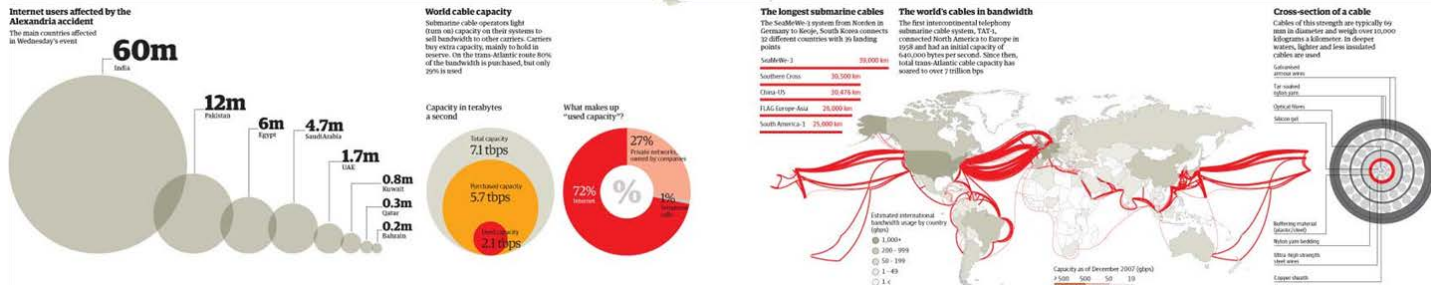
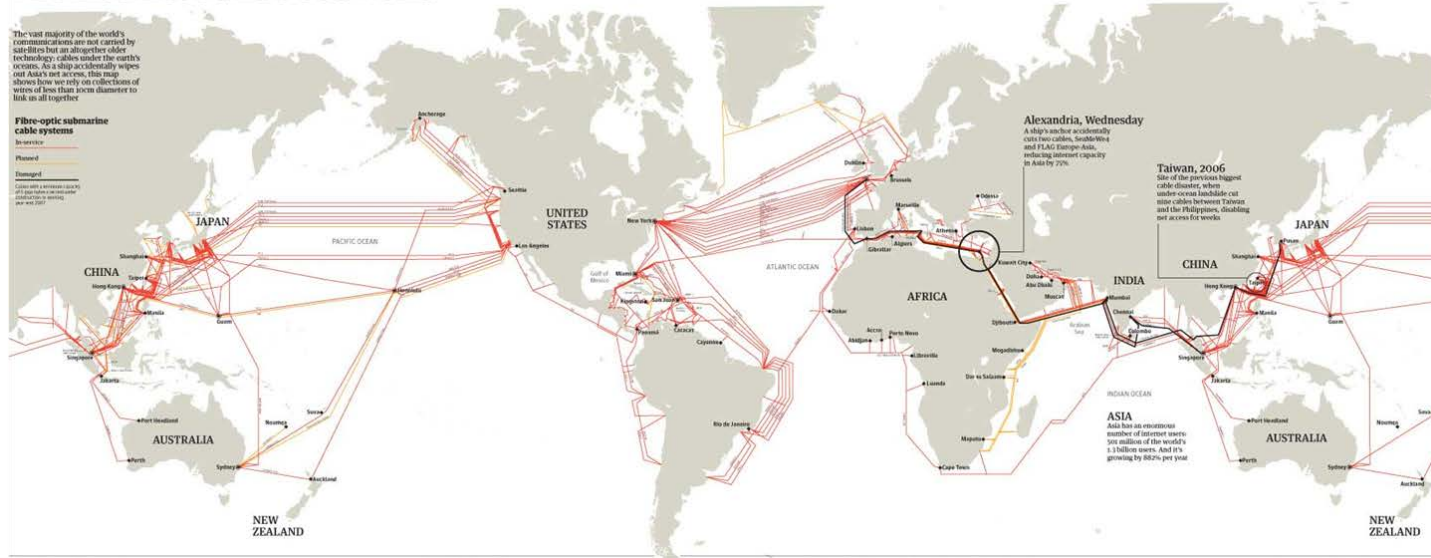


El láser de semiconductor. Comunicaciones ópticas

The internet's undersea world



Angel Valle (IFCA)

Indice

1.- El láser de semiconductor:

- 1.1 Amplificadores de semiconductor
- 1.2 Espejos
- 1.3 El láser y su respuesta temporal
- 1.4 Tipos de láseres de semiconductor

2.- Comunicaciones ópticas

- 2.1 La fibra óptica
- 2.2 Modulación analógica y digital
- 2.3 Funcionamiento del sistema de comunicaciones ópticas: diagrama de ojo y tasa de error (BER)

1.- El láser de semiconductor

LASER =

medio activo bombeado + espejos

(amplificador de semiconductor)

(resonador óptico)

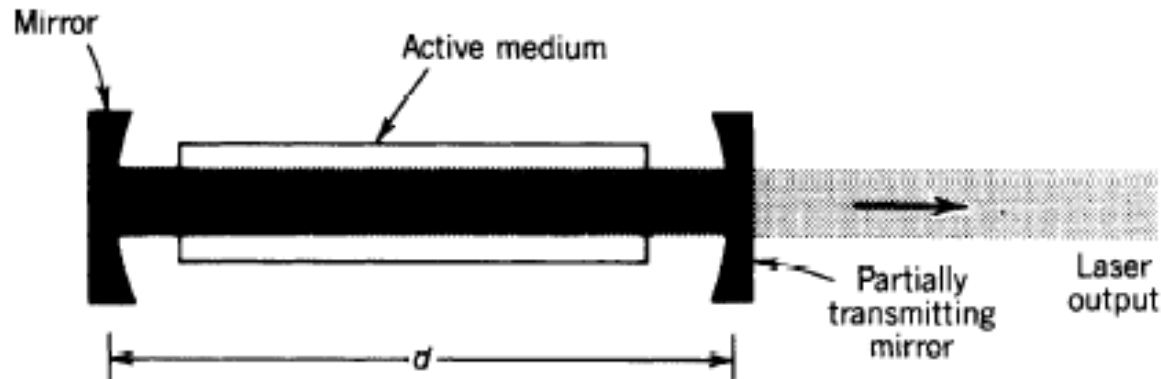


Figure 14.0-3 A laser consists of an optical amplifier (employing an active medium) placed within an optical resonator. The output is extracted through a partially transmitting mirror.

SEMICONDUCTORES

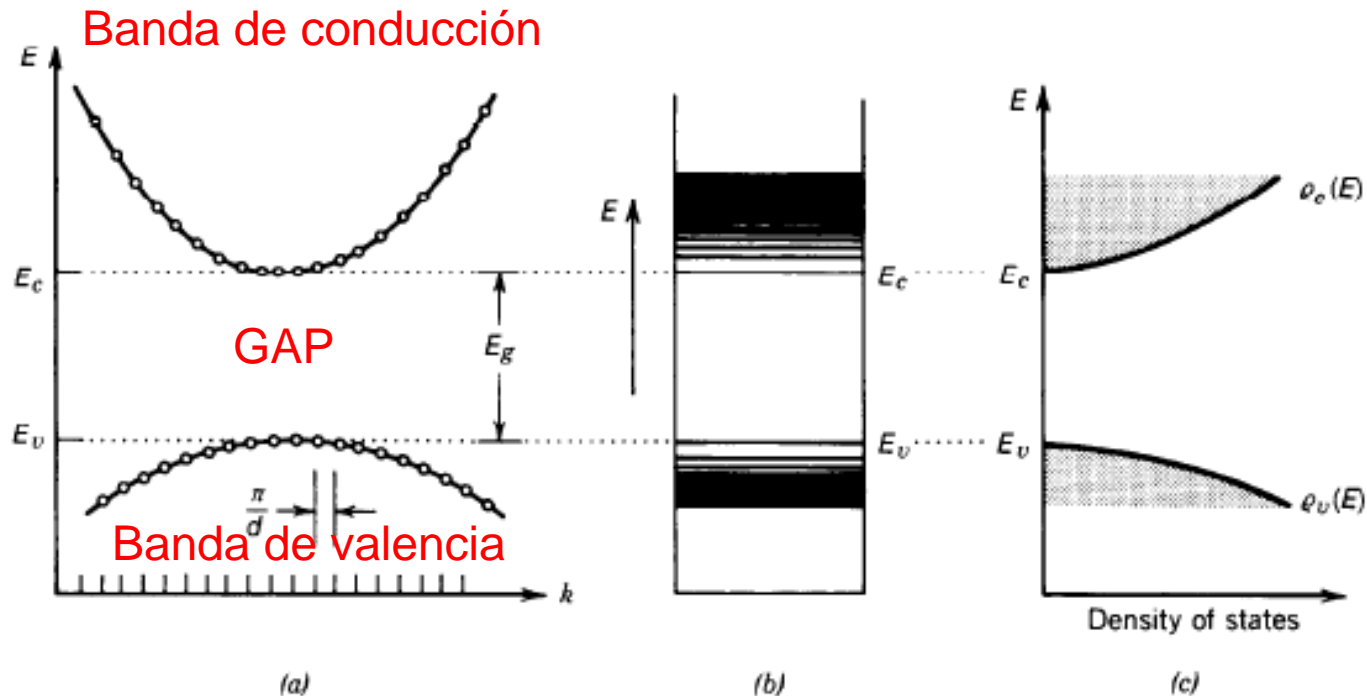


Figure 15.1-7 (a) Cross section of the $E-k$ diagram (e.g., in the direction of the k_1 component with k_2 and k_3 fixed). (b) Allowed energy levels (at all k). (c) Density of states near the edges of the conduction and valence bands. $\rho_c(E) dE$ is the number of quantum states of energy between E and $E + dE$, per unit volume, in the conduction band. $\rho_v(E)$ has an analogous interpretation for the valence band.

En los semiconductores la energía del gap da aprox. la frec. de emisión: $h\nu \sim E_g$

Interacción radiación-materia en semiconductores

Absorción, emisión espontánea y emisión estimulada ocurren entre los niveles de energía, E_2 , en la banda de conducción, y E_1 , en la banda de valencia.

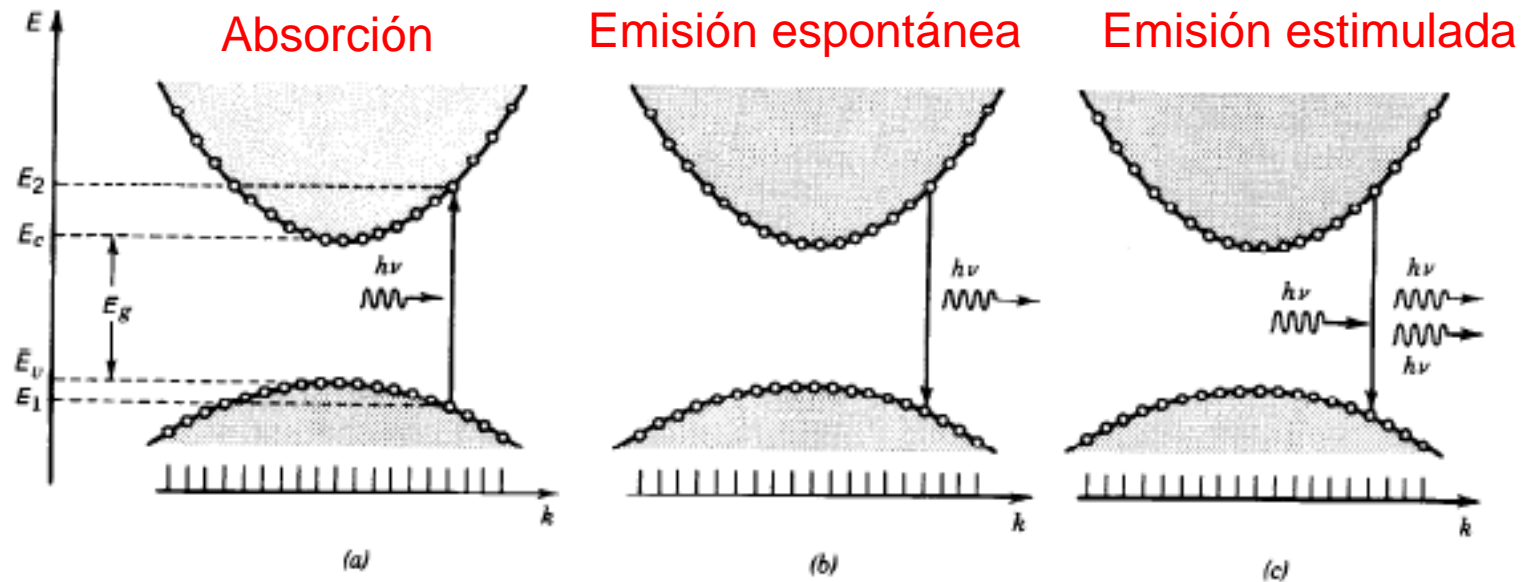


Figure 15.2-5 (a) The absorption of a photon results in the generation of an electron-hole pair. This process is used in the photodetection of light. (b) The recombination of an electron-hole pair results in the spontaneous emission of a photon. Light-emitting diodes (LEDs) operate on this basis. (c) Electron-hole recombination can be stimulated by a photon. The result is the induced emission of an identical photon. This is the underlying process responsible for the operation of semiconductor injection lasers.

TABLE 15.1-3 Selected Elemental and III-V Binary Semiconductors and Their Bandgap Energies E_g at $T = 300$ K, Bandgap Wavelengths $\lambda_g = hc_0 / E_g$, and Type of Gap (I = Indirect, D = Direct)

Material	Bandgap Energy E_g (eV)	Bandgap Wavelength λ_g (μm)	Type
Ge	0.66	1.88	I
Si	1.11	1.15	I
AlP	2.45	0.52	I
AlAs	2.16	0.57	I
AlSb	1.58	0.75	I
GaP	2.26	0.55	I
GaAs	1.42	0.87	D
GaSb	0.73	1.70	D
InP	1.35	0.92	D
InAs	0.36	3.5	D
InSb	0.17	7.3	D

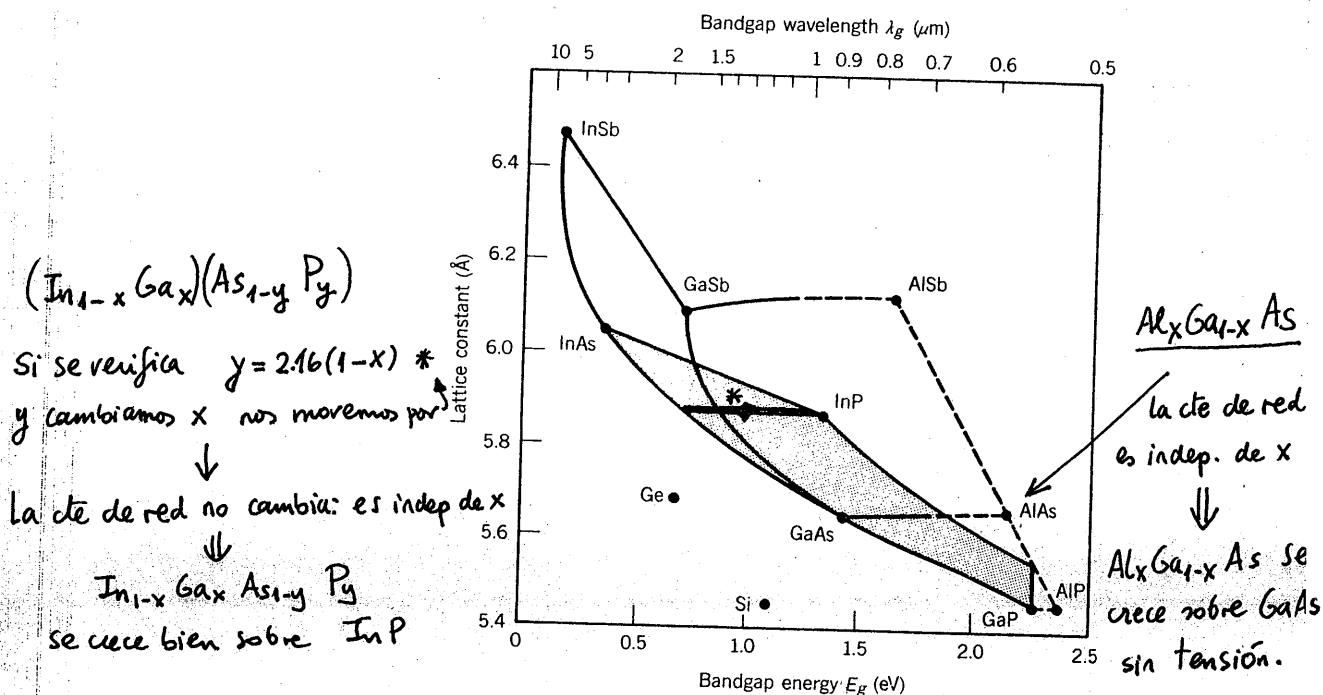
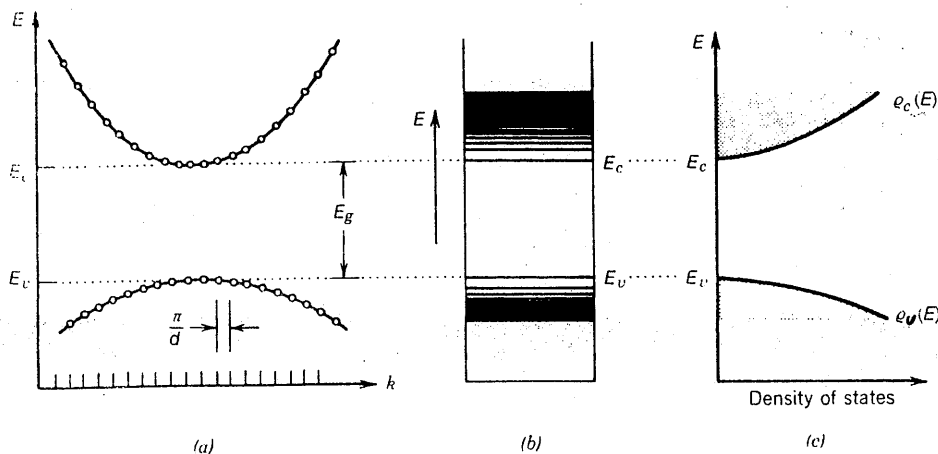


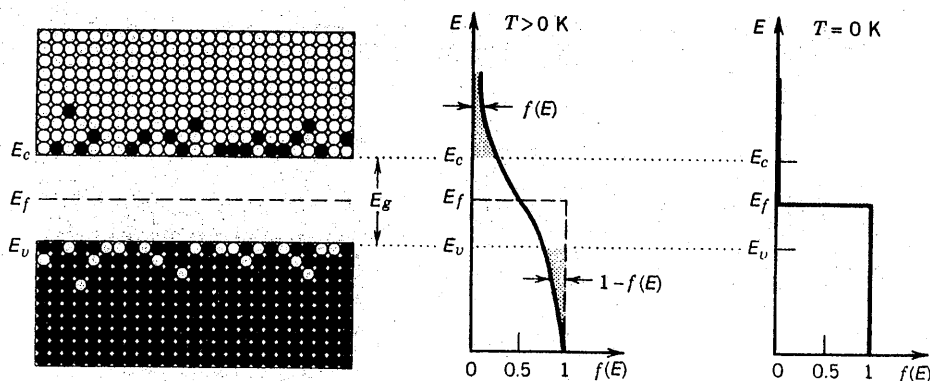
Figure 15.1-5 Lattice constants, bandgap energies, and bandgap wavelengths for Si, Ge, and nine III-V binary compounds. Ternary compounds can be formed from binary materials by motion along the line joining the two points that represent the binary materials. For example, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ is represented by points on the line connecting GaAs and AlAs. As x varies from 0 to 1, the point moves along the line from GaAs to AlAs. Since this line is nearly horizontal, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ is lattice matched to GaAs. Solid and dashed curves represent direct-gap and indirect-gap compositions, respectively. A material may have direct bandgap for one mixing ratio x and an indirect bandgap for a different x . A quaternary compound is represented by a point in the area formed by its four binary components. For example, $(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{As}_{1-y}\text{P}_y)$ is represented by the shaded area with vertices at InAs, InP, GaP, and GaAs; the upper horizontal line represents compounds that are lattice matched to InP.



$$\rho_c(E) = \frac{(2m_c)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} (E - E_c)^{1/2}$$

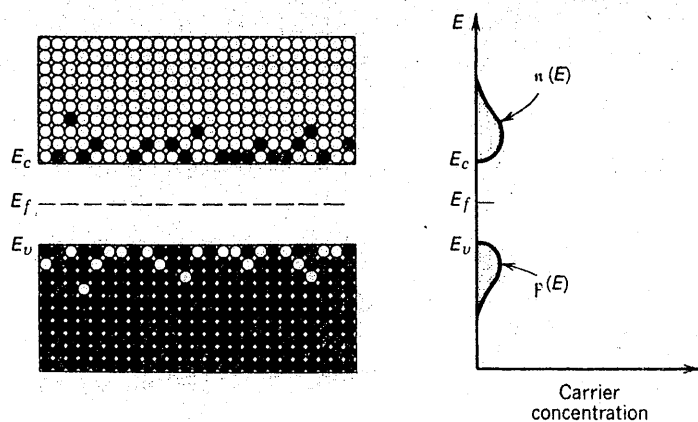
$$\rho_v(E) = \frac{(2m_v)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} (E_v - E)^{1/2}$$

Figure 15.1-7 (a) Cross section of the $E-k$ diagram (e.g., in the direction of the k_1 component with k_2 and k_3 fixed). (b) Allowed energy levels (at all k). (c) Density of states near the edges of the conduction and valence bands. $\rho_c(E) dE$ is the number of quantum states of energy between E and $E + dE$, per unit volume, in the conduction band. $\rho_v(E)$ has an analogous interpretation for the valence band.



