

Instrumentación Electrónica I



Temario

TEMARIO	HTE	P	HL
TEMA 1. INTRODUCCIÓN	1 H		
TEMA 2. SENSORES Y TRANSDUCTORES	1 H	T	
TEMA 3. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE UN TRANSDUCTOR	2 H	T	
TEMA 4. ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE SALIDA DE UN TRANSDUCTOR	7 H	T	
TEMA 5. TRANSDUCTORES PARA LA MEDIDA DE TEMPERATURA.	5 H	1	3 H
TEMA 6. SENSORES PARA LA MEDIDA DE DEFORMACIONES	5 H	2	3 H
TEMA 7. SENSORES DE POSICIÓN Y NIVEL	5 H	3	3 H
TEMA 8. SENSORES ÓPTICOS	6 H		
TOTAL	32 H		9 H

T= Enfoque en todas prácticas



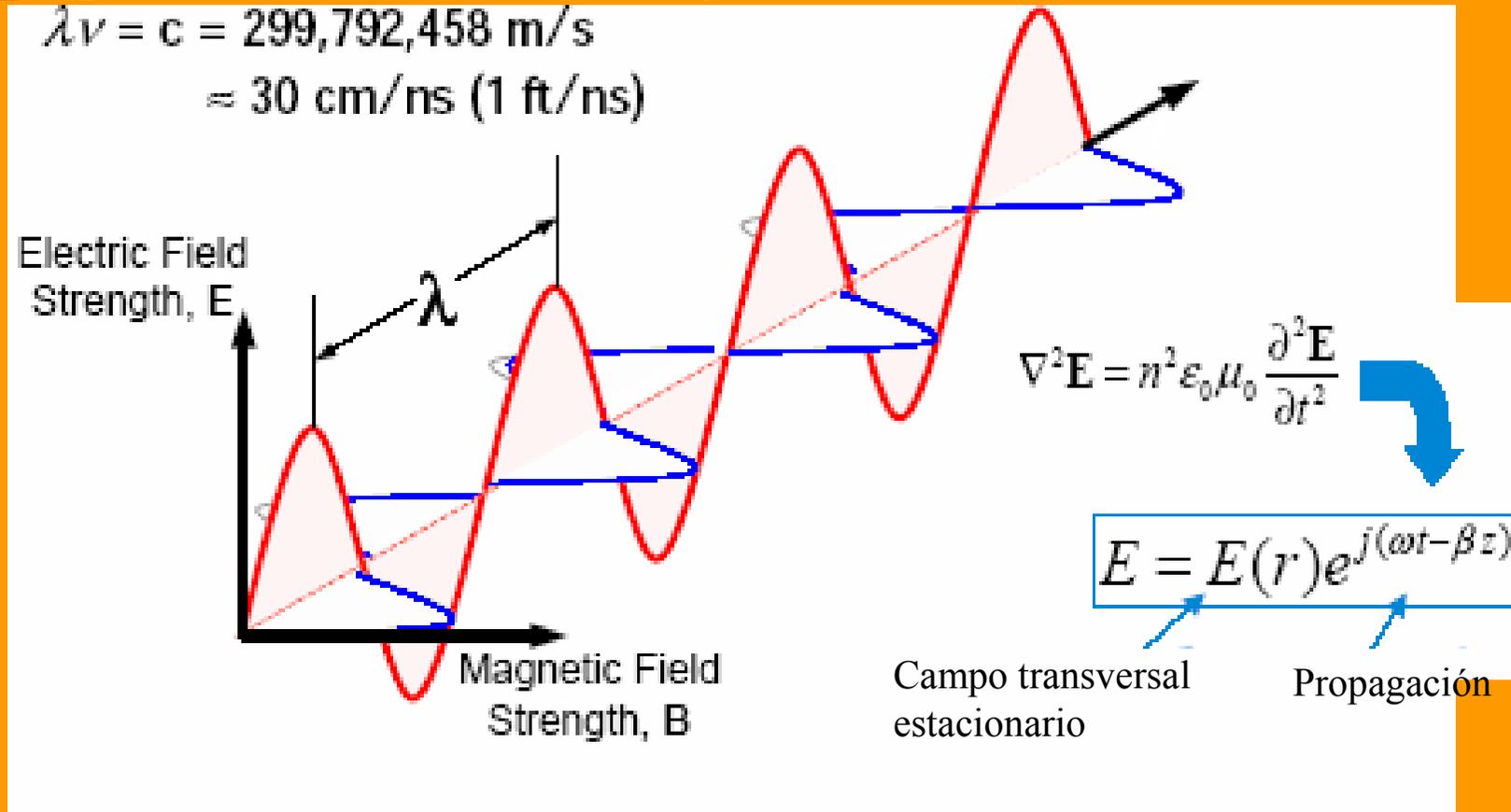
Sensores ópticos. Introducción

- **Conceptos básicos luz:**
 - Naturaleza ondulatoria: λ , ν , n ¿relación? $c=\lambda\nu$
 - Naturaleza corpuscular: $E=h\nu$ (Fotón cantidad discreta de energía)
- **Medidas y unidades en sistemas ópticos**
 - Fotometría energética (radiometría): julio, vatio
