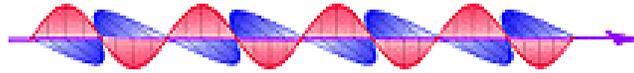


## **4. PROPIEDADES OPTICAS DE LOS MATERIALES**



**4.1 INTERACCIONES DE LA LUZ CON LA MATERIA**

**4.2 PROPIEDADES DE LA LUZ**

**4.3 EL PROCESO DE ABSORCIÓN**

**4.4 EL PROCESO DE EMISIÓN**

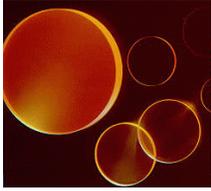
**4.5 DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO OPTICO**

**4.6 FORMACIÓN DE IMÁGENES**

**4.7 PANTALLAS**

**4.8 GENERACIÓN DE POTENCIA**

**4.9 MEDIOS PARA LA TRANSMISIÓN DE SEÑALES**



## **4.1 MATERIALES OPTICOS.**

### **INTERACCIONES DE LA LUZ CON LA MATERIA**

#### **4.1.1 MOTIVACIÓN**

**Estudio de propiedades ópticas ha adquirido importancia debido al crecimiento de la tecnología de la información:**

- Transmisión de TV: aumentar anchos de banda de datos y reducir costos.
- Materiales y dispositivos: láseres, guías de onda, fotodetectores, etc., y su uso en equipos de CD, impresoras láser, diagnóstico médico, visores nocturnos, computación óptica, aplicaciones solares y optoelectrónica.
- **El estudio de las interacciones luz-sólidos no es nuevo:**
  - **4000 años atrás:** el color lo utilizaban los chinos para determinar la composición de del cobre fundido (contenido de Sn).
  - **Galileo:** óptica

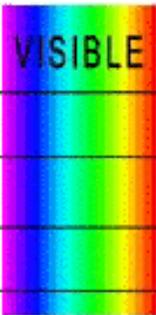
- **Goethe 200 años atrás:** en su *“Tratado del Color”* indicó explícitamente que el color no es una propiedad de la materia.
- **A comienzos de siglo ocurrió cambio fundamental de cómo “vemos” la luz:** Einstein explicó el fenómeno fotoeléctrico y la dualidad de la luz (onda-partícula).
- **El término “color” desaparece. En cambio se postula que las propiedades ópticas se deben a las interacciones entre la luz y los e-del material.**

#### **4.1.2 ¿CÓMO PERCIBIMOS LA LUZ?**

- Desde que nacemos la luz entra a nuestros ojos
- es percibida por receptores luminosos específicos (sólo cubren rango específico de longitudes de onda: **luz visible**)
- estos receptores estimulan las terminaciones nerviosas que transforman la señal luminosa (o las imágenes) en señales eléctricas.
- La señal eléctrica es transmitida a la corteza cerebral
- Por lo tanto, tenemos un **sistema** de formación y transmisión de imágenes **optoelectrónico altamente desarrollado.**

