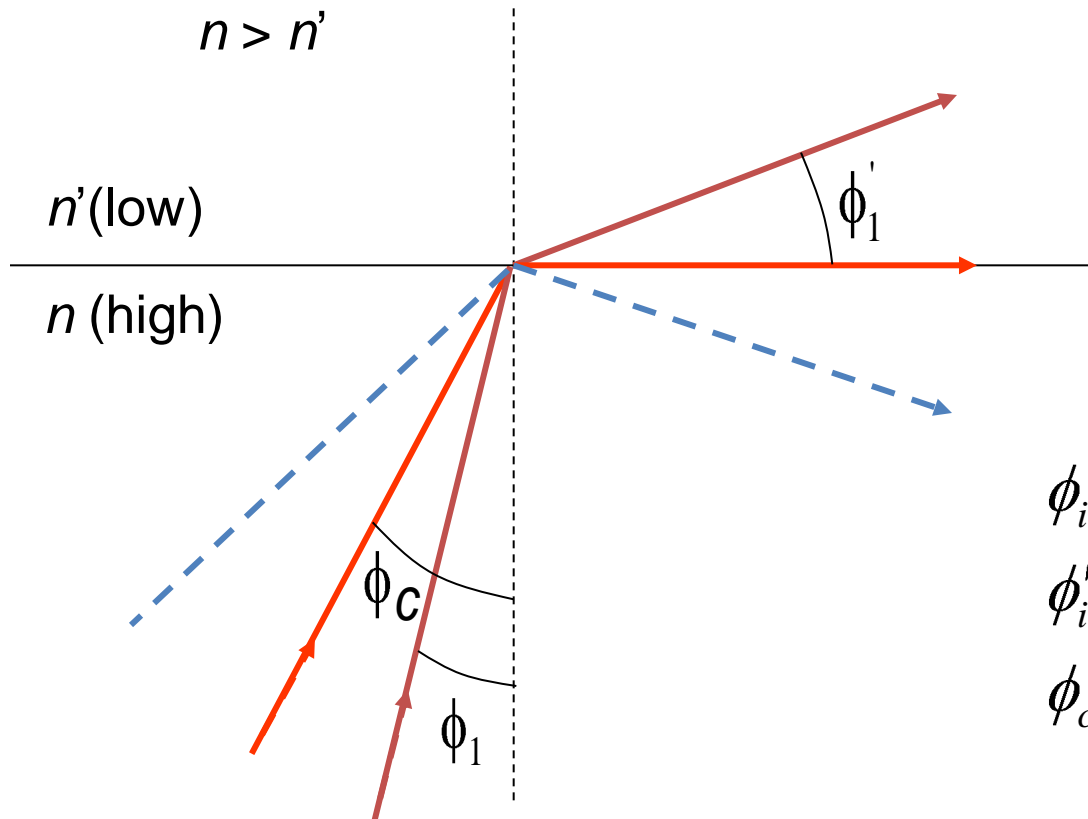
- Cuando la luz pasa de un medio a otro que tiene diferente índice de refracción, parte de la luz se dispersa en la interfaz.

Reflectividad $R = \frac{I_R}{I_0}$

Si la luz incidente es perpendicular a la interfaz: $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$

Cuando la luz se transmite del vacío o del aire a un sólido s , entonces $R = \left(\frac{n_s - 1}{n_s + 1} \right)^2$

Reflexión total interna



$$\frac{n}{n'} = \frac{\sin \phi'}{\sin \phi}$$

ϕ_i = ángulo incidente

ϕ'_i = ángulo refractado

ϕ_c = ángulo crítico

ϕ_c ocurre cuando $\phi'_i = 90^\circ$

para $\phi_i > \phi_c$ la luz se refleja internamente

Ejemplo: Diamante en aire

$$\frac{n}{n'} = \frac{\sin \phi'}{\sin \phi} \Rightarrow \frac{2.41}{1} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \phi_c} = \frac{1}{\sin \phi_c}$$

$$\sin \phi_c = \frac{1}{2.41}$$

$$\phi_c = 24.5^\circ$$

- Cables de fibra óptica tienen un recubrimiento con un material de bajo n .

Absorción de luz

Ley de Lambert-Beer

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha t} \quad \alpha = \text{coeficiente de absorción lineal [cm}^{-1}\text{]}$$

