



TECH pedia



OPTOELECTRÓNICA, FOTÓNICA Y SENSORES

SANTIAGO SILVESTRE

Título: Optoelectrónica, fotónica y sensores
Autor: Santiago Silvestre
Publicado por: České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Dirección de contacto: Technická 2, Praha 6, Czech Republic
Número de teléfono: +420 224352084
Print: (only electronic form)
Número de páginas: 40
Edición: Versión de prueba

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

<http://www.techpedia.eu>



El presente proyecto ha sido financiado con el apoyo de la Comisión Europea.

Esta publicación (comunicación) es responsabilidad exclusiva de su autor. La Comisión no es responsable del uso que pueda hacerse de la información aquí difundida.

NOTAS EXPLICATIVAS



Definición



Interesante



Nota



Ejemplo



Resumen



Ventajas



Desventajas

ANOTACIÓN

Este es un curso de introducción a la optoelectrónica. En los primeros capítulos se introducen los conceptos básicos sobre la transmisión de la luz. Seguidamente, los mecanismos físicos relacionados con dispositivos optoelectrónicos se describen en el capítulo cuatro. Los principales dispositivos optoelectrónicos se presentan en el capítulo cinco. Por último, los capítulos 6 y 7 describen los principios de comunicaciones basadas en fibra óptica y las principales aplicaciones de la optoelectrónica.

OBJETIVOS

Al final del estudio de este curso el alumno será capaz de entender los conceptos básicos de la optoelectrónica, las cuestiones importantes relacionadas con la transmisión de luz e identificar los principales dispositivos y aplicaciones optoelectrónicos.

LITERATURA

- [1] Novikov, M. A. in Ahead of the Time Ch. 1, 7–31 (N. I. Lobachevsky State Univ. of Nizhniy Novgorod Publishing, 2006).
- [2] Hecht, Eugene (2002). Optics. Addison-Wesley. ISBN 0-321-18878-0.
- [3] Clifford R. Pollock. Fundamentals of Optoelectronics. Irwin, 1995. ISBN 0256101043, 9780256101041
- [4] French, A.P., Taylor, E.F. (1978). An Introduction to Quantum Physics, Van Nostrand Reinhold, London, ISBN 0-442-30770-5.
- [5] Kasap S.O. Optoelectronics and Photonics, principles and practices. Pearson 2013. ISBN 978-0-273-77417-4
- [6] DeWerd, L. A.; Moran, P. R. (1978). "Solid-state electrophotography with Al₂O₃". Medical Physics 5 (1): 23–26.
- [7] Buck, John .A. Fundamentals of Optical Fibers, second edition. John Wiley sand Sons, 2004. ISBN 0-471-22191-0.

Indice

1	Introducción a la Optoelectrónica: Historia y fundamentos.....	6
2	Espectro óptico. Refracción, reflexión, atenuación y dispersión	7
2.1	Introducción.....	8
2.2	Espectro Óptico	10
2.3	Refracción, reflexión, atenuación y dispersión	11
3	Transmisión de luz, fuentes y detectores.....	14
3.1	Introducción.....	15
3.2	Fuentes y detectores de luz.....	16
4	Mecanismos Físicos: Absorción, fotoconductividad, emisión de fotones	18
4.1	Absorción de Luz	19
4.2	Fotoconductividad y efecto fotoeléctrico	21
5	Dispositivos optoelectrónicos y Sensores.....	23
5.1	Introducción.....	24
5.2	LEDs.....	26
5.3	LDs, diodos láser	28
5.4	PDs, fotodiodos	30
5.5	Células solares	31
5.6	Amplificadores ópticos.....	32
6	Fibra óptica: Principios de funcionamiento y clasificación; modos de propagación. Cristales fotónicos	34
6.1	Fibra óptica.....	35
7	Aplicaciones: Comunicaciones ópticas, biofotónica, sensores ópticos, iluminación y energía	39
7.1	Aplicaciones optoelectrónicas.....	40

1 Introducción a la Optoelectrónica: Historia y fundamentos

Este capítulo describe algunos aspectos destacados importantes en la historia de la optoelectrónica y también incluye una breve lista de algunas aplicaciones importantes relacionadas con este campo de la física.


$$E=m \cdot c^2$$

La Optoelectrónica es una parte de la fotónica relacionada con el estudio y aplicación de dispositivos electrónicos que interactúan con la luz, sistemas en los que los electrones y los fotones coexisten. Los dispositivos optoelectrónicos operan como transductores eléctrico- ópticos o ópticos-eléctricos.

Algunos aspectos destacados de la historia de la optoelectrónica son los siguientes:

- Primera observación de electroluminiscencia de cristales de SiC en el año 1907 por el capitán Henry Joseph Round (Inglaterra).
- Algunas décadas más tarde, en 1927, Oleg Vladimirovich Losev (Rusia imperial) observó la emisión de luz a partir de óxido de zinc y diodos rectificadores de cristal de carburo de silicio utilizado en receptores de radio cuando eran atravesados por una corriente eléctrica [1].
- En 1961 Ali Javan (Bell Labs) inventó el primer láser de gas de neón o helio. Un año más tarde, Robert Hall inventó el láser de inyección de semiconductores.
- Nick Holonyak (USA) inventó el primer **LED** (*light emission diode*) visible en 1962.
- Primera transmisión utilizando fibras de vidrio inventada por Corning glass e instalada por AT&T en 1983, desde New York a Washington, D. C., a 45 megabits por segundo.

Hoy en día la Optoelectrónica se ha convertido en una nueva tecnología emergente. El mercado de la optoelectrónica está creciendo cada año en todo el mundo, con un crecimiento del 30% anual desde 1992.

La Optoelectrónica permite generar, transportar y manipular datos a muy alta velocidad. Las principales aplicaciones de la optoelectrónica se centran en el campo de las comunicaciones, incluyendo comunicaciones de fibra óptica y sistemas láser.

Sin embargo, las aplicaciones de la optoelectrónica se extienden a nuestra vida cotidiana, incluyendo los campos de la informática, la comunicación, el entretenimiento, los sistemas de información óptica, la educación, el comercio electrónico, la vigilancia del medio ambiente, la salud y el transporte.

Los dispositivos optoelectrónicos también son importantes en aplicaciones de defensa que incluyen el tratamiento de imágenes de infrarrojos, radar, sensores de aviación y armas guiadas ópticamente.

2 Espectro óptico. Refracción, reflexión, atenuación y dispersión

En este capítulo se presentan algunas ecuaciones básicas en la introducción para comprender conceptos importantes relacionados con la optoelectrónica. Después de eso, algunos mecanismos importantes de transmisión de la luz como la refracción, la reflexión, la atenuación y la dispersión se introducen también en este capítulo. Se define también un concepto importante: TIR (reflexión interna total), utilizado en las comunicaciones ópticas.

2.1 Introducción

La luz, como onda electromagnética, se caracteriza por una combinación de variación temporal de \mathbf{E} (*campo eléctrico*) y \mathbf{H} (*campo magnético*) propagándose a través del espacio de acuerdo a las ecuaciones de Maxwell introducidas por James Clerk Maxwell a finales del siglo XIX.

La luz puede ser caracterizada a partir de magnitudes espectrales como la frecuencia, ν ,

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}, \text{ donde } \omega \text{ es la frecuencia angular o pulsación}$$

o la longitud de onda, λ ,

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \text{ siendo } c \text{ la velocidad de la luz en el vacío}$$

$E = m \cdot c^2$

c es una constante física universal y su valor exacto es de 299 792 458 m/s.

