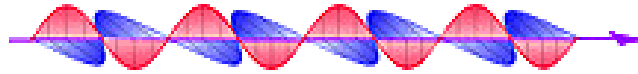


4. PROPIEDADES OPTICAS DE LOS MATERIALES



4.1 INTERACCIONES DE LA LUZ CON LA MATERIA

4.2 PROPIEDADES DE LA LUZ

4.3 LA ABSORCIÓN DE LUZ

4.4 LA EMISIÓN DE LUZ

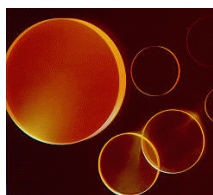
4.5 DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO OPTICO

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.**

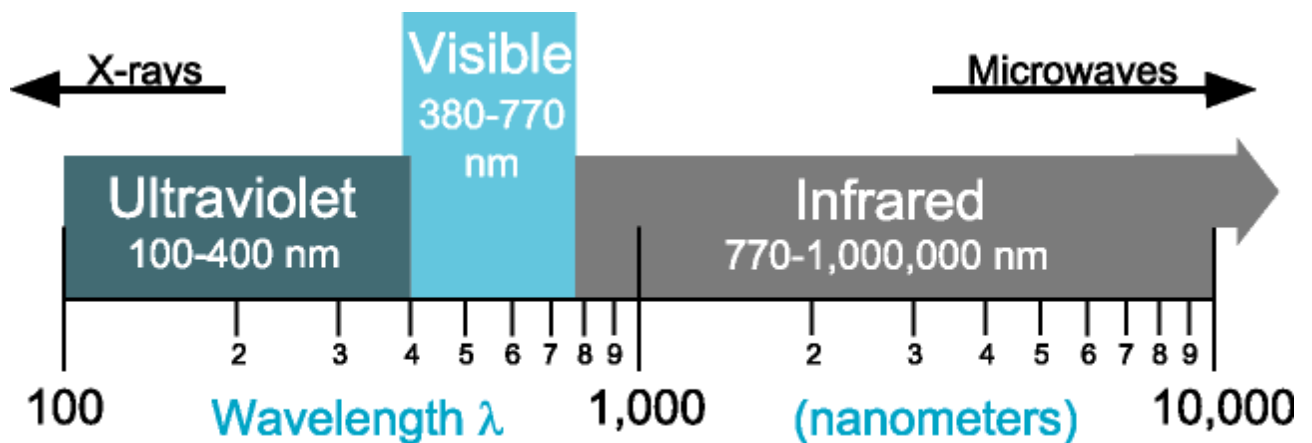
4.1.3 ¿QUÉ ES LA LUZ?

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

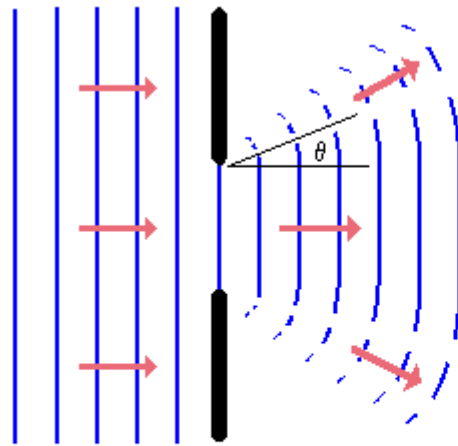
	X RAYOS	UV	VISIBLE	IR	RADIOFRECUENCIA	
ν (Hz)	10^{18}	10^{15}		10^{14}	10^{11}	Frecuencia
λ (m)	10^{-9}	10^{-7}		10^{-6}	10^{-3}	Longitud de onda
$h\nu$ (J)	10^{-15}	10^{-18}		10^{-19}	10^{-22}	Energía

350 - 650 nm

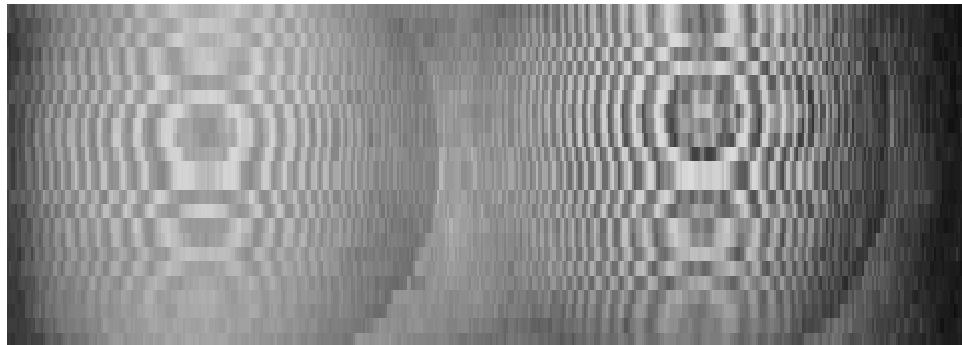
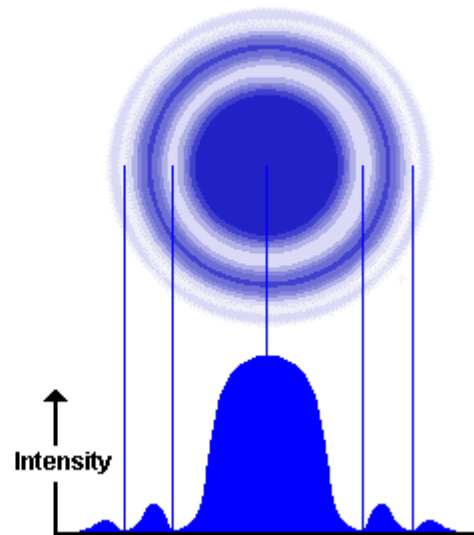
$E = h\nu = h \cdot c / \lambda$