$t = \text{espesor de la muestra}$

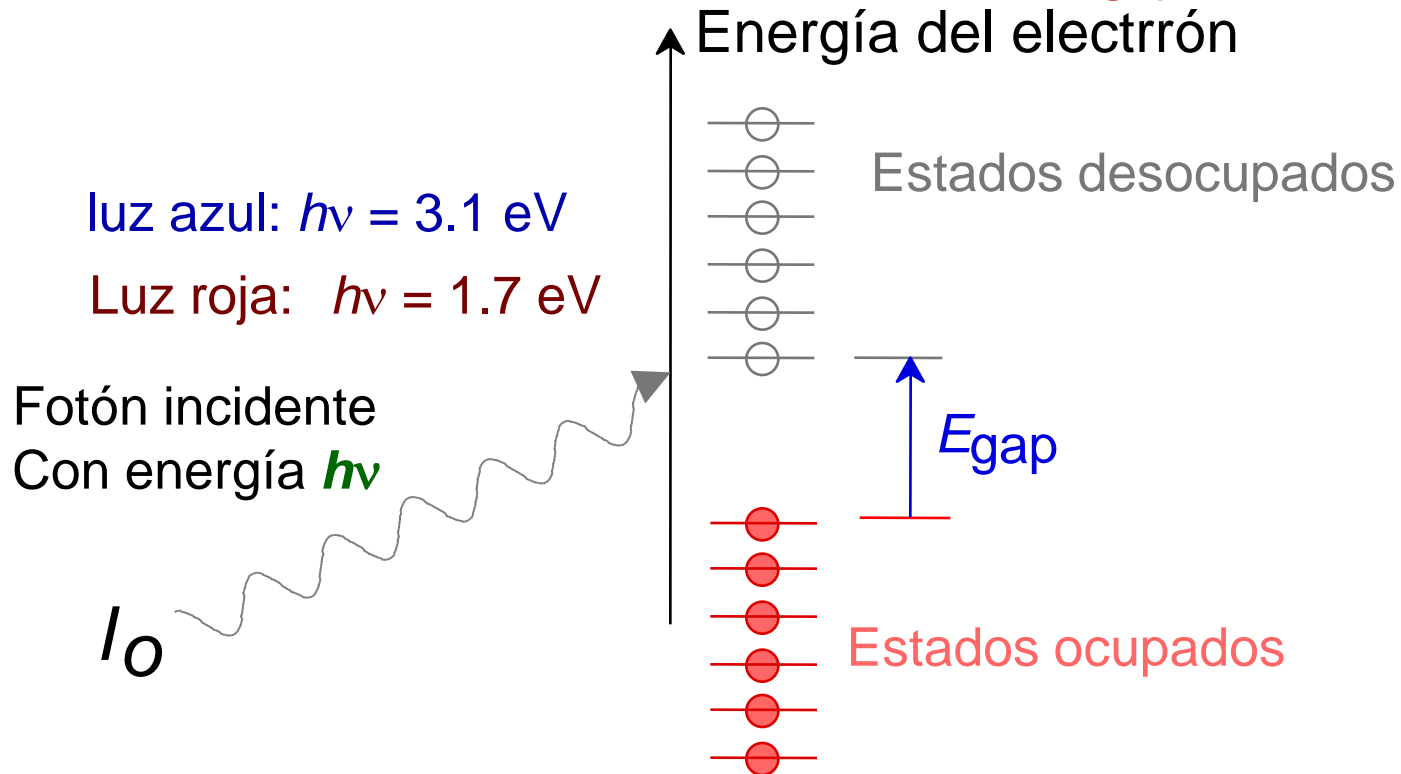
$$\ln \left[\frac{I}{I_0} \right] = -\alpha t$$

Dispersión

- En materiales policristalinos o semicristalinos
- Semicristalinos
 - La densidad de los cristales es mayor en en los materiales amorfos \therefore la velocidad de la luz es menor
 - causa que la luz se disperse
 - puede causar pérdidas significativas de luz
- Es común en polímeros
 - Ej: envases de leche de LDPE – nebulosos
 - Poliestireno – claro – esencialmente sin cristales

Absorción selectiva: Semiconductores

- Absorción de luz por los electrones ocurre si $h\nu > E_{\text{gap}}$



- Si $E_{\text{gap}} < 1.8 \text{ eV}$, absorción completa; su color es negro (Si, GaAs)
- Si $E_{\text{gap}} > 3.1 \text{ eV}$, no hay absorción; es transparente (diamante)
- Si E_{gap} intermedio, absorción parcial; el material tiene color.

Longitud de onda vs. E_g

Ejemplo: Cuál es la mínima longitud de onda que puede absorber el germanio?

$$E_g = 0.67 \text{ eV}$$

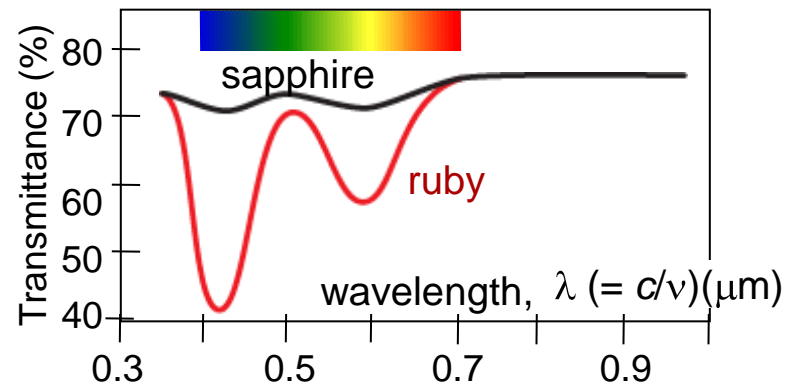
$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{(6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{(0.67 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} \leq 1.85 \mu\text{m}$$

nota : para Si $E_g = 1.1 \text{ eV}$ $\lambda_c \leq 1.13 \mu\text{m}$

Si los estados donadores (o aceptores) también están disponibles, entonces proporcionan otras frecuencias de absorción.