Normalmente se usa un valor aproximado de $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

En cualquier otro medio distinto del vacío, la velocidad de fase de luz, ν (la velocidad a la que los picos o la fase de la onda se mueve), depende del índice de refracción, n , del medio del siguiente modo [2] :

$$\nu = \frac{c}{n}, \text{ donde } n \text{ puede definirse mediante la siguiente ecuación:}$$

$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, siendo ϵ_r y μ_r la permitividad eléctrica relativa y la permitividad magnética del medio respectivamente [3]. El índice de refracción es una función de la longitud de onda.

Las relaciones entre electricidad, magnetismo y la velocidad de la luz en un medio se encuentran definidas en la ecuación siguiente:

$$\nu = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

$E = m \cdot c^2$

Dualidad onda-partícula: Cada partícula elemental o entidad cuántica exhibe las propiedades de las partículas y también de las ondas. La radiación electromagnética se propaga siguiendo las ecuaciones de ondas lineales, pero sólo puede ser emitida o absorbida como elementos discretos: **Fotones**, que se comportan simultáneamente como ondas y partículas.

La energía de un fotón, E , es proporcional a su frecuencia ν , y puede calcularse mediante la relación de Planck–Einstein, también conocida como ecuación de Planck [4] :

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

donde h es la constante de Planck, $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Js o $4.1356 \cdot 10^{-15}$ eVs.

La constante: $hc = 1.24$ eV μ m.



El valor de la permitividad relativa de la sílica (dióxido de silicio: SiO₂) es $\epsilon_r = 3.9$, y su permitividad magnética relativa $\mu_r = 0.53$. Calcular el índice de refracción de la sílica.

SOLUCIÓN

El índice de refracción del SiO₂ es: $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = 1.4377$

2.2 Espectro Óptico

El espectro óptico es una pequeña parte del espectro electromagnético. Los ojos humanos pueden detectar luces de longitud de onda en el rango de 400 nm a 700 nm. Esta parte del espectro electromagnético se llama espectro óptico o de la luz visible. La Figura 1 muestra el espectro electromagnético y los colores asociados al espectro óptico.

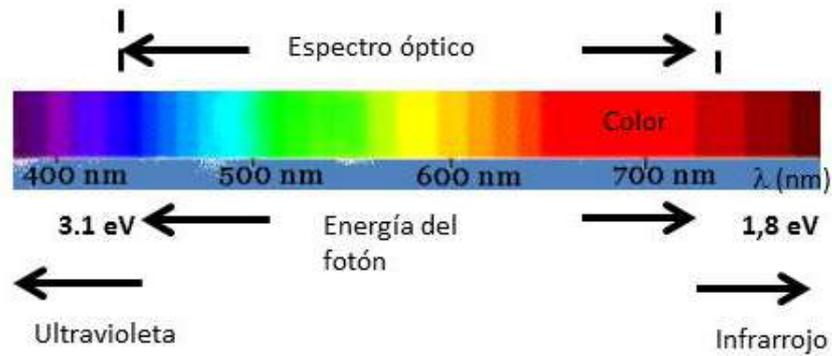


Fig. 1. Espectro óptico.

2.3 Refracción, reflexión, atenuación y dispersión

Cuando la luz llega al plano frontera entre dos medios de comunicación, aparece una luz transmitida en el medio 2 y una luz reflejada en el medio 1. La luz transmitida es la luz refractada. Los ángulos asociados a las direcciones de la luz transmitida, refractada y reflejada se muestran en la figura 2.

El ángulo de incidencia, φ_1 , es igual al ángulo de reflexión φ_3 .

$E=m \cdot c^2$

La Refracción es el cambio de dirección de la luz cuando pasa a un material de índice de refracción diferente, n .

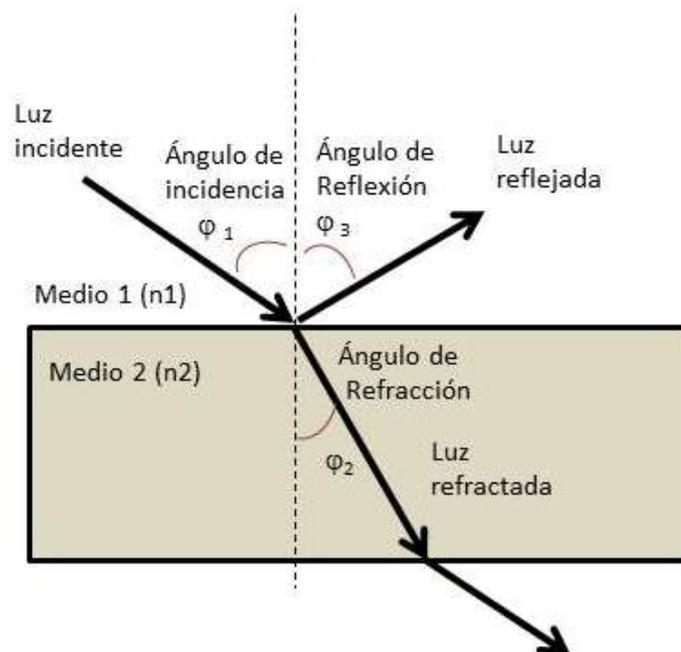


Fig. 2. Angulos de reflexión y refracción.

La ley de Snell nos da la relación entre los senos de los ángulos de reflexión y refracción y de los índices de refracción de los medios:

$$\frac{\sin(\varphi_1)}{\sin(\varphi_2)} = \frac{n_2}{n_1}$$

Para ángulos superiores al ángulo crítico se observa **TIR** (*reflexión interna total*) [5]. El ángulo crítico, φ_{1c} , se da para $\varphi_2 = 90^\circ$.

$$\varphi_{1c} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

En su lugar, toda la luz se verá reflejada de nuevo en el primer medio, un proceso conocido como **TIR**. Este principio se aplica mediante guías de onda tradicionales como fibras ópticas y se muestra en la figura 3.

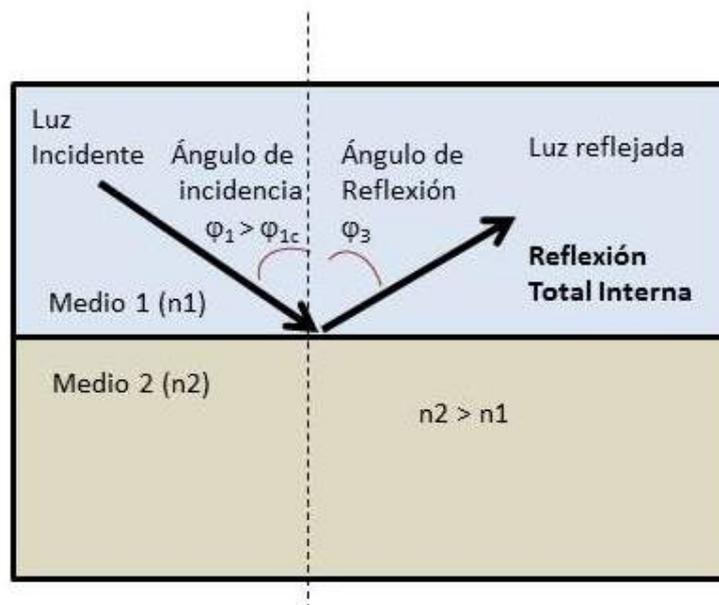


Fig. 3. Efecto TIR.

La luz de diferentes frecuencias se propaga a velocidades diferentes a través del medio. Por otra parte, el índice de refracción depende de la longitud de onda. Debido a estos efectos aparecen algunos efectos de dispersión en el medio.

