

COMUNICACIONES OPTICAS

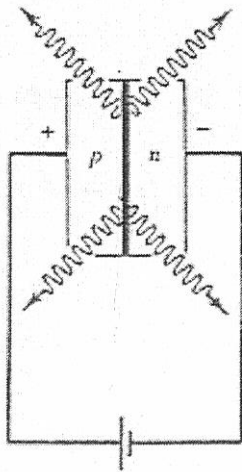
DIODOS EMISORES DE LUZ (LEDS)

Universidad Autónoma de Baja California UABC
FACULTAD DE INGENIERIA ENSENADA
Dr. Horacio Luis Martínez Reyes

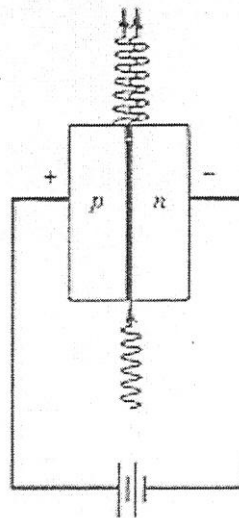
FUENTES DE LUZ PARA COMUNICACIONES OPTICAS

LED y LASER basados en heterouniones de semiconductores de gap directo

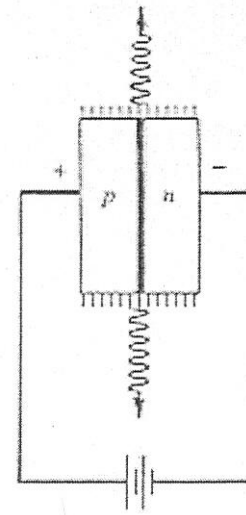
Ventajas: pequeño tamaño, bajo consumo, gran fiabilidad con los cambios de temperatura, alta emisión de potencia óptica, facilidad de acoplo a fibras ópticas, modulación de la potencia óptica a partir de la corriente eléctrica.



(a)



(b)

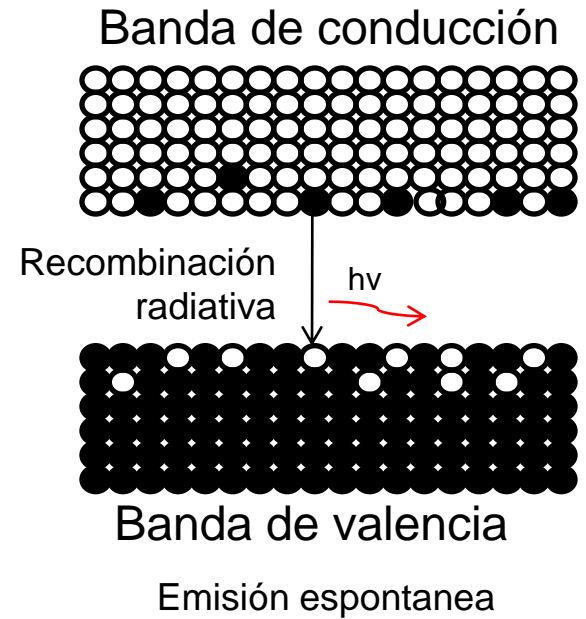


(c)

EMISION DE LUZ EN LEDs

La radiación se consigue inyectando huecos o electrones en una unión p-n con una fuerte polarización directa.

La ocupación inicial de las bandas se altera mediante la polarización externa del semiconductor, inyectando electrones en la parte inferior de la banda de conducción a través de un contacto resistivo o extrayéndolos de la parte superior de la banda de valencia, lo que equivale a inyectar huecos en esta última.



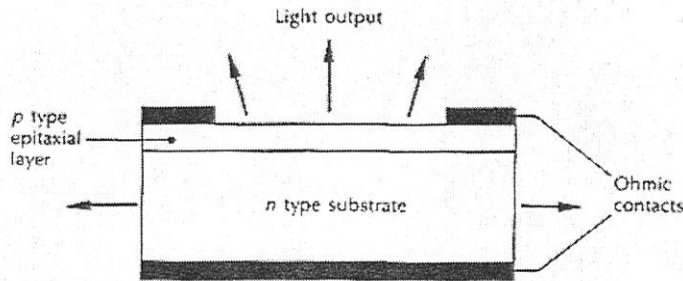
La corriente inyectada provoca la recombinación de huecos de la banda de valencia con electrones de la banda de conducción. Dicha recombinación causa la emisión de fotones con energía equivalente al salto energético E_g .

En los LEDs, la emisión es espontánea. Por lo que, las ondas emitidas no están en fase entre sí por ser un fenómeno aleatorio. Los fotones emitidos emergen en todas las direcciones posibles.

De esta forma, la potencia de salida es mucho menor que en un Laser, su anchura espectral es mayor, y están limitados a anchos de banda de algunos cientos de MHz.Km.

