

<p style="text-align: center;">Materiales Opticos. Interacciones de la Luz con la Materia</p>

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

¿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.

¿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.

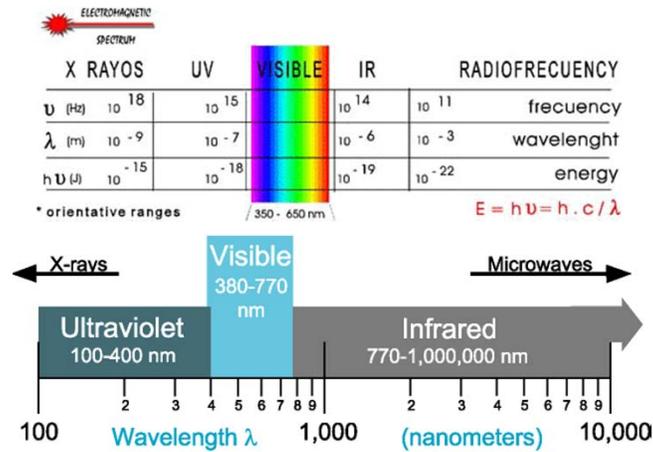


Fig. 1.1 The optical portion of the electromagnetic spectrum

Materiales Ópticos.

Propiedades de la Luz

Introducción

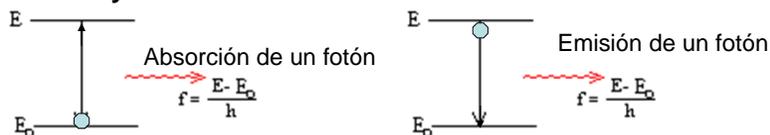
• Las propiedades ópticas de un sólido están determinadas por la forma en que la luz interactúa con éste:

- 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.

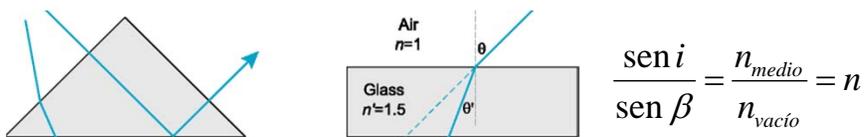


- Normalmente el e- se queda en estado excitado temporalmente y luego se “relaja” y emite el exceso de energía.

Constantes Ópticas

- 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.
- 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



- 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.

- La profundidad de penetración característica W se define como aquella en la cual la intensidad de la luz ha disminuido $\frac{I}{I_o} = \frac{1}{e} = e^{-1} \approx 37\%$

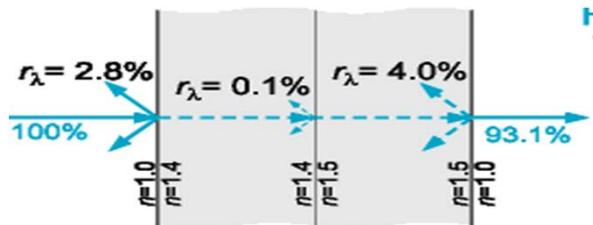
• $W^{-1} \equiv$ absorbanza, α (m^{-1})

- 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 ($\lambda=600$ 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

Constantes Ópticas de Algunos Materiales ($\lambda=600$ nm)

Material	n	k	R (%)
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 ($\lambda=589,3$ 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

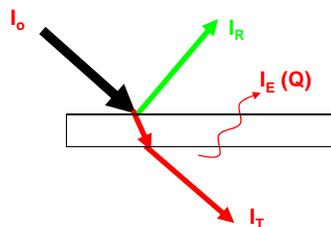
•La razón entre la intensidad transmitida (I_T) y la intensidad incidente (I_o) es la transmisividad:

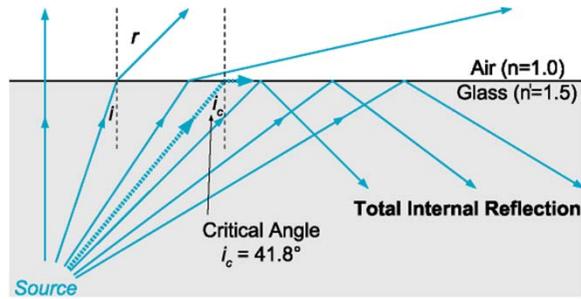
$$T = \frac{I_T}{I_o}$$

•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 azuloso en lentes de cámaras

Materiales Opticos.