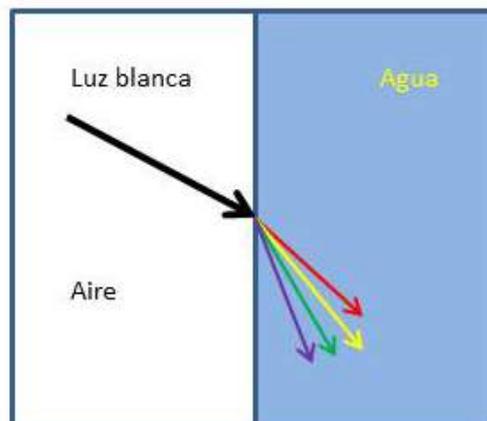


Fig. 4. Efecto de dispersión.

La atenuación es la pérdida de potencia óptica. La atenuación aparece a causa principalmente de la absorción y la dispersión que dan lugar a una pérdida de energía en la dirección de propagación. La atenuación específica: Pérdida de potencia en dB por unidad de longitud, depende de la longitud de onda de la

radiación que viaja a lo largo del medio. El coeficiente de atenuación, α , viene dado por la siguiente ecuación

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P(L)}{P(0)} \right)$$

donde $P(0)$ es la potencia inicial o incidente, $P(L)$ es la potencia a una distancia L del punto inicial.



Considerar un rayo de luz viajando a través de un medio con un índice de refracción $n_1 = 1.44$ que incide en un segundo medio con un índice de refracción $n_2 = 1.4$. La longitud de onda de la luz es de $1.1 \mu\text{m}$.

Calcular el ángulo incidente que provoca el efecto TIR.

SOLUCIÓN

Ley de Snell: $\frac{\sin(\varphi_1)}{\sin(\varphi_2)} = \frac{n_2}{n_1}$

El ángulo crítico, φ_{1c} , aparece para $\varphi_2 = 90^\circ$, entonces

$$\varphi_{1c} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \arcsin \left(\frac{1.4}{1.44} \right) = 76.5^\circ$$

3 Transmisión de luz, fuentes y detectores

En este capítulo, se presentan las principales fuentes de luz y detectores utilizados en sistemas de comunicaciones ópticas. Las comunicaciones ópticas ofrecen ventajas importantes respecto a las comunicaciones convencionales soportadas por cables de cobre. Algunas de estas ventajas se introducen en este capítulo.

3.1 Introducción

Los sistemas de comunicaciones ópticas transmiten información a través de la luz. En comparación con el cobre utilizado en comunicaciones eléctricas, las fibras ópticas tienen un costo menor, pesan menos, tienen menos atenuación y dispersión y proporcionan un mayor ancho de banda. La fibra óptica puede soportar ultra-altas velocidades de datos (terabits por segundo) y puede ser utilizada para transmitir la luz, y por lo tanto la información, a través de largas distancias. Por otra parte, no presenta problemas asociados a **EMC (Compatibilidad electromagnética)** es inmune a las interferencias y la probabilidad de aparición de fuego provocado por el paso de corriente eléctrica en el canal se elimina.

La Figura 5 muestra el diagrama de bloques típico de un sistema de comunicación óptica. La señal eléctrica (información) controla la fuente de la luz; la luz emitida por la fuente está acoplada al canal de transmisión: Fibra óptica, guía de ondas o espacio libre. La luz se transmite a través del canal de transmisión hasta el detector de luz que se acopla con el canal. El detector de luz transforma la luz en señales eléctricas y se recibe la información.



Fig. 5. Diagrama de bloques de un Sistema óptico de comunicaciones.

3.2 Fuentes y detectores de luz

$E=m \cdot c^2$

LED : Light-emitting diode/ Diodo emisor de luz

Las fuentes de luz se utilizan para generar señales de entrada a los sistemas de comunicaciones ópticas. Los sistemas de comunicaciones ópticas a menudo utilizan fuentes ópticas basadas en semiconductores como **LEDs** (*light emitting diodes*) y diodos láser **LDs** (*laser diodes*).

$E=m \cdot c^2$

LASER : Light Amplification by Stimulated Emission and Radiation / Amplificación de luz por emisión y radiación estimulada.

Estos tipos de dispositivos ópticos semiconductores ofrecen una alta eficiencia y fiabilidad. Por otra parte, permiten una cuidadosa selección de la gama de longitud de onda y áreas emisoras compatibles con las dimensiones básicas de fibra óptica. La siguiente tabla resume las características y estructuras de los principales **LEDs** y **LDs** usados en sistemas ópticos de comunicación a través de fibras ópticas.

Fuentes ópticas basadas en semiconductores	Características	Estructuras
LEDs	utilizado en las comunicaciones ópticas, debe tener una alta luminosidad (intensidad de la luz), tiempo de respuesta rápido y alta QE (eficiencia cuántica).	Planar, domo, led de emisión lateral o led de emisión superficial.
LDs	utilizado en las comunicaciones ópticas deben tener luz coherente, ancho de haz estrecho y alta potencia de salida.	Emisión espontánea. Emisión estimulada.

Al final de los sistemas de comunicación ópticos, los sensores ópticos (detectores de luz) se utilizan con el fin de recuperar la información transmitida y convertirla de nuevo en una señal eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico. El papel de un fotodetector es recuperar los datos transmitidos a través del sistema de comunicación de fibra óptica.

$E=m \cdot c^2$

Los Fotodetectores son dispositivos optoelectrónicos que convierten la radiación incidente (luz) en una señal eléctrica, como el voltaje o la corriente.

Los detectores de luz o fotodetectores se basan usualmente en **PDs** (*photodiodes/ fotodiodos*), detectores de fotoconductividad y fototransistores. Los detectores de

fotoconductividad tienen la estructura más simple de esta familia de detectores de luz y pueden obtenerse uniendo dos electrodos metálicos a un material semiconductor. La conductividad del semiconductor aumenta cuando algunos fotones incidentes son absorbidos en el semiconductor. Como resultado, un aumento de la corriente externa aparece cuando se aplica una polarización de tensión a los electrodos. Las células solares son un tipo específico de fotodetectores utilizados en los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica, no en los sistemas de comunicación.



Un fotodiodo es un diodo semiconductor que funciona como fotodetector. Es una estructura p unión PN o p-i-n. Cuando un fotón de energía suficiente incide en el diodo, se excita un electrón creando así un electrón móvil y un hueco con carga positiva.



Los **fototransistores** son **BJTs** (*bipolar junction transistors*) que operan como fotodetectores y ofrecen también una ganancia en corriente eléctrica. Estos dispositivos semiconductores son sensores de luz formados a partir de un transistor convencional con una cubierta transparente.

Detectores ópticos Semiconductores	Características	Ejemplos de estructuras
Fotodiodos	Basados en uniones pn.	Diodos pn or p-i-n. APDs (Fotodiodos de avalancha). Fotodiodos de heterounión.
Uniones Schottky	Uniones formadas por un semiconductor tipo n en contacto con un metal.	Contactos Schottky.
Células solares	Convierten la luz incidente en energía eléctrica.	cSi (Silicio cristalino) aSi:H (silicio amorfo). HiT (heterojunction intrinsic layer thin film solar cell). GaAs
Fototransistores	Transistores sensibles a la luz, amplifican la corriente eléctrica que aparece por variaciones de la luz incidente.	nnp BJTs pnp BJTs
Detectores fotoconductivos	Varían su conductividad debido a la absorción de la luz incidente.	LDR (<i>light-dependent resistor</i>). PbS (lead sulfide) IR (<i>infrared detector/ detector de infrarrojos</i>). Lead selenide (PbSe).

4 Mecanismos Físicos: Absorción, fotoconductividad, emisión de fotones

Los principales mecanismos físicos relacionados con los efectos de la conversión de energía en materiales semiconductores se introducen en este capítulo.