ESTRUCTURAS SENCILLAS DE LEDS

Son estructuras realizadas a base de homouniones p-n, con no muy buenas características de emisión (básicamente la radiancia).
Típicamente se aplican para los LEDs visibles utilizados en señalización.



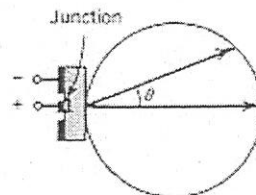
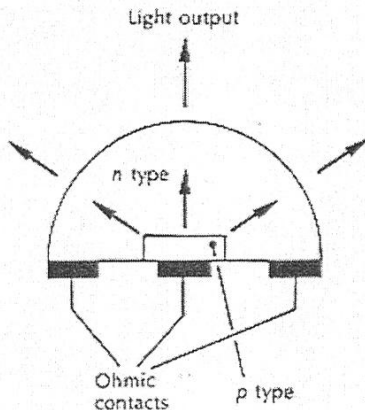
Se fabrican a partir de epitaxias en fase líquida o en fase vapor: difusión de una región de tipo p en un substrato de tipo n para crear la homom unión. Suelen emitir con emisión espontánea de tipo lambertiano

Radiancia: potencia emitida por unidad de área normal y unidad de ángulo sólido

$$L = \frac{I}{A_s \cos \theta} = \frac{\phi}{\Omega A_s \cos \theta} \quad \left(\frac{W}{m^2 sr} \right)$$

Emisión Lambertiana: radiancia constante, lo que implica que la intensidad radiante (potencia por unidad de ángulo sólido):

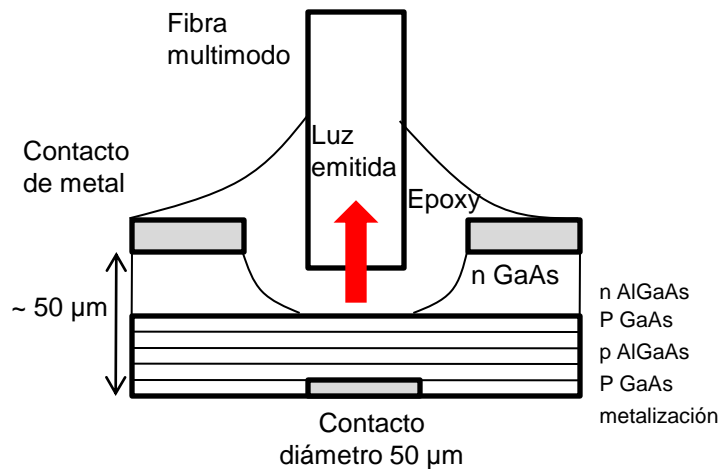
$$L_{cte} \Rightarrow I(\theta) = I(0) \cos \theta$$



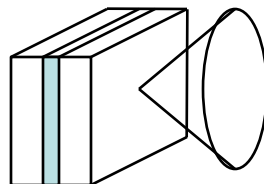
Para electroluminiscencia: $\phi = \eta_i \frac{I_{elec}}{e} h \nu$

EL LED DE EMISION SUPERFICIAL (SLED)

También denominado LED Burrus. Permiten un incremento en la radiancia disminuyendo el tamaño (lateral) de la región donde se produce la emisión. Se emplean estructuras de doble heterounión para conseguir una mayor eficiencia.



La disminución de la región de emisión se consigue alimentando solo una pequeña parte de la región de emisión, por lo que J (I_{elec}/A_s) aumenta, la superficie de emisión es menor y la radiancia aumenta



Esquema de emisión

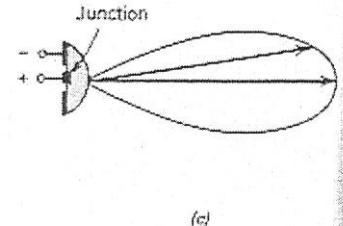
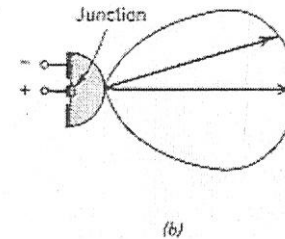
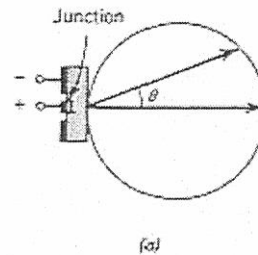
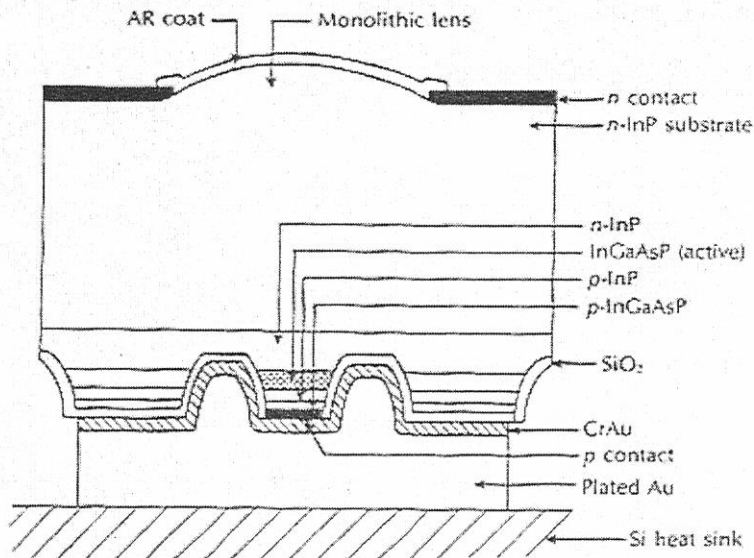
EL LED DE EMISION SUPERFICIAL (SLED)