$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E - E_f}{kT}} + 1}$$

Figure 15.1-8 The Fermi function $f(E)$ is the probability that an energy level E is filled with an electron; $1 - f(E)$ is the probability that it is empty. In the valence band, $1 - f(E)$ is the probability that energy level E is occupied by a hole. At $T = 0$ K, $f(E) = 1$ for $E < E_f$, and $f(E) = 0$ for $E > E_f$; i.e., there are no electrons in the conduction band and no holes in the valence band.



$$n(E) = \rho_c(E) f(E)$$

$$p(E) = \rho_v(E) (1 - f(E))$$

Figure 15.1-9 The concentrations of electrons and holes, $n(E)$ and $p(E)$, as a function of energy E in an intrinsic semiconductor. The total concentrations of electrons and holes are n and p , respectively.

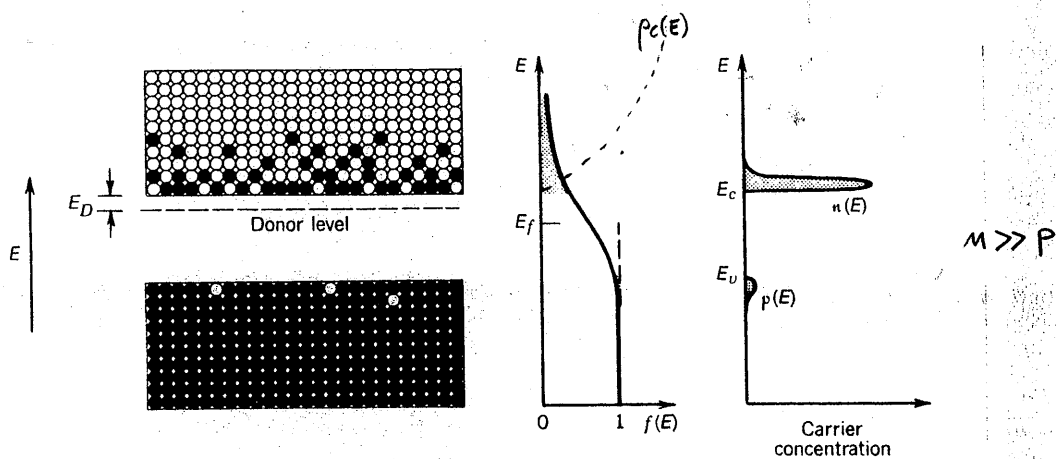


Figure 15.1-10 Energy-band diagram, Fermi function $f(E)$, and concentrations of mobile electrons and holes $n(E)$ and $p(E)$ in an *n*-type semiconductor.

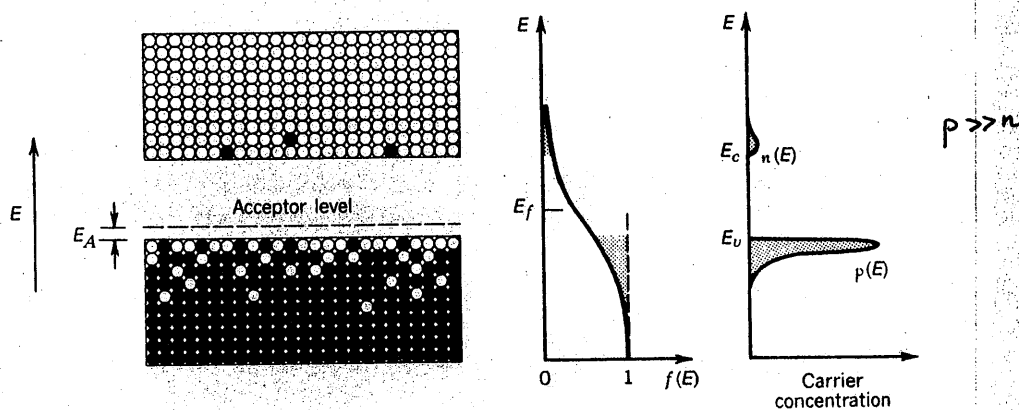


Figure 15.1-11 Energy-band diagram, Fermi function $f(E)$, and concentrations of mobile electrons and holes $n(E)$ and $p(E)$ in a *p*-type semiconductor.

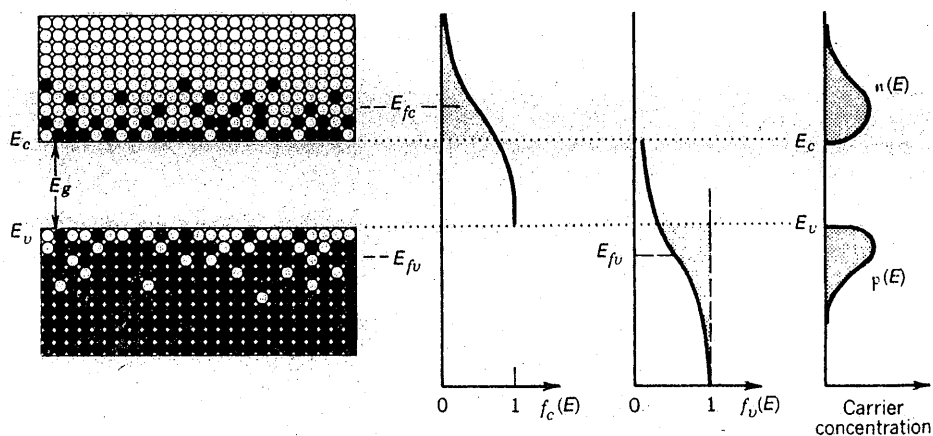


Figure 15.1-12 A semiconductor in quasi-equilibrium. The probability that a particular conduction-band energy level E is occupied by an electron is $f_c(E)$, the Fermi function with Fermi level E_{fc} . The probability that a valence-band energy level E is occupied by a hole is $1 - f_v(E)$, where $f_v(E)$ is the Fermi function with Fermi level E_{fv} . The concentrations of electrons and holes are $n(E)$ and $p(E)$, respectively. Both can be large.

- Solo hay emisión/absorción entre las bandas si $h\nu > E_g$

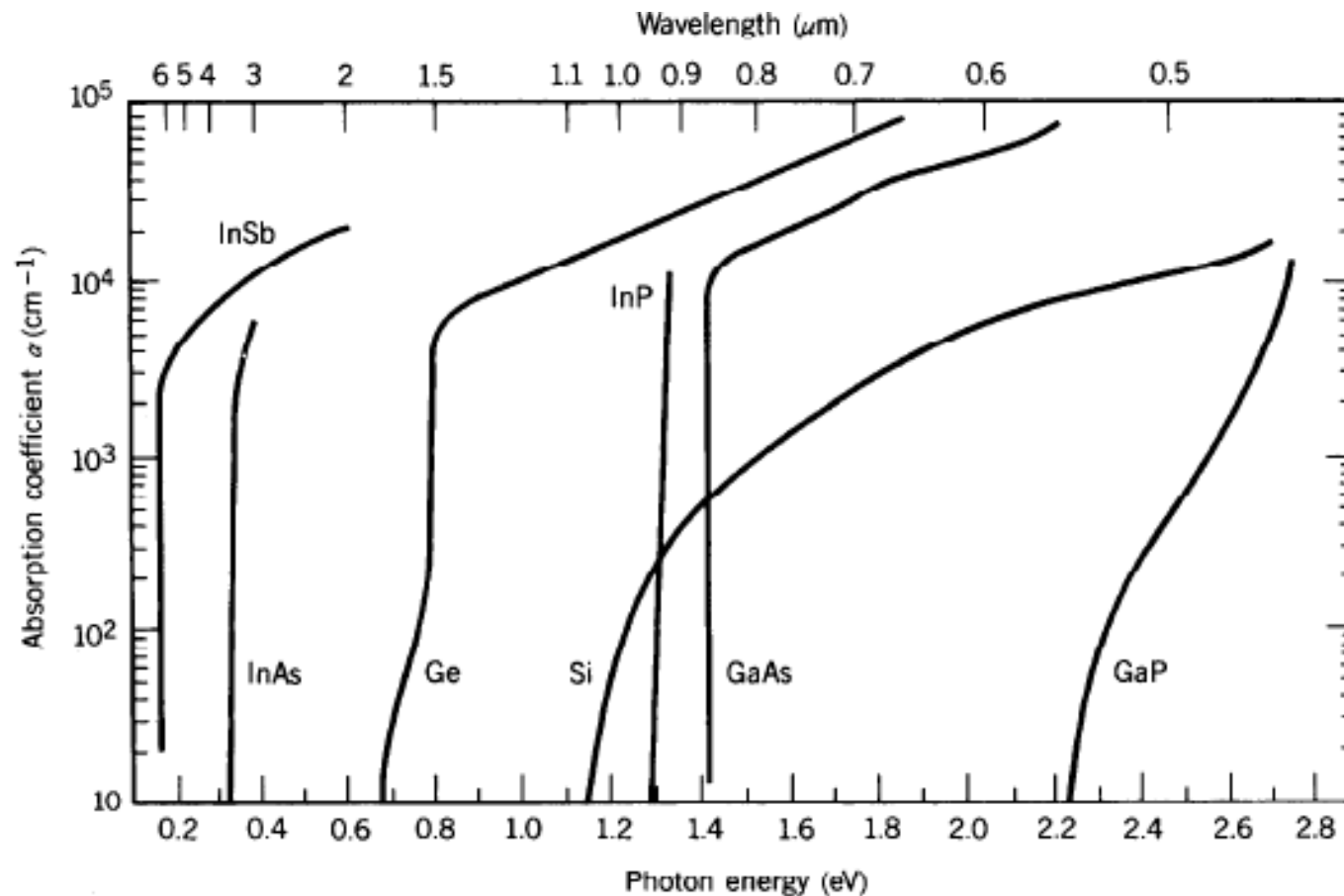


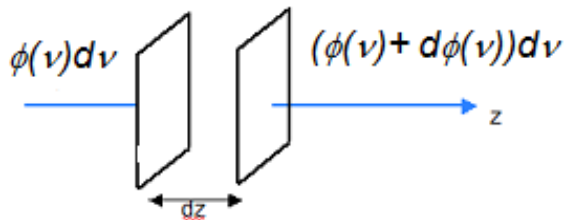
Figure 15.2-3 Absorption coefficient versus photon energy for Ge, Si, GaAs, and selected other III-V binary semiconductors at $T = 300$ K, on an expanded scale (Adapted from G. E. Stillman,

1.1 Amplificadores de semiconductor

La inyección de corriente eléctrica en una unión p-n puede crear una inversión de población que provoque más emisiones estimuladas que absorciones

Las transiciones tienen lugar entre bandas de niveles de energía cercanamente espaciados en vez de entre niveles discretos bien separados

Ventajas: pequeños, ancho de banda \approx varios THz



$\phi(\nu)$: densidad espectral de flujo de fotones
fotones/(area tiempo frecuencia)

$$d\phi(\nu) = \gamma(\nu) \phi(\nu) dz$$

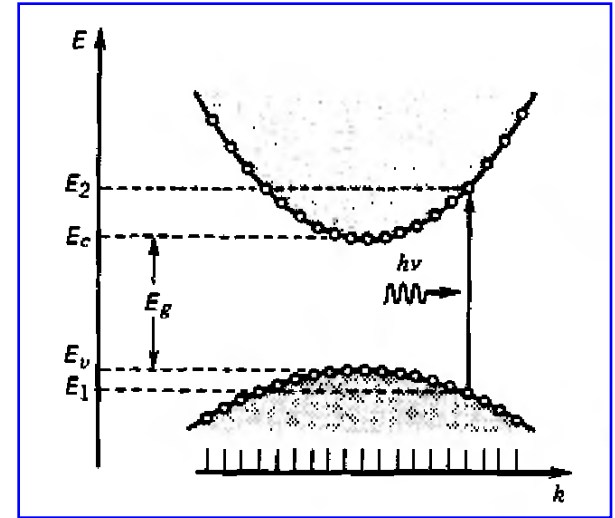
$\gamma(\nu)$: coeficiente de ganancia

Velocidad de emisión estimulada, $r_{st}(\nu)$ (de absorción, $r_{ab}(\nu)$) : Número de fotones emitidos estimuladamente (absorbidos) por segundo por hertzio por unidad de volumen:

$$r_{st}(\nu) = \frac{\lambda^2}{8\pi\tau_r} \zeta(\nu) f_e(\nu) \phi(\nu)$$

$$r_{ab}(\nu) = \frac{\lambda^2}{8\pi\tau_r} \zeta(\nu) f_a(\nu) \phi(\nu)$$

τ_r : Tiempo de vida de recombinación radiativa electrón-hueco



$f_e(\nu)$: Probabilidad de que se cumplan las condiciones de emisión=

Prob. que el estado superior (BC) este lleno*Prob. estado inferior (BV) vacio.

$f_a(\nu)$: Probabilidad de que se cumplan las condiciones de absorción=

Prob. que el estado superior (BC) este vacío*Prob. estado inferior (BV) lleno

$\varsigma(\nu)$: Densidad conjunta de estados con los que un fotón de energía $h\nu$ puede interaccionar cumpliendo las condiciones de conservación de energía y momento en un semiconductor de gap directo

$$\varsigma(\nu) = \frac{(2m_r)^{3/2}}{\pi\hbar^2} (h\nu - E_g)^{1/2}$$

$$d\phi(\nu) = (r_{st}(\nu) - r_{ab}(\nu))dz = \gamma(\nu)\phi(\nu)dz$$

$$\gamma(\nu) = \frac{\lambda^2}{8\pi\tau_r} \varsigma(\nu) (f_e(\nu) - f_a(\nu))$$

La **amplificación** de luz está caracterizada por el coeficiente o espectro de ganancia, $\gamma(\nu)$

Ancho de banda ~ varios THz

Ancho de banda de amplificador:
rango de ν en que $\gamma(\nu) > 0$

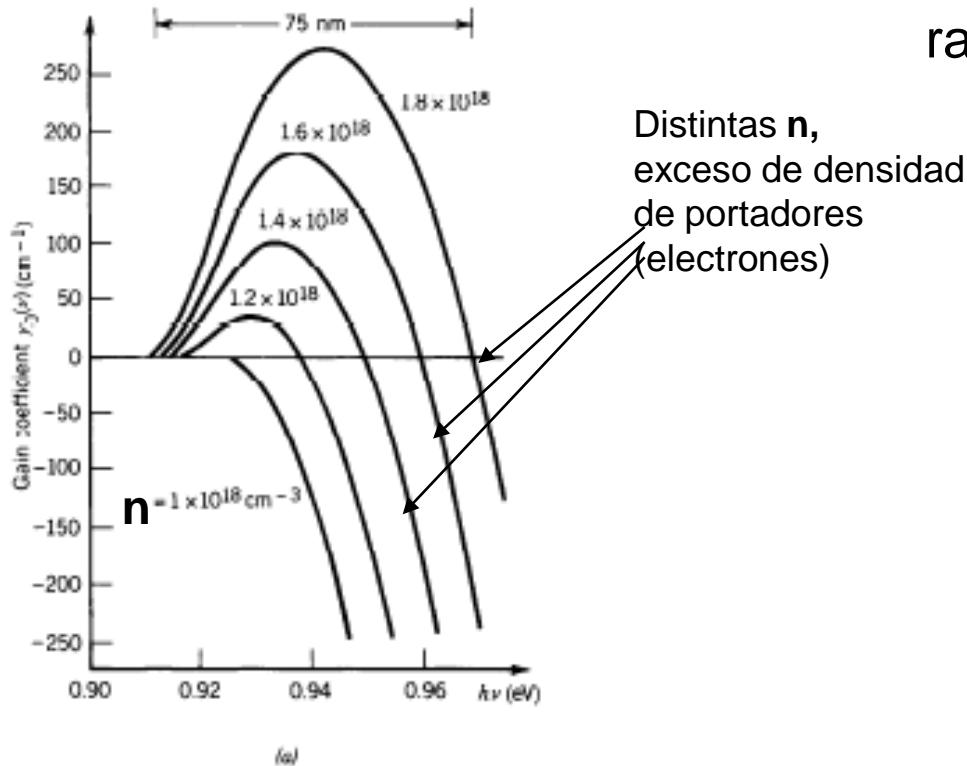
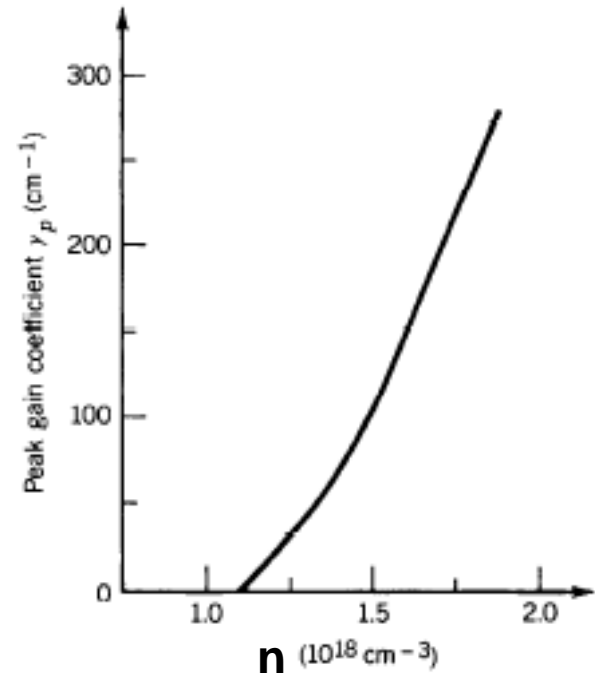


Figure 16.2-3 (a) Calculated gain coefficient $\gamma_0(\nu)$ for an InGaAsP laser amplifier versus photon energy $h\nu$, with the injected-carrier concentration Δn as a parameter ($T = 300 \text{ K}$).



El pico de la ganancia crece linealmente con n ,
$$\gamma_p = \alpha \left(\frac{n}{n_t} - 1 \right)$$

Corriente:

i

Portadores pasando por la región de unión:

i/e

Velocidad de inyección de portadores (portadores/cm³ sec):

$R=i/(eV)$

Si el flujo de fotones es bajo

$$\frac{dn}{dt} = R - \frac{n}{\tau} = \frac{i}{eV} - \frac{n}{\tau} \quad (1)$$

donde τ es el tiempo de vida de los portadores (o vida media recombinación e⁻- hueco)

Concentración de portadores en estado estacionario:

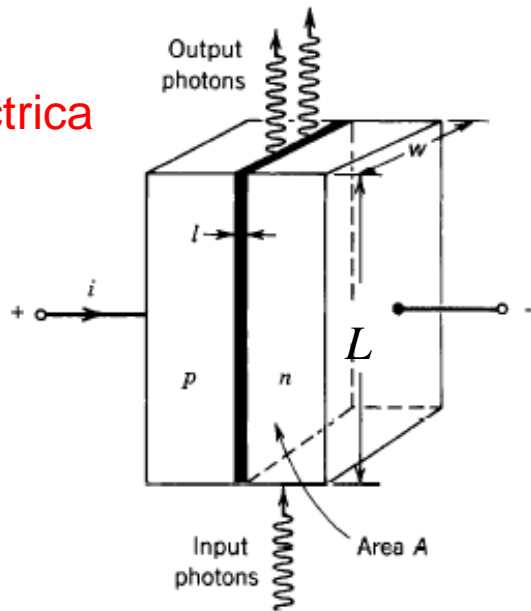
$n=i \tau/(eV)$

$$\gamma_p = \alpha \left(\frac{n}{n_t} - 1 \right)$$

Si $n=0$, $\gamma_p=-\alpha$, donde α es el coeficiente de absorción en ausencia de corriente

Si $n=n_t$, $\gamma_p=0$, donde n_t es la densidad de portadores en transparencia:
el número de absorciones=número de emisiones estimuladas

Bombeo =
Corriente eléctrica



Medio activo (zona negra)

Es el medio donde se producen
la mayor parte de emisiones
estimuladas y absorciones

$V = w L l$, volumen del medio activo

Figure 16.2-6 Geometry of a simple laser amplifier. Charge carriers travel perpendicularly to the p - n junction, whereas photons travel in the plane of the junction.