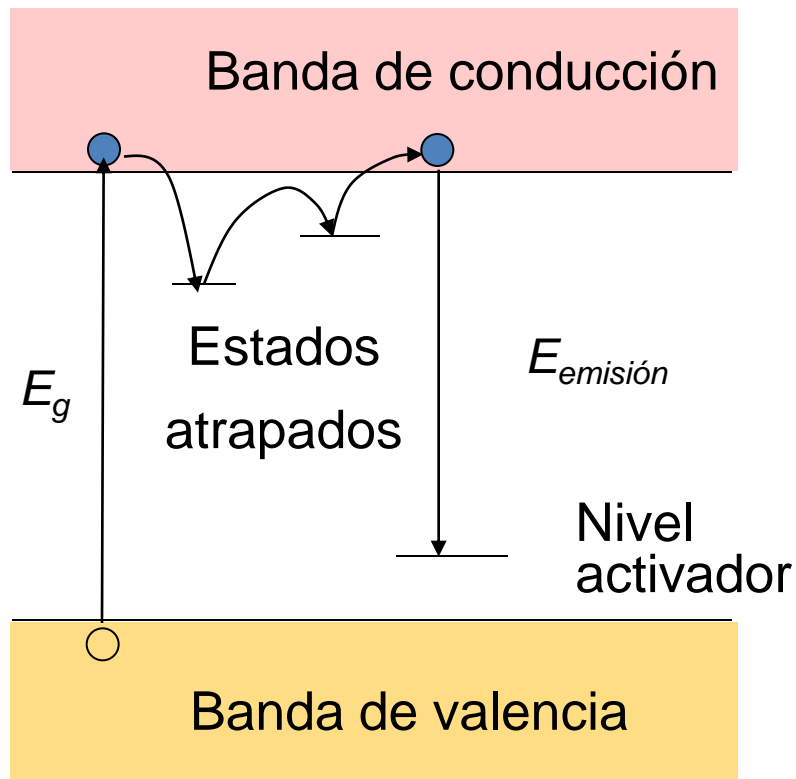
Color de los No metales

- Color determinado por la suma de las frecuencias de
 - luz transmitida,
 - luz re-emitida de las transiciones de los electrones.
- Ej: Sulfuro de cadmio (CdS)
 - $E_{gap} = 2.4$ eV,
 - absorbe luz visible de alta energía (blue, violet),
 - Rojo/amarillo/naranja se transmite y da el color.
- Ej: **Rubí** = Zafiro (Al_2O_3) + (0.5 to 2) at% Cr_2O_3
 - El zafiro es transparente (i.e., $E_{gap} > 3.1$ eV)
 - agregando Cr_2O_3 :
 - se altera el gap
 - absorbe luz azul
 - amarillo/verde es absorbido
 - rojo es transmitido
 - Resultado: el **Rubí** es de color Rojo profundo.



Luminiscencia

- **Luminiscencia** – emisión de luz por un material
 - El material absorbe luz a una frecuencia y emite a otra frecuencia menor

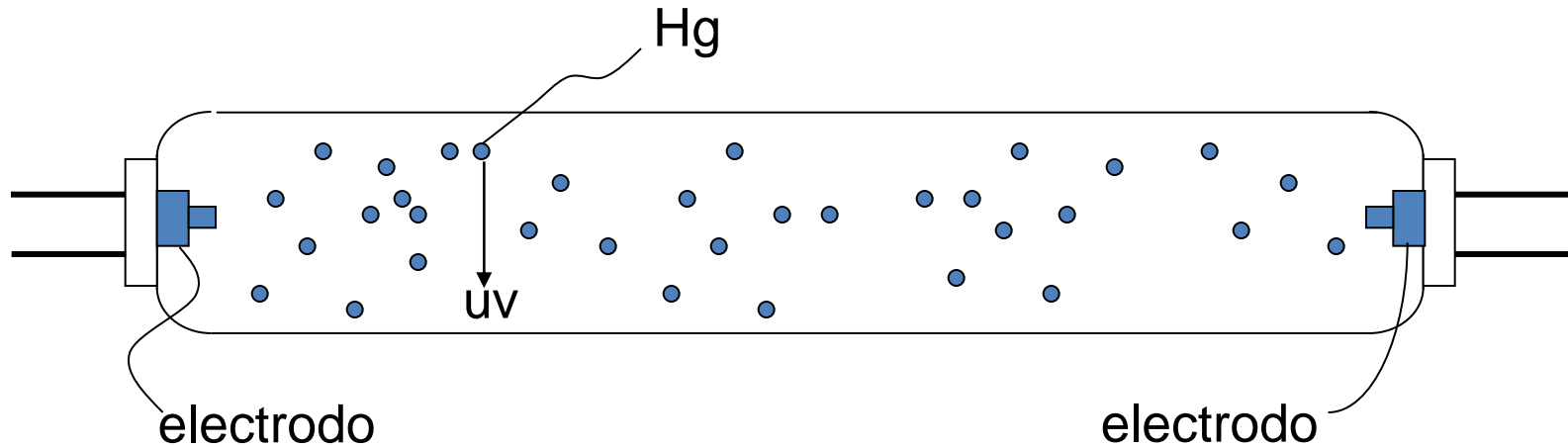


Qué tan estable es el estado atrapado?