La Absorción de Luz

- 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**.

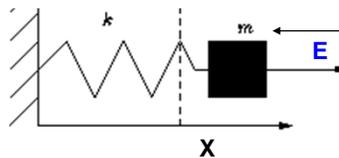
Modelo clásico (electrones libres)

- ¿Qué les pasa en presencia de un campo eléctrico oscilante (e.g., luz)?



- Dipolo se comporta como masa en el extremo de un resorte: existe fuerza restauradora $\propto x$:

$$F = -kX$$



Aplicaciones

• Estos efectos tienen aplicaciones comerciales:

- Interior de tubos catódicos de TV: ZnS genera luz cuando le llegan e- (generados por filamento caliente (rayo catódico)).
- Lámparas fluorescentes: interior de tubo de vidrio está cubierto por tungstanatos o silicatos, los que emiten luz al ser bombardeados con luz UV (generada por descarga de mercurio).

Se distingue entre:

- Emisión espontánea de luz: velas, ampolletas incandescentes, etc.

Propiedades:

Radiación a amplia región angular del espacio.

Normalmente es policromática (más de una frecuencia)

- Incoherente (fase)

Normalmente ocurre cuando los materiales son altamente calentados (emisión térmica): la t° excita los e- de valencia a $>$ energías, desde las cuales regresan.

Láser

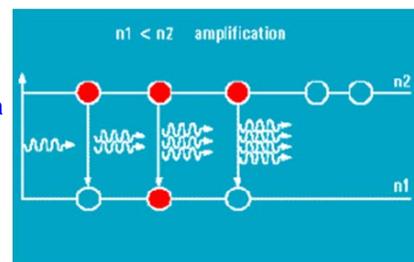
Emisión estimulada de luz

Caso $n_2 > n_1$: inversión de la población de e-

Un e- estimula la caída de otro e- con la misma fase (son coherentes).

Estos 2 e- estimulan la caída de 2 e-, etc.

... **Avalanchaaa...!**



- **En resumen**, la emisión estimulada de luz sucede cuando la radiación incidente fuerza a los e- a entregar más fotones al haz incidente.

LASER: light amplification by stimulated emission of radiation

Amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación.

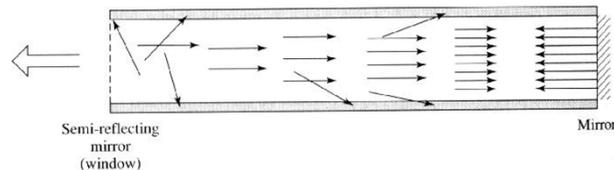
•Propiedades:

Altamente monocromático (transiciones entre 2 niveles energéticos angostos).

Consecuencia: puede enfocarse a punto de $\approx 1 \mu\text{m}$ (**muy colimado**)

Montaje:

- El material que genera el láser está embebido en un contenedor largo y angosto: la cavidad.
- Las caras opuestas de la cavidad deben ser absolutamente paralelas entre sí.
- Una de las caras está plateada (Ag) y sirve de espejo perfecto.
- La otra cara sólo tiene una película delgada de Ag: transmite algo de luz.
- Estos espejos reflejan una y otra vez la luz láser, aumentando el N° de fotones en cada pasada.
- Los e- que sobreviven son los que viajan paralelos a paredes de la cavidad. Los demás, serán absorbidos por las paredes.
- Una fracción escapa por la ventana y constituyen en haz emergente



Bombeo de e- desde el nivel E1 al E2 ($E2 > E1$)

• Un método: bombeo óptico.