- **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⁻¹] es la velocidad de la luz.
- Usualmente se usa $hc=1,24$ eV/ μ 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 ϕ 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 $\lambda=400 \text{ nm} = 0,4 \mu\text{m} \Rightarrow$

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

i.e. ultravioleta cercano.

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

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

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:

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

El número de fotones presentes en 10 W es:

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

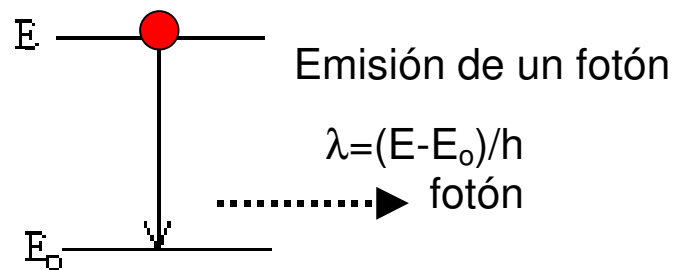
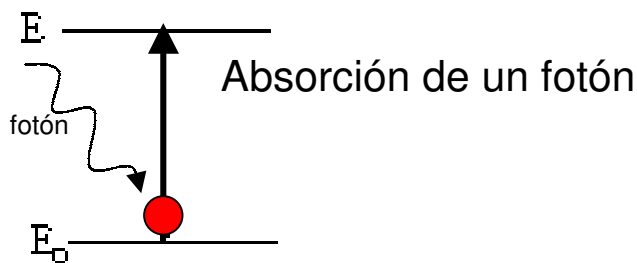


4.2 MATERIALES OPTICOS.

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.



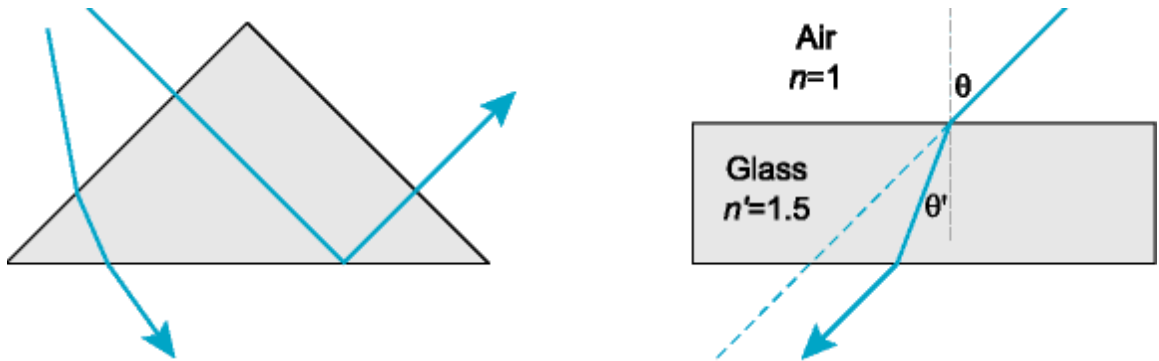
- Normalmente el e- se queda en estado excitado temporalmente y luego se “relaja” y emite el exceso de energía.
- Esto sucede con conservación de energía y momento.
- Conservación de E es sencilla
- Conservación de p es más complicado: vibraciones del cristal.

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: α (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 (β) 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 (ϵ).

- 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.
- $j = \sqrt{-1}$
- ω : 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.
 - α 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:

- ϵ : permitividad del sólido en F/m
- μ : permeabilidad del sólido en H/m
- σ : 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. $\mu=\mu_o$
- $\epsilon_o=8,86\times 10^{-12}$ F/m : permitividad del vacío
- $c = 1/\sqrt{\epsilon_o\mu_o}$

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

ABSORCIÓN

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

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

$$\sigma \approx 0$$

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):