- Si es muy estable (vida larga = $>10^{-8}$ s) = **fosforescencia**
- Si es menos estable ($<10^{-8}$ s) = **fluorescencia**

Ejemplo: juguetes que brillan en la oscuridad. Se cargan exponiéndolos a la luz. Reemiten durante un tiempo -- fosforescencia

Fotoluminiscencia



- El arco entre electrodos excita al mercurio de la lámpara a un nivel de energía más alto.
 - El electrón decae emitiendo luz UV
 - Un material que absorbe UV emite luz visible
- $\text{Ca}_{10}\text{F}_2\text{P}_6\text{O}_{24}$ con 20% de F^- reemplazado por Cl^-
- Se puede ajustar el color dopando con cationes metálicos

Sb^{3+} azul

Mn^{2+} naranja-rojo

Catodoluminiscencia

- Se usa en televisores
 - Bombardeo de fósforo con electrones
 - Se excita el fósforo a un nivel más alto
 - Se relaja emitiendo un fotón (visible)

ZnS (Ag⁺ & Cl⁻)

azul

(Zn, Cd) S + (Cu⁺+Al³⁺)

verde

Y₂O₂S + 3% Eu

rojo

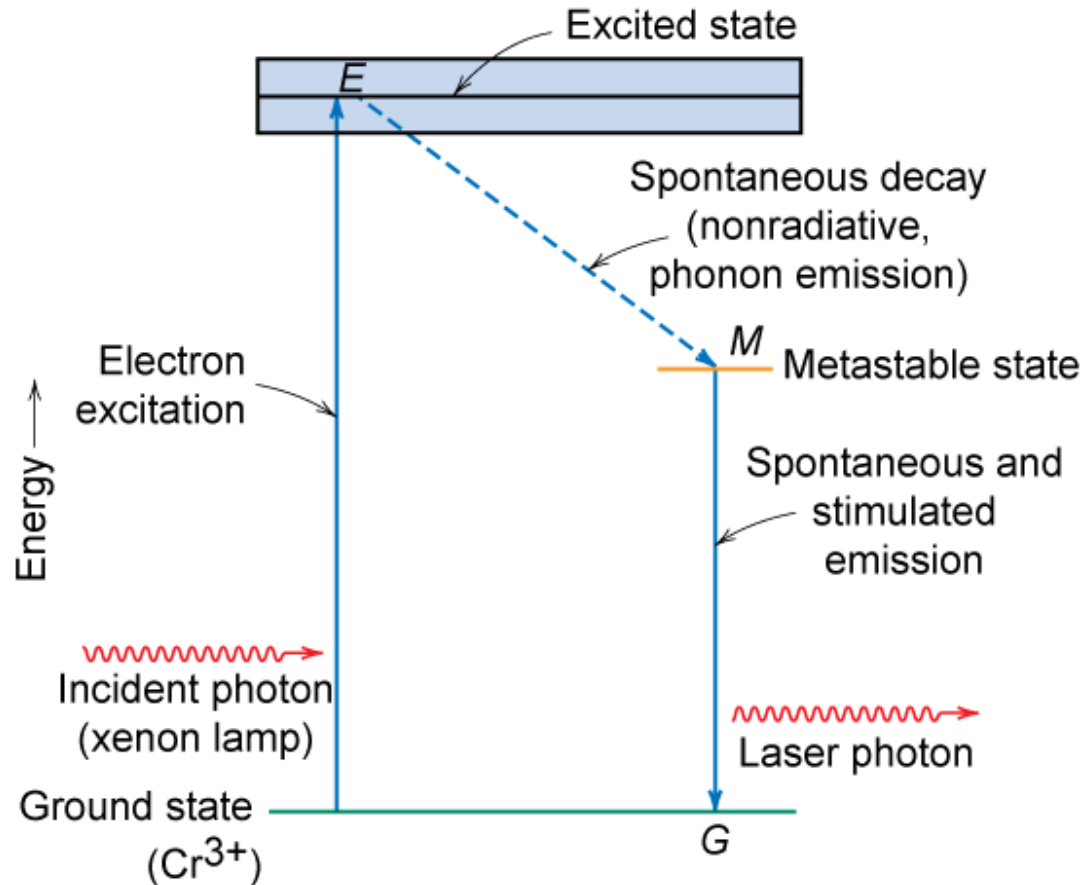
- Nota: la luz emitida es aleatoria en fase y dirección i.e., no es coherente

Luz LASER

- La luz no coherente puede ser un problema para aplicaciones
 - diverge
 - No se puede mantener colimada
- Cómo se obtiene luz en fase? (coherente)
 - LASERES
 - Light
 - Amplification by
 - Stimulated
 - Emission of
 - Radiation
- Involucran un proceso llamado **inversión de población** de estados de energía