4.1 Absorción de Luz

Cuando la luz se propaga a través de un material hay una conversión de una parte de la energía de los fotones a otras formas de energía (por ejemplo calor). Esta energía perdida es absorbida por el material. Los electrones de los átomos se pueden mover a los estados de mayor energía y pasar de la VB (banda de valencia) a la CB (banda de conducción) por la absorción de la energía de los fotones. Este mecanismo crea pares e^-h^+ (electrón-hueco).

$$E = m \cdot c^2$$

El proceso más importante de la absorción de la luz en un semiconductor es la creación de esos pares e^-h^+ . Cada fotón absorbido causa una transición desde la banda de valencia a la banda de conducción. Un fotón es absorbido por un semiconductor si la energía del fotón es mayor que la banda prohibida del material.

La banda prohibida o gap, E_g , generalmente se refiere a la diferencia de energía, en eV (electrón-voltios) entre la parte superior de la VB y el fondo de la CB en aislantes y semiconductores. La afinidad electrónica de un semiconductor, χ , es la anchura de la CB en eV. La energía de Fermi, E_F , indica los más altos estados de energía ocupados a 0 K. Los estados de energía por encima de E_F están vacíos hasta el nivel de vacío.

$$E_g = E_c - E_v$$

donde E_c y E_v son los niveles de energía correspondientes a la parte superior de la VB y a la parte inferior de la CB. La Fig. 6 muestra el mecanismo de absorción y el diagrama de bandas de energía.

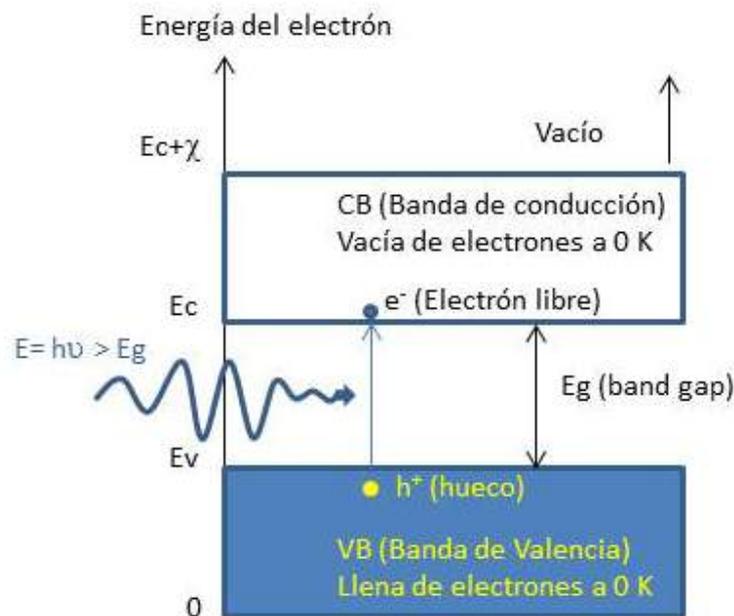


Fig. 6. Mecanismo de absorción y diagrama de bandas de energía.

Propiedades típicas de algunos semiconductores a T = 300 K

Semiconductor	E _g (eV)	χ(eV)
Silicio : Si	1.11	4.05
Arseniuro de Galio :GaAs	1.42	4.07
Germanio: Ge	0.66	4.13
Fosfuro de Indio : InP	1.35	4.5
Fosfuro de Galio : GaP	2.26	3.8

Para cada longitud de onda, λ , del haz incidente de la luz, I_0 , que pasa a través del material, la intensidad del haz de luz, I , es atenuada por la dispersión y los mecanismos de absorción. La ley de Lambert define la transmisión y la absorción de la siguiente forma:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha L}$$

donde α es el coeficiente de absorción; α (m^{-1}) que es función de λ .

4.2 Fotoconductividad y efecto fotoeléctrico

$$E=m \cdot c^2$$

La fotoconductividad es un fenómeno optoelectrónico en el que un material se vuelve más conductor de la electricidad debido a la absorción de la radiación electromagnética tal como la luz.

$$E=m \cdot c^2$$

Efecto fotoeléctrico: Muchos metales emiten electrones cuando la luz incide sobre ellos. En el proceso de fotoemisión, si un electrón dentro de algún material absorbe la energía de un fotón y adquiere más energía que la función de trabajo del material, se emite.

Einstein fue galardonado con el Premio Nobel en 1921 por sus investigaciones sobre el efecto fotoeléctrico. La energía necesaria para arrancar un electrón del material se llama función de trabajo del metal, ϕ .

$$E=m \cdot c^2$$

Emisión de un fotón: Cuando un electrón cae a un nivel de energía inferior y se encuentra con un hueco, se libera energía en forma de un fotón. La longitud de onda de la luz depende de la banda prohibida del material semiconductor. La luz se emite en múltiplos de una determinada unidad de energía mínima. El valor de esa unidad es la energía del fotón.

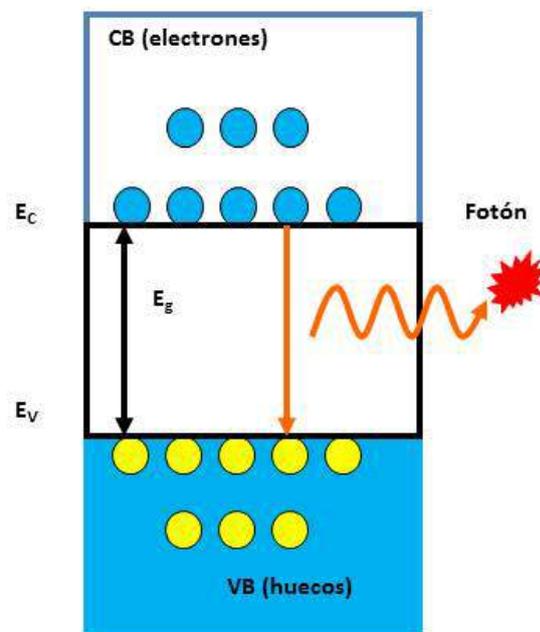


Fig. 7. Emisión de un fotón.



La energía del fotón es: $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$, siendo c la velocidad de la luz en el vacío.

Calcular el rango de longitudes de onda que no son absorbidas por el Germanio: Ge, considerando que el gap del Ge = 0.66 eV.

SOLUCIÓN

La absorción de luz en un semiconductor crea pares $e^- - h^+$ cuando la energía de los fotones incidentes es mayor que la banda prohibida del material, por ejemplo. En el caso del Ge, el valor mínimo de la energía de los fotones para ser absorbidos será la siguiente: $E = h\frac{c}{\lambda} > E_g(\text{Ge}) = 0.66 \text{ eV}$. Por tanto, fotones con longitud de onda:

$\lambda < h\frac{c}{E_g(\text{Ge})}$ no serán absorbidos por el semiconductor.

Considerando $hc = 1.24 \text{ eV}\mu\text{m}$. La longitud de onda mínima de los fotones que generan pares $e^- - h^+$ en el Ge es: $\lambda < 1878 \text{ nm}$.



Todos los efectos físicos que se describen en este capítulo tienen aplicación específica en tecnologías optoelectrónicas, así como en otras ciencias físicas relacionadas.

5 Dispositivos optoelectrónicos y Sensores

Este capítulo describe los principales dispositivos optoelectrónicos y sensores que forman parte de la mayoría de las aplicaciones de la fotónica. Algunos conceptos básicos sobre física de semiconductores también se introducen con el fin de entender las características internas y el comportamiento de estos dispositivos, principalmente la conversión directa entre electrones y fotones.

5.1 Introducción

Los dispositivos optoelectrónicos y sensores de luz se fabrican mediante el uso de materiales semiconductores.