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

- 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, α (m^{-1})**

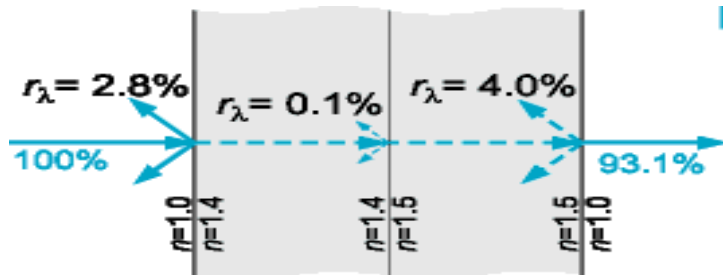
$$\alpha = \frac{2\omega k}{c}$$

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

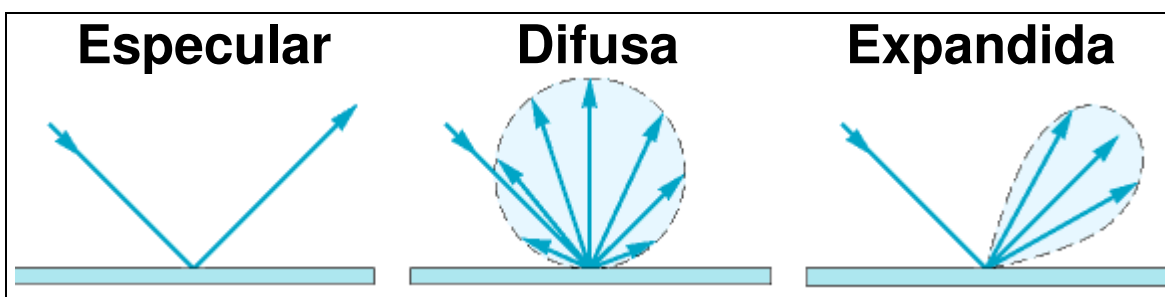
$$R = \frac{I_R}{I_o} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (\text{Ecuación de Beer})$$

- 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 $W \approx 0$



Constantes Ópticas de Algunos Materiales ($\lambda=600 \text{ nm}$)			
Material	n	k	R (%)
Metales			
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
Cerámicas			
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 (Al_2O_3)	1,76	$\approx 10^{-7}$	7,58
Semiconductores			
Silicio	3,94	0,025	35,42
GaAs	3,91	0,228	35,26
Polímeros			
Polietileno	1,51	$\approx 10^{-7}$	4,13
Poliestireno	1,60	$\approx 10^{-7}$	5,32
Politetrafluoroetano	1,35	$\approx 10^{-7}$	2,22

Parámetros Ópticos ($\lambda=589,3 \text{ nm}$)		
Material	W (mm)	K
Agua	320	$1,4 \times 10^{-7}$
Vidrio	290	$1,5 \times 10^{-7}$
Grafito	6×10^{-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**:

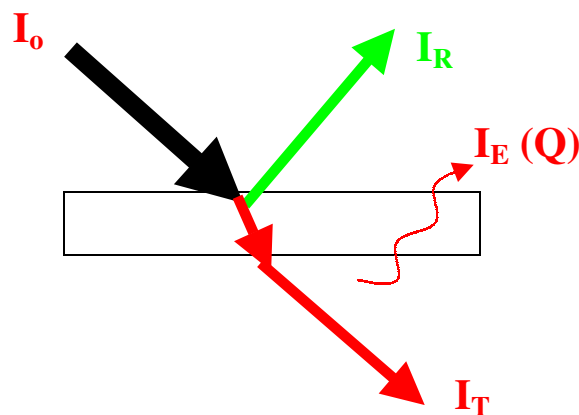
$$T = \frac{I_T}{I_o}$$

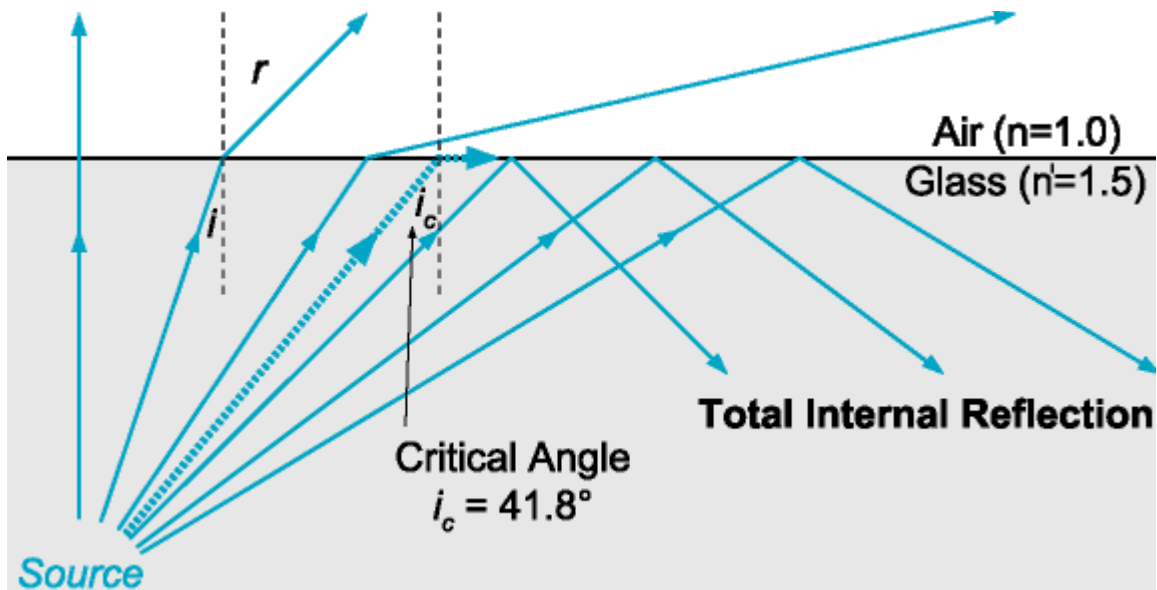
- Por conservación de la energía:

$$I_o = I_R + I_T + I_E$$

donde I_E es la energía perdida por calor.
Dividiendo por I_o :

$$R + T + E = 1$$

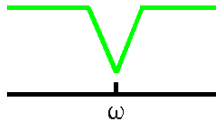




- **Aplicación: Lentes**
 - Para disminuir reflexión: se recubre superficie con película de material dieléctrico.
 - Normalmente se usa: MgF_2 (fluoruro de magnesio).
 - Resultado: color azulado en lentes de cámaras
- Existe ecuación que relaciona la reflectividad de la luz a **bajas frecuencias (infrarojo)** con la conductividad continua:

$$R = 1 - 4\sqrt{\pi\epsilon_o \frac{V}{\sigma}} \quad (\text{Ecuación de Hagen - Rubens})$$

- Encontrada experimentalmente el S.XIX por Hagen y Rubens.
- Indica que materiales con $\sigma \uparrow$ (e.g., metales) también poseen $R \uparrow$.



4.3 MATERIALES OPTICOS.

LA ABSORCIÓN DE LUZ

4.3.1 EL PROCESO DE ABSORCIÓN

- Cuando la luz incide sobre un material:
 - Es reemitida (reflexión, transmisión)
 - o se extingue (se transforma en calor)
- En ambos casos hay interacción luz-materia.
- Uno de los mecanismos de interacción es la **ABSORCIÓN**.

4.3.1.1 MODELOS CLÁSICOS

- Descripción clásica del fenómeno la realizó Paul Drude a fines del S. XIX (el mismo que ya conocen):
 - Existen electrones libres, *i.e.* pueden ser separados de sus núcleos (e- de valencia)
 - Estos e- libres pueden ser acelerados por campo eléctrico externo.
 - En su movimiento chocan con imperfecciones en la red.
 - ¿Qué les pasa en presencia de un campo eléctrico oscilante (*e.g.*, luz)?
 - Oscilan al "compás" del campo. Lo siguen.

- Sin embargo, oscilaciones de los e- están restringidas por las interacciones e⁻-red
 ∴ debe considerarse una **fuerza de roce**.
- **Cálculo de las constantes ópticas vs. ω :**
 - Interacciones e⁻-red se incluyen en el término de amortiguación (k o $\alpha=2\omega k/c$):

$$k \propto \text{velocidad de los e-}$$

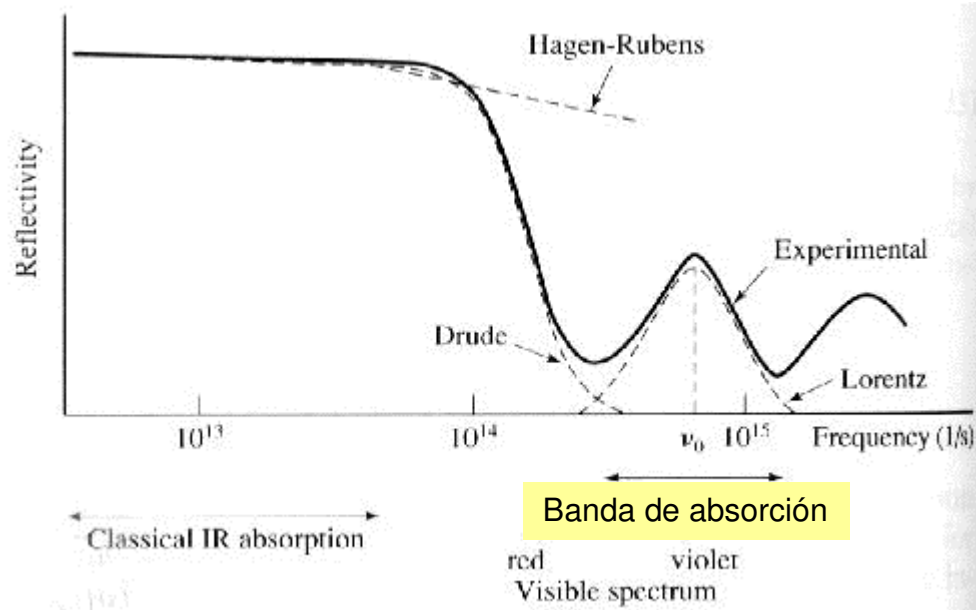
- La ecuación de Newton ($F=ma$) es:

$$F = eE \quad ; \quad E = E_o \text{sen}(\omega t)$$

$$m \frac{dv}{dt} + \gamma v = eE_o \text{sen}(2\pi \nu t)$$

donde **γ es la energía de amortiguación** y es la que considera las interacciones e⁻-red (amortiguamiento del movimiento de e-).