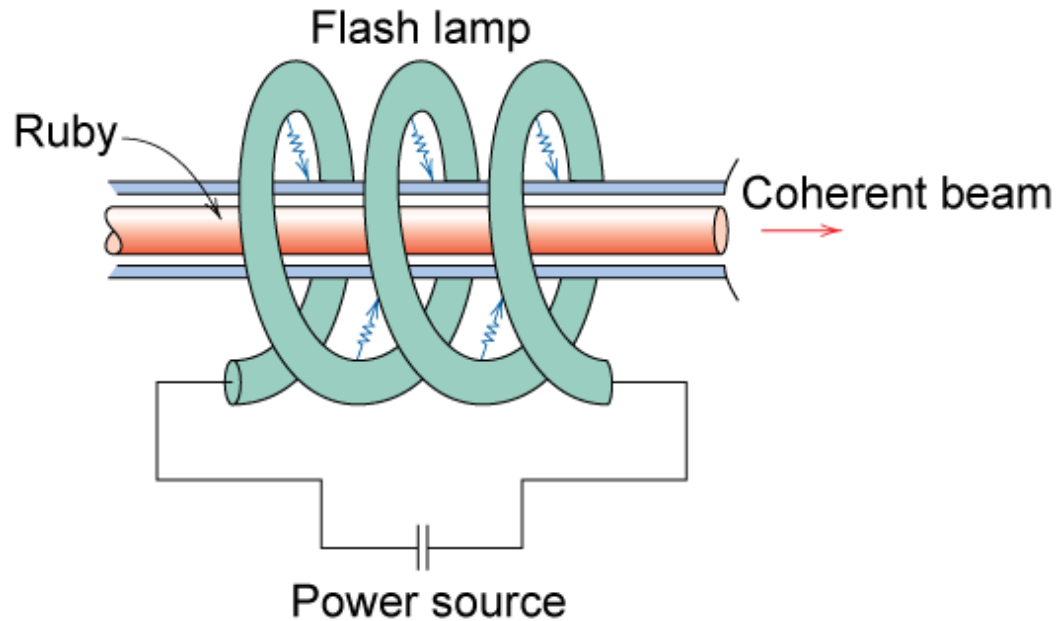
Inversión de población

- Se puede aumentar el número de especies a un estado excitado



Producción de luz LASER

- “bombeo” del material laser a un estado excitado
 - con una lámpara (lámpara no-coherente).

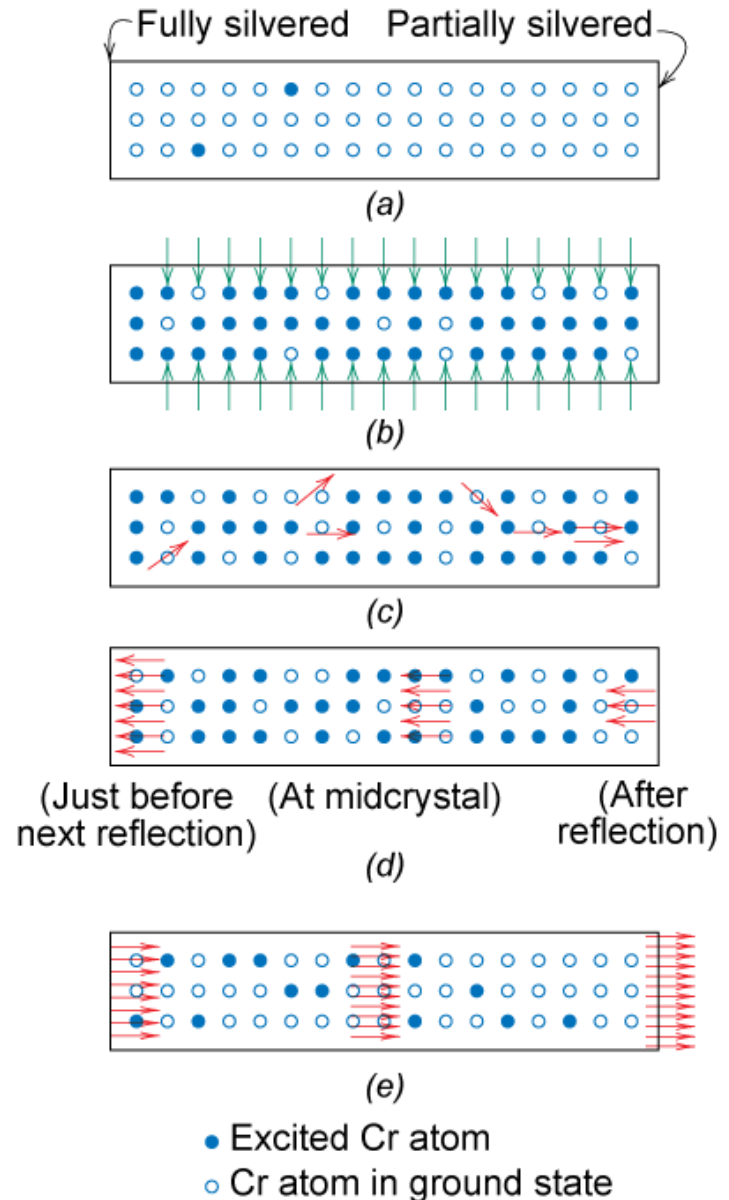


- si sólo se deja decaer no hay coherencia.

Cavidad LASER

Cavidad “entonada” :

- **Emisión estimulada**
 - Un fotón induce la emisión de otro fotón, en fase con el primero.
 - Cascadad que producen radiación coherente muy intensa.
- i.e., **láser pulsado**