$E = m \cdot c^2$

Un material semiconductor tiene un valor de conductividad eléctrica que se encuentra entre la de un conductor, tal como cobre, y un aislante, como el vidrio.

La conductividad eléctrica de un material semiconductor aumenta al aumentar la temperatura, que es un comportamiento opuesto al de un metal. Hoy en día, el Si (silicio) es el semiconductor más utilizado en aplicaciones electrónicas. Los semiconductores intrínsecos o semiconductores de tipo *i* son semiconductores puros sin ningún tipo de especie dopantes o impureza presente en el material (no dopado). El número de portadores de carga, los electrones y huecos, por lo tanto, está determinado por las propiedades del material en sí. En un semiconductor intrínseco el número de electrones excitados y el número de huecos son iguales:

$n = p = n_i$ (portadores cm^{-3}), el valor de n_i depende del gap del semiconductor, E_g , y varía con la temperatura del siguiente modo:

$$n_i = AT^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

donde T es la temperatura en K, k_B la constante de Boltzmann : $k_B = 8.62 \cdot 10^{-5}$ eV/K y A es una constante.

Los dispositivos semiconductores pueden mostrar una gama de propiedades útiles, tales como el paso de corriente más fácilmente en una dirección que en otra, mostrando resistencia variable, y sensibilidad a la luz o el calor. La introducción de impurezas específicas en estructuras puras cristalinas semiconductoras *i*- (intrínsecas) permite obtener semiconductores extrínsecos: Semiconductores en el que la concentración de un tipo de portador, electrones o huecos, es mucho mayor que la del otro tipo. Cuando la concentración de electrones es mucho mayor que la concentración de huecos el semiconductor se llama de tipo *n*. Por contrario, si la densidad de huecos es mucho mayor que la de los electrones, el semiconductor es un semiconductor de tipo *p*.

Algunos sensores y dispositivos descritos en este capítulo se basan en uniones *p-n*.

$E = m \cdot c^2$

Una unión *p-n* es un límite o interfaz entre dos tipos de material semiconductor, de tipo *p* y de tipo *n*, en el interior de un único cristal semiconductor. Los diodos son dispositivos semiconductores formados por un material semiconductor con una unión *p-n* conectado a dos terminales eléctricos.

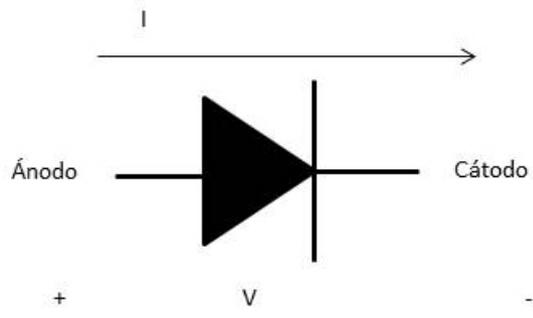


Fig. 8. Símbolo electrónico del diodo.

5.2 LEDs



LEDs (*Light-emitting diodes/diodos emisores de luz*) son diodos semiconductores que emiten luz incoherente de espectro reducido cuando la unión pn está polarizada.

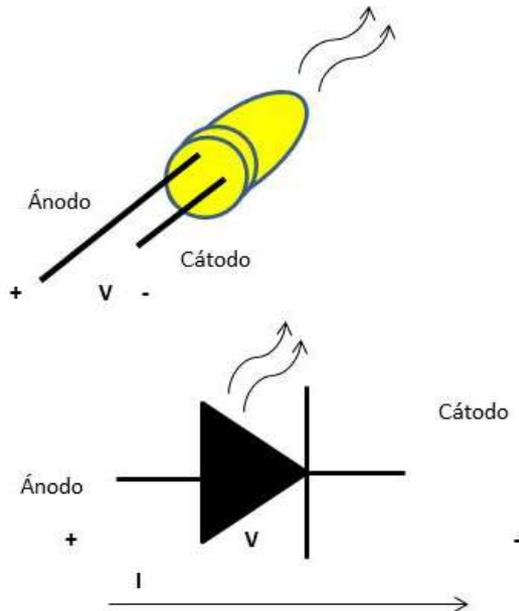


Fig. 9. LED.

La **CB (banda de conducción)**, normalmente vacía, de los semiconductores está poblada por los electrones inyectados en ella por la corriente hacia a través de la unión. Como vimos en el capítulo 4, cuando un electrón se encuentra con un hueco (se recombina), cae a un nivel de energía más bajo, y libera energía en forma de un fotón. Esta emisión de fotones es el mecanismo por el cual la luz es emitida desde los LEDs. Cuando el electrón puede someterse a la transición a un nivel de energía inferior por sí mismo, el proceso de emisión de fotones se llama **emisión espontánea**.

La luz se genera cuando los electrones se recombinan con los huecos y la longitud de onda de la luz depende de la banda prohibida del material semiconductor. La siguiente tabla muestra los colores asociados a las longitudes de onda de la luz emitida por los LEDs fabricados por diferentes materiales semiconductores.

Los leds fabricados con semiconductores que presentan un gap directo emiten más luz que los fabricados a partir de semiconductores de gap indirecto.

Semiconductor	Color	Brillo
GaAs; GaAlAs	Infrarrojo	General (normal)
GaAs; AlGaAs; GaP	Rojo	General (normal)
GaN	Azul	General (normal)
GaP	Verde	General (normal)
GaAlAs; GaAsP; InGaAlP;	Rojo	High (super & ultra)
GaN	Azul	High (super & ultra)
GaP ; InGaN	Verde	High (super & ultra)
InGaAlP; GaAsP	Amarillo	High (super & ultra)

Los LEDs se aplican en muchos campos, tales como pantallas, iluminación de estado sólido, control remoto y sistemas de comunicación óptica. Los LEDs son comúnmente utilizados también en la iluminación general como muchas lámparas LED integradas y luminarias LED. Diferentes paquetes de LED se pueden encontrar en el mercado en función de las aplicaciones. Algunos tipos de lentes se incluyen normalmente en el envasado de LEDs para controlar el ángulo de salida de la luz. Esta es una de las características que normalmente dan los fabricantes en los datasheets, así como la intensidad de luz (mcd), flux (lm), longitud de onda dominante (nm) y el color. Valores específicos (umbrales típicos) de parámetros eléctricos como V_f (*forward voltage*), I_f (*forward current*) también son suministrados por los fabricantes.

La eficiencia energética de un LED, η , se caracteriza en base a la relación de potencia eléctrica a la entrada respecto a la potencia de luz a la salida—o más técnicamente: Flux emitidos (lumens) dividido de la potencia de alimentación (W). Los LEDs comerciales presentan eficiencias entre el 50–70 %.



Fig. 10. LEDs Infrarrojos.

5.3 LDs, diodos láser



Láser: La amplificación de luz por emisión estimulada. La energía de un fotón entrante, $E = h\nu$, estimula el proceso de emisión mediante la inducción de un electrón para pasar a un nivel de energía inferior. Este proceso permite obtener la amplificación de fotones: Un fotón entrante resulta en dos fotones salientes que tienen la misma dirección, longitud de onda y fase.

Los LEDs presentados en el capítulo anterior se basan en el mecanismo de emisión espontánea, mientras que los **LDs** (*diodos laser*) se basan en el principio de emisión estimulada.