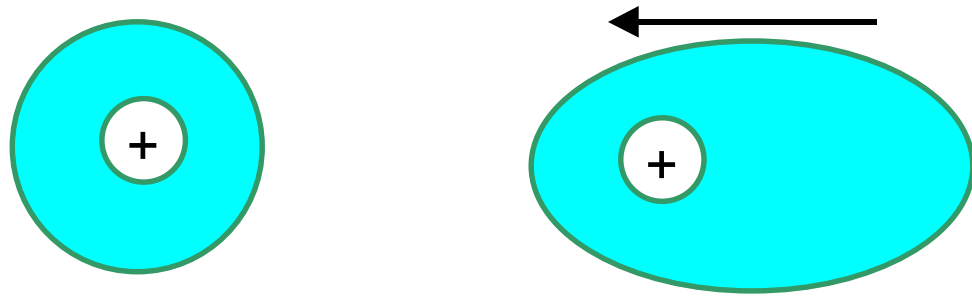
- La solución de esta ecuación entrega la dependencia en frecuencia de las constantes ópticas (no se intentará).
- La teoría del e- libre describe bastante bien $R=R(\nu)$:



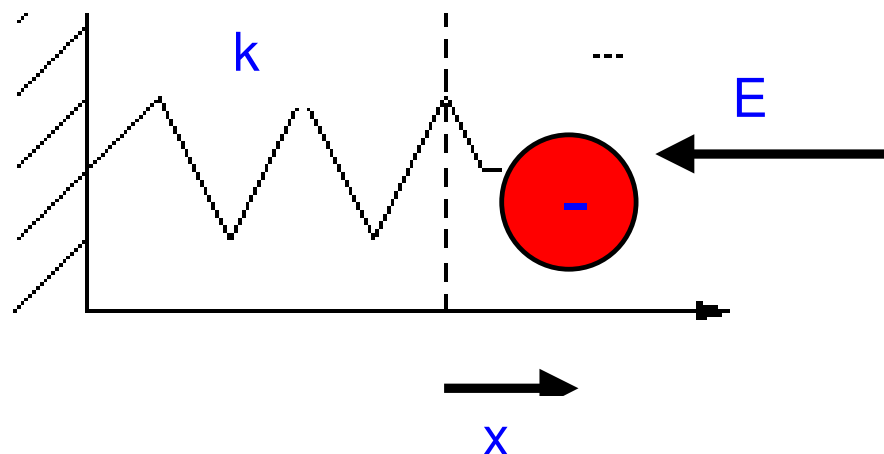
- Hagen-Rubens: hasta $\nu = 10^{13} \text{ s}^{-1}$
- Drude: incluso hasta el visible
- A frecuencias mayores: se encuentra que $R \uparrow$ y luego $R \downarrow$ (experimental):

Aparece banda de absorción !

- La banda de absorción **no** puede ser explicada por el modelo de e- libres. Entonces, **¿cómo se interpreta?**
- Se requiere usar un concepto nuevo: **modelo de Lorentz**.
 - Postula que e- deben considerarse ligados al núcleo y
 - Campo eléctrico externo desplaza la nube de e- (carga: -) c/r al núcleo (carga: +): dipolo eléctrico.



- Entonces ¿qué pasa cuando se ilumina el sólido?
- Dipolo se comporta como masa en el extremo de un resorte: existe fuerza restauradora $\propto x$:



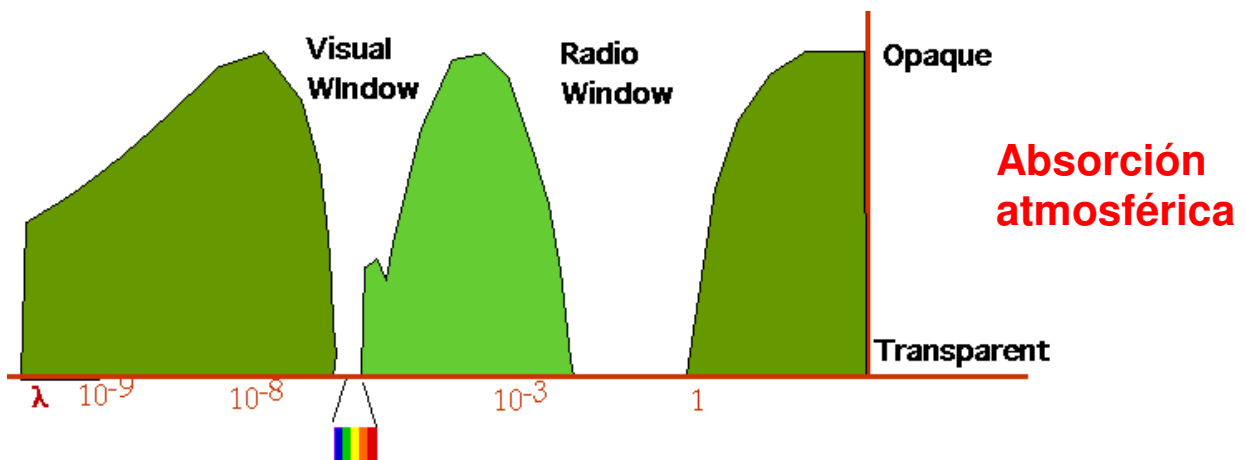
$$m \frac{dv}{dt} + \gamma' v + kx = eE_o \sin(2\pi vt)$$