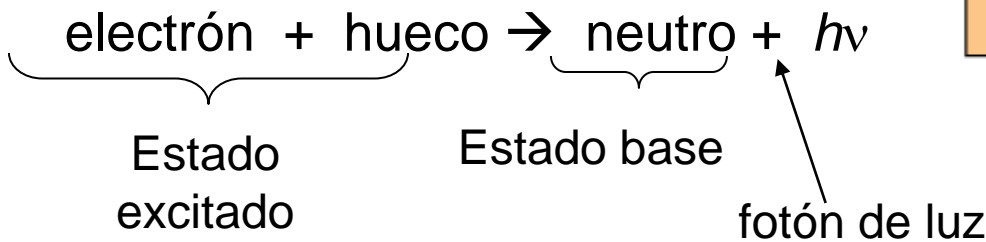
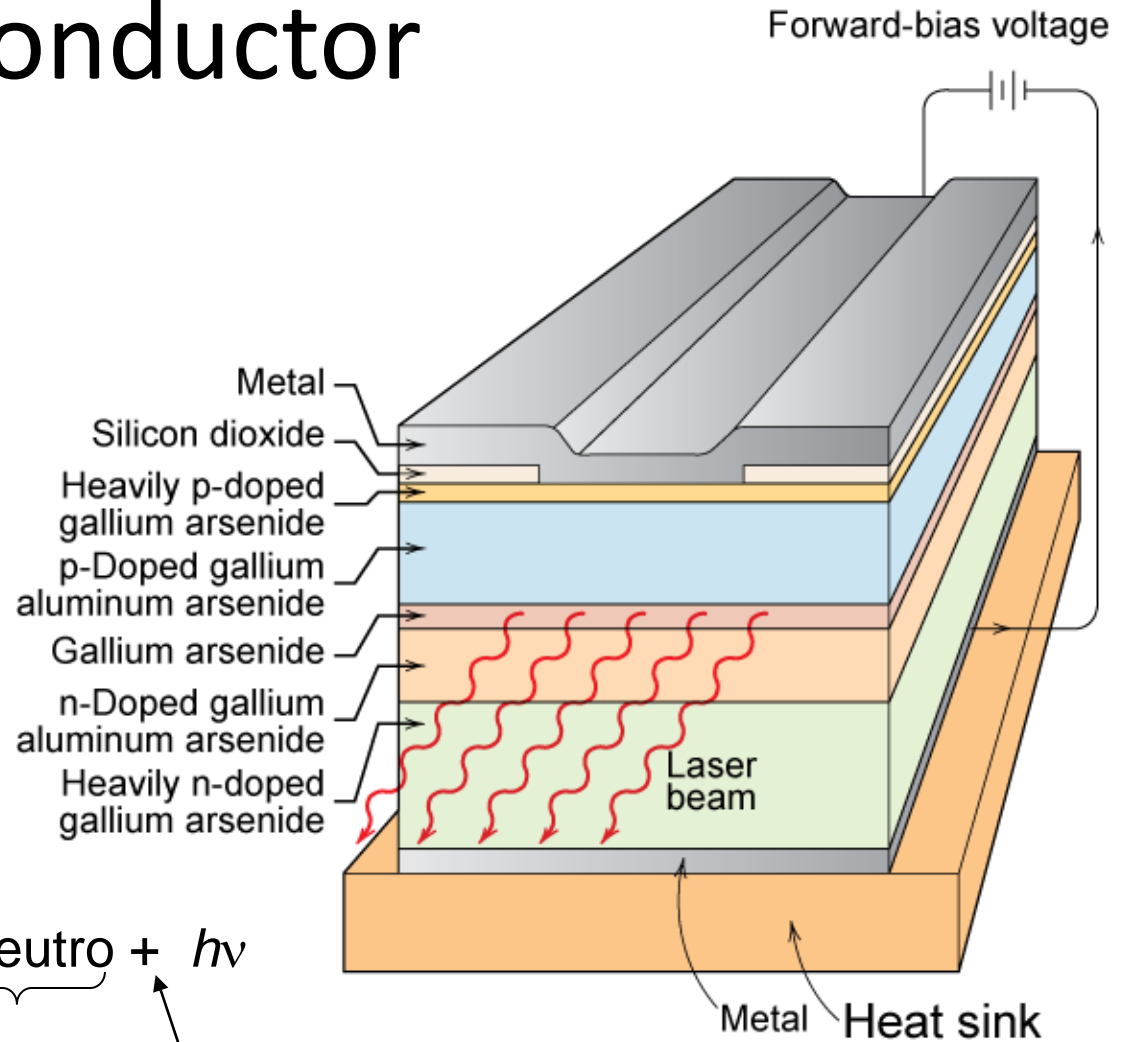


Onda láser continua

- Se usan también materiales como CO_2 or itrio- aluminio- granate(YAG) para LASERES
- Se obtiene una onda estacionaria en la cavidad láser–
 - Se entona la frecuencia ajustando la distancia del espejo.
- Usos de láseres de onda continua
 1. soldadura
 2. perforación
 3. Corte – madera tallada con láser, cirugía ocular
 4. Tratamientos superficiales
 5. trazado – cerámicas, etc.
 6. Fotolitografía – láser de Excímero

LASER Semiconductor

- Se aplica un voltaje grande a la junta. Se crean estados excitados bombeando electrones a través del gap, formando pares electrón-hueco..



Uso de láseres semiconductores

- uso #1 = reproductores de discos compactos
 - Color? - rojo
- Bancos de láseres semiconductores se usan como lámparas para bombear otros láseres
- Comunicaciones
 - Las fibras pueden variarse a frecuencias específicas (típicamente en el azul)