Los medios activos usan una **doble heteroestructura**, de ancho l , que confina
a la vez a los portadores de carga y a la luz en ese medio activo

Si el espesor, l , es de unos pocos nm: **POZO CUANTICO (QW)**

Si la luz viaja paralela al medio activo: **amplificadores de emisión lateral**

“ “ “ “ perpendicular “ “ :**amplificadores de emisión vertical (VCSSOA)**

La doble heteroestructura

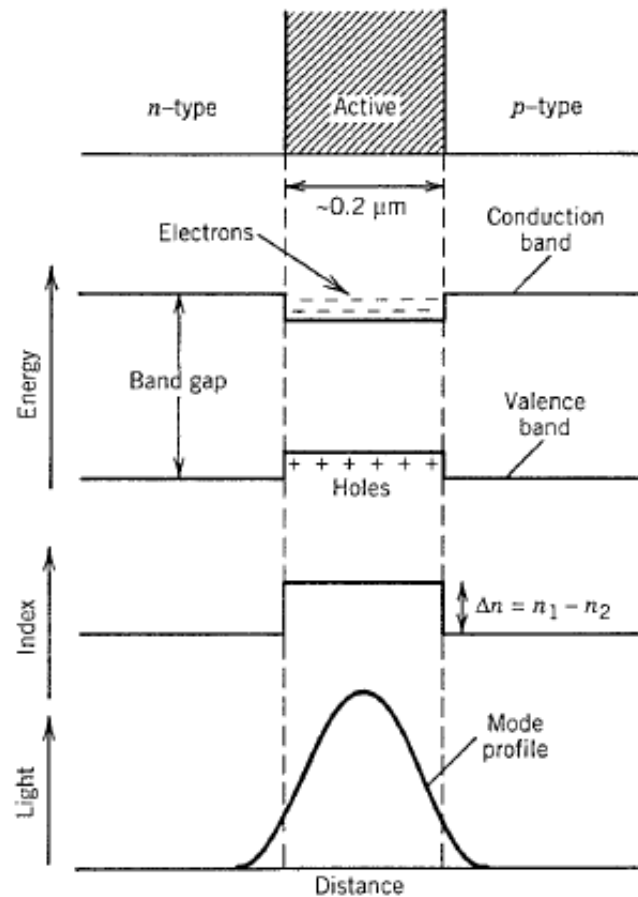


Figure 3.4: Simultaneous confinement of charge carriers and optical field in a double-heterostructure design. The active layer has a lower bandgap and a higher refractive index than those of *p*-type and *n*-type cladding layers.

1.2 Espejos

Si se pulen los planos del cristal perpendiculares al plano de la unión en un amplificador de emisión lateral: **Láseres de emisión lateral**

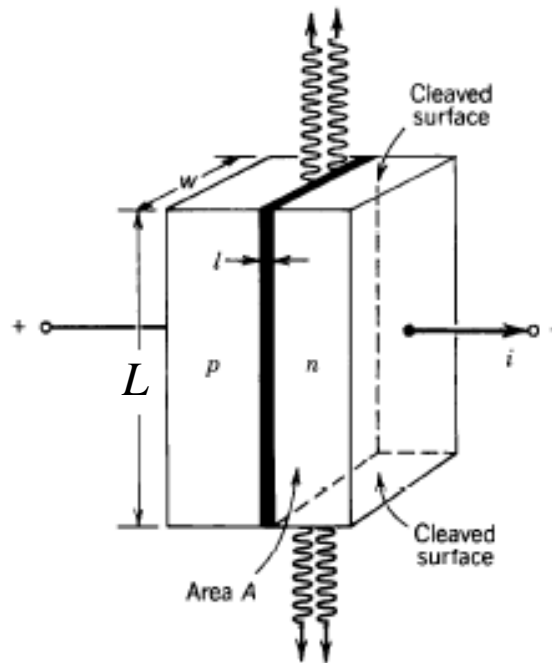


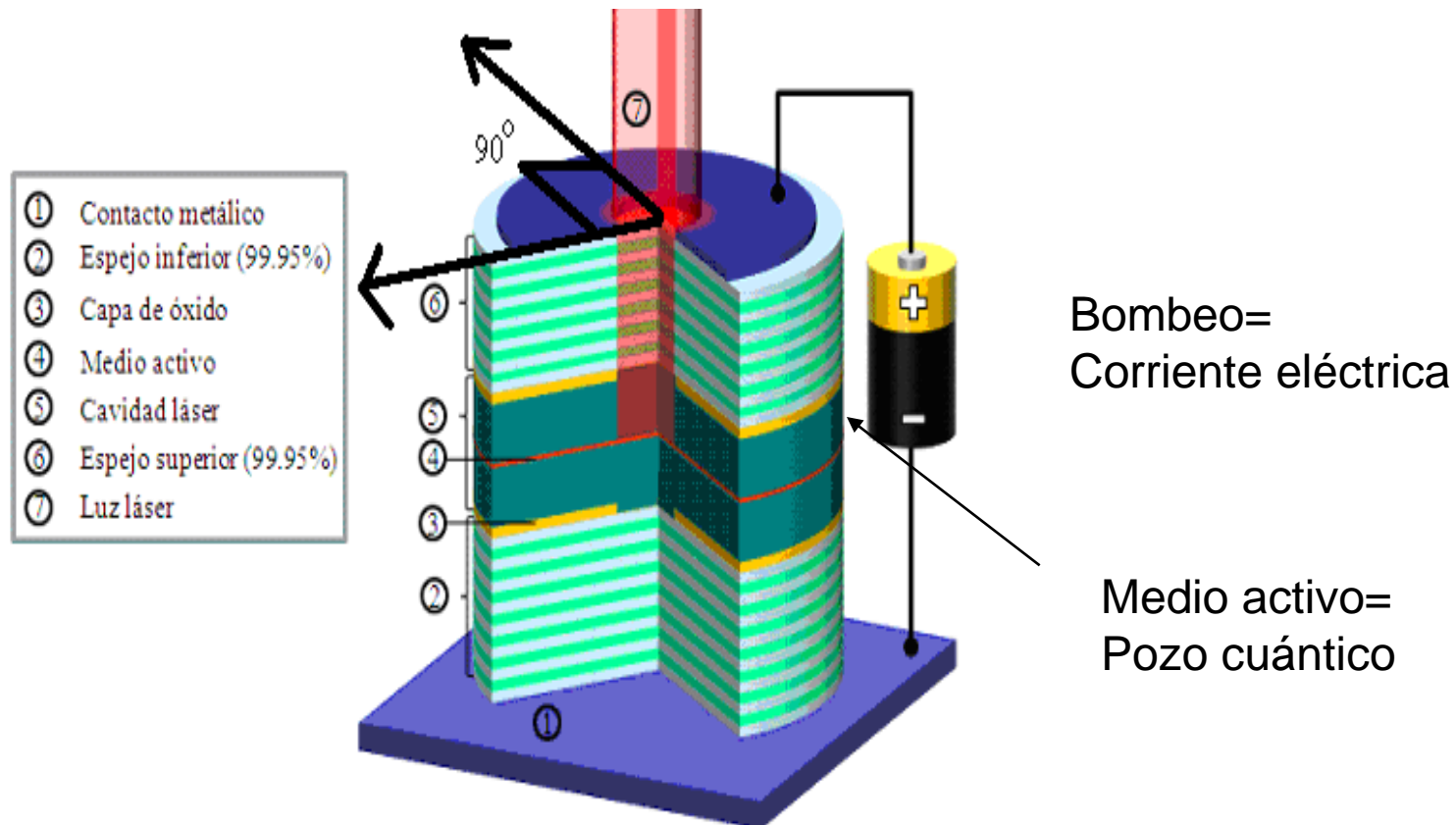
Figure 16.3-1 An injection laser is a forward-biased p - n junction with two parallel surfaces that act as reflectors.

Reflectividad en potencia, $R=(n-1)^2/(n+1)^2$, ($n \approx 3.6$), $R \approx 0.32$

Si espejos formados por pares de capas alternadas de distintos semiconductores, de espesores $\lambda/4n$, donde n índice de refracción: **Láseres de emisión vertical (VCSEL)**

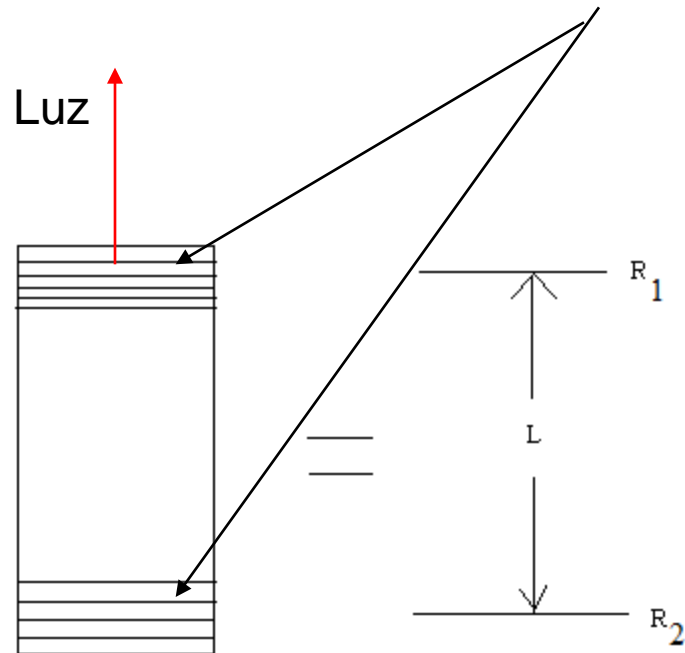
El haz láser es perpendicular a la zona activa

Los espejos se llaman reflectores de Bragg distribuidos, DBR, ($R \approx 0.9995$)



Son **microláseres**: dimensiones de unas pocas micras en cualquier dirección

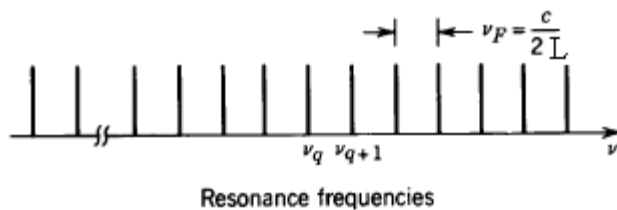
Espejos en los VCSEL: Reflectores Bragg (DBR)



Resonador de Fabry-Perot

$L \sim 2$ micras

$$\nu_F = c/(2L) = 20 \text{ THz}$$



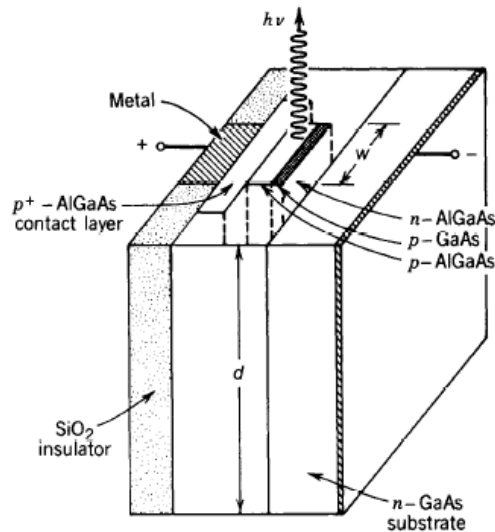
1.3 El láser de semiconductor y su respuesta temporal

Materiales y longitudes de onda de emisión

Table 13.2 *Major III–V semiconductor lasers*

Laser material	Substrate	Wavelength	Color
InGaN	Sapphire	370–680 nm	UV–red
InGaP	GaAs	620–700 nm	Red
AlGaAs	GaAs	750–870 nm	Red–IR
InGaAs	GaAs	980–1050 nm	IR
InGaAsP	InP	1.1–1.65 μm	IR
InGaAsSb	GaSb	2–3 μm	IR

Estructuras típicas



Láser de emisión lateral

Figure 16.3-7 Schematic diagram of an AlGaAs/GaAs buried-heterostructure semiconductor injection laser. The junction width w is typically 1 to 3 μm , so that the device is strongly index guided.

Láser de emisión vertical

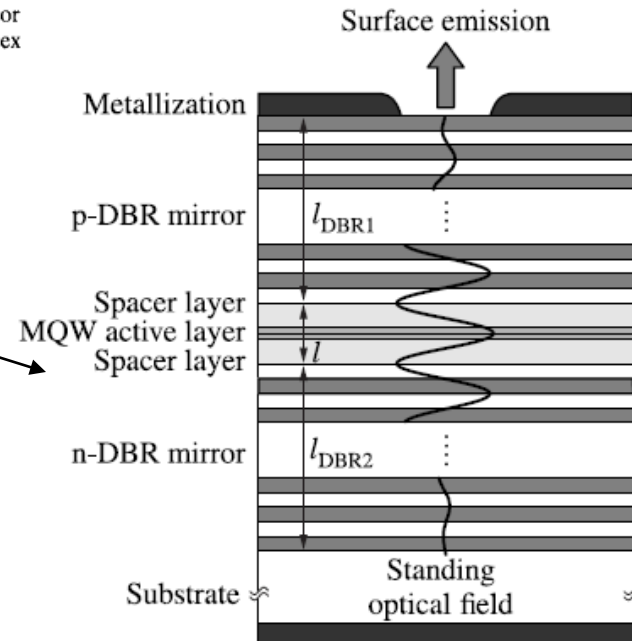


Figure 13.37 Structure of a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL).

Espectros típicos

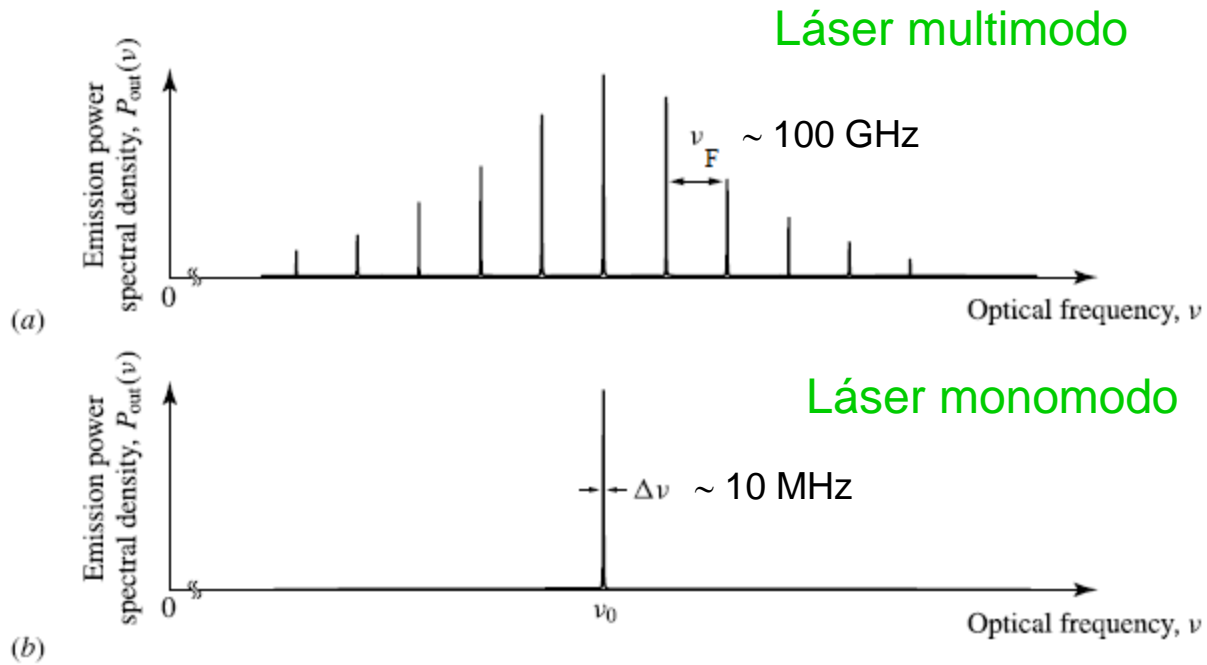


Figure 13.39 Representative emission spectra of (a) a multimode semiconductor laser and (b) a single-frequency semiconductor laser.

Respuesta temporal

Descrita por las ecuaciones de balance (rate equations)

$$\frac{dP}{dt} = a(N - N_t)P - \frac{P}{\tau_c} + \beta N$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{i}{e} - \frac{N}{\tau} - a(N - N_t)P$$

P : número de fotones en el interior del láser

N : número de electrones en la región activa

a : ganancia diferencial

N_t : número de electrones en transparencia

τ_c : vida media del fotón ($=1/\xi$, ξ : velocidad de pérdida de fotones)

β : factor de emisión espontánea.

i : corriente; e : carga del e^-

τ : tiempo de vida de los portadores.

Hay ganancia de fotones: emisión estimulada - absorción:

$$d\phi(\nu) = \gamma(\nu)\phi(\nu)dz \qquad \frac{dP}{dz} = \gamma(\nu)P \longrightarrow \frac{dP}{dt} = v_g \gamma(\nu)P$$

v_g : velocidad de grupo

$$\text{aproximo } \gamma(\nu) \approx \gamma_p = \alpha \left(\frac{n}{n_t} - 1 \right)$$

$$\frac{dP}{dt} = a(N - N_t)P \quad \text{donde} \quad a = \frac{v_g \alpha}{V n_t}$$

Hay pérdida de fotones: por los espejos, scattering en el interior...

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau_c}$$

βN : velocidad de emisión espontánea en el modo láser

Eq. (1) x V:
$$\frac{dN}{dt} = \frac{i}{e} - \frac{N}{\tau}$$
 Sin fotones

Como hay fotones: disminución de N debido a emisiones estimuladas

¿Velocidad de recombinación e⁻-hueco debido a emisión estimulada – absorción?

por cada fotón creado, desaparece un e⁻ :
$$\frac{dN}{dt} = -a(N - N_t)P$$

Valores típicos:

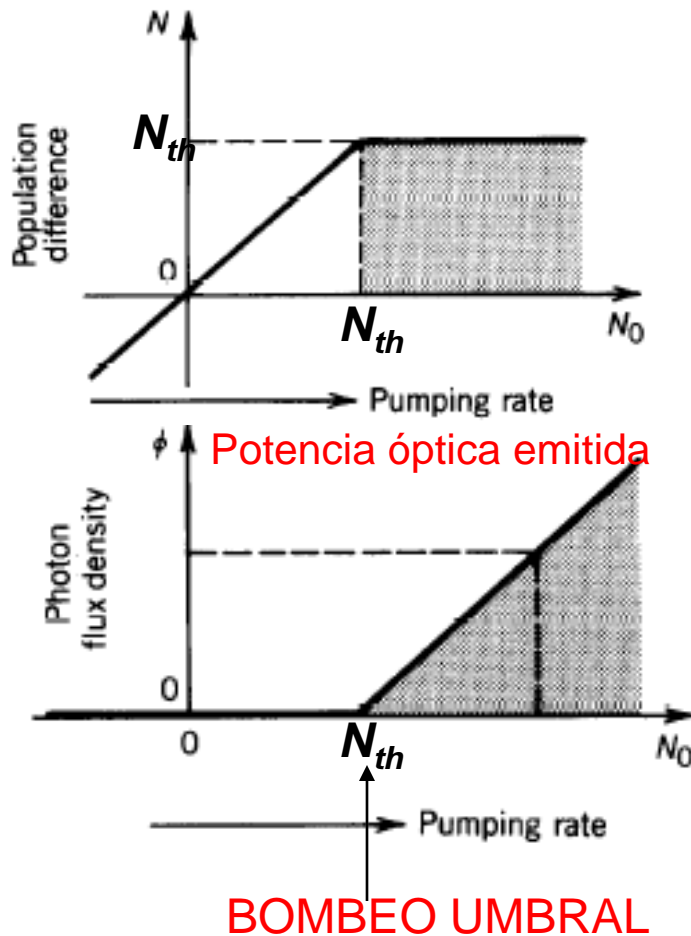
$$a \approx 6 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1} ; \quad N_t \approx 7 \cdot 10^7 ; \quad \tau_c \approx 2 \text{ ps}$$

$$\tau \approx 2 \text{ ns} ; \quad \beta \approx 4 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$$

Funcionamiento en onda continua (CW): $dP/dt = dN/dt = 0$

Hay un valor del bombeo (bombeo umbral) por encima del cual comienza la acción láser (domina la emisión estimulada).