A fin de lograr una amplificación de la luz por emisión estimulada, la probabilidad de una emisión de fotones debe ser superior a la de la absorción para el rango espectral de que se trate. Cuando la emisión estimulada es dominante, la luz es amplificada, y se produce efecto láser. La emisión estimulada es el mecanismo dominante cuando la probabilidad de encontrar un electrón en CB es mayor que la probabilidad de encontrar un electrón en la VB. Esto sucede en presencia de una inversión de población. La inversión de población se consigue cuando la diferencia entre la energía de Fermi de los electrones, E_{FN} , y la energía de Fermi de huecos, E_{FP} , es mayor que la banda prohibida, E_g . Con el fin de separar estos niveles de energía de Fermi es necesario **bombear** energía en forma de corriente eléctrica en el semiconductor. Entonces, mediante el bombeo láser, cuando se inyecta una corriente umbral, el semiconductor se desplaza a un estado de inversión de población.

Las cavidades ópticas, como las **FP** (*Fabry-Perot*) o espejos dieléctricos **DBRs** (*distributed Bragg reflectors*), contienen un láser entre dos superficies reflectoras y se usan como resonadores ópticos. En régimen estacionario, hay oscilaciones estacionarias **EM** (*electromagnetic*) en la cavidad óptica. Estas oscilaciones se reflejan en las superficies de la cavidad óptica. La cavidad óptica presenta ejes perpendiculares al flujo de corriente. En cada reflexión, la onda se transmite parcialmente a través de las caras reflectoras. La oscilación láser comienza cuando la cantidad de amplificación se hace igual a la cantidad total perdida a través de los lados del resonador, a lo largo de propagación en el medio y por medio de la absorción por el cristal.

Hay dos tipos principales de LDs: Edge Emitting y LDs de superficie emisora. Los Edge emitting LDs tienen emisiones de mayor anchura y astigmática, mientras que los LDs de superficie emisora presentan un haz más estrecho de emisión. Las **VCSELs** (*vertical cavity surface emitting lasers*) son láseres con una región activa muy corta que presenta el eje de la cavidad óptica a lo largo de la dirección del flujo de corriente.

En estos láseres, la emisión de luz ocurre en una dirección perpendicular a la región activa. Las VCSELs permiten comunicaciones de datos hasta 10 Gbps.



Un **EOM** (*electro-optic modulator*) es un dispositivo que se puede utilizar para controlar la potencia, la fase o la polarización de un rayo láser por medio de una señal de control eléctrica.

Los LDs son el tipo más común de láser y se usan en un amplio rango de aplicaciones. Estos dispositivos son de pequeño tamaño, relativo bajo coste y larga vida, lo que los hace una buena elección para múltiples aplicaciones, que incluyen : Comunicaciones ópticas, lectores de códigos de barras, punteros láser, lectores y grabadores de discos CD/DVD/Blu-ray, escáneres láser e impresoras o fuentes de luz direccional.

5.4 PDs, fotodiodos

$$E = m \cdot c^2$$

Un **fotodiodo** es un dispositivo semiconductor que convierte la luz en corriente eléctrica. La corriente se genera cuando los fotones son absorbidos en el fotodiodo. Se basa en una unión p-n o p-i-n. Cuando un fotón de energía suficiente golpea el diodo, se excita un electrón creando así un electrón móvil y un agujero de electrones con carga positiva.

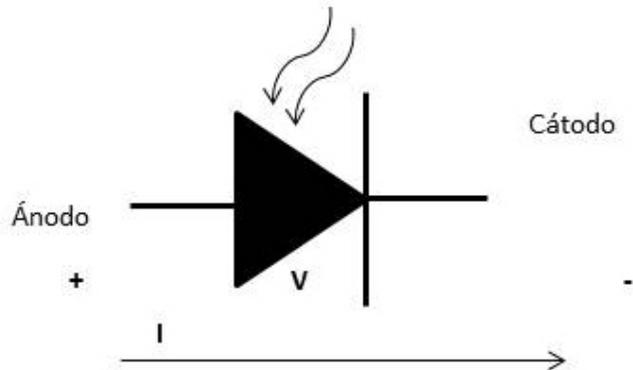


Fig. 11. Fotodiodo.

5.5 Células solares



Una célula solar es un dispositivo **PV** (*photovoltaic/ fotovoltaico*) que convierte la luz que recibe en energía eléctrica.

Las células solares basadas en semiconductores pueden ser uniones p-n individuales, heterouniones o múltiples uniones.

Los principales semiconductores utilizados en la fabricación de células solares son Si y GaAs.

La eficiencia de la célula solar se da como la relación entre la máxima energía eléctrica a la salida respecto a la potencia total de la luz incidente.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{G A}$$

donde V_m e I_m son las coordenadas del **MPP** (*maximum power point/ punto de máxima potencia*) a la salida del dispositivo, G es la irradiancia (W/m^2) y A es el área activa del dispositivo.

Las células solares basadas en Si cristalino han alcanzado eficiencias de hasta el 25% y las células solares multiunión que trabajan bajo luz concentrada presentan eficiencias actuales de hasta un 43,5%.

La eficiencia de la célula solar, así como los principales parámetros del dispositivo son dados por los fabricantes en condiciones **STC** (*standard conditions of work*): espectro AM1.5, $G = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ y $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Las células solares están conectadas en serie para formar cadenas en módulos fotovoltaicos. Un módulo fotovoltaico consiste en una o más cadenas de células conectadas en paralelo.

5.6 Amplificadores ópticos

Con el fin de transmitir señales a largas distancias (> 100 km) es necesario compensar las pérdidas de atenuación dentro de la fibra óptica (canal de transmisión óptico). Este es el objetivo de los amplificadores ópticos.

Las pérdidas típicas en la fibra óptica de 1,5 micras están en el intervalo de 0,2 dB / km. Es posible convertir la señal óptica en señal eléctrica y el uso de amplificadores electrónicos convencionales para compensar las pérdidas de transmisión y luego convertir de nuevo la señal a óptica. Sin embargo, estas conversiones de señal requieren elementos electrónicos de velocidad costosos.

$E=mc^2$

Un **amplificador óptico** amplifica una señal óptica directamente, sin la necesidad de convertirla antes en una señal eléctrica.

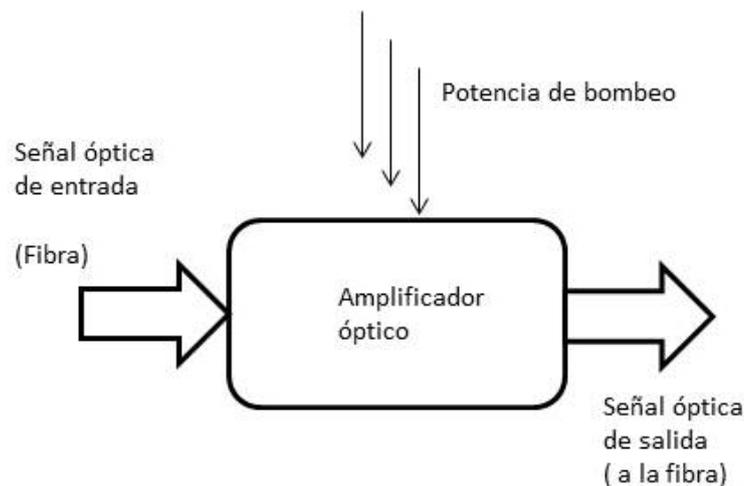


Fig. 12. Esquema de amplificador óptico.

Las principales características de los amplificadores ópticos son: Ganancia (dB), el rango de frecuencias de funcionamiento o **BW** (*bandwidth/ ancho de banda*), saturación de ganancia: Máxima potencia de salida, y nivel de ruido de salida. La ganancia se define en la siguiente ecuación

$G = \frac{P_o}{P_i}$, donde P_o y P_i son las potencias de salida y entrada respectivamente.