Características de algunos láseres

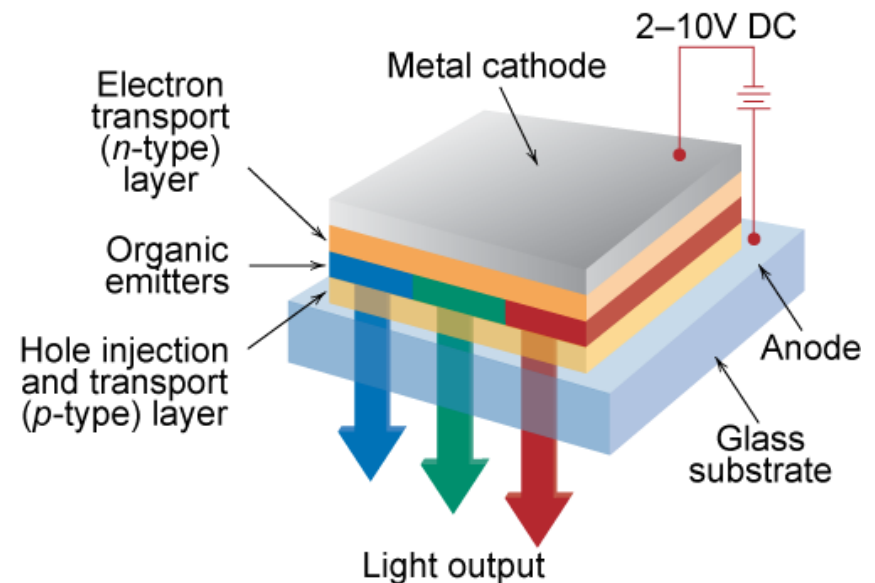
Table 21.2 Characteristics and Applications of Several Types of Lasers

<i>Laser</i>	<i>Type</i>	<i>Common Wavelengths (μm)</i>	<i>Max. Output Power (W)^a</i>	<i>Applications</i>
He-Ne	Gas	0.6328, 1.15, 3.39	0.0005–0.05 (CW)	Line-of sight communications, recording/ playback of holograms
CO ₂	Gas	9.6, 10.6	500–15,000 (CW)	Heat treating, welding, cutting, scribing, marking
Argon	Gas ion	0.488, 0.5145	0.005–20 (CW)	Surgery, distance measurements, holography
HeCd	Metal vapor	0.441, 0.325	0.05–0.1	Light shows, spectroscopy
Dye	Liquid	0.38–1.0	0.01 (CW) 1×10^6 (P)	Spectroscopy, pollution detection
Ruby	Solid state	0.694	(P)	Pulsed holography, hole piercing
Nd-YAG	Solid state	1.06	1000 (CW) 2×10^8 (P)	Welding, hole piercing, cutting
Nd-Glass	Solid state	1.06	5×10^{14} (P)	Pulse welding, hole piercing
Diode	Semiconductor	0.33–40	0.6 (CW) 100 (P)	Bar-code reading, CDs and DVDs, optical communications

^a “CW” denotes continuous; “P” denotes pulsed.

Aplicación de la ciencia de materiales

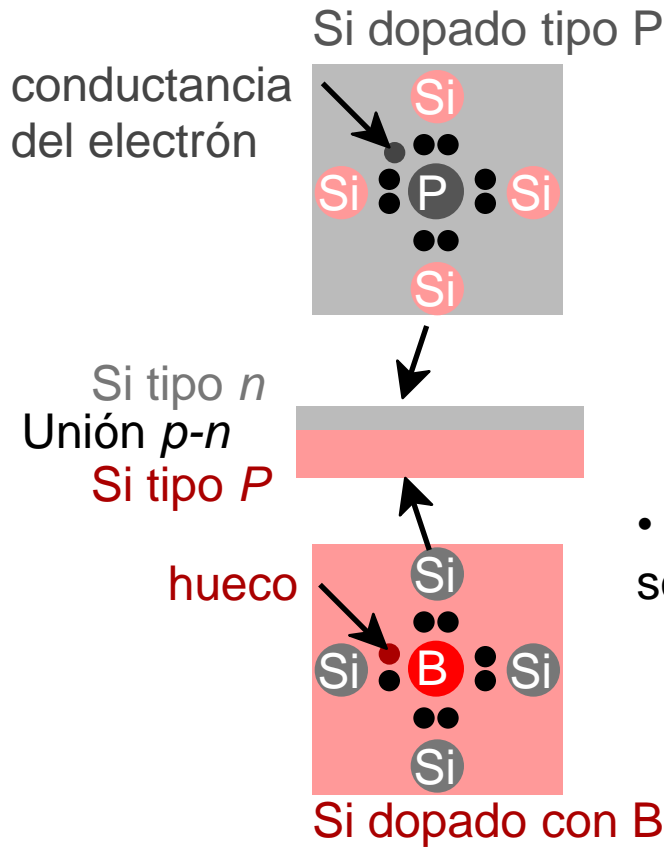
- Se deben desarrollar nuevos materiales para hacer nuevos y mejorados dispositivos ópticos.
 - Organic Light Emitting Diodes (OLEDs)
 - Fuentes semiconductoras de luz blanca



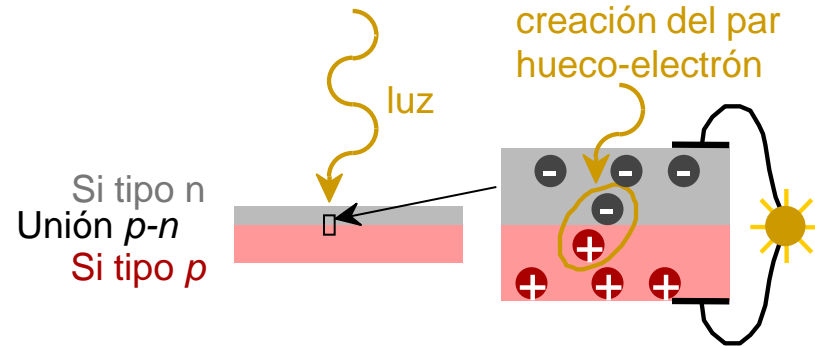
- Nuevos semiconductores
- Científicos usan los láseres como herramientas.
- Celdas solares

Celdas solares

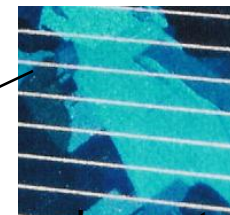
- uniones $p-n$:



- Operación:
 - fotones incidentes producen un par electrón-huevo.
 - típicamente se requiere un potencial de 0.5 V
 - la corriente aumenta con la intensidad de luz.