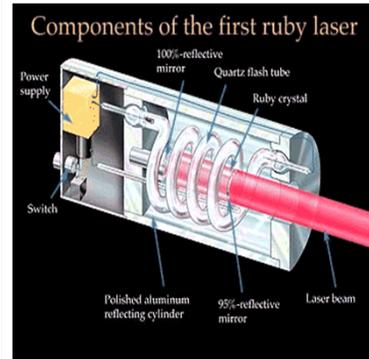
- Absorción de luz proveniente de fuente policromática.
- Lámparas de Xe para láseres pulsados
- Lámparas de tungsteno-yodo para láseres continuos
- Más métodos: colisiones e-gas en una descarga eléctrica, reacciones químicas, reacciones nucleares, inyección externa de un haz de e-.

• Los materiales:

- Cristales: rubí
- Vidrios: vidrio dopado con neodimio
- Gases: He, Ar, Xe
- Vapores metálicos: Cd, Zn, Hg
- Moléculas: CO₂
- Líquidos: solventes con moléculas colorantes

Tipos de láseres y características

Tipo de láser	Longitud de onda (nm)	Divergencia del haz (mrad)	Peak de potencia (W)
Rubí (Al ₂ O ₃ dopado con Cr ³⁺)	694,3	10 5	≈5 (continuo) 10 ⁶ -10 ⁸ (pulsado 1-3 ms)
Neodimio (Vidrio o YAG dopado con Nd ³⁺)	1,064	3-8	≈10 ³ (continuo) ≈10 ⁴ (pulsado 0,1-1 μs)
HeNe	632,8	1	10 ⁻³ -10 ⁻²
CO₂	10600 9600	2	≈10-1,5x10 ⁴ (continuo) ≈10 ⁵ (pulsado 0,1-1 μs)
Semiconductor GaAs GaAlAs	≈870 ≈850	250 500	≈10-30 (pulsado 0,1 μs) ≈0,1-0,4 (continuo)
Colorantes (Colorantes orgánicos en solventes)	350- 1000	3 10	≈0,1 (continuo) ≈10 ⁵ (pulsado 6 ns)



Láseres de semiconductores

- Aplicaciones:
- Impresoras láser y fotocopiadoras
- Medición de distancias (topografía)
- Telecomunicación óptica.

Normalmente no se requiere una película reflectante, ya que el semiconductor ya lo es (R≈35%).

Ventajas: pequeños y eficientes.

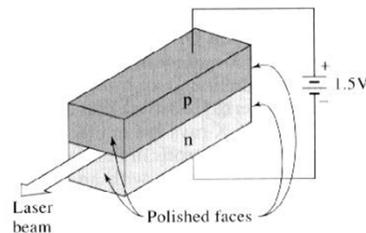
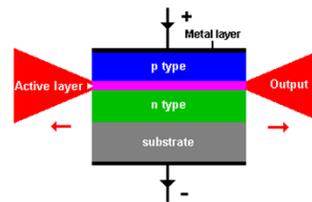
- Eg puede ajustarse con aleaciones ternarias y cuaternarias: 1,3 μm es la frecuencia deseable en telecomunicaciones: mínimo de absorción

La juntura p-n funciona con voltaje hacia delante

⇒ e- de banda de valencia son a BC excitados si E>Eg

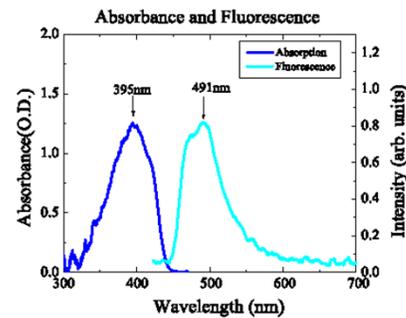
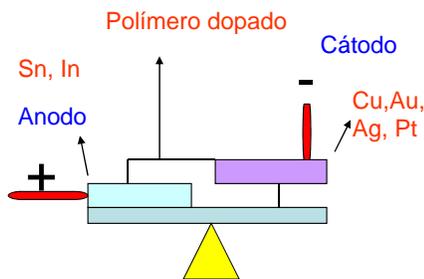
⇒ se observa una inversión de población de e- en la zona de la juntura entre p y n.