Se puede aumentar la radiancia de la fuente si se disminuye el área de emisión, así, el valor de J será mas grande para una misma I_{elec} .

Con el SLED las áreas mas pequeñas para confinar la emisión son de alrededor de $25\text{ }\mu\text{m}$ de diámetro.

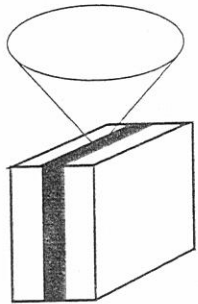
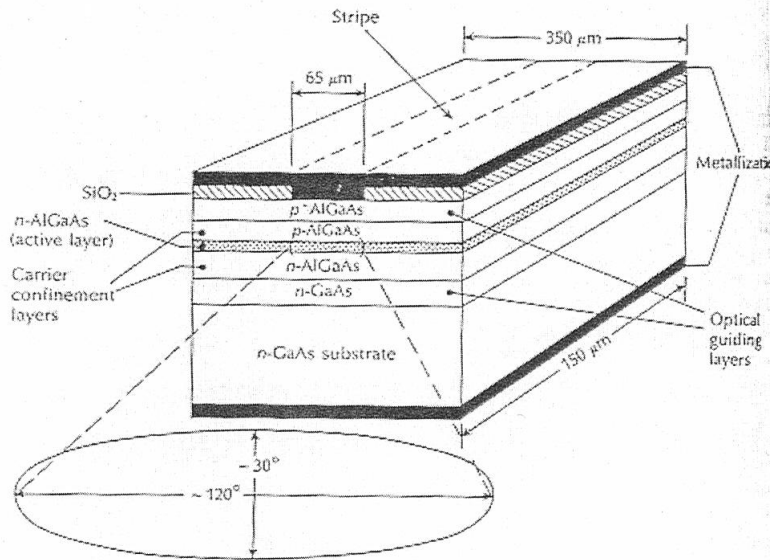
Para mejorar esto se proponen estructuras mas complejas (MESA).

Para mejorar el acoplo de luz a fibra hay que utilizar lentes, debido a que la emisión lambertiana es poco eficiente.



$$I(\theta) = I(0) \cos^m \theta$$

LED DE EMISION DE BORDE (ELED)



Esquema de emisión

La emisión es forzada a producirse por uno de los bordes (estructura similar al diodo láser). La zona activa tiene una anchura dada por la anchura del contacto (entre 50 y 100 μm). El espesor de la zona variable viene dado por el tamaño de la zona activa en la doble heteroestructura. Se puede reducir a la anchura del contacto para mejorar sus propiedades.

La zona activa se puede hacer muy pequeña para aumentar la radiancia de la fuente (eso no implica que emitan mas potencia que los SLED).

Los SLED son mejores con fibras de $AN > 0.3$, y los ELED para $AN < 0.3$.

Los ELED pueden ser modulados a mayores frecuencias y son mas caros que los SLED.

PARAMETROS DE UN LED: EFICIENCIA DE EMISION

Eficiencia externa en potencia (eficiencia energética): es la potencia óptica generada a partir de la potencia eléctrica suministrada

$$\eta_{pot}(\%) = \frac{P_{opt}}{I \cdot V} (\times 100)$$

La eficiencia cuántica implica a las partículas relacionadas en el proceso

$$\eta = \frac{\# \text{ fotones } _emitidos}{\# \text{ portadores } _inyectados}$$

Esta eficiencia consta de dos términos, porque no todos los fotones generados son emitidos: eficiencia cuántica interna y eficiencia cuántica externa

PARAMETROS DE UN LED: EFICIENCIA CUANTICA

$$\eta = \frac{\# \text{ fotones _ generados}}{\# \text{ portadores _ inyectados}} \cdot \frac{\# \text{ fotones _ emitidos}}{\# \text{ fotones _ generados}}$$

Eficiencia cuántica interna

Eficiencia cuántica externa

$$\eta_i \approx \frac{\tau}{\tau_r}$$

Si todas las recombinaciones son radiativas, el tiempo de vida medio de los portadores que dan lugar a recombinaciones sera igual al total y $\eta_i = 1$

$$\eta_i = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}}$$

Donde R_r y R_{nr} representan las tasas de recombinación radiativa y no radiativa (recombinaciones/unidad de tiempo)