N en función del bombeo



Si el bombeo \geq bombeo umbral

Ganancia neta = pérdidas

$$dP/dt = 0 \rightarrow a(N_{th} - N_t)P = P/\tau_c \quad (\text{pues } \beta N \ll 1)$$

$$N_{th} = N_t + 1/(a\tau_c)$$

Bombeo umbral = corriente umbral, i_{th}

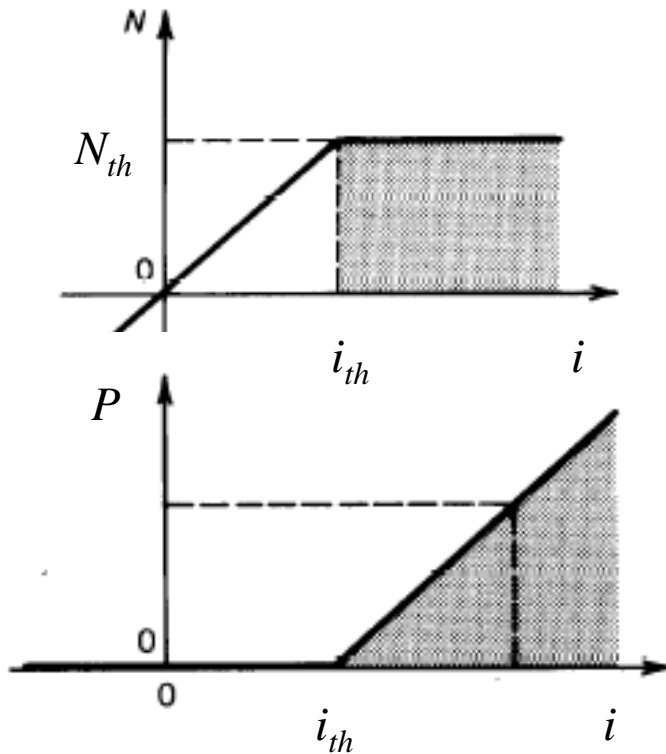
$$\text{si } i = i_{th}, \rightarrow P = 0$$

$$dN/dt = 0 \rightarrow i_{th}/e - N_{th}/\tau = 0$$

$$i_{th} = \frac{e}{\tau} N_{th}$$

si $i > i_{th}$, \rightarrow hallamos P a partir de $dN/dt=0$

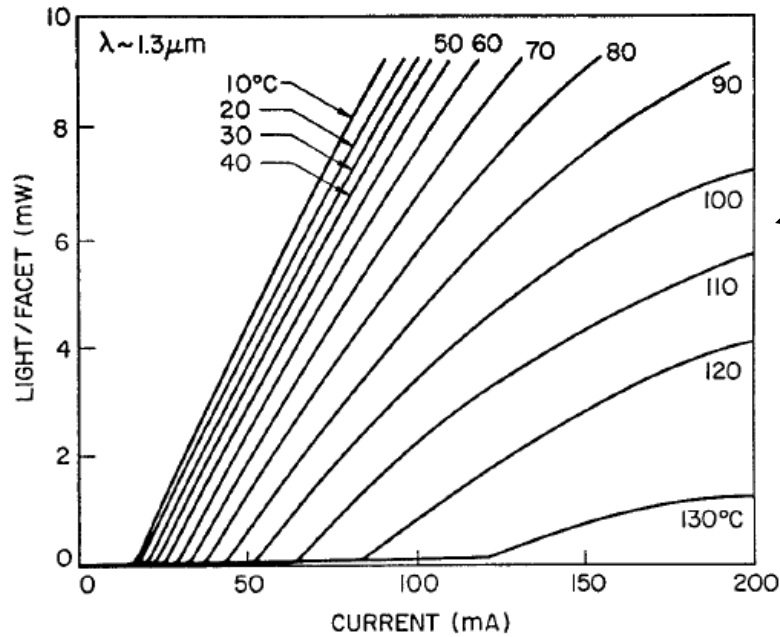
$$\frac{dN}{dt} = \frac{i}{e} - \frac{N_{th}}{\tau} - \frac{P}{\tau_c} = 0 \quad \rightarrow \quad P = \frac{\tau_c}{e} (i - i_{th})$$



$$Potencia\ emitida = \frac{1}{2} h\nu v_g \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) P$$

Curva potencia emitida frente a corriente: **Curva $P-i$**

Curvas $P-i$

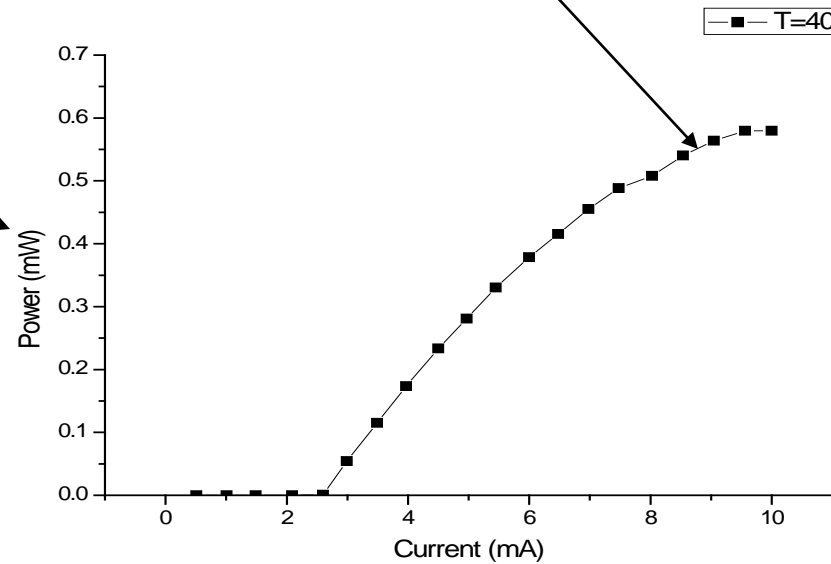


Láser de emisión lateral

Saturación

Figure 3.20: $P-I$ curves at several temperatures for a $1.3\text{-}\mu\text{m}$ buried heterostructure laser.

Láser de emisión vertical



Funcionamiento en el transitorio, $dP/dt \neq 0$, $dN/dt \neq 0$

OSCILACIONES DE RELAJACION

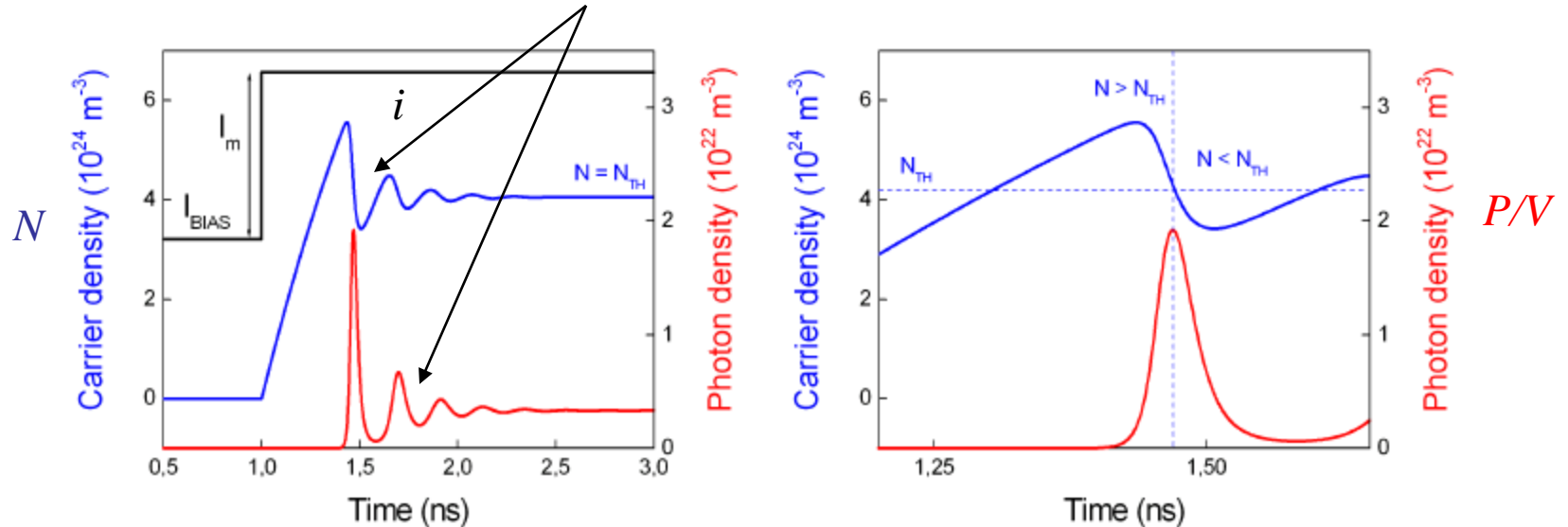


Figure 3.9: Left: transient behavior of a laser at the turn-on: current (black), carrier density (blue) and photon density (red). Right: enlarged view during the first spike of relaxation oscillations.

Frecuencia de las oscilaciones de relajacion, ν_R

$$\nu_R \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{aP}{\tau_c}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{e}} (i - i_{th})$$

ν_R : hasta decenas de GHz!

Respuesta a una modulación de corriente de amplitud pequeña

Máximo en $\nu_R \rightarrow$ el láser responde (es capaz de formar “pulsos” de luz) con corrientes sinusoidales de frecuencias hasta ν_R

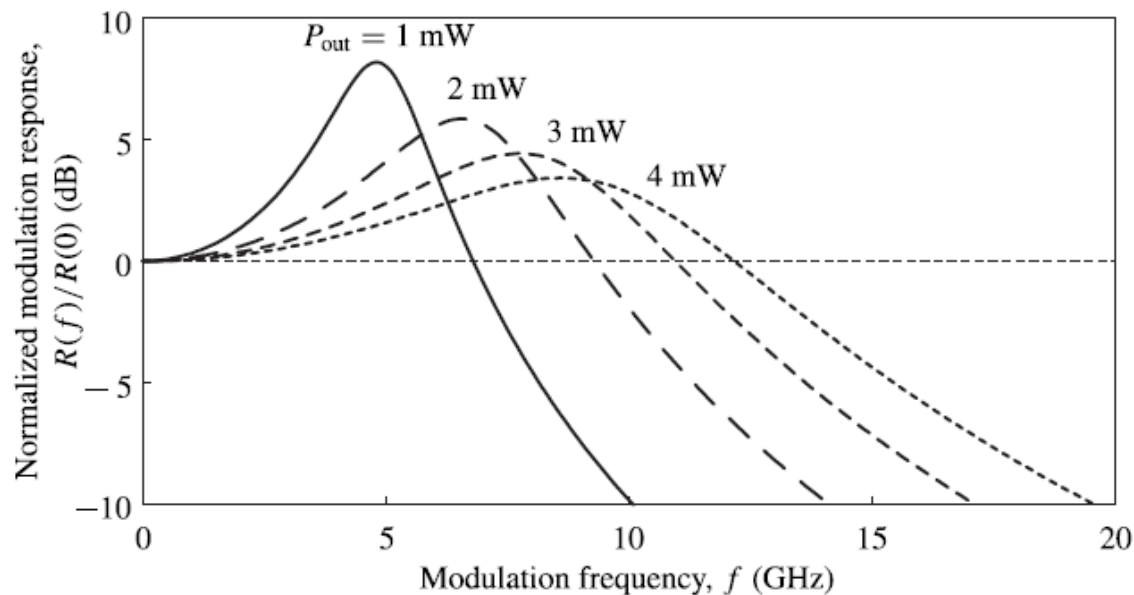


Figure 13.40 Normalized current-modulation frequency response of a semiconductor laser

Ancho de banda de modulación es el rango de frecuencias sobre el cual responde el láser a una modulación de corriente: es $\approx \nu_R$, decenas de GHz!

1.4 Tipos de láser de semiconductor

Láser de emisión lateral multimodo

Láser de Fabry-Perot

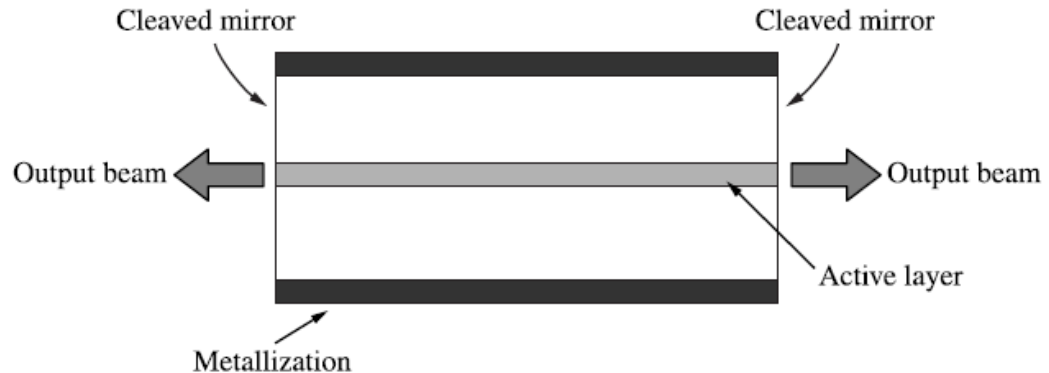


Figure 13.30 Structure of an edge-emitting Fabry-Perot semiconductor laser with cleaved facets.

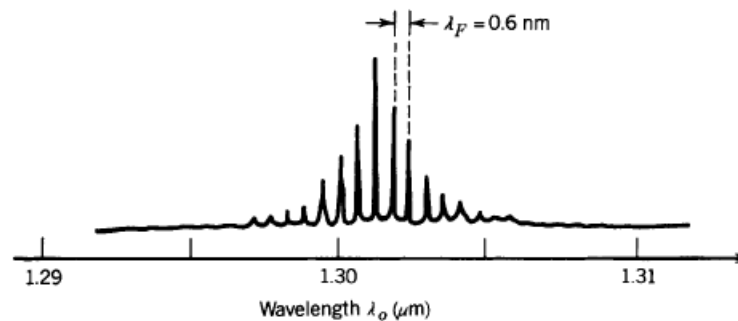


Figure 16.3-5 Spectral distribution of a 1.3- μm InGaAsP index-guided buried-heterostructure laser.

¿Cómo conseguir que un láser de emisión lateral multimodo pase a emitir en un solo modo longitudinal?

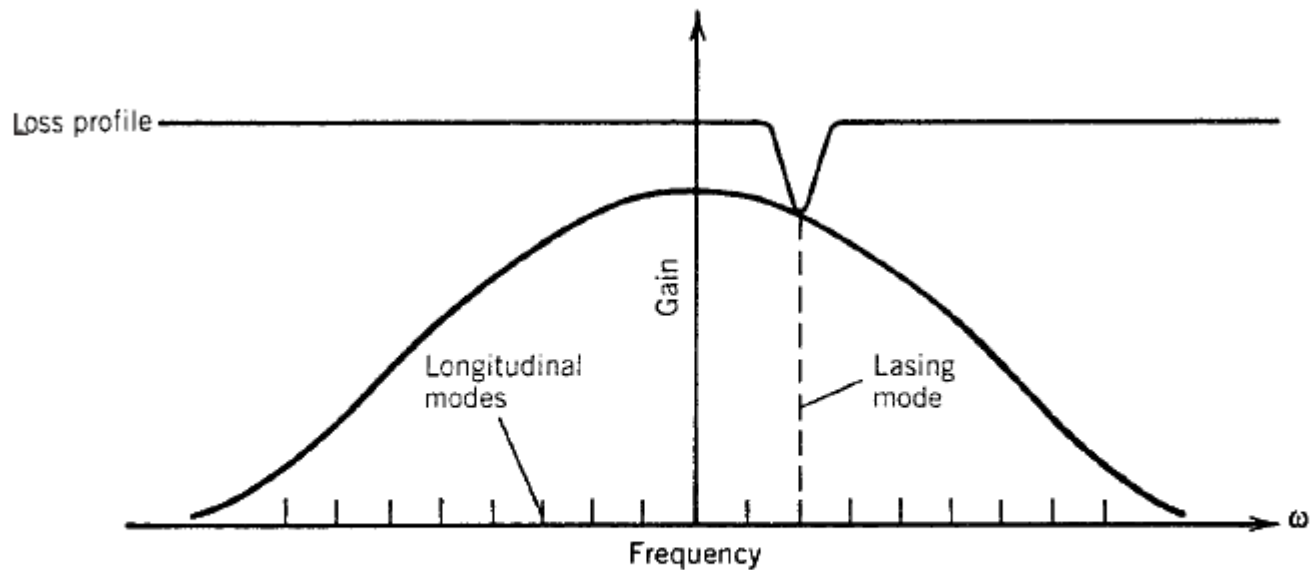


Figure 3.15: Gain and loss profiles for semiconductor lasers oscillating predominantly in a single longitudinal mode.

Láseres de emisión lateral monomodo

Láser DFB
(retroalimentación
distribuida)

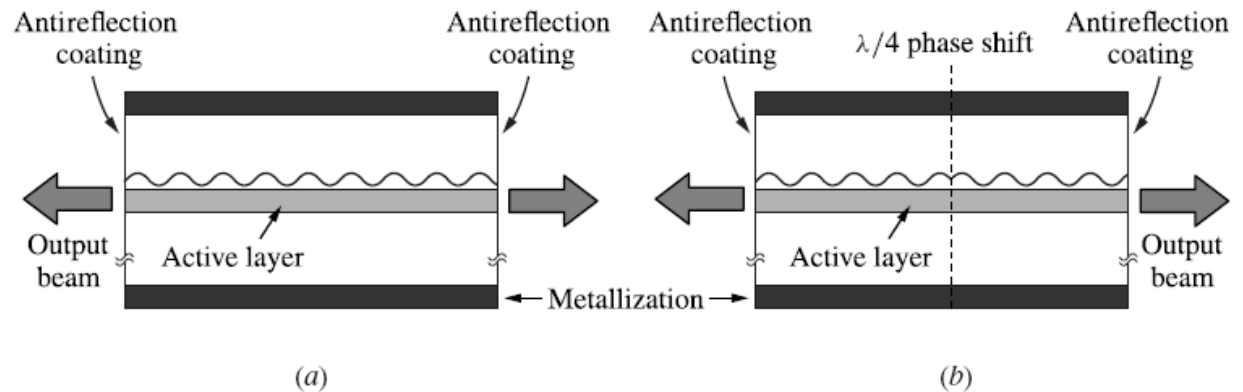


Figure 13.32 Structures of edge-emitting distributed feedback (DFB) semiconductor lasers: (a) DFB laser with no phase shift and (b) $\lambda/4$ phase-shifted DFB laser.

Láser DBR

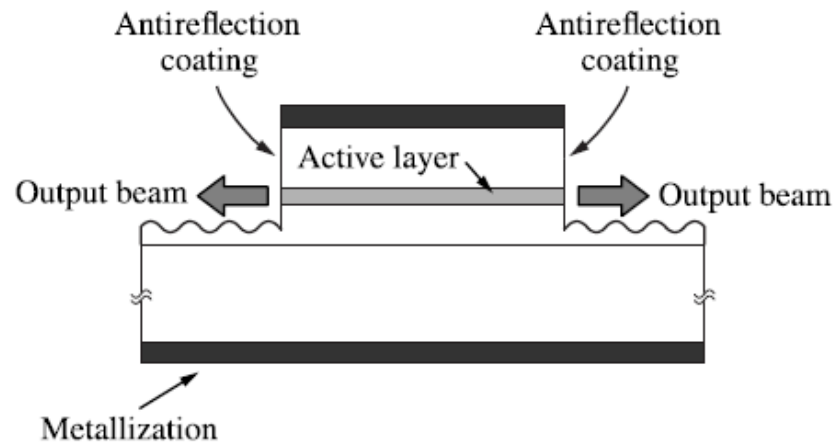
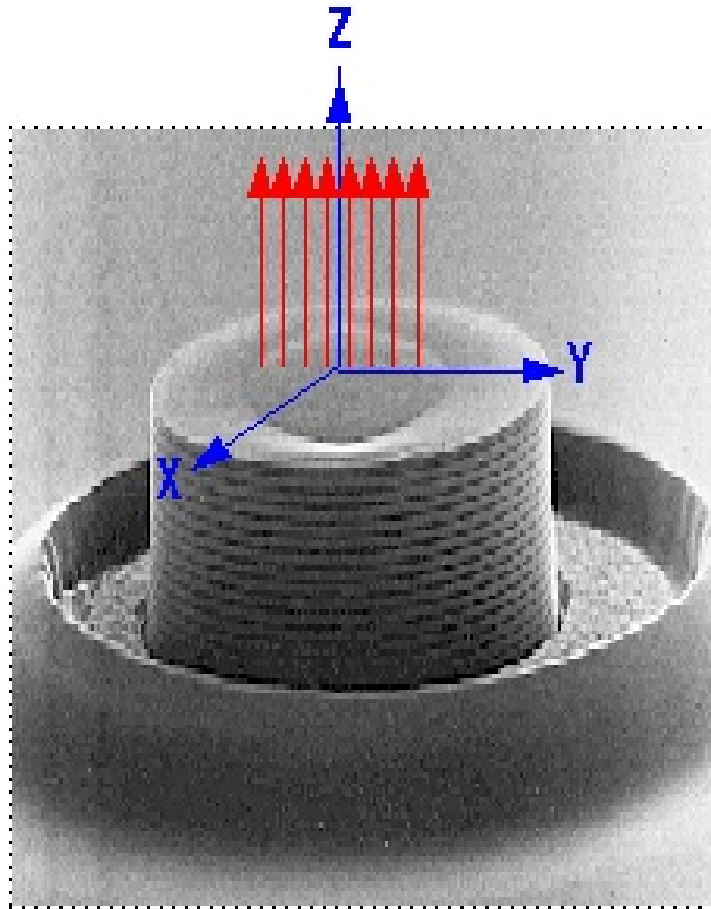


Figure 13.31 Structure of an edge-emitting distributed Bragg reflector (DBR) semiconductor laser with two Bragg reflectors.