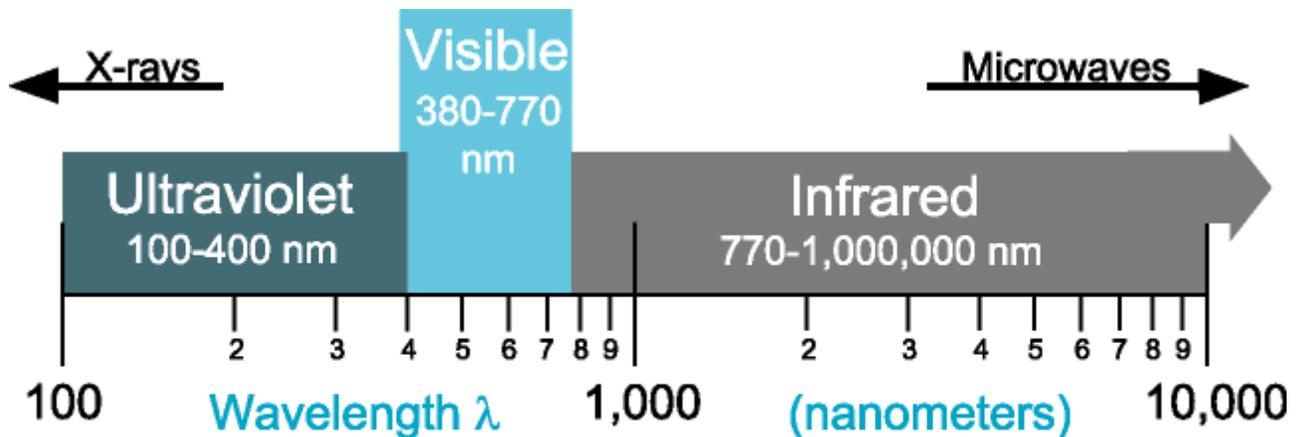
### 4.1.3 ¿QUÉ ES LA LUZ?

- Intuitivamente, la luz la percibimos como una onda (electromagnética) que viaja desde una **fuente a un punto de observación.**
- **Color**  $\Leftrightarrow$  longitud de onda.

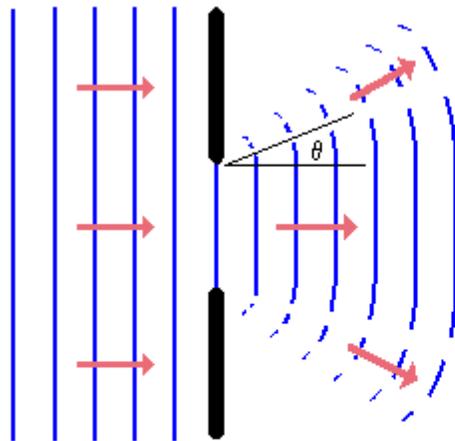
	X RAYOS	UV	VISIBLE	IR	RADIOFRECUENCY	
$\nu$ (Hz)	$10^{18}$	$10^{15}$		$10^{14}$	$10^{11}$	Frecuencia
$\lambda$ (m)	$10^{-9}$	$10^{-7}$		$10^{-6}$	$10^{-3}$	Longitud de onda
$h\nu$ (J)	$10^{-15}$	$10^{-18}$		$10^{-19}$	$10^{-22}$	Energía

$350 - 650 \text{ nm}$

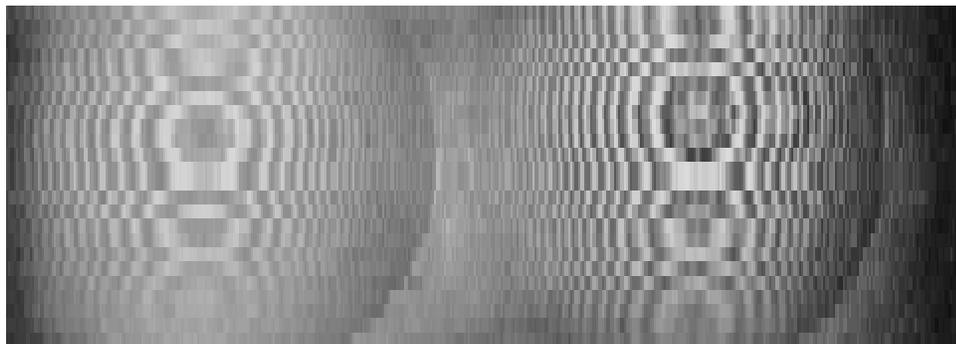
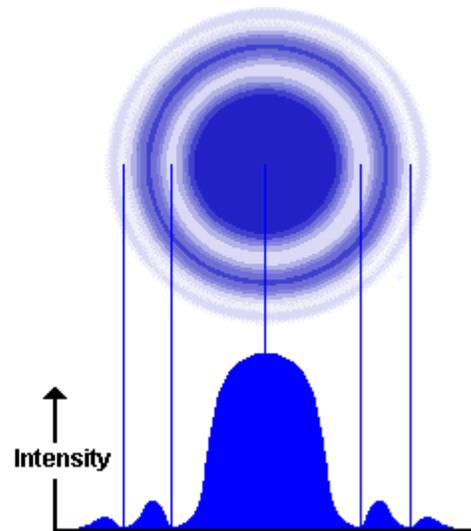
$E = h\nu = h \cdot c / \lambda$