Recombinaciones en semiconductor tipo p

$$\frac{\# \text{ recombinaciones}}{u. _ de _ tiempo} \propto \Delta n \Rightarrow \frac{\Delta n}{\tau}$$

La variación del numero de portadores con el tiempo: $\frac{d(\Delta n)}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau}$ **(sin inyección)**

$\Delta n(t) = \Delta n(0)e^{-t/\tau}$ **Hay un decaimiento exponencial por emisión espontánea**

La constante de proporcionalidad es el tiempo de vida medio

TASAS DE RECOMBINACION

Si se inyectan R portadores por unidad de tiempo, se produce una variación:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = R - \frac{\Delta n}{\tau}$$

Aumentara el numero de minoritarios, y por lo tanto las recombinaciones, hasta que llegar a un estado estacionario donde la variación de portadores cuando el tiempo sea 0. Entonces:

$$R = \frac{\Delta n}{\tau}$$

R es el numero de recombinaciones por unidad de tiempo para que se llegue a un estado estacionario del emisor.

Si la tasa de recombinación total la expresamos como la suma de sus partes radiativa y no radiativa, podemos escribir:

$$R = R_r + R_{nr} = \frac{\Delta n}{\tau} = \frac{\Delta n}{\tau_r} + \frac{\Delta n}{\tau_{nr}}$$

Operando se obtiene la expresión vista con anterioridad para la eficiencia interna

TIEMPO DE VIDA DEL ELECTRON

Los procesos de recombinación se caracterizan con el tiempo de vida del electrón.

El tiempo de vida del electrón es la duración media que sobrevive un electrón en la banda de conducción antes de volver a encontrar un hueco y recombinarse.

Para un semiconductor donde: $\tau_r \ll \tau_{nr}$, los electrones se recombinan muy rápido en forma radiativa y pocos electrones lo hacen en forma no radiativa (se generan muchos fotones). En el caso contrario, casi toda la energía se libera en forma de calor.

El tiempo de vida no radiativo depende principalmente de la cantidad de defectos en el cristal del semiconductor: átomos del cristal mal apilados (dislocaciones), átomos ausentes (lagunas) o bien átomos situados entre dos posiciones cristalinas normales (átomos intersticiales). Todos estos defectos constituyen trampas para el electrón liberado, y favorecen la recombinación no radiativa (disminuye τ_{nr}). Por lo tanto, es necesario que el semiconductor tenga el mínimo posible de defectos cristalinos.

El tiempo de vida radiativo depende principalmente de la estructura de la banda del semiconductor (transición directa e indirecta).

TIEMPO DE VIDA DEL ELECTRON

En un semiconductor de transición indirecta, además de la conservación de la energía, se debe conservar la cantidad de movimiento. Como el fotón tiene una cantidad de movimiento muy pequeña, la transición electrónica necesita la acción de las vibraciones térmicas de los átomos (fonones) de la red cristalina para que se respete el principio de la conservación de la cantidad de movimiento.

La interacción de las vibraciones de una red cristalina es un fenómeno lento. Por lo tanto, τ_r es mucho mayor en los semiconductores de transición indirecta de banda.

De esa forma, para los LEDs se emplean los materiales semiconductores de transición directa de banda

Para un semiconductor de transición directa en presencia de un gran número de huecos se aumenta la probabilidad de recombinación del electrón con el hueco (dopado de los materiales).

La eficiencia cuántica interna es la relación entre el numero de fotones producidos respecto al número de electrones que se recombinan.

$$\eta_i = \tau_{nr} / \tau_r + \tau_{nr}$$

silicio: $\tau_r = 1 \times 10^{-3} \text{ s}$, $\tau_{nr} = 1 \times 10^{-7} \text{ s}$. $\eta_i = 1 \times 10^{-4}$

Arseniuro de galio: $\tau_r = 1.5 \times 10^{-8} \text{ s}$, $\tau_{nr} = 1 \times 10^{-7} \text{ s}$. $\eta_i = 0.87$

EFICIENCIA CUANTICA EXTERNA

De todos los fotones generados en la zona activa no todos son emitidos al exterior donde pueden ser aprovechados, sino que se van a producir perdidas que van a reducir el numero de fotones emitidos: el parámetro que mide dichas perdidas es la eficiencia cuántica externa

Mecanismos que hacen que $\eta_e < 1$:

1,- La emisión es espontánea, emitiendose en todas direcciones. La luz que va hacia atrás (hacia el sustrato) se pierde: puede representar un factor 0.5 ($\eta_{e1} = 0.5$)

2.- los LEDs se fabrican con semiconductores con índices de refracción del orden de 3.7. El ángulo critico en este caso (con aire como medio externo) es 16.6°. Por lo que solo saldrán al exterior aquellos fotones que incidan en la intercaras con ángulos menores.