Láseres de emisión vertical



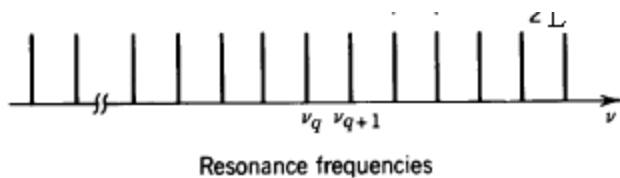
Resonador de Fabry-Perot

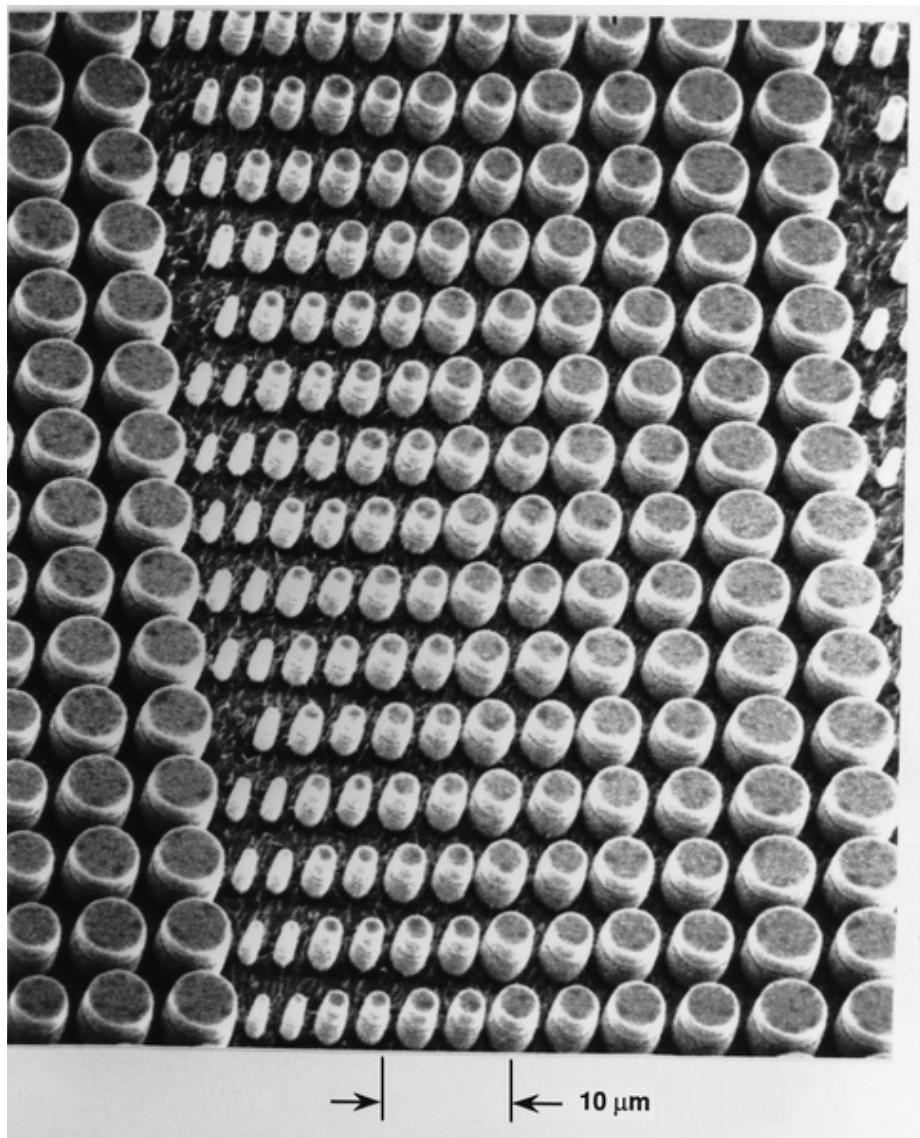
$L \sim 2$ micras

$$\nu_F = c/(2L) = 20 \text{ THz}$$

$\nu_F \gg$ ancho espectro de ganancia:
solo un modo longitudinal tiene ganancia

El láser emite en un solo modo longitudinal





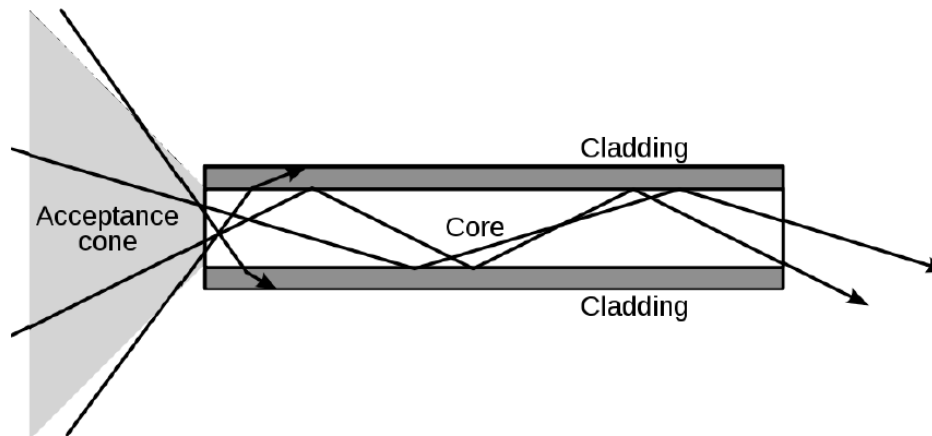
2.- Comunicaciones ópticas

2.1 La Fibra óptica

2.1.1- Descripción geométrica de la propagación en fibras

Fibra Óptica: guía de onda dieléctrica cilíndrica hecha de materiales muy transparentes (cristal de sílice, polímeros plásticos...)

Constan de un núcleo central (core) rodeado por una zona de índice de refracción ligeramente menor (cladding).



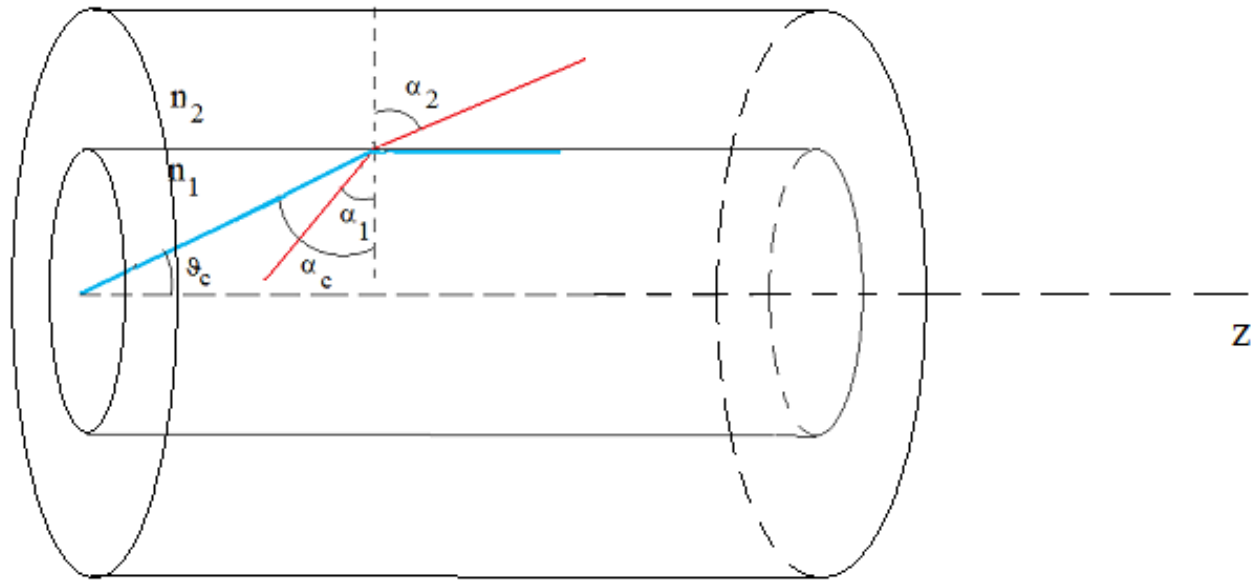
Los rayos que inciden sobre la superficie core-cladding con un ángulo mayor que el ángulo crítico sufren REFLEXION INTERNA TOTAL: **son guiados**

$$n_{\text{core}}=n_1 \approx 1.44 \text{ a } 1.46$$

$$\Delta=(n_1-n_2)/n_1 \approx 0.001 \text{ a } 0.02, \text{ donde } n_2=n_{\text{cladding}}$$

Diámetro del core/Diámetro del cladding:

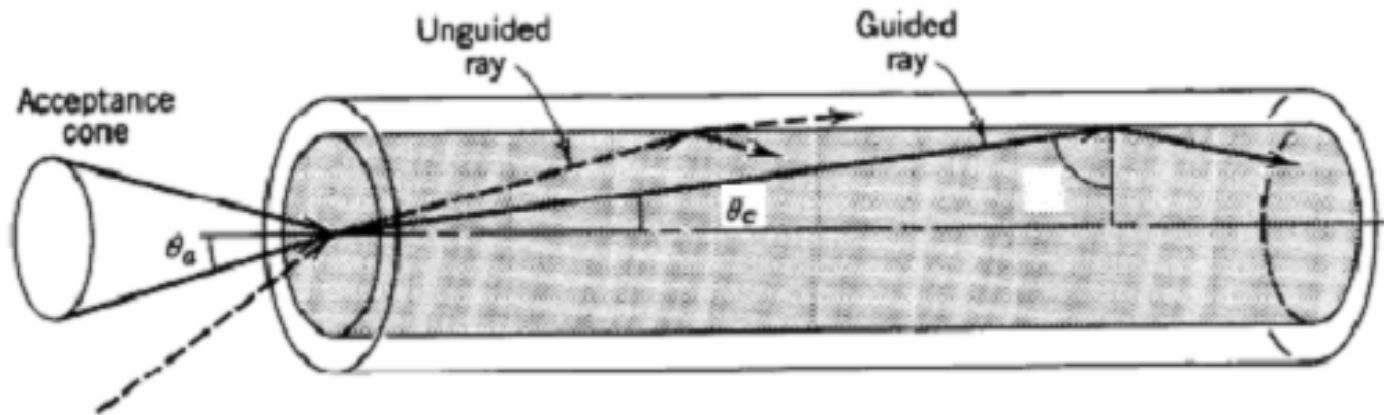
8/125, 50/125, 62.5/125... (en micras)



$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

Angulo límite, α_c , $n_1 \sin \alpha_c = n_2 \sin \pi/2$, $\alpha_c = \arcsin (n_2/n_1)$

Reflexión interna total (rayos guiados) si $\alpha > \alpha_c$, o $\vartheta < \vartheta_c$, $\vartheta_c = \arccos (n_2/n_1)$



Rayos guiados si inciden en la cara de la fibra con ángulo con el eje $< \theta_a$,

$$1 \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_c \rightarrow \theta_a = \arcsin (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

θ_a : cono de rayos externos guiados por la fibra

$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$, Apertura numérica de la fibra.

2.1.2. Descripción electromagnética de la propagación en fibras

Guías de onda

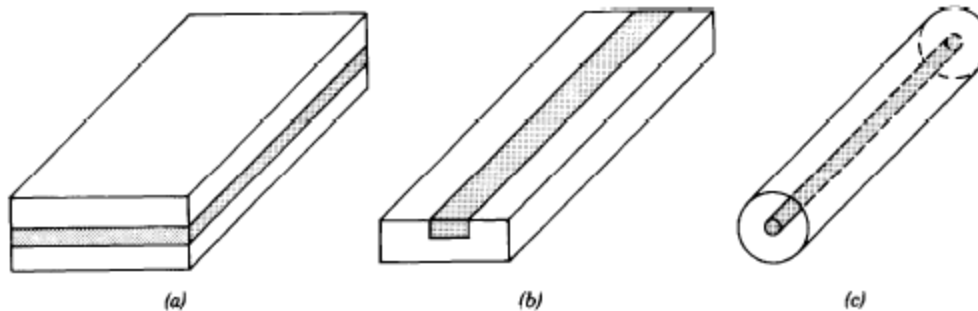


Figure 7.0-1 Optical waveguides: (a) slab; (b) strip; (c) fiber.

La fibra óptica es un ejemplo de guía de onda cilíndrica.

En las guías de onda hay soluciones especiales, los modos de la guía, que son campos monocromáticos que mantienen la misma distribución transversal y de polarización a lo largo del eje de la guía.

Modos de la Fibra óptica

Spatial Distributions

Each of the components of the electric and magnetic fields must satisfy the Helmholtz equation, $\nabla^2 U + n^2 k_o^2 U = 0$, where $n = n_1$ in the core ($r < a$) and $n = n_2$ in the cladding ($r > a$) and $k_o = 2\pi/\lambda_o$

In a cylindrical coordinate system (see Fig. 8.1-4) the Helmholtz equation is

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n^2 k_o^2 U = 0, \quad (8.1-4)$$

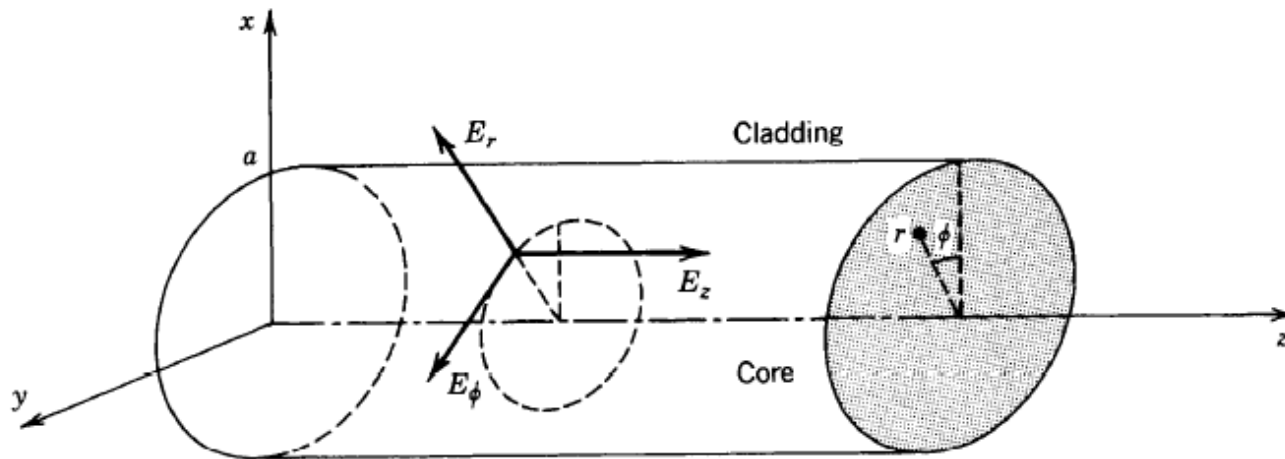
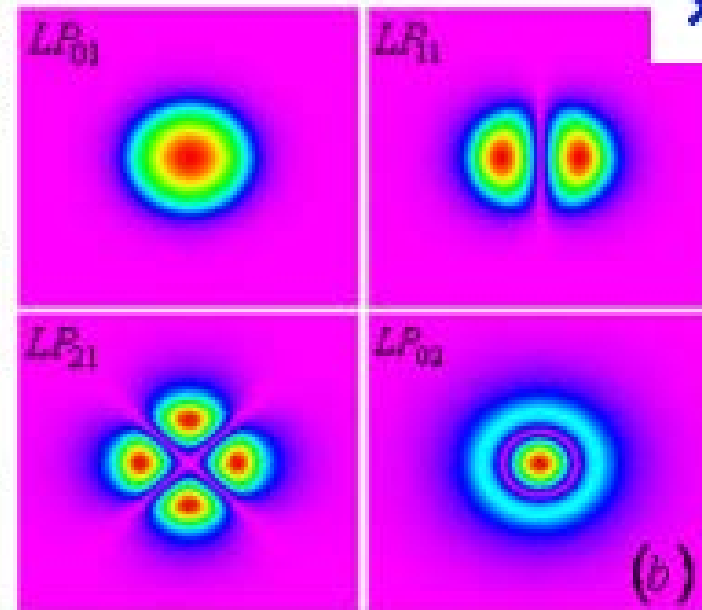
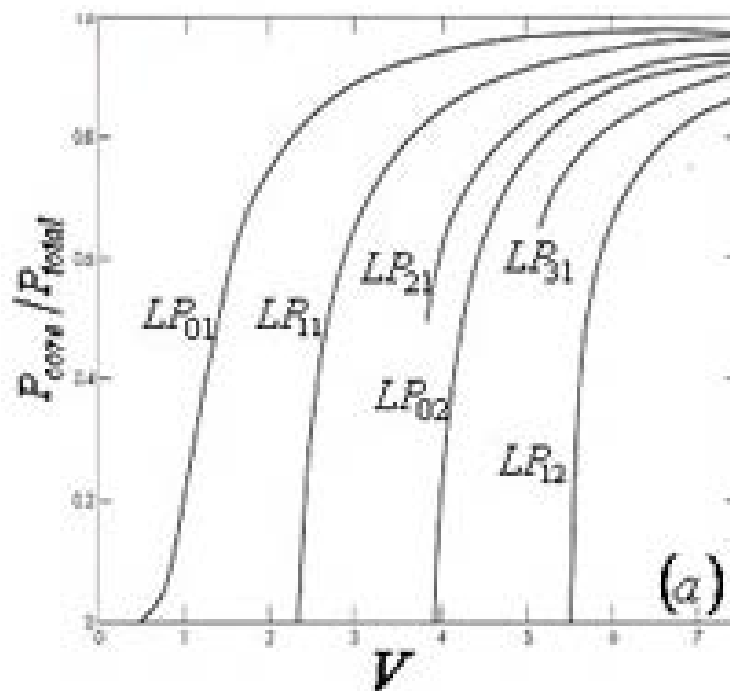


Figure 8.1-4 Cylindrical coordinate system.

where the complex amplitude $U = U(r, \phi, z)$ represents any of the Cartesian components of the electric or magnetic fields or the axial components E_z and H_z in cylindrical coordinates.