 - Fotometría visual: lumen, lux, candela
- **Distintos efectos**
 - Fotoconducción (fotorresistencias, fotodiodos..)
 - Efecto fotovoltaico (célula solar)
 - Efecto fotoemisorio (fotomultiplicadores)
 - Otros: sensores de fibra óptica



Introducción. Ondas electromagnéticas

SIMU <http://acacia.cnice.mecd.es/~jruiz27/interf/emwaves/emWave.html>



Describe la luz: λ (longitud de onda), ν (frecuencia)

Ejemplo: 1550nm 200THz



Introducción. Ondas electromagnéticas

λ (longitud de onda): Distancia espacial entre dos máximos consecutivos de la onda en la dirección de propagación ($1\mu\text{m}=1000\text{ nm}$)

ν (frecuencia): Oscilaciones completas por segundo cuando la radiación atraviesa un punto fijo en el espacio ($\text{Hz}=\text{s}^{-1}$)

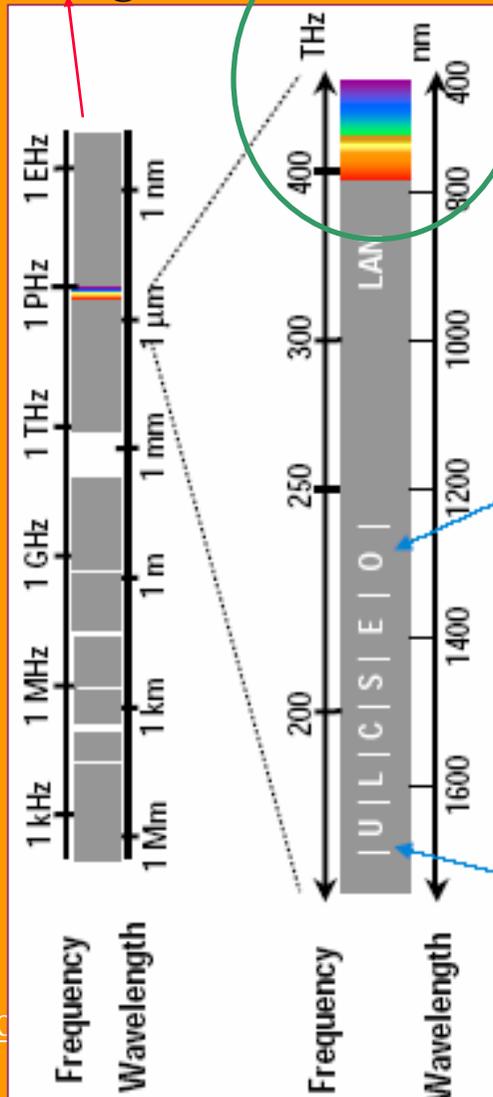
- Propagación luz medio, cuantifica a través del índice de refracción “ n ”; $\nu=c/n$