Hay tres tipos principales de amplificadores ópticos: Los **EDFAs** (*erbium-doped fibre amplifiers*), los **SOAs** (*semiconductor optical amplifiers*), y los amplificadores de fibra Raman. En los EDFAs el medio de amplificación es un cristal de fibra óptica dopado con iones de erbio que son bombeados ópticamente a un estado de inversión de población con una entrada óptica separada. Los SOAs se bombean con corriente eléctrica y el medio de ganancia está formado por

semiconductores intrínsecos. Estos amplificadores ópticos son muy usados en redes locales debido a su relativo bajo coste y suficiente ganancia para distancias cortas.

En los amplificadores Raman, la amplificación se basa en **SRS estimulado (dispersión estimulada Raman)**. La dispersión Raman es un proceso en el que la luz es dispersada por las moléculas de una longitud de onda inferior a una longitud de onda mayor.

Algunos tipos de amplificadores ópticos	Características	Desventajas
SOAs 400 – 2000 nm	Similares a las cavidades láser (láseres semiconductores). Gran BW y buena ganancia	Elevada figura de ruido y niveles de cross-talk.
Rare earth doped fibre amplifiers erbium – EDFA 1500 nm Praseodymium – PDFA 1300 nm	Amplificación principalmente a través del proceso de emisión estimulada. La ganancia depende tanto de la frecuencia como de la intensidad del haz local	Relativo gran tamaño Efectos de Cross-talk y saturación de ganancia. Emisión espontánea de ruido
Amplificadores Raman y Brillouin	No requieren inversión de población.	Las señales de bombeo y amplificadas son de longitud de onda distinta. Alto coste

6 Fibra óptica: Principios de funcionamiento y clasificación; modos de propagación. Cristales fotónicos

La fibra óptica es hoy en día el canal de comunicación más utilizado en las comunicaciones ópticas. Las principales características de las fibras ópticas se introducen en este capítulo para comprender sus características y ventajas respecto a los canales de comunicación más convencionales utilizados en comunicaciones de datos en aplicaciones que van desde las grandes infraestructuras de red troncal de telecomunicaciones para sistemas Ethernet, la distribución de banda ancha y las redes de datos de alta calidad.

6.1 Fibra óptica

$$E=m \cdot c^2$$

La fibra óptica es una fibra flexible, transparente hecha de vidrio (sílice) o de plástico, ligeramente más grueso que un cabello humano. Las fibras ópticas se utilizan más a menudo como un medio para transmitir la luz y son de amplio uso en las telecomunicaciones.

Las fibras ópticas se utilizan como canales ópticos de comunicación debido a su alto BW, velocidades de datos de Gbps, y su capacidad de transmisión. Miles de canales se pueden multiplexar en una fibra. Por otra parte, las fibras ópticas tienen muy baja atenuación, alrededor de 0,2 dB / km, y relativo bajo coste. Todas estas características resultan de gran interés para las comunicaciones a través de grandes distancias.

El centro de cristal fino de la fibra en el que viaja la luz se llama el núcleo. El material óptico exterior que rodea el núcleo que refleja la luz de nuevo en el núcleo se llama el revestimiento. Un revestimiento exterior o chaqueta protege la superficie óptica.

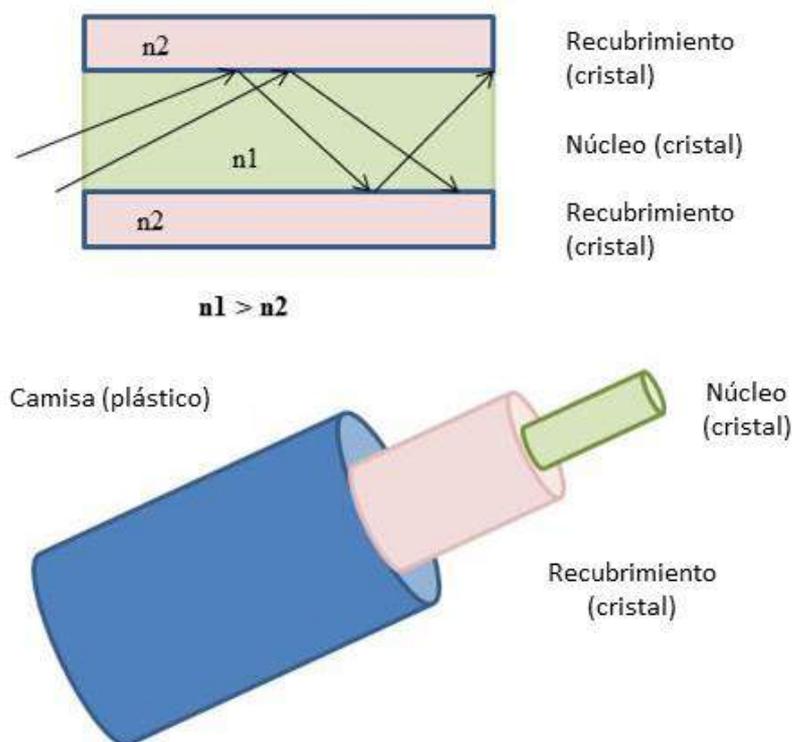


Fig. 13. Fibra óptica.

Una fibra óptica tiene una región central, principal o *core*, de mayor índice de refracción n_1 que el de la región del revestimiento circundante, que tiene un índice de refracción n_2 . Si la luz incide en la interfaz en cualquier ángulo mayor que el

ángulo crítico, φ_{1c} definido en la sección 2.3, no va a pasar a través del segundo medio y se refleja de nuevo en el núcleo debido al proceso de TIR.



Una fibra óptica tiene un núcleo de puro Si con índices de refracción: $n = 5.57$ para longitudes de onda de $0.4 \mu\text{m}$ y $n = 3.78$ para longitudes de onda de $0.7 \mu\text{m}$.

Calcular los tiempos necesarios para luces de ambas longitudes de onda para viajar a lo largo de 2 km que la fibra óptica.

SOLUCIÓN

La velocidad de la luz de diferentes longitudes de onda en el núcleo será diferente debido a los diferentes valores del índice de refracción en las longitudes de onda dadas. Este valor está dado por: $v = \frac{c}{n}$.

Primero debemos calcular las velocidades en cada una de las longitudes de onda:

$$v_1(\lambda = 0.4 \mu\text{m}) = \frac{c}{n(0.4 \mu\text{m})} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{5.57} = 5.39 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_2(\lambda = 0.7 \mu\text{m}) = \frac{c}{n(0.7 \mu\text{m})} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{3.78} = 7.94 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$$

Entonces podemos calcular el tiempo necesario para viajar 2 km , como sigue:

$$t_1 = \frac{x}{v} = \frac{2000}{5.39 \cdot 10^7} \text{ s} = 37.1 \mu\text{s}$$

$$t_2 = \frac{x}{v} = \frac{2000}{7.94 \cdot 10^7} \text{ s} = 25.2 \mu\text{s}$$

Las fibras multimodo son fibras que pueden llevar más de un modo de una longitud de onda de luz específica. Algunas fibras tienen un núcleo de muy pequeño diámetro y soportan un solo modo, las fibras monomodo, donde la luz viaja como una línea recta en el centro del núcleo. Para obtener una onda que se propaga a lo largo de una guía es necesario tener una interferencia constructiva. Todos los rayos interfieren entre sí. Sólo se permiten ciertos ángulos. Cada ángulo permitido representa un modo de propagación.

El ángulo máximo de aceptación de la fibra define un cono para la luz entrante en la fibra que se propagará en distintos modos de propagación. La mitad del ángulo definido por dicho cono es el ángulo de aceptación, φ_{max} , determinado sólo por los índices de refracción. La **NA** (*apertura numérica*) de la fibra viene definida por la ecuación siguiente:

$$NA = n \cdot \sin(\varphi_{\text{max}}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

donde n es el índice de refracción del medio en que la luz viaja antes de entrar en la fibra óptica.