Ecuación de autovalores de la fibra óptica

Si $\Delta \ll 1$: Modos linealmente polarizados de la fibra, modos LP_{mn}



Número de modos soportados por la fibra

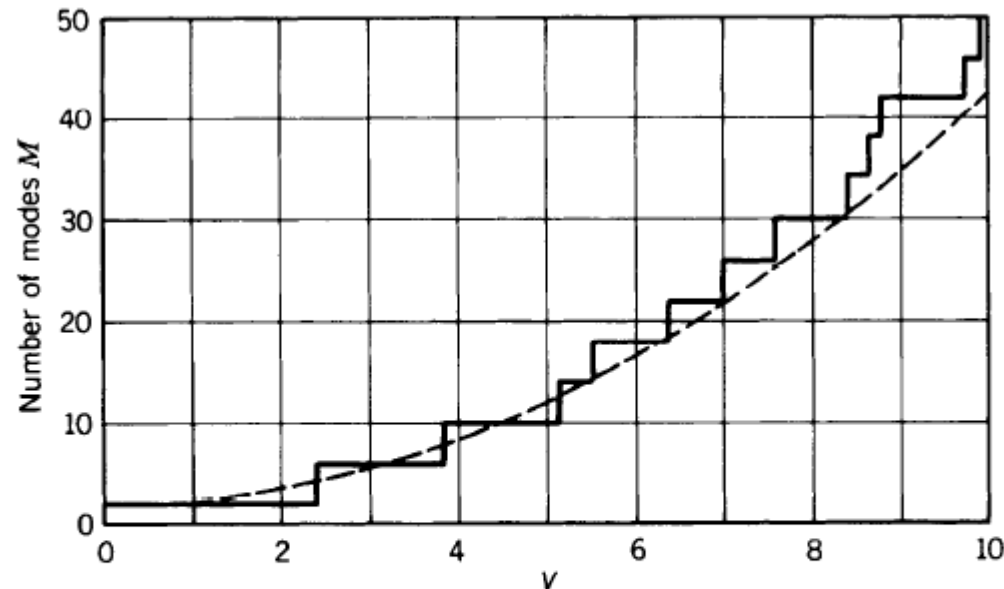
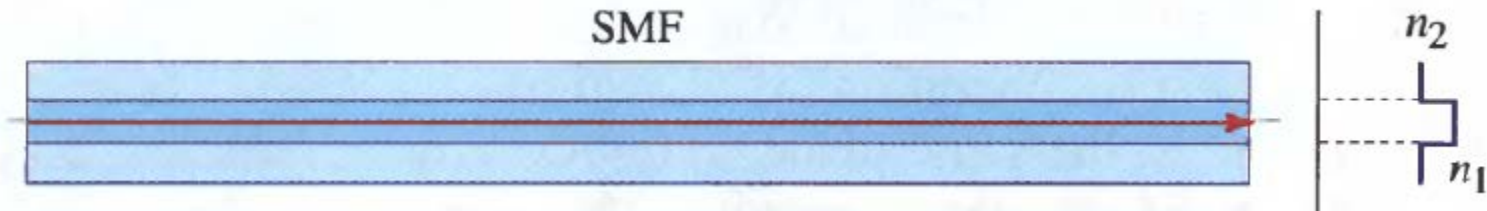
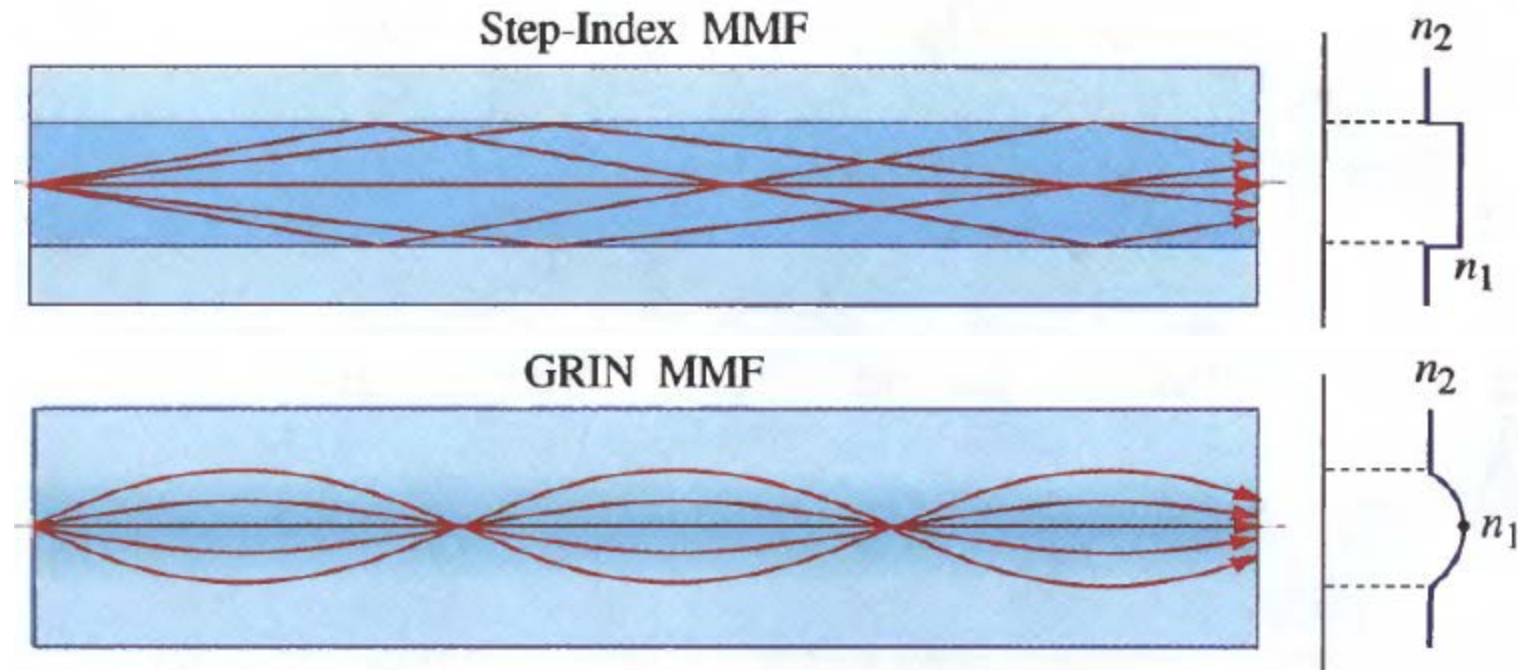


Figure 8.1-8 Total number of modes M versus the fiber parameter $V = 2\pi(a/\lambda_0)NA$. Included in the count are two helical polarities for each mode with $l > 0$ and two polarizations per mode. For $V < 2.405$, there is only one mode, the fundamental LP_{01} mode with two polarizations. The dashed curve is the relation $M = 4V^2/\pi^2 + 2$, which provides an approximate formula for the number of modes when $V \gg 1$.

Si el diámetro del core es suficientemente pequeño solo puede viajar un modo por la fibra: **FIBRA MONOMODO**



Si viajan más de un modo: **FIBRA MULTIMODO**

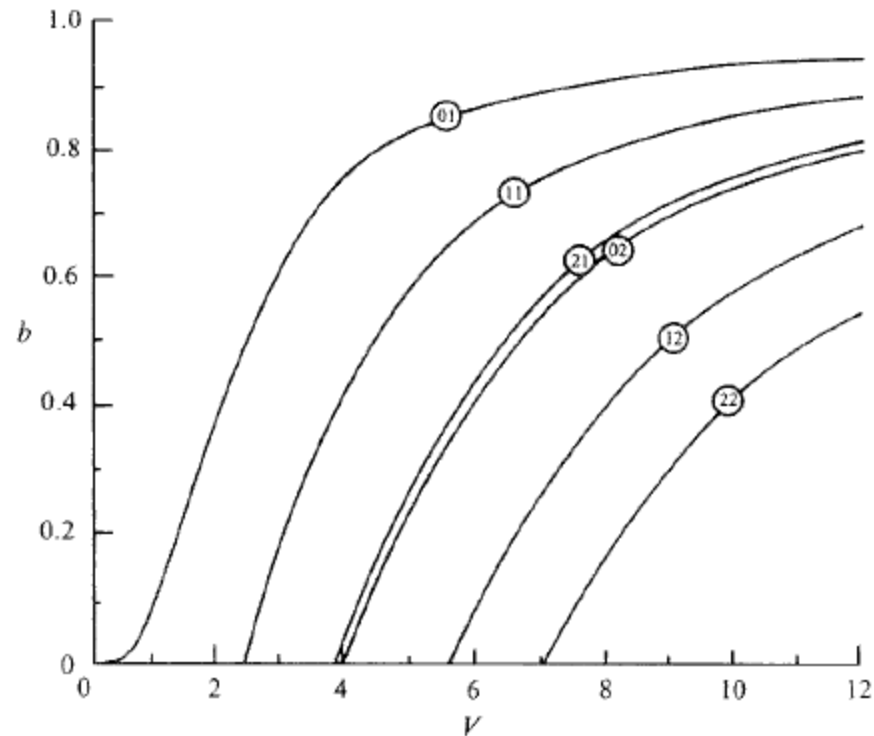


Cada modo viaja con una velocidad de grupo diferente

Variation of the normalized propagation constant b with normalized frequency V for a step index fiber corresponding to some low-order modes.

$$b = \frac{\beta_{mn}^2 - k_0^2 n_2^2}{k_0^2 (n_1^2 - n_2^2)}$$

$$\beta_{mn} = \sqrt{n_2^2 k_0^2 + b k_0^2 (n_1^2 - n_2^2)}$$



$$U \propto e^{i(\beta_{mn}z - \omega t)}$$

$$v_{mn} = \frac{1}{\frac{d\beta_{mn}}{d\omega}}$$

2.1.3.- Atenuación en la fibra

Atenuación en el material: El cristal de sílice es muy transparente

La potencia disminuye exponencialmente con la distancia, L , debido a:

absorción
scattering

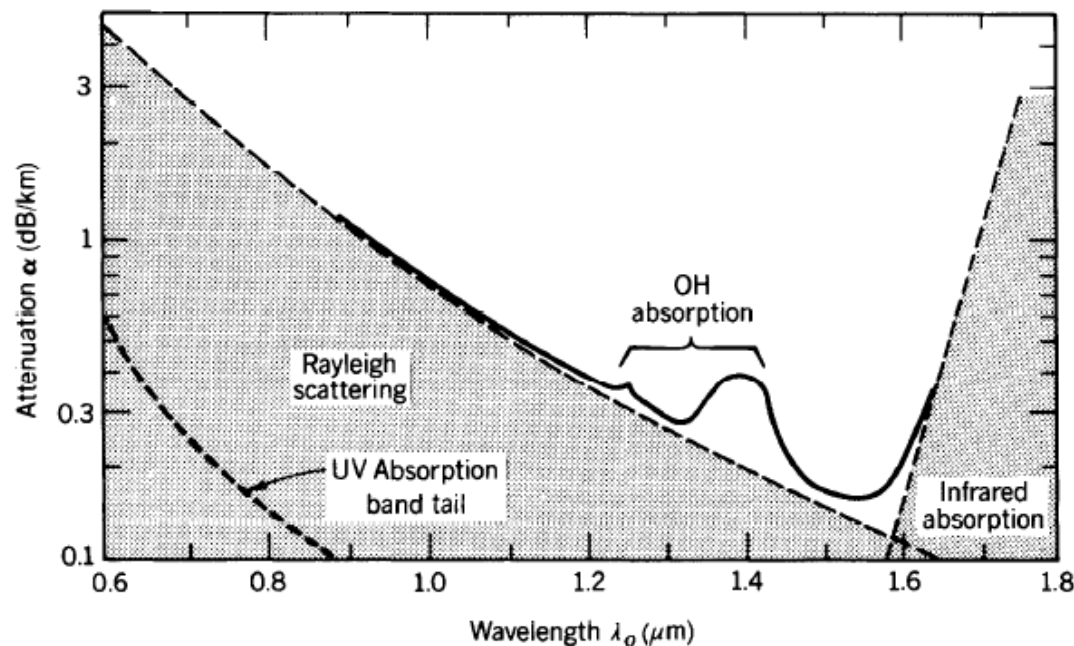


Figure 8.3-2 Dependence of the attenuation coefficient α of silica glass on the wavelength λ_0 . There is a local minimum at 1.3 μm ($\alpha \approx 0.3$ dB/km) and an absolute minimum at 1.55 μm ($\alpha \approx 0.16$ dB/km).

$$P(L) = P(0) 10^{-\alpha L/10},$$

$P(0)$ potencia incidente,

$P(L)$ potencia transmitida después de longitud L

Coeficiente de atenuación,

$$\alpha = \frac{1}{L} 10 \log_{10} \frac{P(0)}{P(L)}$$

Atenuación en la fibra

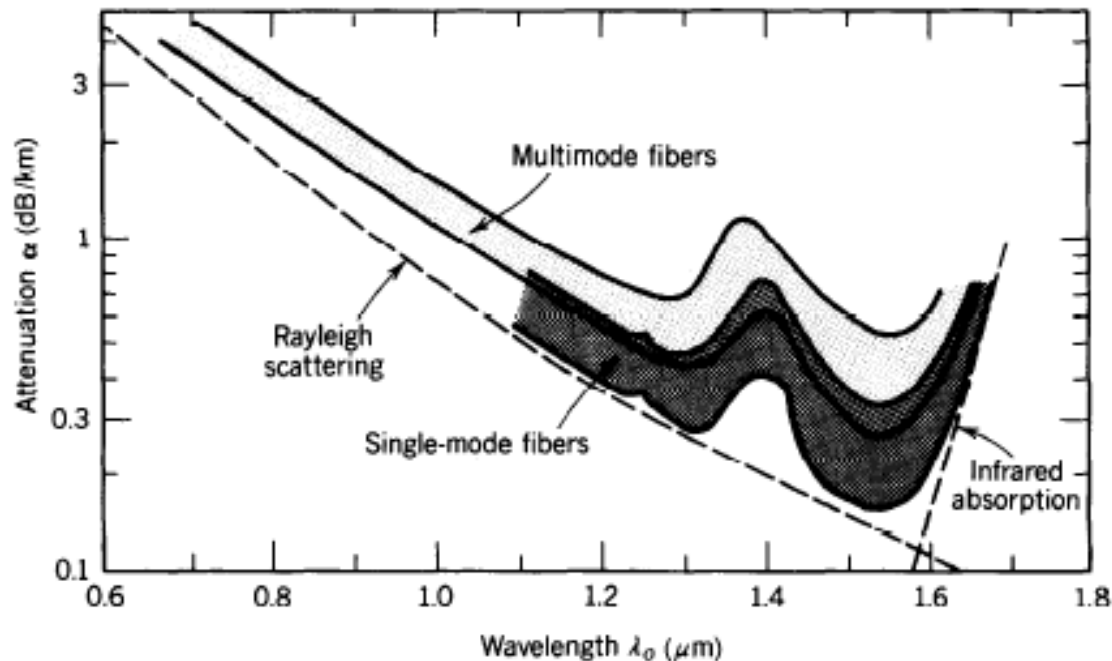


Figure 8.3-3 Ranges of attenuation coefficients of silica glass single-mode and multimode fibers.

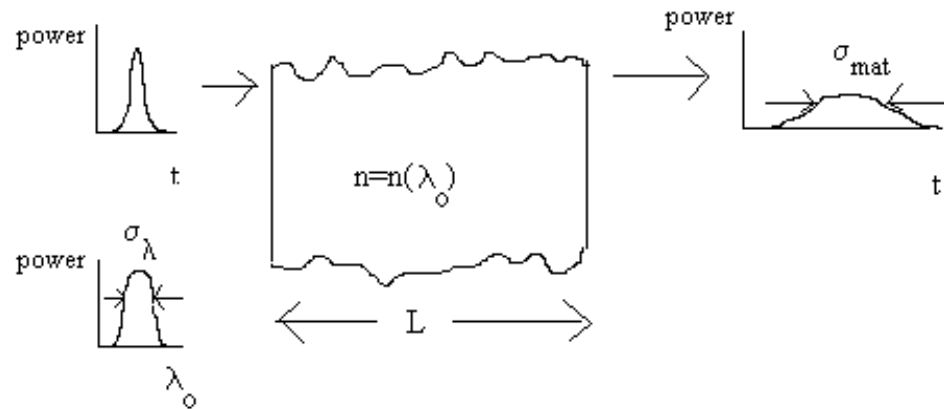
Por 1 km de fibra se transmite el 96.4 % de la luz incidente ($\lambda=1550$ nm)

2.1.4.- Dispersión en la fibra

Dispersión en la fibra: los pulsos de luz se ensanchan al viajar por la fibra.

Dispersión material, $n=n(\lambda_0)$

Aparece en cualquier tipo de fibra



Un pulso óptico viaja por el medio con velocidad de grupo:
$$v_g = \frac{c_0}{n(\lambda_0) - \lambda_0 \frac{dn}{d\lambda_0}}$$

Como el pulso tiene componentes espectrales de distintas λ_0 , cada una viaja con v_g diferente \longrightarrow el ancho del pulso aumenta

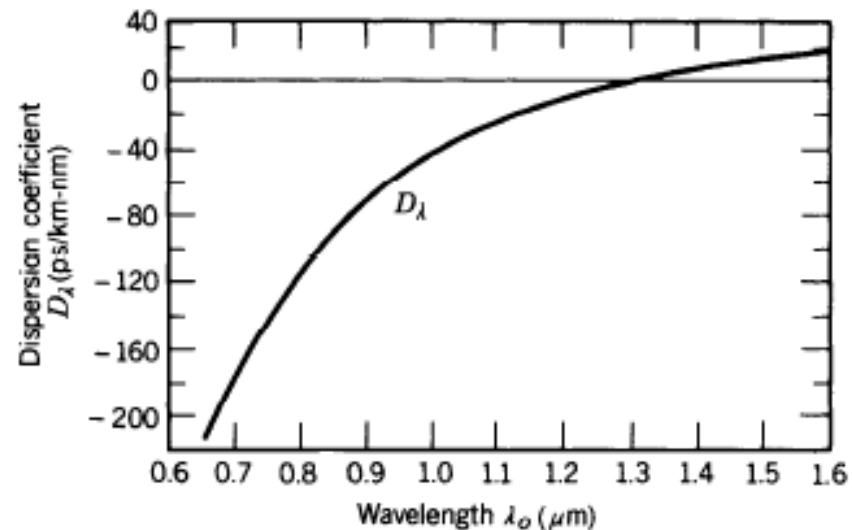
La componente espectral λ_0 tarda en atravesar la fibra: $\tau(\lambda_0)=L/v_g(\lambda_0)$

$$\tau = \tau(\lambda_0) \rightarrow \sigma_\tau = \left| \frac{d\tau}{d\lambda_0} \right| \sigma_\lambda$$

$$\sigma_\tau = \left| \frac{d}{d\lambda_0} \left(\frac{L}{v_g} \right) \right| \sigma_\lambda = \left| \frac{d}{d\lambda_0} \left(\frac{L \left(n(\lambda_0) - \lambda_0 \frac{dn}{d\lambda_0} \right)}{c_0} \right) \right| \sigma_\lambda = \left| -\frac{\lambda_0}{c_0} \frac{d^2 n}{d\lambda_0^2} \right| \sigma_\lambda L$$

$$\sigma_\tau = \sigma_{mat} = |D_\lambda| \sigma_\lambda L$$

$$D_\lambda = -\frac{\lambda_0}{c_0} \frac{d^2 n}{d\lambda_0^2}$$



The dispersion coefficient D_λ of silica glass as a function of wavelength λ_c

Fibra multimodo: cada modo viaja con velocidad de grupo distinta:

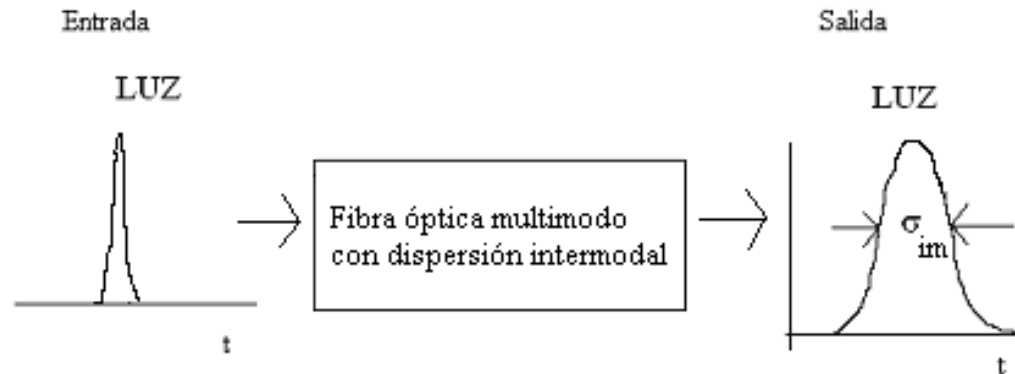
Dispersión intermodal

El tiempo que tarda cada modo en atravesar la fibra es diferente

El pulso óptico (en el que participan todos los modos) se ensancha al viajar por la fibra.

La dispersión intermodal se caracteriza por el coeficiente de dispersión intermodal,

D_{im} dado por $D_{im} = \sigma_{im} / L$, donde σ_{im} es el ancho temporal (r.m.s) a la salida de la fibra que corresponde a un pulso estrecho de luz a la entrada de la fibra.



Ensanchamiento de un pulso estrecho debido a la dispersión intermodal

Más dispersión: guía de ondas, polarización, no lineal (solitones en fibra).