- **Muchos experimentos confirman la naturaleza ondulatoria de la luz:**
  - **Difracción**
  - **Interferencia**



**Patrón de difracción**



**Interferencia**

- Hertz, 1887, descubrió **efecto fotoeléctrico** (explicado por Einstein, 1905): luz tiene naturaleza corpuscular!  $\Rightarrow\Leftarrow$
- Emisión de e- desde una superficie metálica después de iluminarla con luz de energía apropiadamente alta (ej.: luz azul).
- Ahora sabemos que la expresión de energía luminosa más pequeña es el **cuanto de luz o fotón**:

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

donde  $h=6,63 \times 10^{-34}$  J s

- Además,  $\lambda\nu=c$ , donde  $c=3 \times 10^8$  [m s<sup>-1</sup>] es la velocidad de la luz.
- Usualmente se usa  $hc=1,24$  eV/ $\mu$ m, pues

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda[\mu m]} eV$$

- La energía que se requiere imprimir al metal para extraer un electrón ligado al núcleo es:

$$E = h\nu - \phi$$

donde  $\phi$  es la función trabajo del metal.

## Problema 1

¿Cuáles son las energías de la luz con las siguientes longitudes de onda (a) 400 nm y (b) 800 nm? ¿Cuáles son sus colores?

(a) Si  $\lambda=400 \text{ nm} = 0,4 \mu\text{m} \Rightarrow$

$$E = 1,24 eV / 0,4 [\mu m] = 3,1 eV$$

i.e. ultravioleta cercano.

(b) Si  $\lambda=800 \text{ nm} = 0,8 \mu\text{m} \Rightarrow$

$$E = 1,24 eV / 0,8 [\mu m] = 1,55 eV$$

i.e. luz roja.

## Problema 2

¿Cuál es el número de fotones que salen por unidad de tiempo desde un sólido si se ilumina con luz de 10 W de potencia y  $\lambda=0,65 \mu\text{m}$ ?

Un fotón de  $\lambda=0,65 \mu\text{m}$  posee una energía de:

$$E = 1,24 eV / \lambda [\mu m] = 1,24 eV / 0,65 = 1,9 eV$$

El número de fotones presentes en 10 W es:

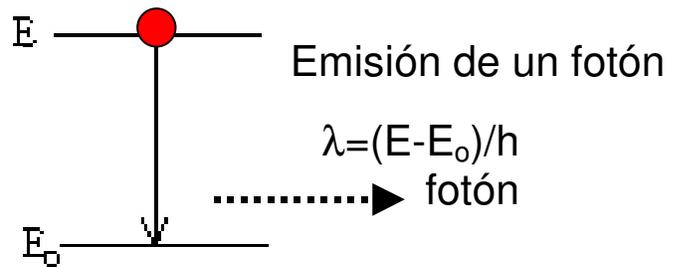
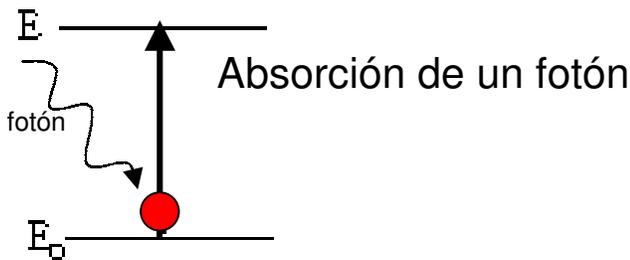
$$\# \text{ fotones} = \frac{10 \text{ J/s}}{(1,9 eV) \times (1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 0,33 \times 10^{20} \text{ fotones/s}$$