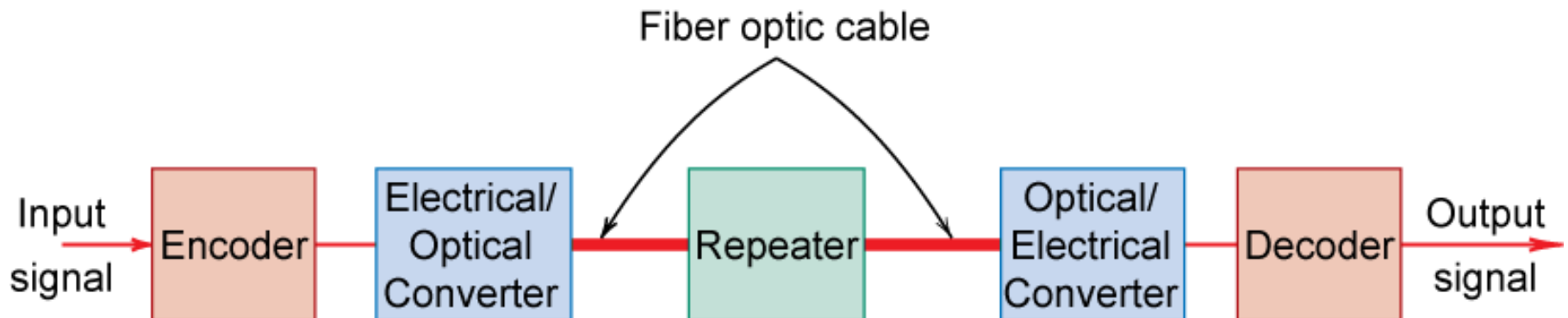
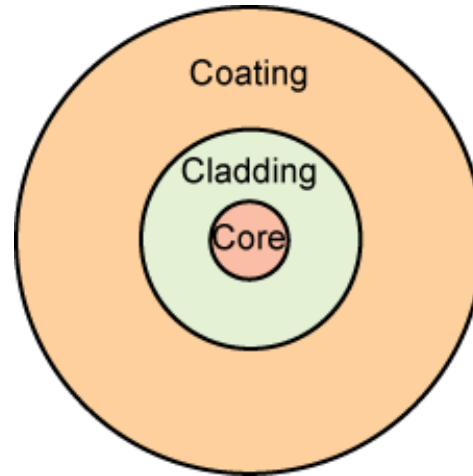
- Estación meteorológica alimentada con energía solar:



polycrystalline Si

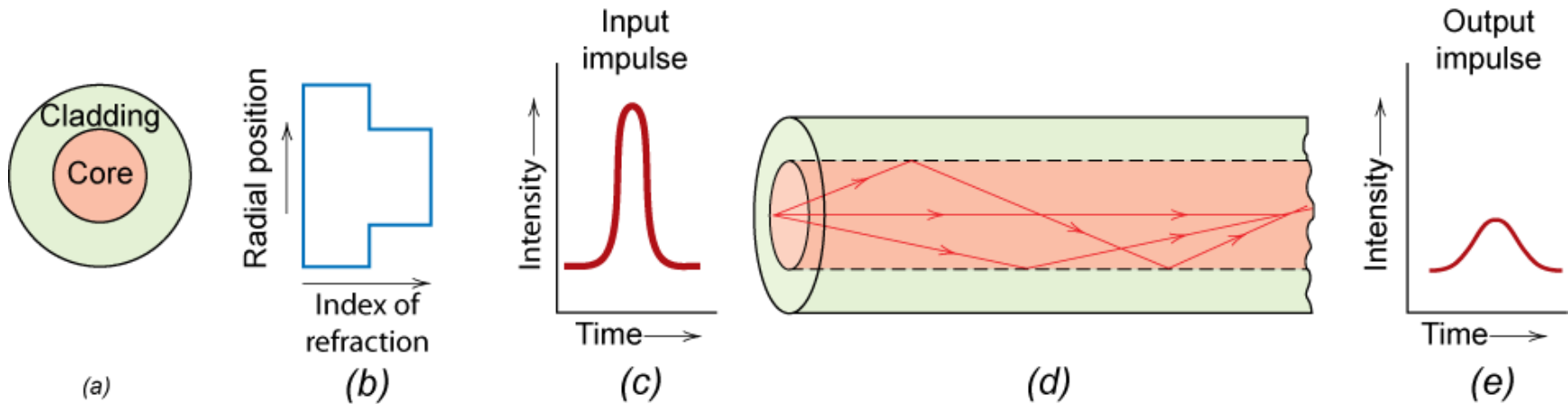
Los Alamos High School weather station (photo courtesy P.M. Anderson)

Fibras ópticas



Perfiles de fibras ópticas

Fibra óptica de índice de escalón



Fibra óptica de índice gradual