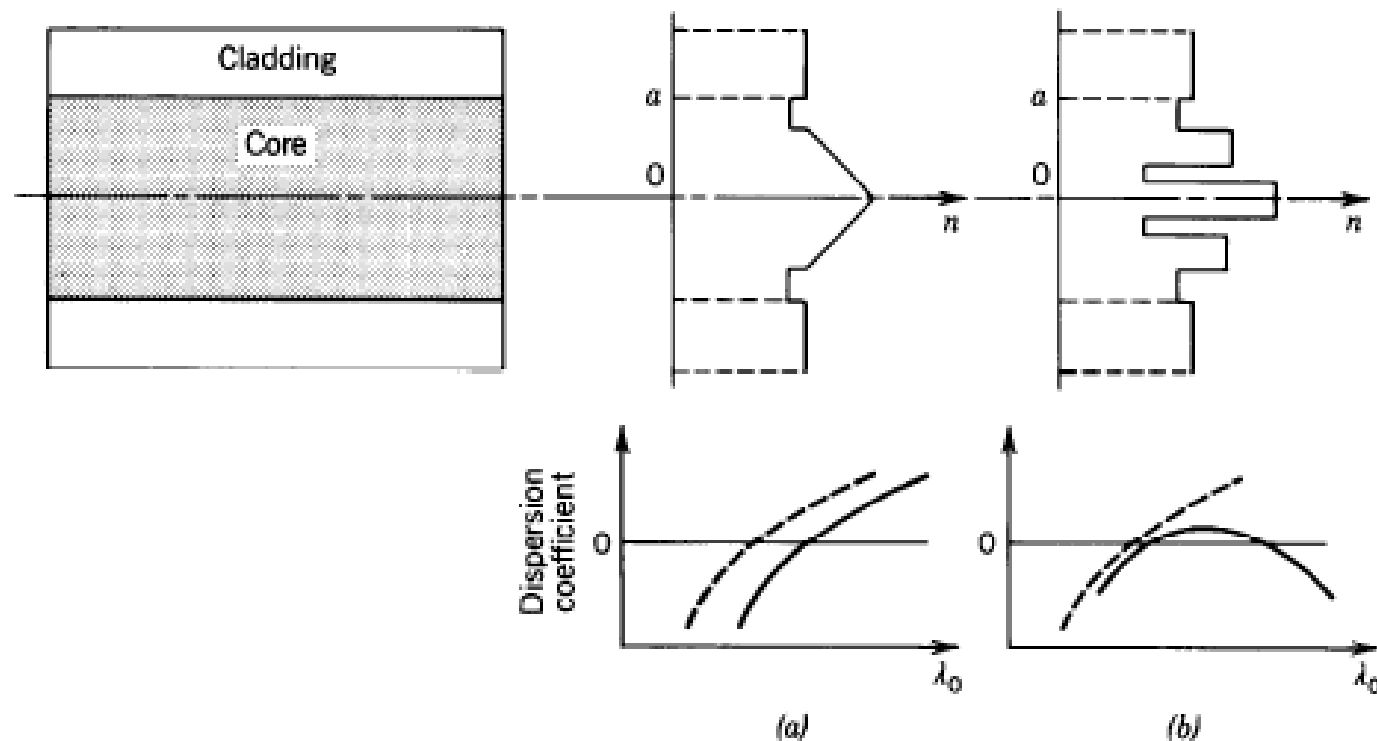
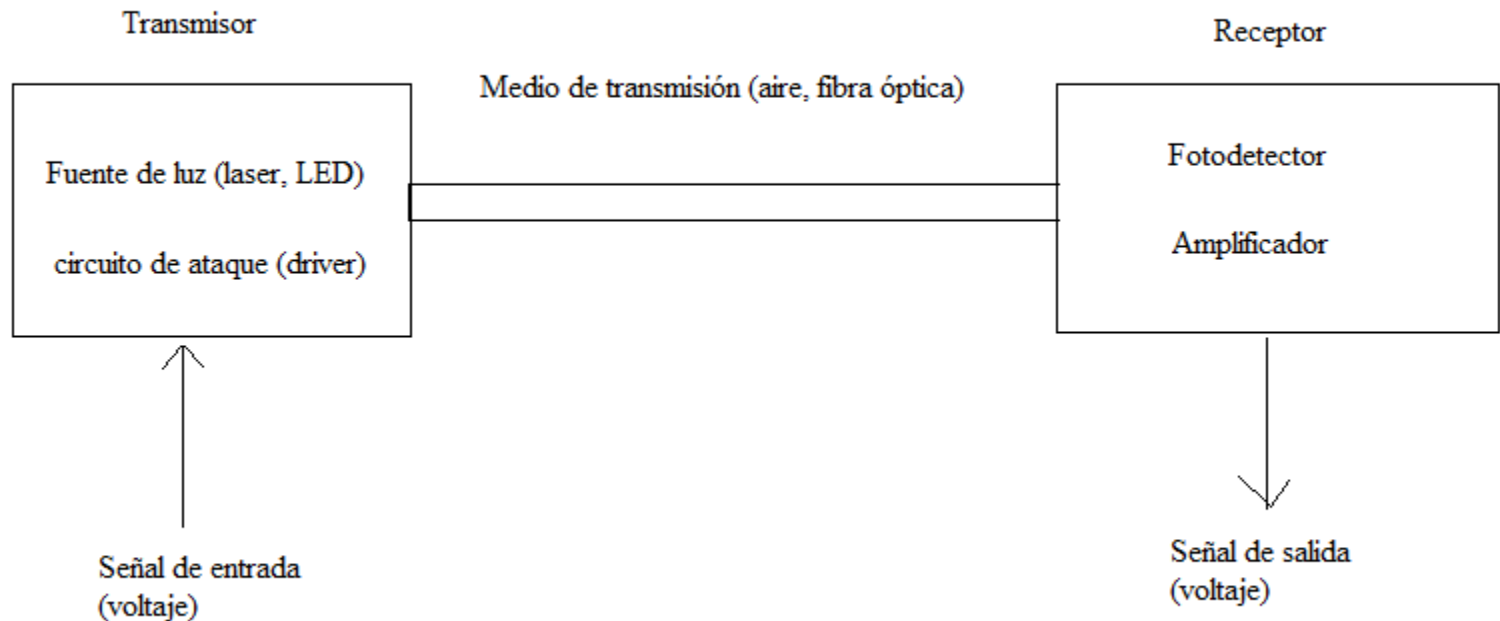


Figure 8.3-6 Refractive-index profiles and schematic wavelength dependences of the material dispersion coefficient (dashed curves) and the combined material and waveguide dispersion coefficients (solid curves) for (a) dispersion-shifted and (b) dispersion-flattened fibers.

Sistema de Comunicaciones ópticas



Sistema de comunicaciones ópticas

2.2 Modulación analógica y digital

Para transmitir información hay que **modular** la luz emitida por una fuente

Hay dos esquemas de modulación: analógica y digital

Modulación analógica: variación continua de la señal transmitida

Modulación digital: señal transmitida formada por pulsos (bits “1”) o ausencia de pulsos (bits “0”): 2 valores de la señal

Onda portadora: la onda óptica a la que se aplica la modulación

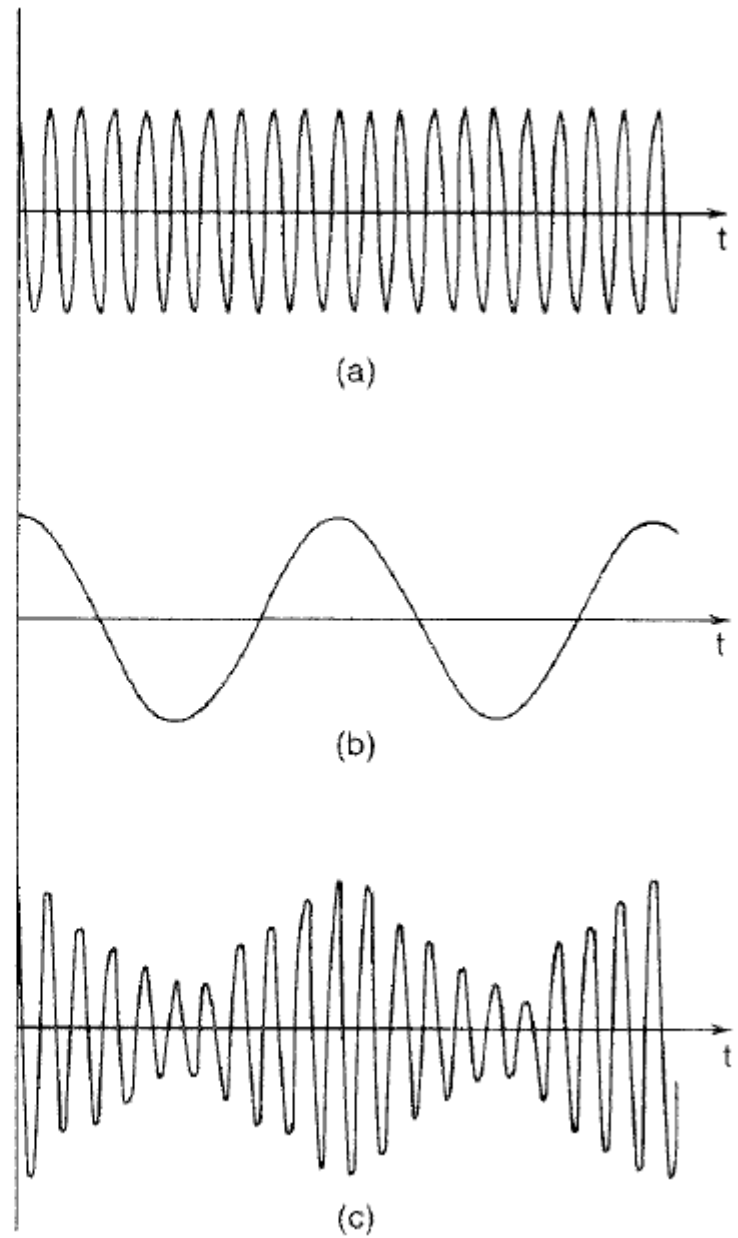
Formas usuales de modulación:

1.- **Modulación en amplitud (AM)** : es analógica.

La amplitud de la onda portadora se hace proporcional a la amplitud de la señal (información)

Fig. 13.2: When the carrier wave shown in (a) is amplitude modulated by the modulating wave shown in (b), one obtains an amplitude-modulated wave as shown in (c).

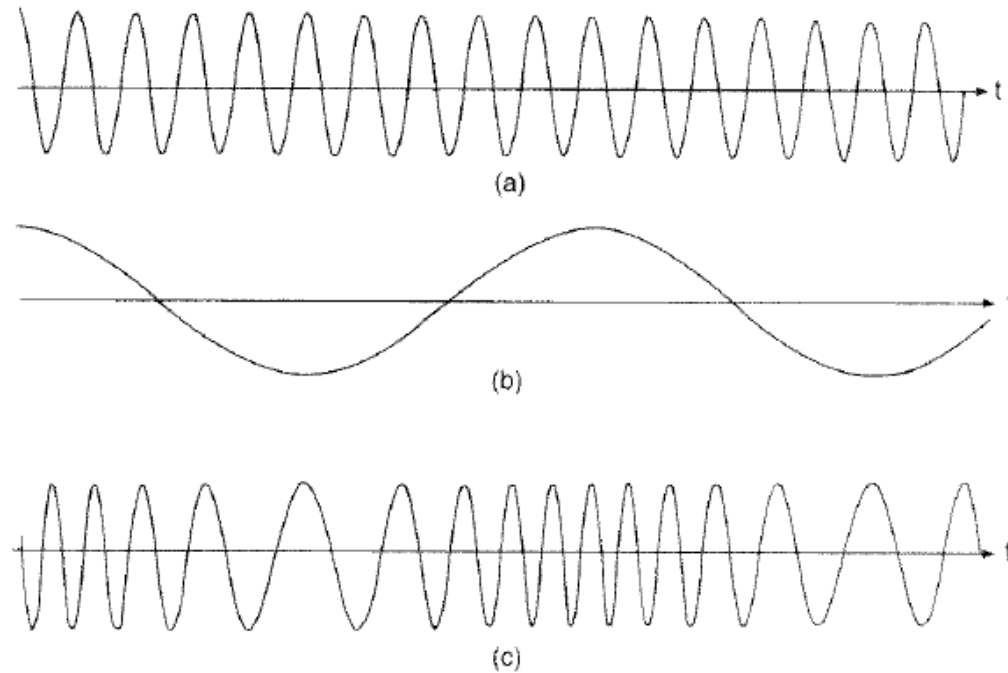
Modulación AM



Modulación en frecuencia (FM) : es analógica.

La frecuencia de la onda portadora cambia dependiendo de la amplitud de la señal (información)

Fig. 13.3: When the carrier wave shown in (a) is frequency modulated by the modulating wave shown in (b), one obtains a frequency-modulated wave as shown in (c).



Modulación codificada en pulsos (PCM) : es digital. La más usada.

PCM convierte una señal analógica en pulsos digitales

La señal se convierte en una serie de números.

El valor de cada número corresponde a la amplitud de la señal en un tiempo de muestreo

Ejemplo: sea la señal $f(t) = 15[4 + \sin \omega_0 t + \sin(1.5\omega_0 t) + \cos(2\omega_0 t) + \cos(3\omega_0 t) + \sin(4\omega_0 t)]$ (13.1)

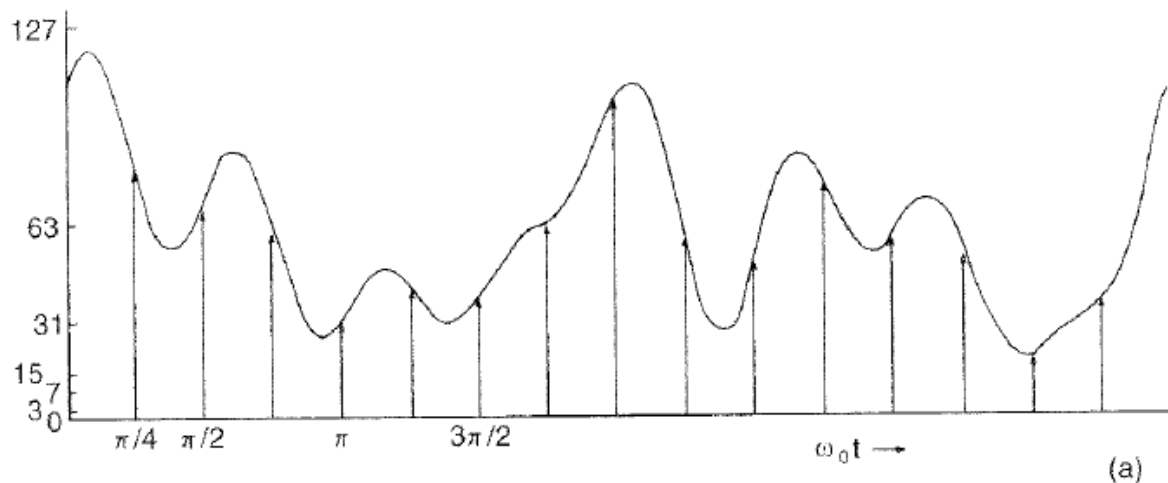


Fig. 13.4: (a) The figure shows a time-varying signal given by equation (13.1), whose maximum frequency component ν_m is $4\omega_0/2\pi$.

Hence, by the sampling theorem, the signal can be completely determined by sampling the signal at time intervals of $1/2\nu_m = \pi/4\omega_0$, which is shown as vertical lines.

Teorema del muestreo

una señal que no tiene componentes en frecuencia mayores que ν_m se puede reconstruir completamente a partir de sus valores muestreados en tiempos separados por un valor $\leq 1/(2\nu_m)$

Ejemplo: hay que muestrear como mucho cada $1/(2(4\omega_0/(2\pi))) = \pi/(4\omega_0)$ sec.

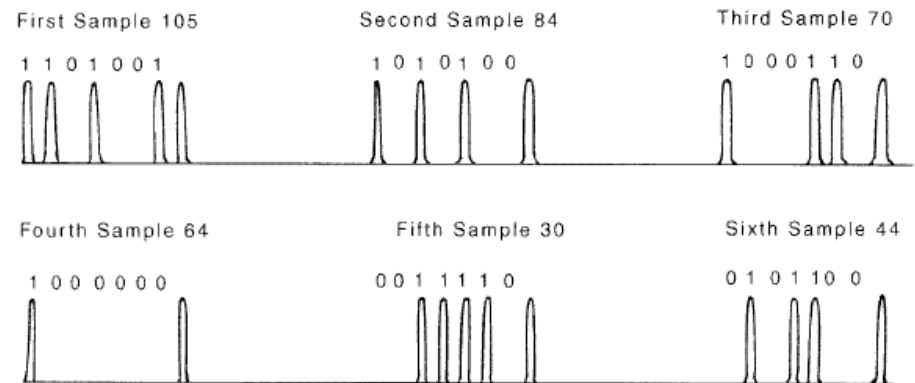
La señal original se aproxima por una nueva obtenida de la anterior **cuantizando**

El valor cuantizado se convierte al **código binario**: “1”=pulso, “0”=ausencia de pulso

Ejemplo: 2^7 niveles \rightarrow longitud de codificado de 7 bits

Time, t	Signal Value	Binary Equivalent in Seven Levels	Pulse Code Waveform
0	105	1101001	
$\frac{\pi}{4\omega_0}$	84	1010100	
$\frac{\pi}{2\omega_0}$	70	1000110	
$\frac{3\pi}{4\omega_0}$	64	1000000	
$\frac{\pi}{\omega_0}$	30	0011110	
$\frac{5\pi}{\omega_0}$	44	0101100	

	Remainder	
2 105	1	The binary equivalent of 105 is formed by successively dividing by 2, then listing the final quotient and the remainders from bottom up. Hence, the binary equivalent of 105 is 1101001.
2 52	0	
2 26	0	
2 13	1	
2 6	0	
2 3	1	
2 1	1	



El octavo bit es siempre un “1”

Hay dos técnicas para representar el tren de pulsos digital:

NRZ, formato de no regreso a cero: duración del pulso = duración del periodo del bit, T

RZ, formato de regreso a cero: duración del pulso $< T$

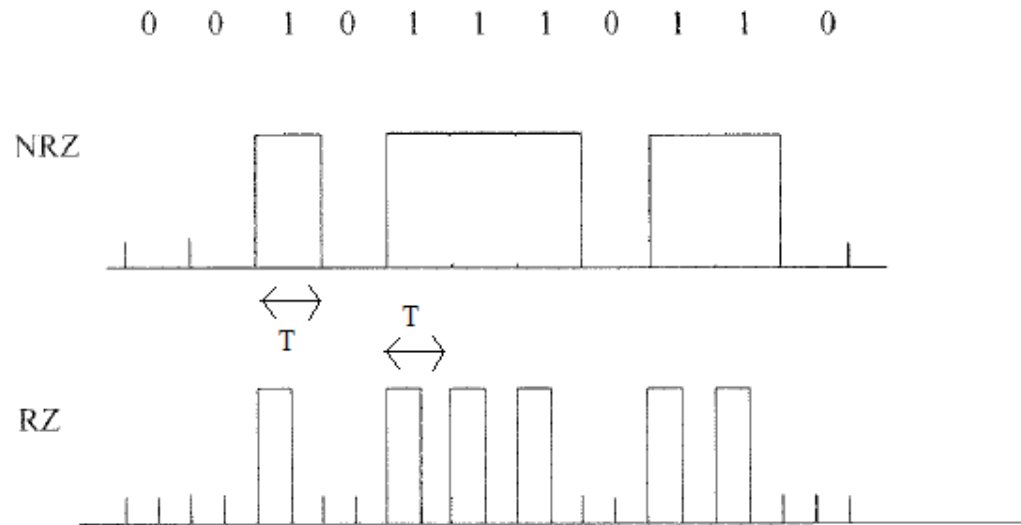


Fig. 13.7: The digital pulse sequence of 00101110110 in NRZ and RZ formats.