## 4.2 MATERIALES OPTICOS. PROPIEDADES DE LA LUZ

### 4.2.1 INTRODUCCIÓN

- Las propiedades ópticas de un sólido están determinadas por cómo la luz interactúa con éste:
  - cómo transmite la luz,
  - cómo refleja la luz y/o
  - cómo absorbe la luz.
- La interacción luz-materia depende de la naturaleza de la luz (onda-partícula):
  - Si es onda e.m.  $\Rightarrow$  se esperan interacciones entre la **componente de campo eléctrico de la luz** y las **partículas cargadas del sólido** (iones y e-).
  - **Absorción y emisión de fotones.**



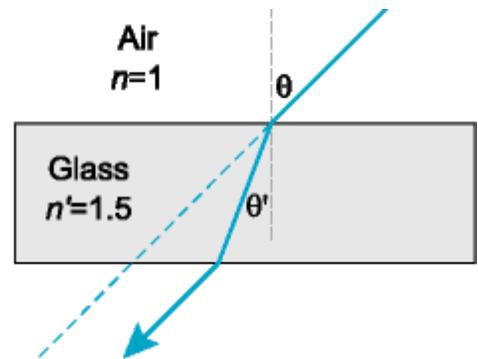
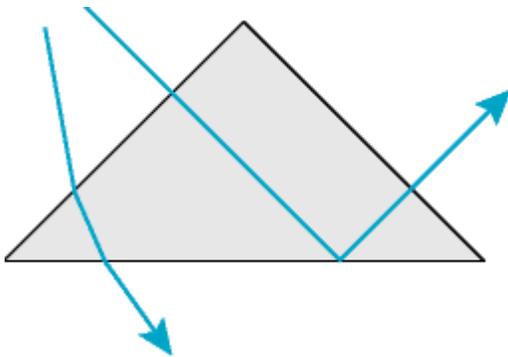
- Normalmente el e- se queda en estado excitado temporalmente y luego se “relaja” y emite el exceso de energía.
- Esto sucede con conservación de energía y momento.
- Conservación de E es sencilla
- Conservación de p es más complicado: vibraciones del cristal.

#### 4.2.2 CONSTANTES OPTICAS

- Cuando la luz pasa a través de un sólido ópticamente “delgado” también polariza los e- de valencia y los iones de la red.
- Este proceso da lugar a dipolos inducidos, los que modifican la constante dieléctrica y el índice de refracción.
- Estos cambios se “reflejan” en medidas de la permitividad dieléctrica.
- Normalmente, cómo la luz pasa a través de un sólido está determinado por **constantes ópticas**:
  - Índice de refracción:  $n$  (**dirección**)
  - Coeficiente de absorción:  $\alpha$  (**atenuación**)

- Por otro lado, cuando la luz pasa desde un sólido ópticamente “delgado” (ej.: aire o vacío) **hacia** un medio ópticamente denso el ángulo de refracción ( $\beta$ ) es menor que el ángulo de incidencia ( $i$ ): **Ley de Snell**

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } \beta} = \frac{n_{\text{medio}}}{n_{\text{vacío}}} = n$$



- Usualmente  $n_{\text{vacío}} \equiv 1$  (esto es arbitrario)
- Luego, la refracción es provocada por las diferentes velocidades de la luz en distintos medios:

$$n = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } \beta} = \frac{c_{\text{vacío}}}{c_{\text{medio}}} = \frac{c}{v}$$

- La magnitud de  $n$  depende de la longitud de onda de la luz incidente: esta propiedad se llama **dispersión**.
- En los metales:  $n = n(\lambda, i)$

- En general,  $n$  es un número complejo

$$\hat{n} = n_1 - jn_2 = n - jk$$

donde  **$k$  es la constante de amortiguación** (sinónimos: constante de absorción, índice de atenuación o coeficiente de extinción).