- k determina la energía de ligadura entre los e^- y el núcleo.
- Cada dipolo vibratorio pierde energía por radiación (e.g., antena): $\gamma'v$ representa la amortiguación por radiación del oscilador.

- Oscilador absorbe un máximo de energía si es excitado con frecuencia cercana a la frecuencia de resonancia:

$$\nu_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

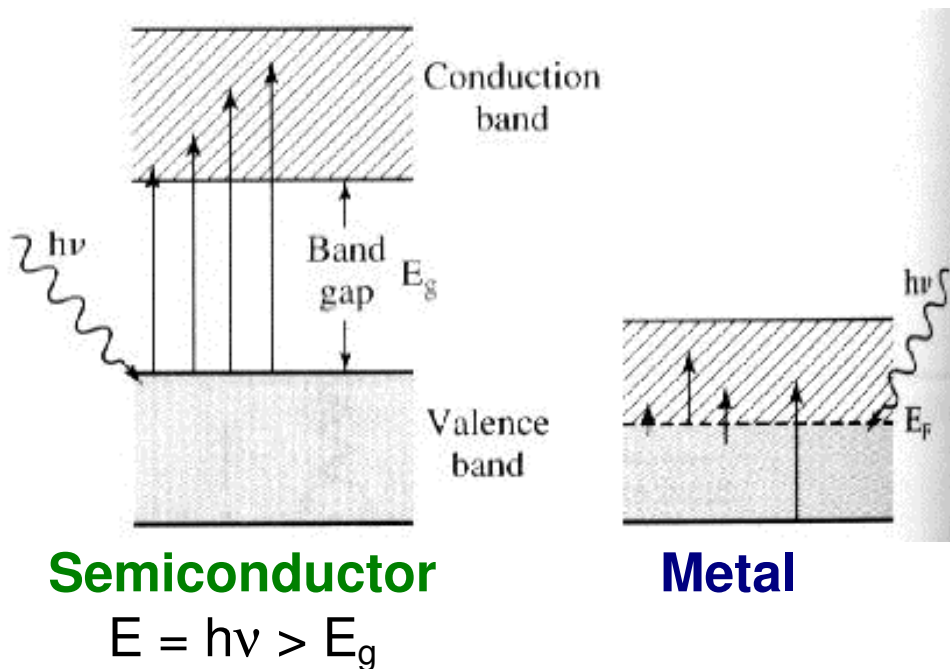
- Usualmente existen más de un ν_o .
- **Resumen:** influencia de la luz en los materiales:
 - **Metales:**
 - Baja ν : electrones libres clásicos
 - Alta ν : e- ligados (osciladores armónicos clásicos)
 - **Aisladores:**
 - Sólo osciladores armónicos.



4.3.1.2 MODELO CUÁNTICO

4.3.1.2.1 ABSORCIÓN DE FOTONES POR ELECTRONES

- Entrega mayor comprensión del fenómeno de absorción.
- Nuevamente la pregunta:
¿qué sucede cuando la luz incide en un sólido?
- Luz de **energía suficientemente alta** incide sobre el sólido.
- e⁻ del sólido absorben la energía de los fotones y son **enviados a niveles de energía ↑**.