Fijada una velocidad de bits, $B=1/T$,
ancho de pulsos $RZ < \text{ancho pulsos NRZ}$,
tiempos de subida $RZ < \text{tiempos de subida NRZ}$
ancho de banda $RZ > \text{ancho de banda NRZ}$

2.3 Funcionamiento de un sistema de comunicaciones ópticas

En un receptor se muestrean los pulsos ópticos a una velocidad igual a la velocidad de bits, B

En cada muestra se decide si el bit es un “1” o un “0”

Decisión: se fija un nivel umbral
si la señal en el tiempo de muestreo $>$ umbral: bit “1”
si la señal en el tiempo de muestreo $<$ umbral: bit “0”

Los pulsos se han de muestrear a la velocidad correcta: los pulsos de reloj necesarios para decidir se extraen del tren de pulsos que llega al receptor

Factible si el tren de pulsos ha de tener suficiente energía a la frecuencia B

Aun así, la señal que se recupera en el receptor no es siempre la misma que se ha enviado por el transmisor

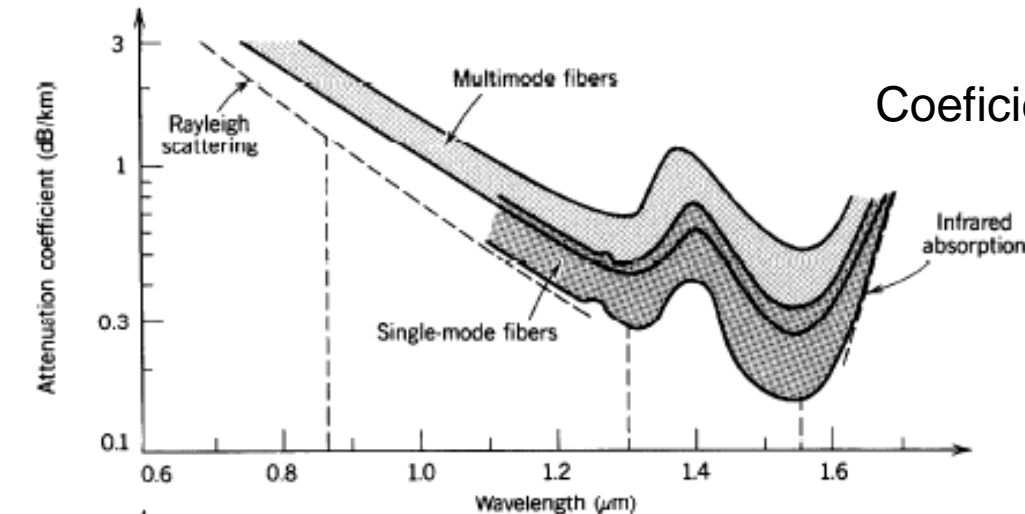


ERRORES

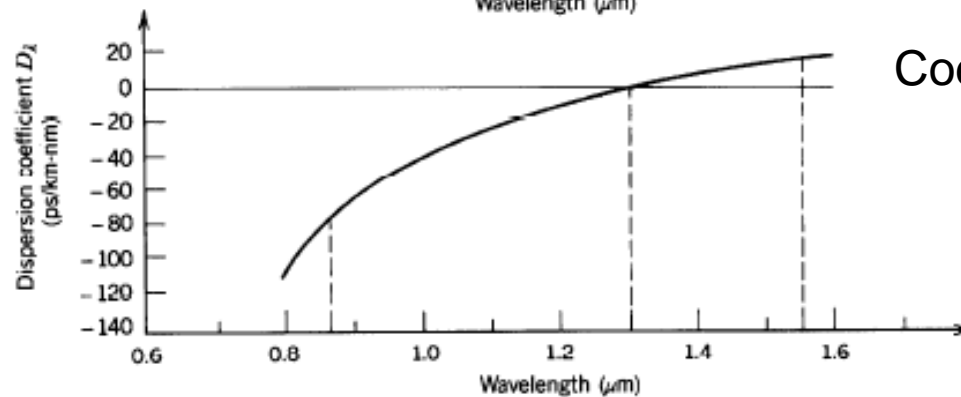
La señal se atenúa y se dispersa en la fibra

La señal que llega al receptor es más débil

Las subidas y bajadas de los pulsos cuadrados que salen del transmisor se redondean



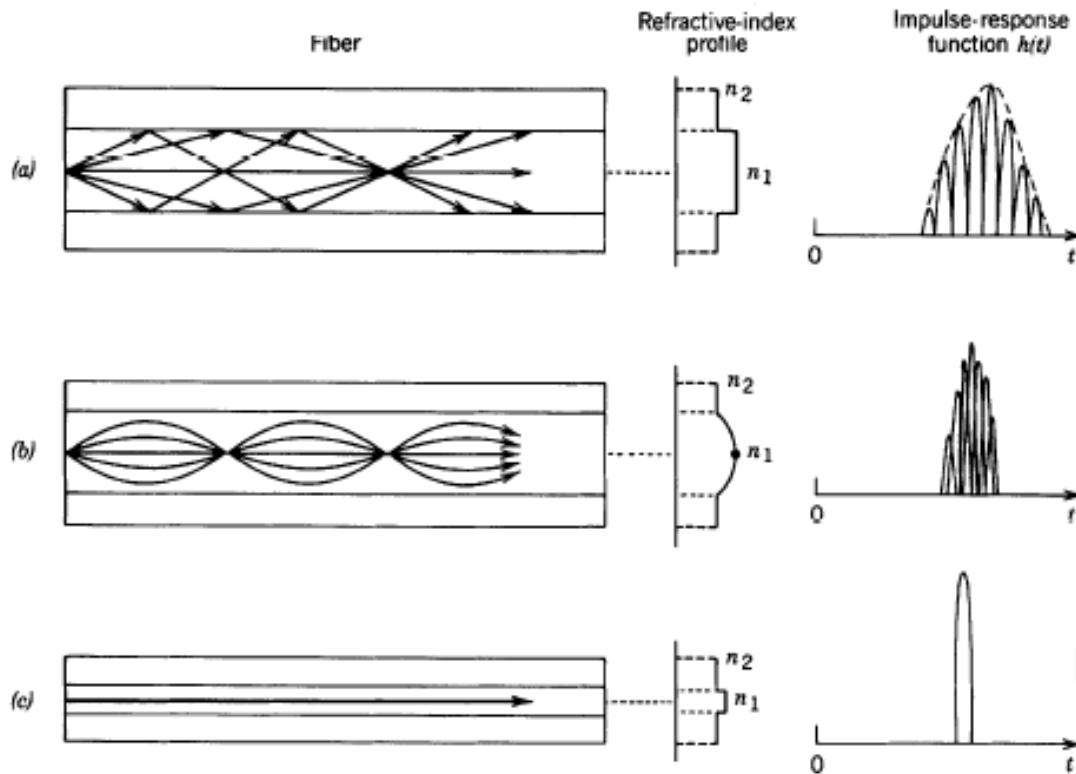
Coefficiente de Atenuación



Coefficiente de Dispersión material

Figure 22.1-2 Wavelength dependence of the attenuation and material dispersion coefficients of silica-glass fibers, indicating three wavelengths at which fiber-optic communication systems typically operate: 0.87, 1.3, and 1.55 μm.

Dispersión intermodal



Grande en fibra multimodo de salto de índice

Reducida en fibra multimodo de índice gradual

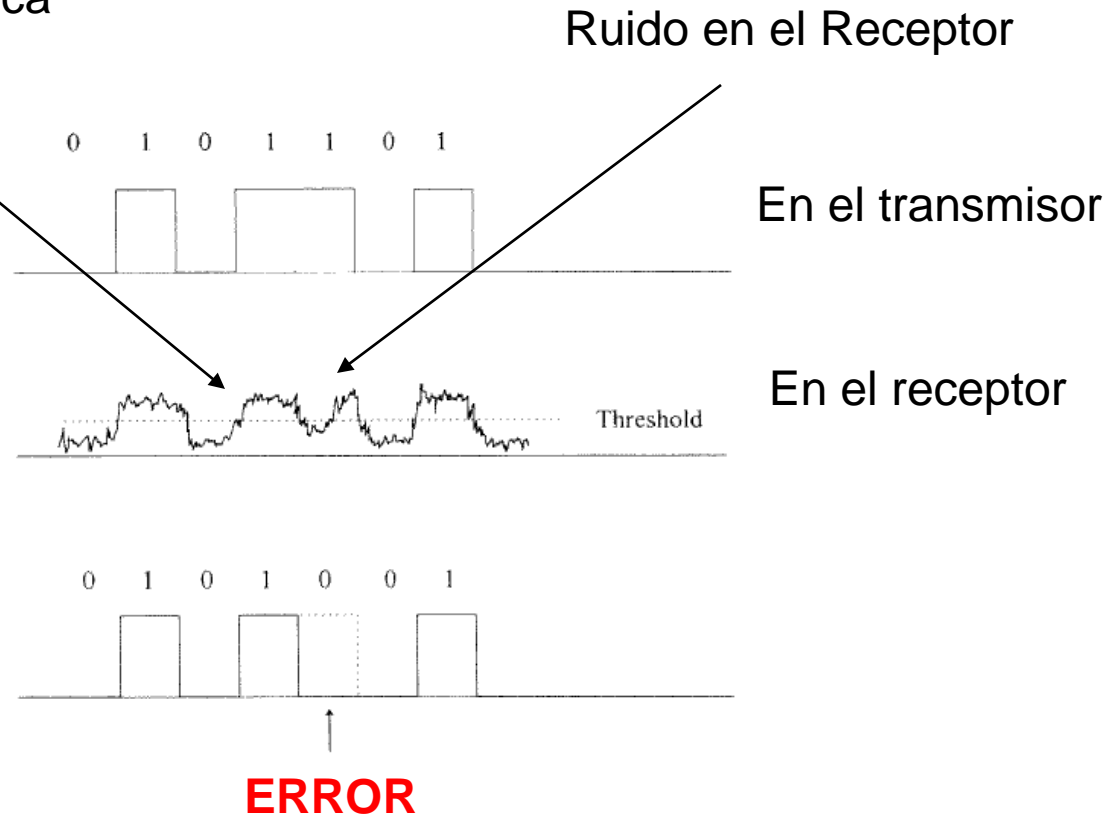
No aparece en fibra monomodo

Figure 22.1-1 (a) Multimode step-index fibers: relatively large core diameter; uniform refractive indices in the core and cladding; large pulse spreading due to modal dispersion. (b) Graded-index fibers: refractive index of the core is graded; there are fewer modes; pulse broadening due to modal dispersion is reduced. (c) Single-mode fibers: small core diameter; no modal dispersion; pulse broadening is due only to material and waveguide dispersion.

Dispersión en la fibra óptica

Fig. 13.11: The transmitted pulse sequence 0101101, the received signal corrupted by noise and dispersion, and the reformed pulse sequence.

Note that due to the presence of noise, one bit has been read incorrectly.



El funcionamiento o la calidad de un sistema de comunicaciones digitales está especificada por el BER (bit error rate o tasa de error) o probabilidad de que se lea incorrectamente un bit

$$BER = \frac{\text{bits leídos erróneamente en un tiempo } \tau}{\text{bits recibidos en un tiempo } \tau}$$

Valores típicos de BER: 10^{-9} , 10^{-12} , 10^{-15} .

La intensidad de la corriente en el circuito del receptor, i , tiene fluctuaciones alrededor de su valor medio, \bar{i}

Intensidad de esas fluctuaciones: desviación típica de esa corriente, σ_i

El ruido en el receptor viene caracterizado por el cociente señal ruido, SNR

$$SNR = \frac{\bar{i}^2}{\sigma_i^2}$$

Cuanto menor sea el SNR, mayor es el efecto del ruido, mayor es el BER.

La medida directa del BER es costosa en tiempo y en equipamiento.

¿Cuál es la relación entre el BER y el SNR (fácil de medir)?

Teorema de la probabilidad total

$$\text{Prob(error)} = \text{Prob(error | se recibe "1")} \text{Prob(recibir "1")} + \text{Prob(error | se recibe "0")} \text{Prob(recibir "0")}$$

$\text{BER} = P(0 | 1) P(1) + P(1 | 0) P(0)$

$P(0|1)$: prob de decidir "0" si se recibe "1"

$P(1|0)$: prob de decidir "1" si se recibe "0" ; $P(0)=P(1)=1/2$

Umbral de decisión

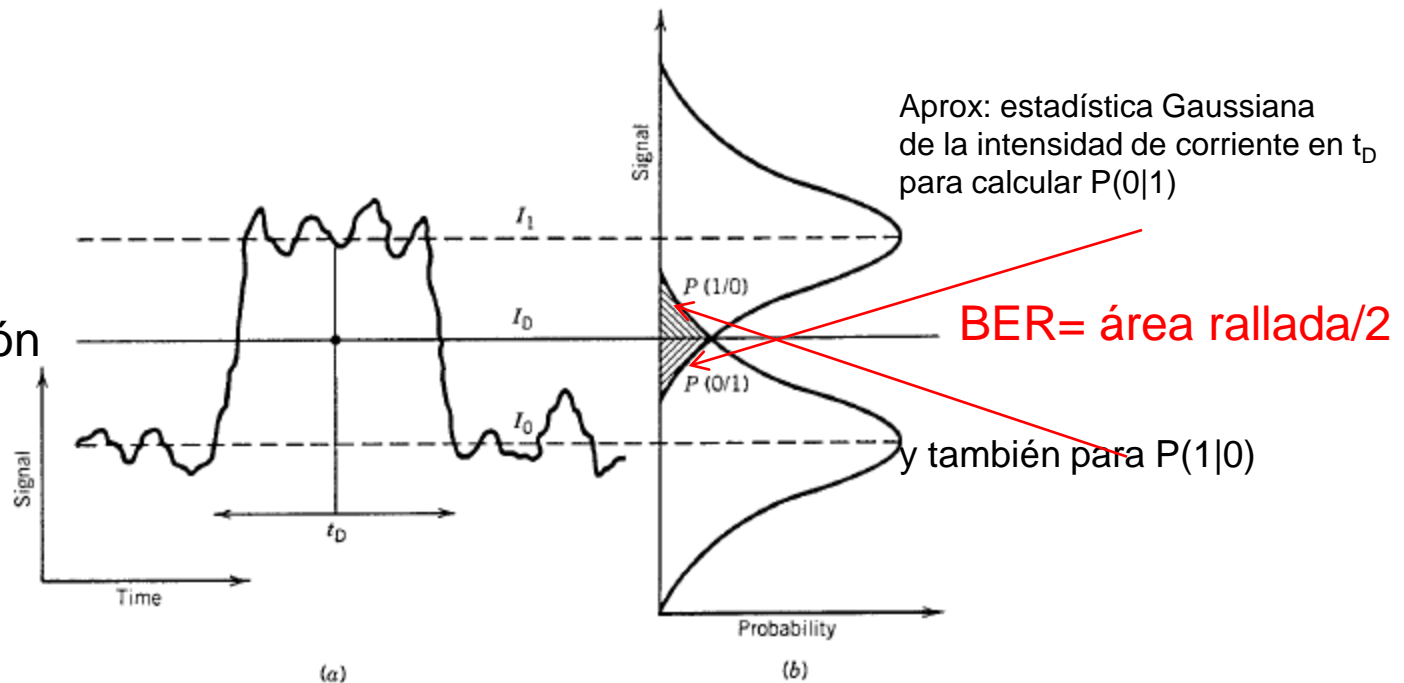


Figure 4.18: (a) Fluctuating signal generated at the receiver. (b) Gaussian probability densities of 1 and 0 bits. The dashed region shows the probability of incorrect identification.

$$\text{BER} = (P(0 | 1) + P(1 | 0)) / 2$$

$$P(0 | 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \int_{-\infty}^{I_D} \exp\left(-\frac{(I - I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) dI = \frac{1}{2} \left(1 - \text{erf}\left(\frac{I_1 - I_D}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)\right)$$

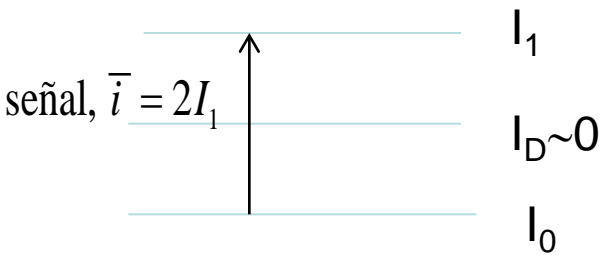
$$P(1 | 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \int_{I_D}^{\infty} \exp\left(-\frac{(I - I_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) dI = \frac{1}{2} \left(1 - \text{erf}\left(\frac{I_D - I_0}{\sqrt{2}\sigma_0}\right)\right)$$

donde $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$

$$\text{BER} = \frac{1}{4} \left(2 - \text{erf}\left(\frac{I_1 - I_D}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \text{erf}\left(\frac{I_D - I_0}{\sqrt{2}\sigma_0}\right) \right) = \frac{1}{4} \left(2 - 2\text{erf}\left(\frac{I_1 - I_D}{\sqrt{2}\sigma_i}\right) \right) = \frac{1}{2} \left(1 - \text{erf}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \right)$$

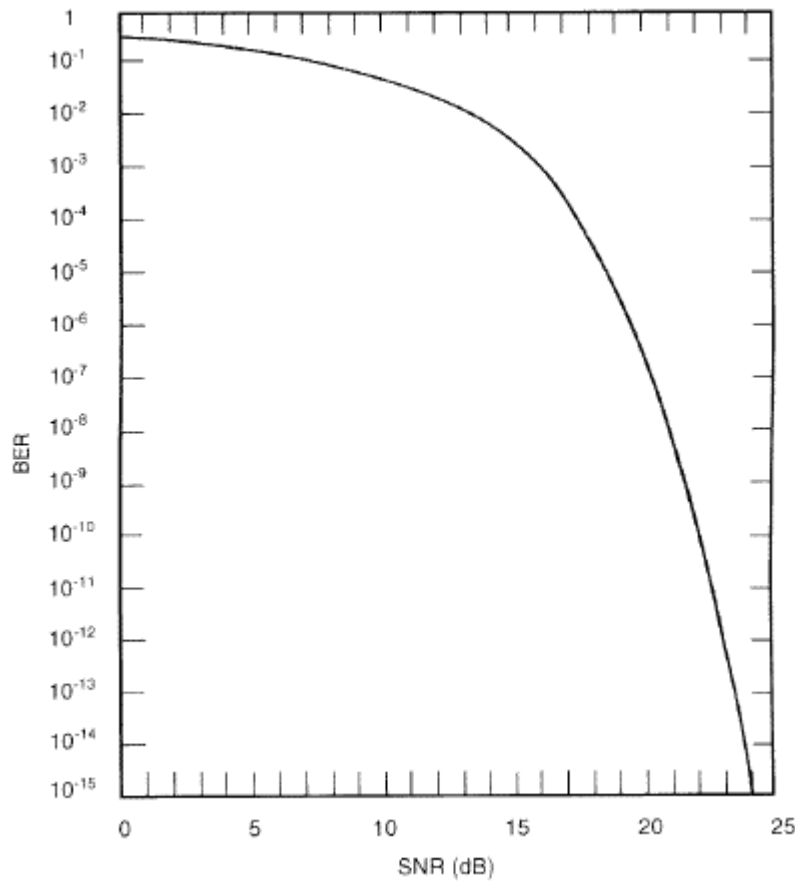
Tomando $I_1 - I_D = I_D - I_0$ y $\sigma_1 = \sigma_0 = \sigma_i$

Definimos $Q = \frac{I_1 - I_D}{\sigma_i}$



$$Q = \frac{I_1 - I_D}{\sigma_i} = \frac{I_1}{\sigma_i}$$

$$\sqrt{SNR} = \frac{\bar{i}}{\sigma_i} = \frac{2I_1}{\sigma_i} = 2Q$$



$$BER = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right)$$

$$BER = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{SNR}}{2\sqrt{2}} \right) \right)$$

Para que $BER=10^{-9}$, $SNR=144$

DIAGRAMA de OJO

Otra forma, más cualitativa, de valorar la calidad de un sistema de comunicaciones

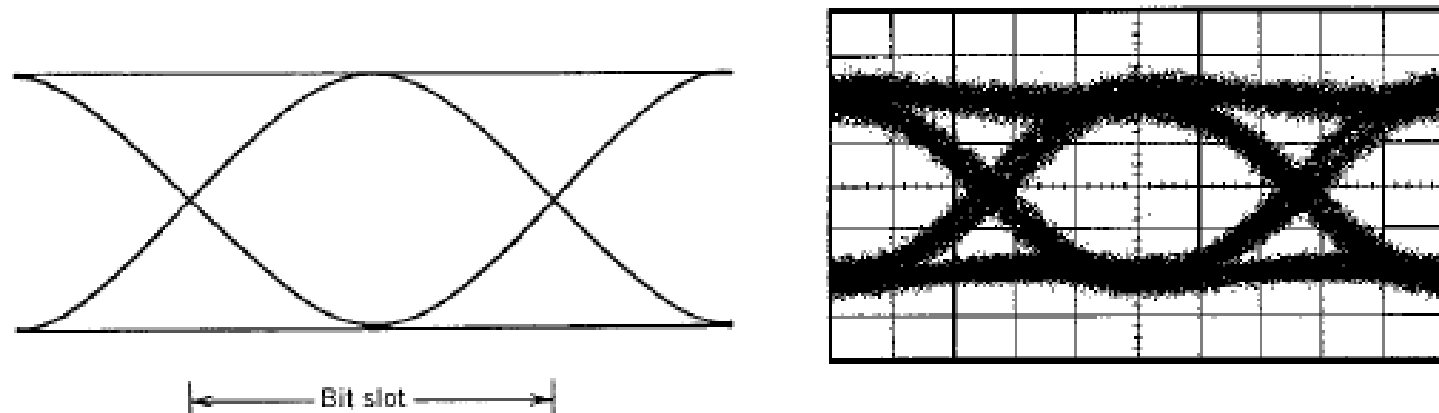


Figure 4.13: Ideal and degraded eye patterns for the NRZ format.

Bibliografía

- Fundamentals of Photonics, B.E.A. Saleh, Wiley Interscience.
- Fiber optic communication systems, G.P. Agrawal, Wiley Interscience.