- Relación del índice de refracción ( $n$ ) con la permitividad ( $\epsilon$ ).
- Examinemos la componente eléctrica de una onda electromagnética:

$$E(x, t) = E_o \exp(j\omega(t - \hat{n} x/c))$$

**donde:**

- $E_o$  : amplitud máxima del campo eléctrico en V/m.
- $j = \sqrt{-1}$
- $\omega$  : frecuencia angular en rad/s
- $\hat{n}$  : índice de refracción complejo
- $t$  : tiempo en s
- $x$  : dirección de propagación de la luz en m
- $c$  : velocidad de la luz en m/s.

**por lo tanto**

$$E(x, t) = E_o \exp(j\omega(t - n x/c)) \exp(-\alpha x)$$

donde  $\alpha^* = \omega k/c$  es el coeficiente de absorción en  $m^{-1}$

- Se aprecia que:
  - $n$  altera la fase (o la velocidad) de la onda estacionaria.
  - $\alpha$  da una medida de la atenuación
- Al aplicar la ecuación de Maxwell a esta onda estacionaria:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} - \sigma \frac{dE}{dt} - \epsilon \mu \frac{d^2 E}{dt^2} = 0$$

donde:

- $\epsilon$  : permitividad del sólido en F/m
- $\mu$  : permeabilidad del sólido en H/m
- $\sigma$  : la conductividad en  $1/\Omega m$

luego aplicándola a la onda e.m. estacionaria da:

$$\hat{n}^2 = (n - jk)^2 = c^2 \mu n - j c^2 \sigma \mu / \omega$$

luego las partes real e imaginaria de  $\hat{n}$  son:

$$\hat{n}^2 = \hat{\epsilon} = \epsilon_1 - i\epsilon_2 = n^2 - k^2 - 2nki$$

i.e.

$$\epsilon_1 = \epsilon_s / \epsilon_o = n^2 - k^2$$

**POLARIZACIÓN**

**donde:**

- el medio es no magnético, i.e.  $\mu=\mu_0$
- $\epsilon_0=8,86\times 10^{-12}$  F/m : permitividad del vacío
- $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$

$$\epsilon_2 = \sigma / (\omega n) = 2nk$$

**ABSORCIÓN**

- **Si en el medio no hay atenuación:  $k\approx 0$**

$$n = \sqrt{\epsilon / \epsilon_0}$$

$$\sigma \approx 0$$

**i.e. el medio es un aislador eléctrico.**

- **Cuando la radiación e.m. pasa desde el vacío (o aire) hasta un medio más denso ópticamente, luego **amplitud de la onda****
  - **Disminuye al aumentar  $k$**
  - **Disminuye al aumentar  $z$  desde la superficie**
- **La intensidad  $I=E^2$  obedece la siguiente relación (puede deducirse de las ecuaciones de Maxwell):**

$$I = E^2 = I_0 \exp\left(-\frac{2\omega k}{c} z\right)$$

- La **profundidad de penetración característica  $W$**  se define como aquella en la cual la intensidad de la luz ha disminuido