- **En semiconductores:**

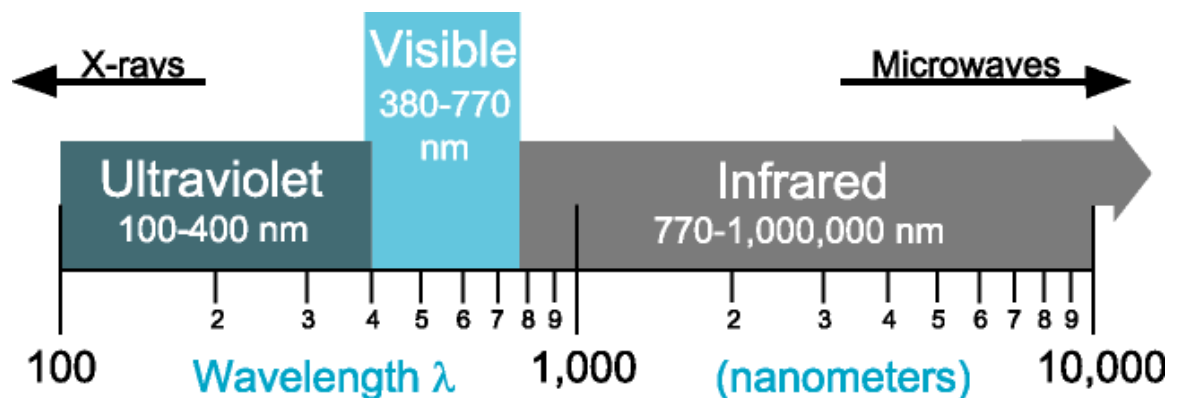
- Proceso se llama **transición interbandas**.

- Si $E_u = h\nu = E_g$: **energía umbral** para la absorción de fotones.

- **Ejemplo 1: Aislador, vidrio silíceo (SiO_2)**

- $E_g = 6,2 \text{ eV} \Leftrightarrow \lambda[\mu\text{m}] = \frac{1,24}{E_g[\text{eV}]} = 0,2 \mu\text{m} \Rightarrow \text{UV}$

- **No absorbe luz en el rango visible** por el proceso de transición interbandas: es transparente a esta radiación.



- **Ejemplo 2: Semiconductor, silicio (Si)**

- $E_g = 1,12 \text{ eV} \Leftrightarrow \lambda[\mu\text{m}] = \frac{1,24}{E_g[\text{eV}]} = 1,11 \mu\text{m} \Rightarrow \text{IR}$

- Comienza a absorber luz en el IR cercano.

- **Es opaco en el rango visible.**

- Puede transmitir en IR lejano ($<1 \text{ eV}$).

- **En metales:**

- Bandas están parcialmente llenas.
- También suceden transiciones interbandas.
- **Además**, sucede proceso de absorción por transiciones intrabandas (equivalentes a comportamiento de e- libres, clásicos).
- Absorben incluso energías muy pequeñas de fotones, *i.e.*,

metales absorben luz en todo el espectro e.m.

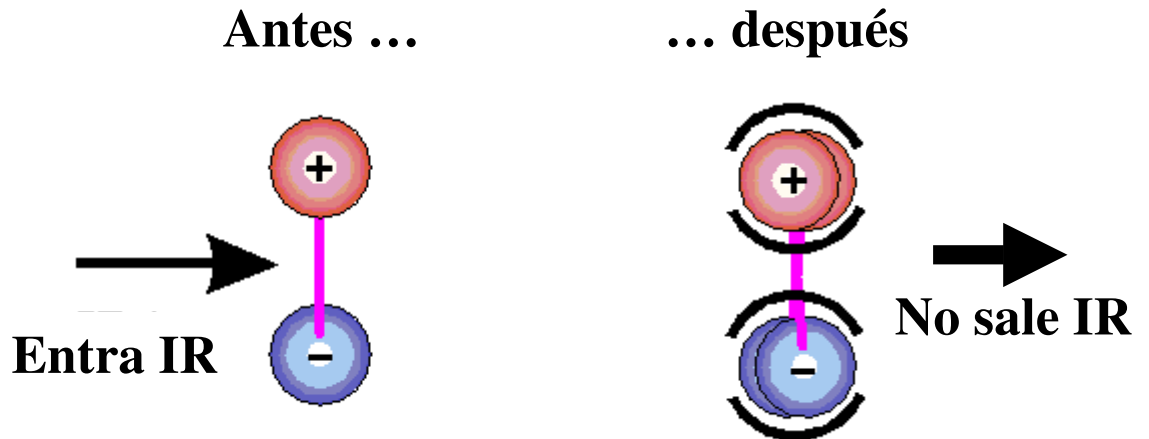


son opacos en el visible, el IR, el UV, etc.

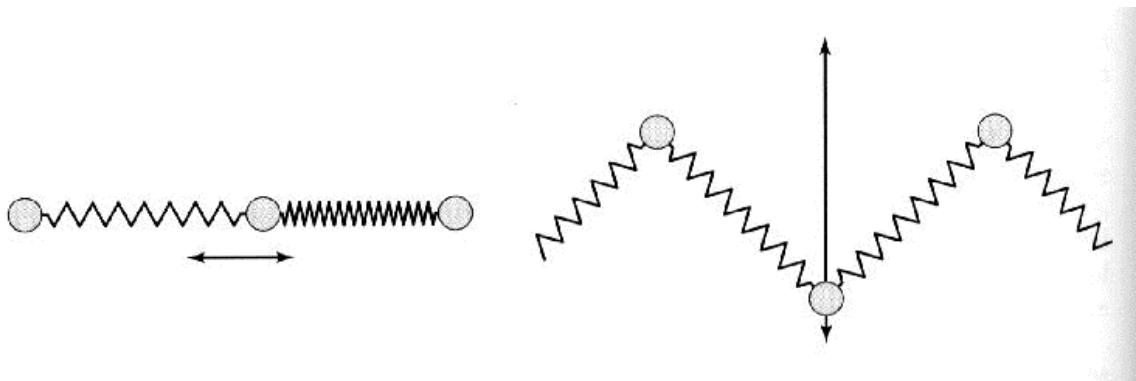
- La MQ **también** predice otro mecanismo de absorción que involucra a las vibraciones cuantizadas de la red: **fonones**.
- Cada vez que sucede una transición (intra (sí) o inter (no siempre)), se dice que se intercambia un fonón con la red, lo que hace que el sólido reciba energía térmica.
- Estas transiciones se llaman transiciones indirectas.
- Su comprensión requiere conocer la estructura de bandas con mayor detalle (aquí no).