$$\eta_{e2} = n_{ext}^2 / n_{int}^2 \quad \text{En este caso, } \eta_{e2}=0.073$$

3.-perdidas de reflexión por las leyes de Fresnel en la intercara semiconductor-aire:

$$\eta_{e3} = T = 1 - R = \frac{4n_{ext}n_{int}}{(n_{ext} + n_{int})^2} \quad \text{Con un índice interno de 3.7 y aire: } \eta_{e3} = 0.67$$

4.- absorción en el medio: es difícil de cuantificar. Se asume que, al menos, $\eta_{e4} = 0.5$

$$\eta_e = \eta_{e1}\eta_{e2}\eta_{e3}\eta_{e4} \qquad \eta_e = 0.012(1.2\%)$$

RELACION ENTRE LAS EFICIENCIAS

LA EFICIENCIA CUANTICA TAMBIEN PUEDE PONERSE COMO:

$$\begin{aligned} \frac{\# \text{ fotones _ generados }}{\text{unidad _ de _ tiempo}} &= \frac{E}{h \nu} \frac{1}{t} = \frac{P_{\text{int}}}{hc} \lambda \\ \frac{\# \text{ portadores _ inyectados }}{\text{unidad _ de _ tiempo}} &= \frac{Q}{e} \frac{1}{t} = \frac{I}{e} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \eta_i = \frac{e \lambda}{hc} \frac{P_{\text{int}}}{I} \quad \text{y} \quad \eta_e = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{int}}}$$

Luego:

$$\eta = \eta_e \eta_i = \frac{e \lambda}{hc} \frac{P_{\text{out}}}{I}$$

Además, como la eficiencia energética externa es

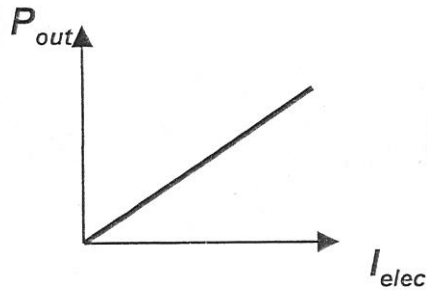
$$\eta_{\text{pot}} = \frac{P_{\text{out}}}{I \cdot V}$$

$$\eta = \frac{e \lambda}{hc} V \eta_{\text{pot}}$$

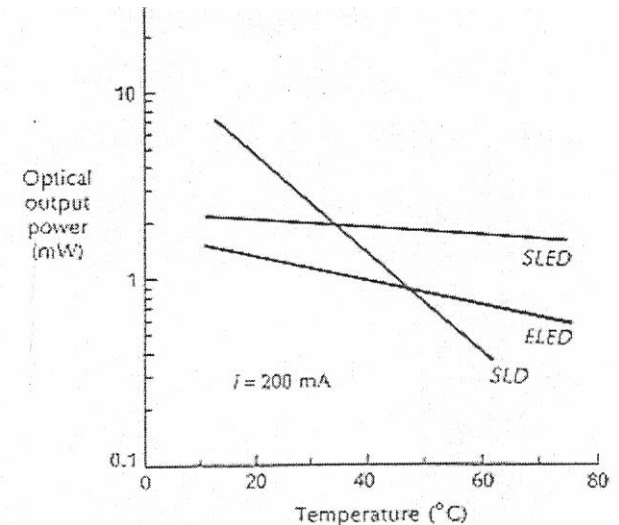
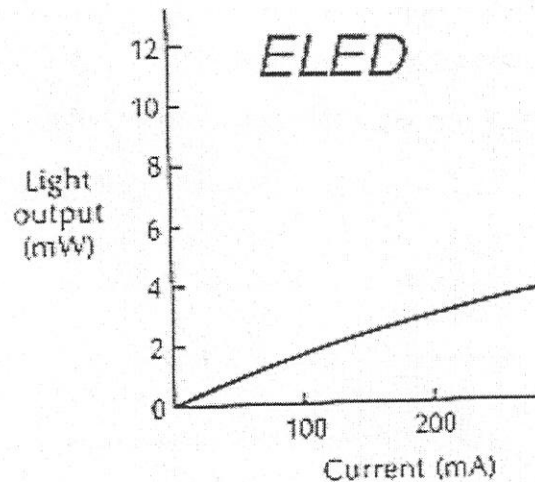
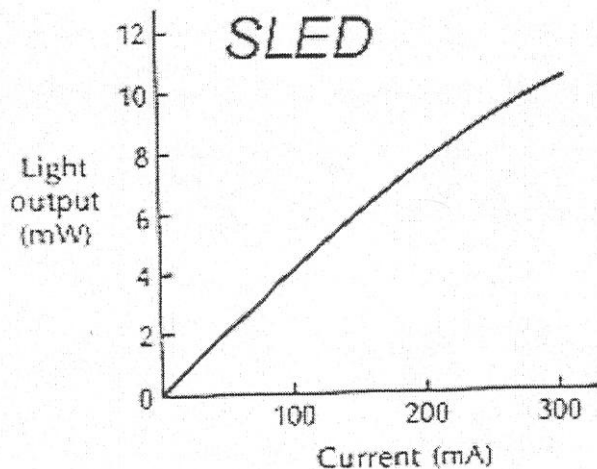
Relación entre la eficiencia cuántica y la externa

PARAMETROS DE UN LED: POTENCIA EMITIDA

Se ha visto en la transparencia anterior que la potencia óptica es proporcional a la intensidad eléctrica inyectada, luego un LED es un dispositivo básicamente lineal. De todas formas, por encima de unos 70 mA empiezan a producirse no linealidades que apartan la emisión del LED de una línea recta: problemas para transmitir en analógico.