La cavidad está constituida por una combinación de semiconductores tipo n y tipo p altamente dopados



LEDs: *Light emitting diodes* (diodos de emisión de luz)

- Fuentes de luz barata, duraderas y pequeñas
- Juntura p-n con voltaje hacia delante.
- No opera en el modo láser: se omiten caras paralelas, etc., durante proceso de fabricación. ⇒ Luz no es coherente ni colimada.
- Se desea que emita en rango visible.



Aplicaciones del láser en procesamiento de materiales

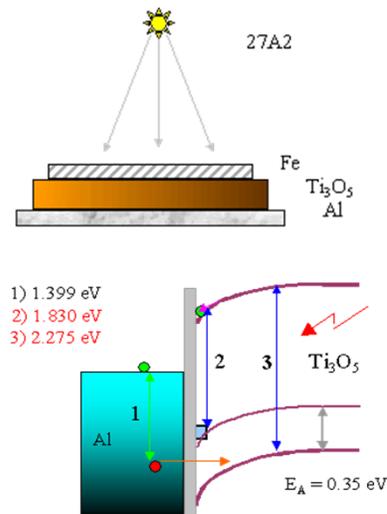
Aplicaciones	Láser	Comentarios
Soldadura	YAG	Láser de potencia alta Usado para: •Perforaciones profundas •Soldaduras de alto rendimiento
Perforación	YAG CWCO ₂	Densidades de potencia peak altas Usado para perforaciones de precisión con: •mínima zona de afectación térmica, •baja conicidad y •máxima profundidad
Corte	YAG CWCO ₂	Corte de precisión de formas 2D y 3D complejas a grandes velocidades en plásticos y cerámicas.
Tratamiento superficial	CWCO ₂	Endurecimiento de superficies aceradas con haz de barrido desenfocado y permitiendo autotemplado.
Trazado	YAG CWCO ₂	Trazado de grandes áreas de cerámicas completamente cocidas.
Fotolitografía	Excimer	Proceso fotolitográfico en la fabricación de circuitos impresos

CELIDAS SOLARES DE PELÍCULA DELGADA EN BASE A OXIDOS SEMICONDUCTORES: Ti_3O_5

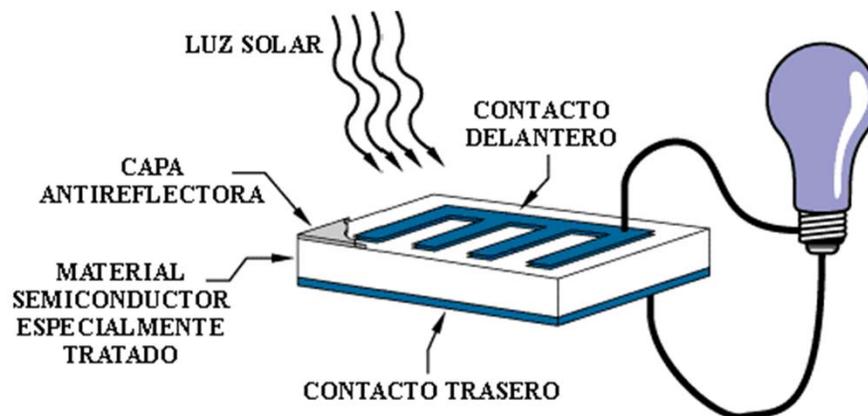
EXPERIMENTO :

Para la elaboración de una película semiconductor de oxido de titanio (Ti_xO_y) se parte de la evaporación de oxido de titanio (TiO_2) granular de grado q.p., obteniéndose películas [5] de un espesor promedio de 1 a 4 nm.

Las mejores uniones fotovoltaicas (Ti_3O_5 / Al), se elaboraron a partir de muestras de (Ti_3O_5) sobre substratos de aluminio, sobre las cuales se evaporó como contacto una película semitransparente (0,1 mm) de hierro (Fe), por donde penetra la luz a la unión (Figura 1).



EN SENCILLO



CELDAS SOLARES EN LA AVENTURA ESPACIAL



CELDA FOTOELÉCTRICA CON COLORANTE