4.3.1.2.2 EXCITACIÓN DE FONONES POR FOTONES

- En el IR sucede otro mecanismo de absorción: la luz estimula vibraciones atómicas en la red, i.e. la excitación de fonones por fotones.

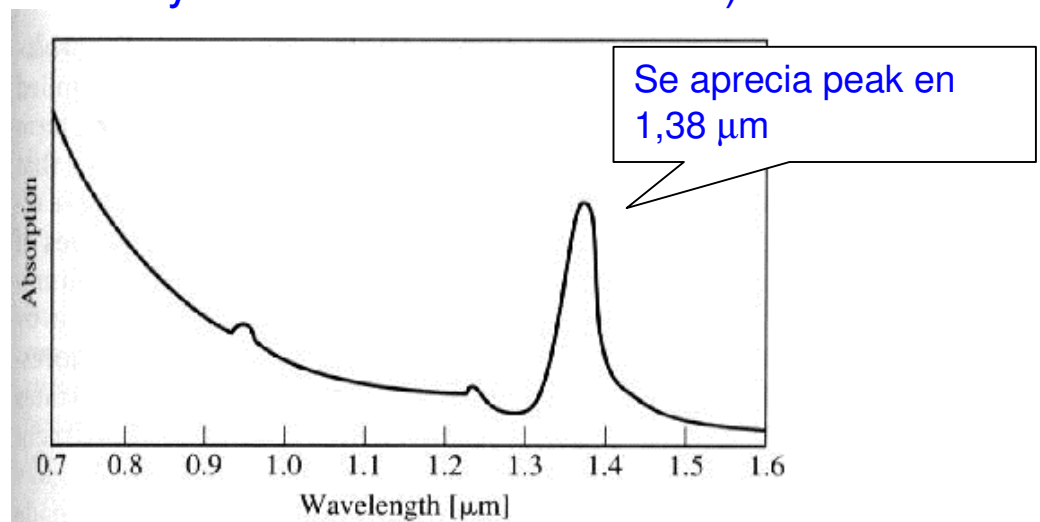


- Se puede pensar que la luz de frecuencia apropiada produce oscilaciones de los átomos *"en torno a sus posiciones de reposo"*.
- Pero**, estas oscilaciones influyen las de sus vecinos más cercanos y viceversa, i.e. no son independientes de lo que hagan sus vecinos.



- Interacción con la luz con los átomos de la red puede modelarse en forma clásica: k (resortes)

- El amortiguamiento de las oscilaciones se debe a las interacciones de fonones con
 - imperfecciones de la red,
 - superficies externas u
 - otros fonones.
- La absorción de luz es intensa a ν de resonancia (ν_0) \Rightarrow se ve absorción en ν_0 .
- **Ejemplos: Vidrios**
 - El vidrio silíceo es transparente entre $0,2 \mu\text{m}$ (UV) y $4,28 \mu\text{m}$ (IR)
(Nota: vidrio de ventana es similar, salvo corte UV en $0,38 \mu\text{m}$)
 - Posee 2 peaks de absorción pronunciados:
 - $1,38 \mu\text{m}$ y $2,8 \mu\text{m}$
 - Nuevos desarrollos de vidrios por la vía sol-gel:
 - Suprimen peaks en $1,38 \mu\text{m}$ y $2,8 \mu\text{m}$
 - Virtualmente transparentes de $0,16 - 4 \mu\text{m}$.
 - Espectro de absorción de vidrio altamente purificado para aplicaciones de fibra óptica (núcleo de fosfosilicato y envoltura de borosilicato):



- Pérdidas de transmisión en vidrios para uso en telecomunicaciones:

Nota:

$$1 \text{ dB} = 10 \log \left(\frac{I}{I_o} \right)$$
$$\frac{I}{I_o} = \exp \left(- \frac{2\omega k}{c} z \right)$$

- Vidrio de ventana: **1000 dB/km**
- Vidrio de alta calidad para fibras ópticas: **100 dB/km**
- 1970 (Corning Glass): **20 dB/km**
- 1982 y hasta hoy (Corning Glass): **0,02 dB/km**