El LED es un dispositivo cuya potencia óptica puede ser modulada a través de la modulación de una corriente eléctrica.



POTENCIA INYECTADA DE UN LED A UNA FIBRA

La fracción de potencia inyectada desde una fuente puntual difusa a una fibra óptica es:

$$\frac{P_{iny}}{P_{out}} = \text{sen}^2 \theta_a = \frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{n_{ext}^2}$$

Si la fuente esta lejos de la fibra se calcula la fracción de ángulo sólido que inyecta, y si la fuente tiene un tamaño mayor que la fibra hay que multiplicar por el cociente entre áreas lo que reduce aun mas la potencia inyectada.

Normalmente la eficiencia de inyección total (incluyendo la eficiencia cuántica y el acoplo) es de un factor 0.002 (esto implica que, en circunstancias normales la potencia inyectada será de algunos microwatios).

Por eso es conveniente mejorar el acoplo utilizando lentes.

Con un estudio fotométrico y considerando que solo quedaran guiados aquellos modos que entren dentro del ángulo de aceptancia, se puede demostrar que la fracción de potencia inyectada usando una lente es:

$$\frac{p_{inyectada}}{p_{emitida}} = \frac{A_{fibra}}{A_{fuente}} \frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{n_{ext}^2} \quad (\text{si } A_{fuente} < A_{nucleo})$$

Por eso, fuentes con menores áreas de emisión (mayores radiancias) son capaces de inyectar mas potencia en una misma fibra óptica

PARAMETROS DE UN LED: ESPECTRO DE EMISION

La distribución de energías de los fotones emitidos por emisión espontánea tiene un máximo en:

$$h\nu_{\max} = E_g + \frac{k_B T}{2}$$

Y una anchura en energías de los fotones emitidos que vale (FWHM)

$$h\Delta\nu = 1.8k_B T$$

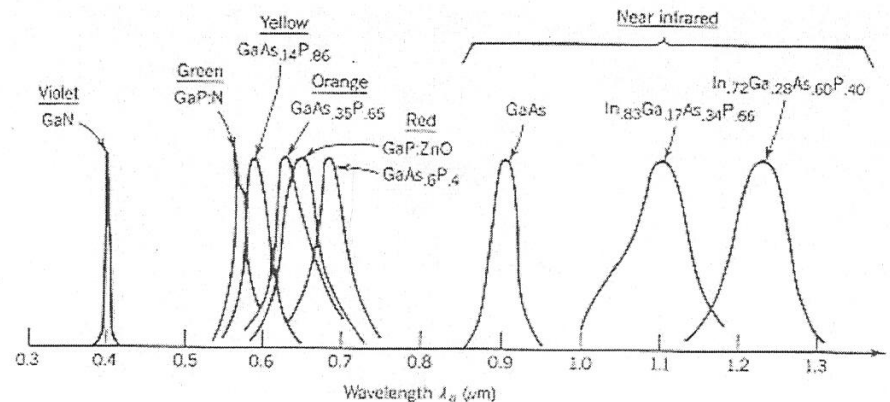
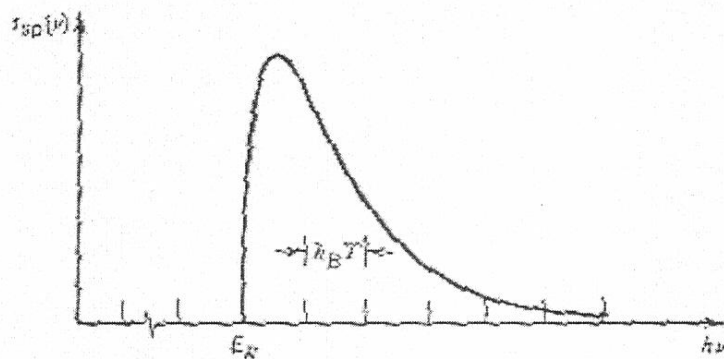
Independiente de ν

En longitud de onda, la anchura espectral es:

$$\Delta\lambda \approx 1.45\lambda_p^2 k_B T$$

Dependiente de λ y T

$k_B T$ en eV



PARAMETROS DE UN LED: ANCHO DE BANDA DE MODULACION

Para calcular el ancho de banda de modulación de un LED, se considera la respuesta en potencia emitida del dispositivo cuando se aplica una corriente eléctrica variable en el tiempo.