$$\frac{I}{I_o} = \frac{1}{e} = e^{-1} \approx 37\%$$

luego

$$z_w = W = \frac{c}{2\omega k} = \frac{c}{4\pi\nu k} = \frac{\lambda}{4\pi k}$$

- $W^{-1} \equiv$  **absorbancia,  $\alpha$  ( $m^{-1}$ )**

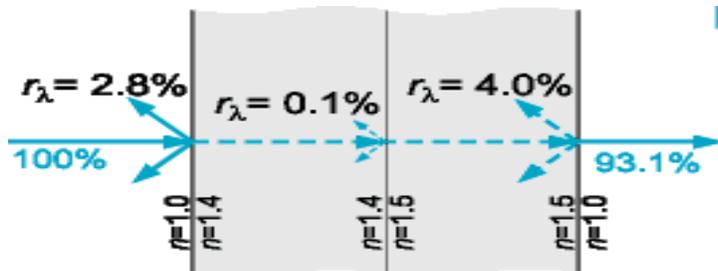
$$\alpha = \frac{2\omega k}{c}$$

- La razón entre la intensidad reflejada ( $I_R$ ) y la intensidad incidente ( $I_o$ ) es la **reflectividad**:

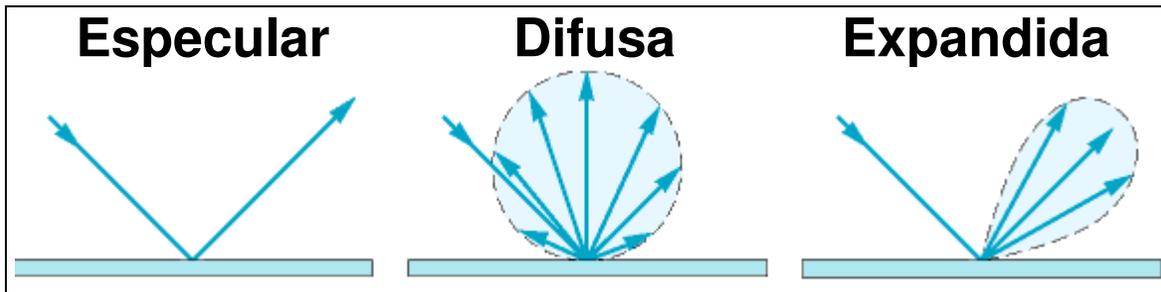
$$R = \frac{I_R}{I_o} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (\text{Ecuación de Beer})$$

- En los **aisladores:  $k \approx 0$**

$$R_{\text{aislador}} = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (\text{Ley de Fresnel})$$



- En los **metales**: R es alto pues  $W \approx 0$



<b>Constantes Ópticas de Algunos Materiales</b> ( $\lambda=600 \text{ nm}$ )			
<b>Material</b>	<b>n</b>	<b>k</b>	<b>R (%)</b>
<b>Metales</b>			
Cobre	0,14	3,35	95,6
Plata	0,05	4,09	98,9
Oro	0,21	3,24	92,9
Aluminio	0,97	6,0	90,3
<b>Cerámicas</b>			
Vidrio sílice (Vycor)	1,46	$\approx 10^{-7}$	3,50
Vidrio de soda	1,51	$\approx 10^{-7}$	4,13
Cuarzo	1,55	$\approx 10^{-7}$	4,65
Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	1,76	$\approx 10^{-7}$	7,58
<b>Semiconductores</b>			
Silicio	3,94	0,025	35,42
GaAs	3,91	0,228	35,26
<b>Polímeros</b>			
Polietileno	1,51	$\approx 10^{-7}$	4,13
Poliestireno	1,60	$\approx 10^{-7}$	5,32
Politetrafluoroetano	1,35	$\approx 10^{-7}$	2,22

<b>Parámetros Ópticos</b> <b>(<math>\lambda=589,3</math> nm)</b>		
<b>Material</b>	<b>W (mm)</b>	<b>K</b>
Agua	320	$1,4 \times 10^{-7}$
Vidrio	290	$1,5 \times 10^{-7}$
Grafito	$6 \times 10^{-7}$	0,8
Oro	$1,5 \times 10^{-6}$	3,2

- **La razón entre la intensidad transmitida ( $I_T$ ) y la intensidad incidente ( $I_o$ ) es la transmisividad:**

$$T = \frac{I_T}{I_o}$$