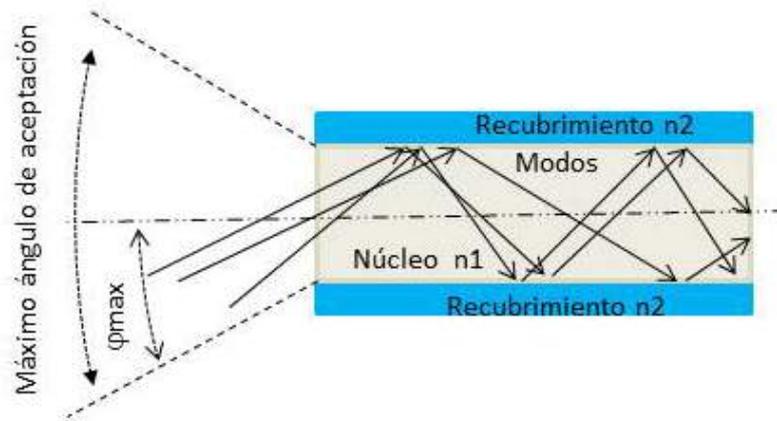


Fig. 14. Modos de propagación y ángulo de aceptación.



El **número de modos de propagación, M** , depende de los parámetros de la fibra del modo siguiente:

$M = \frac{V^2}{2}$, siendo V el número V o frecuencia normalizada, definido por la ecuación siguiente:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \text{ donde } 2a \text{ es el espesor del core.}$$

cuando $V < 2.495$ hay un solo modo de propagación en la fibra, el modo fundamental (fibra de modo único o monomodal). Para valores de $V > 2.495$ la fibra es multimodo.

Las pérdidas de transmisión principales en la fibra están relacionadas con mecanismos de absorción y dispersión. La dispersión de Rayleigh debida a irregularidades microscópicas en la fibra es una fuente intrínseca de pérdidas. La absorción se debe a la presencia de impurezas en el material de la fibra. En fibras ópticas fabricadas a partir de sílice (SiO_2) hay tres picos principales de atenuación debidos a la absorción causadas por iones OH^- en longitudes de onda de 1.050 nm, 1.250 nm y 1.380 nm.

Una segunda fuente de pérdidas o atenuación es la flexión de la fibra. Parte de la radiación se pierde en la región en la que la fibra está doblada. La cantidad de pérdidas depende de la curvatura de la flexión. Si el radio de curvatura de la flexión es similar al diámetro de la fibra incluyendo el revestimiento, D , estamos en presencia de micro flexiones, mientras que la flexión con un radio de curvatura mayor que D es llamado un macro curvaturas. Típicamente, la macroflexión se produce cuando la fibra se dobla durante la instalación de un enlace de fibra óptica, como al pasar la fibra alrededor de una esquina, mientras que los efectos de micro flexión se deben a defectos de fabricación que pueden resultar en variaciones en la geometría de la fibra sobre pequeñas distancias.

Tipos de fibras ópticas	Características
Plásticas	Pérdidas alrededor de 10^2 dB/km Muy flexibles, baratas, ligeras.
Otras fibras cristalinas	Materiales : Chalcogenide, fluoroaluminato Usada en comunicaciones de longitudes de onda largas.
Sílica (SiO ₂)	Puede ser extremadamente puro y luego dopado para obtener la concentración deseada de portadores. Bajas pérdidas y dispersion a $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

Podemos acoplar dos fibras si son de tipos compatibles. Las fibras deben estar alineadas con precisión entre sí, con NA compatibles, y los extremos de la fibra deben ser unidos adecuadamente.

Compación entre fibras ópticas y cables coaxiales o bifilares.

Ventajas	Inconvenientes
No les afectan las interferencias electromagnéticas	Alto coste inicial de instalación
Menor atenuación que en coaxiales o cables bifilares. Pueden usarse emisores de menor potencia	Sistemas de comunicación punto a punto
No son necesarias protecciones de masa o de sobretensión	La unión de fibras y los empalmes no son fáciles. Es difícil añadir nodos adicionales
Alta seguridad de la señal. No hay efectos de radiación que puedan detectarse por antenas	Más frágiles que un cable coaxial
Gran ancho de banda	Más caras de reparar y mantener



Los Cristales fotónicos son estructuras periódicas artificiales de múltiples dimensiones con un período del orden de longitudes de onda ópticas. Estos materiales están estructurados para tener una modulación periódica del índice de refracción.

Es posible fabricar fibras ópticas mediante el uso de cristales fotónicos. En estas fibras, tanto el núcleo como el revestimiento utilizan el mismo material, por lo general sílice. Una de las regiones de la fibra, el núcleo o el revestimiento, presenta agujeros de aire, mientras que la otra región es totalmente sólida. La presencia de los agujeros de aire en una región, por ejemplo en el revestimiento, da como resultado un índice de refracción efectivo que es menor que la región del núcleo sólido.

Por otra parte, es posible suprimir la emisión espontánea mediante el uso de cristales fotónicos.

7 **Aplicaciones: Comunicaciones ópticas, biofotónica, sensores ópticos, iluminación y energía**

En este capítulo se muestra una lista de las principales aplicaciones de la optoelectónica. Sin embargo, nuevas aplicaciones aparecen en el mercado cada año. Como resultado, el mercado optoelectrónico está creciendo cada año un 30% desde 1992.

7.1 Aplicaciones optoelectrónicas

Las principales aplicaciones de la optoelectrónica se detallan en la siguiente tabla.

Aplicaciones de la optoelectrónica.

Aplicación	Características
<p>Comunicaciones de fibra óptica</p> <ul style="list-style-type: none"> • Telecomunicaciones • Redes de Computadores • TV por cable 	<p>La fibra óptica se utiliza como un canal de transmisión de información, debido a sus características intrínsecas: Bajo coste y poco peso, baja atenuación y dispersión, y gran ancho de banda.</p> <p>Otros dispositivos optoelectrónicos como LD, fotodetectores, sensores, amplificadores ópticos, moduladores ópticos y demoduladores, multiplexores y demultiplexores forman parte de los sistemas de comunicación óptica.</p> <p>La transmisión óptica de datos también se utiliza en equipos de control y automatización industrial</p>
<p>Productos electrónicos de consumo</p>	<p>Un gran conjunto de productos electrónicos de consumo en el mercado incluyen dispositivos optoelectrónicos como fotodetectores, leds, sensores CCD, fotodiodos, fototransistores, etc.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Computadoras, impresoras y proyectores • Lectores de CD , DVD, BluRay • Imágenes térmicas • Cámaras y Displays • Teléfonos inteligentes • Chips de memoria
<p>LDs, Diodos Láser</p>	<p>Principales aplicaciones de LDs en el campo de las telecomunicaciones a través de fibras ópticas como emisores de luz. Sin embargo, otras aplicaciones de LDs son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cortadoras industriales, medicina (cirugía). • Lectores y grabadores de CD, DVD, BluRay • Almacenamiento óptico de datos. • Defensa : Radar, armas guiadas por láser
<p>Iluminación, leds.</p>	<p>Los leds se usan en aplicaciones de iluminación diversas como :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Residenciales. Edificios • Señales de tráfico, iluminación de calles. • Exteriores: Indicadores en aeropuertos. • Relojes digitales. Indicadores electrónicos.
<p>Células solares</p>	<p>Sistemas fotovoltaicos (PV)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones de baja potencia: Calculadoras de bolsillo, relojes, iluminación. • Sistemas fotovoltaicos autónomos. • Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. • Aplicaciones aeroespaciales.