Instrumentación Electrónica I



Introducción. Espectro electromagnético I

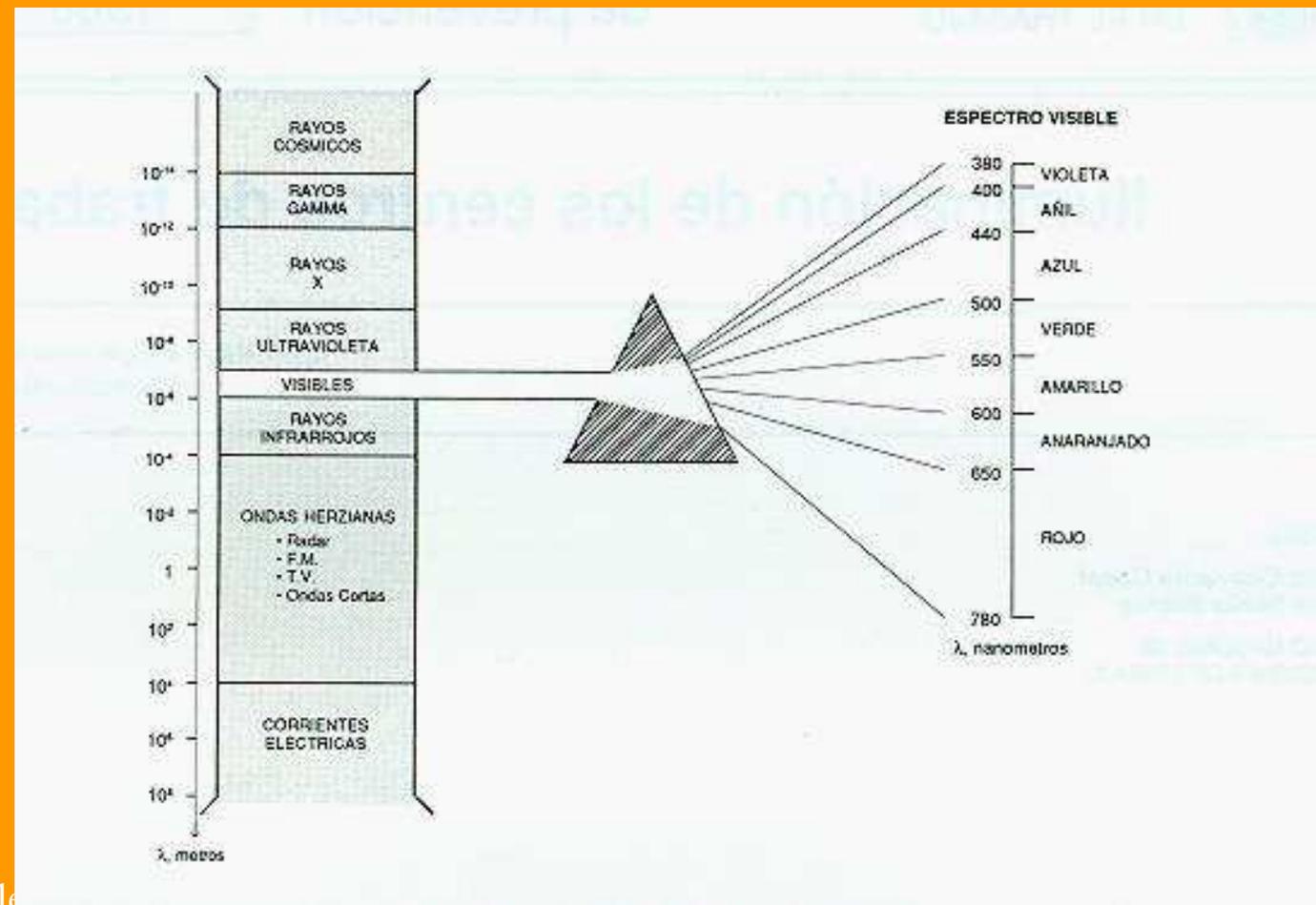
Más energética, más corta



Instrumentación: VIS, IR, UV

Introducción. Espectro electromagnético II

Instrumentación: VIS, IR, UV



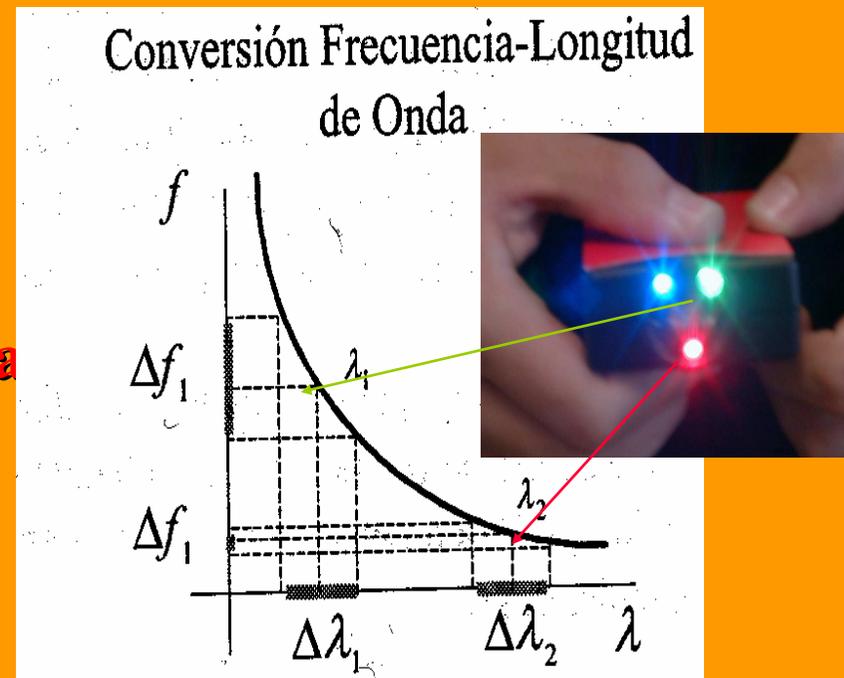
Introducción. Relaciones ondas

Relación $\Delta\lambda$ (anchura espectral en longitud de onda) y $\Delta\nu$ (ancho banda en frecuencia óptica)

$$c = \lambda f;$$

$$\Delta\lambda = -c/f^2 \Delta f = -\lambda^2 / c \Delta f$$

Una misma anchura espectral se corresponde con distintos anchos de banda en frecuencia
Según la longitud de onda de la fuente de luz





Medidas en sistemas ópticos

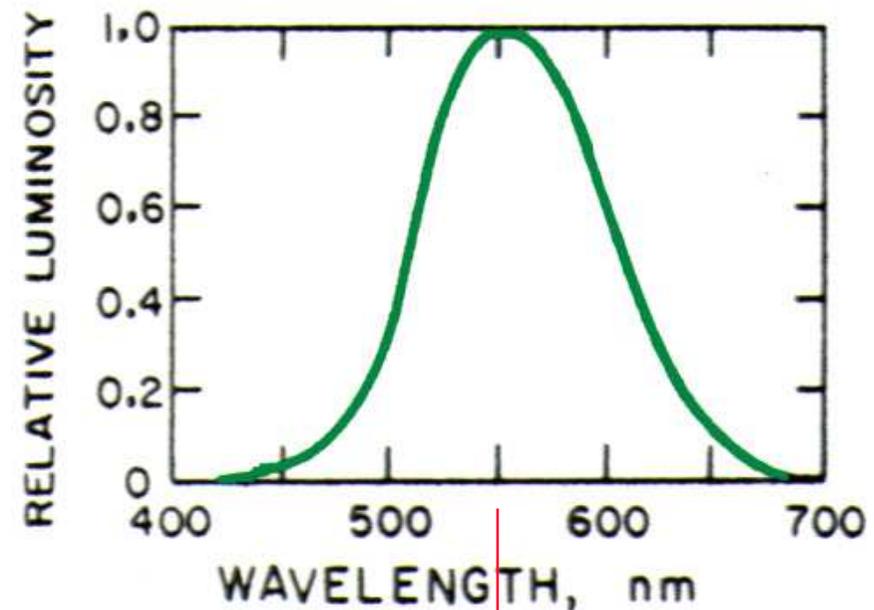
- **Fotometría energética (radiometría):**
“Sólo contenido energético de la radiación luminosa y no su impresión sensorial”. Julio, vatio
 - **Fotometría visual**
“Pondera la magnitud de energía radiante en el espectro visible”. Candela, lumen, lux
- “1 W de potencia energética a 550nm son 680 lumen”

Fotometría visual

$$\Phi(\lambda) = 680 V(\lambda) \Phi_v(\lambda)$$

La conexión entre las medidas fotométricas y las radiométricas es la **Función de Luminosidad Fotópica (o Función de Eficiencia Luminosa Relativa)**. Esta curva, que es un estándar del C.I.E., especifica la sensibilidad espectral del *observador humano medio* a una radiación óptica en función de la longitud de onda.

$V(\lambda)$

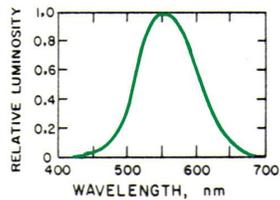


Verde: 555nm

Centre Internationale d'Éclairage (CIE) es una organización internacional que establece métodos para medir el color.

Los estándares de color para medidas colorimétricas son especificaciones internacionalmente aceptadas que definen los valores de color matemáticamente.