$$I_{elec} = I_0 + I_1 \cos(\Omega t)$$

La respuesta en frecuencia del LED es del tipo:

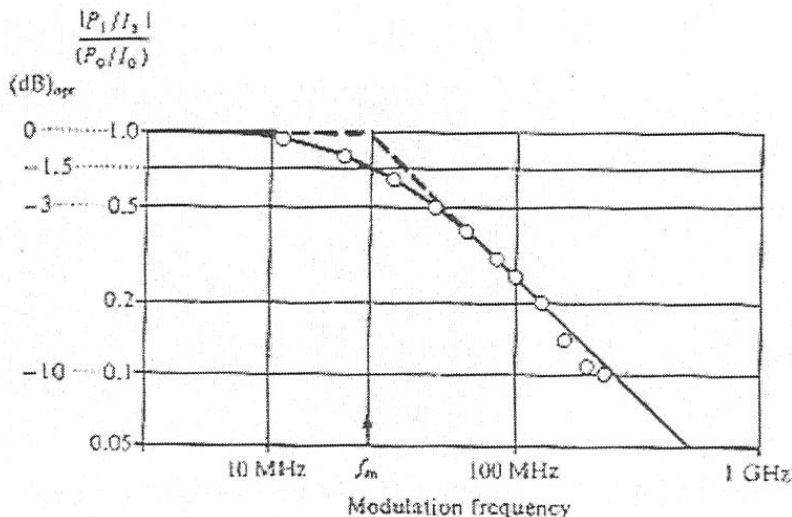
$$P_{emit} = P_0 + P_1 \cos(\Omega t)$$

Con:

$$\frac{P_1}{I_1} = \frac{P_0 / I_0}{(1 + \Omega^2 \tau^2)^{1/2}}$$

Equivale a la respuesta de un circuito R-C

Esto significa que si la frecuencia de modulación empieza a ser mayor que el tiempo de vida medio de los portadores, la respuesta del dispositivo empezara a disminuir con el factor señalado con respecto a la señal en continua.



El ancho de banda a 3 dB (eléctrico) es:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi\tau}$$

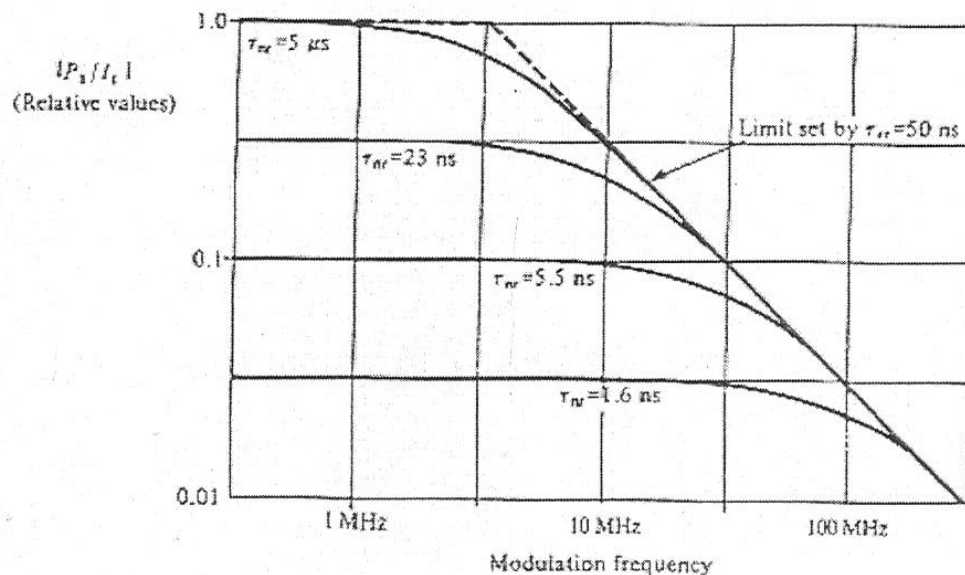
LIMITES EN EL ANCHO DE BANDA DE MODULACION

Para aumentar el ancho de banda en LEDs (poder modular la potencia a frecuencias mas altas) se debe reducir el tiempo de vida medio de los portadores minoritarios en la región de emisión.

Esto se puede lograr reduciendo el parámetro τ_{nr} . Sin embargo, se reduce drásticamente la eficiencia interna, definida como:

$$\eta_i \approx \frac{\tau}{\tau_R}$$

Para aumentar el ancho de banda sin disminuir la eficiencia hay que disminuir τ_r



Esto se puede lograr escogiendo los materiales y el dopaje de los mismos. Los valores típicos de tiempos de vida medio están entre 1 y 50 ns, que corresponden a anchos de banda del orden de algunos centenares de MHz (150 a 200 MHz en SLED y 500-600 MHz en ELEDs).

- LEDS COMERCIALES

Datacom

<http://www.mitel.com>

Device	Type	Wave-length nm	Band-width MHz	Rated Current mA	Rated Fiber	Optical Power Rated 62.5G1 μ W μ W		Respon-sivity A/W, V/W	Applications
850 nm Emitters and Detectors									
MF430	LED	865	250	60	62.5G1	50	50		Ethernet 100 Mbps, Intra-Office Telecom
1A239	LED	840	50	50	50G1	90	150		Ethernet, General Purpose
1A225	LED	880	50	50	10SM	2,5	150		Single-Mode Ethernet
1A286	LED	820	70	100	-	4000	-		Free Air Communication
1A194	LED	860	70	60	50G1	45	95		Ethernet, General Purpose
1A388	LED	820	250	50	62.5G1	50	50		Ethernet 100 Mbps, Intra-Office Telecom
1A301	LED	820	350	100	62.5G1	80	80		Fibre Channel 266 Mbps
1A363	LED	820	700	50	62.5G1	35	35		ATM 622 Mbps
1A440	VCSEL	840	5000	10	50G1	1000	1000		Fibre Channel, Gigabit Ethernet, ATM
1A444	VCSEL	840	5000	10	50G1	1000	1000		Fibre Channel, Gigabit Ethernet, ATM
1A354	PIN	850	1000		62.5G1			0.45	Fibre Channel, Gigabit Ethernet, ATM
1300 and 1550 nm Emitters and Detectors									
MF431	LED	1320	125	60	62.5G1	40	40		FDDI, ATM 155 Mbps
1A439	LED	1320	125	60	62.5G1	50	50		FDDI, ATM 155 Mbps
1A380	LED	1320	160	60	62.5G1	40	40		ESCON, Fibre Channel 266 Mbps
1A427	LED	1320	450	80	62.5G1	35	35		ATM 622 Mbps
MF432	PIN	1300/1550	2500		62.5G1			0.8/1.0	FDDI, ATM 155 and 622 Mbps
1A358	PIN	1300/1550	2500		62.5G1			0.8/1.0	FDDI, ATM 155 and 622 Mbps
8B428	Receiver	1300/1550	1000		62.5G1			1600/1900	Fibre Channel, Gigabit Ethernet, ATM
850 and 1300 nm Duplex Devices									
MF699	Duplex	1320/820	125	60	62.5G1	25	25	0.25	Full Duplex WDM (used with MF799)
MF799	Duplex	820/1320	250	60	62.5G1	35	35	0.5	Full Duplex WDM (used with MF699)
1A212	Duplex	880	50	60	50G1	55	90	0.15	Half Duplex Communication
1A353	Duplex	1320	50	80	62.5G1	55	55	0.3	Half Duplex Communication



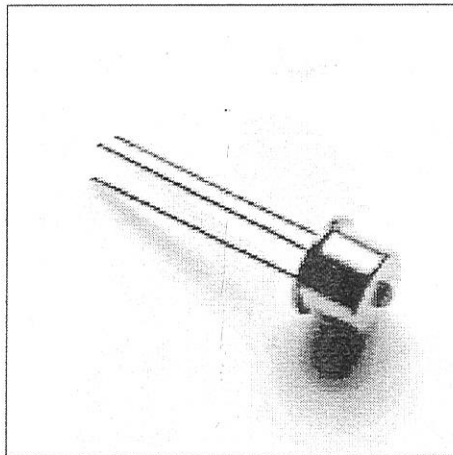
- LEDS COMERCIALES

820nm

1A388
High-Performance LED

Datacom, Intra-Office Telecom

This device is designed for Ethernet 100 Mbps and Intra-Office Telecom applications and offers an excellent price/performance ratio for cost-effective solutions. Its double-lens optical system results in optimum coupling of power into the fiber. And it matches the 1A354 PIN Photodiode.



Optical and Electrical Characteristics (25 °C Case Temperature)

PARAMETER	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	TEST CONDITION	
Fiber-Coupled Power	P_{fiber}	40	50		μW	$I_F=50\text{mA}$ (Note 1)	Fiber: 62.5/125 μm
Rise and Fall Time (10-90%)	t_r, t_f			2	ns	$I_F=50\text{mA}$ (no bias)	Graded
Bandwidth (3dB $_{cl}$)	f_c	200	250		MHz	$I_F=50\text{mA}$	Index NA=0.275
Peak Wavelength	λ_p	800	820	840	nm	$I_F=50\text{mA}$	
Spectral Width (FWHM)	$\Delta\lambda$			60	nm	$I_F=50\text{mA}$	
Forward Voltage	V_F			1.85	V	$I_F=50\text{mA}$	
Reverse Current	I_R			20	μA	$V_R=1\text{V}$	
Capacitance	C		20		pF	$V_R=0\text{V}, f=1\text{MHz}$	

Note 1: Measured at the exit of 100 meters of fiber.

Los tiempos de vida de estos dispositivos superan el millón de horas de funcionamiento