Dpto de Tecnología Electrónica



Instrumentación Electrónica I



Unidades Fotométricas

MAGNITUD	SIMBOLO	UNIDAD	DEFINICION DE LA UNIDAD	REPRESENTACION GRAFICA	RELACIONES
FLUJO	Φ	LUMEN (lm)	Flujo luminoso de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hertz y un flujo de energía radiante de 1/683 vatios.		$\Phi = I \times \omega$
INTENSIDAD LUMINOSA	I	CANDELA (cd)	Intensidad luminosa de una fuente puntual que emite un flujo luminoso de un lumen en un ángulo sólido de un estereoradian.		$I = \frac{\Phi}{\omega}$
NIVEL DE ILUMINACION (LUMINANCIA)	E	LUX (lx)	Flujo luminoso de un lumen que recibe una superficie de 1 m ² .		$E = \frac{\Phi}{S}$
LUMINANCIA	L	CANDELA por m ² (cd/m ²) CANDELA por cm ² (cd/cm ²)	Intensidad luminosa de una candela por unidad de superficie.		$L = \frac{I}{S}$

Unidad energética

Vatios (w)

Vatios/
estereoradian

Vatios/m²

Julio (J)



Otras unidades fotométricas

- *footcandle* es una unidad histórica para medir luz y se define como la iluminación producida cuando la luz de una candela estándar cae en una superficie situada a 1 pie; frente al lux que es lo mismo pero respecto de una superficie situada a 1m. La conversión entre “footcandle” y “lux” es la siguiente: $1.0 \text{ fc} = 10.76 \text{ lux}$, $1.0 \text{ lux} = 0.093 \text{ fc}$.
- La fuente de luz estándar que se utiliza en la industria para calibrar la resistencia de una LDR ($K\Omega/\text{lux}$) es una lámpara de filamento de tungsteno a una temperatura de color de 2854 K. Para poder comparar diferentes células se utilizan dos niveles de luz estándar en la medida : 2 fc (footcandles) y a 10 lux



Sensores ópticos: Principio funcionamiento

“Liberación de cargas al incidir un haz de luz”=Efecto fotoeléctrico

$W_p > W_1$ (W_p =energía fotón, W_1 =energía unión e- a los átomos)

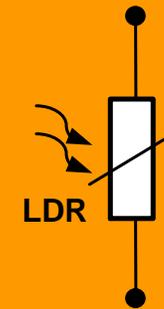
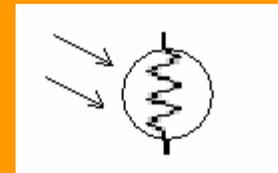
Según la naturaleza del dispositivo iluminado se manifiesta:

- Fotoconducción “Variación de la conductividad del material al incidir la luz” (fotorresistencias, fotodiodos..)
- Efecto fotovoltaico “Generación de un voltaje al incidir la radiación (célula solar)
- Efecto fotoemisorio “Emisión electrones al incidir la luz (fotomultiplicadores)

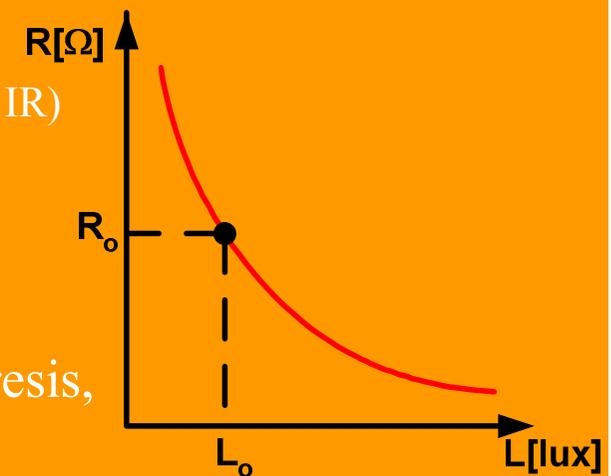
Otros: sensores de fibra óptica (distintas clasificaciones)

Célula Fotoconductor

- Transductor resistivo, basado efecto fotoconductor
- Símbolos
- Más común: LDR (Light Dependent Resistor)
- Características estáticas

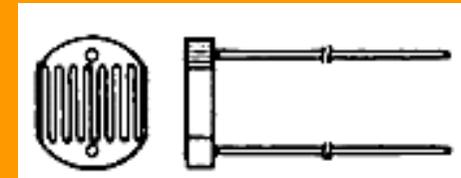


- Sensibilidad alta y negativa, $f(\lambda, T, \text{material})$:
CdS respuesta espectral \sim respuesta ojo humano, CdSe desplazada IR)
- No lineal $R(\Phi) = a \Phi^{-\gamma}$
- $R_{\text{oscuridad}}$ alta varía ciento Ω (SbIn) a $M\Omega$ (CdS, CdSe)
- Tiempo respuesta: $0,1\mu\text{s}$ (SbIn), $1-100\text{ms}$ (CdSe)
- Inconvenientes: respuesta espectral estrecha, histéresis, poca estabilidad térmica



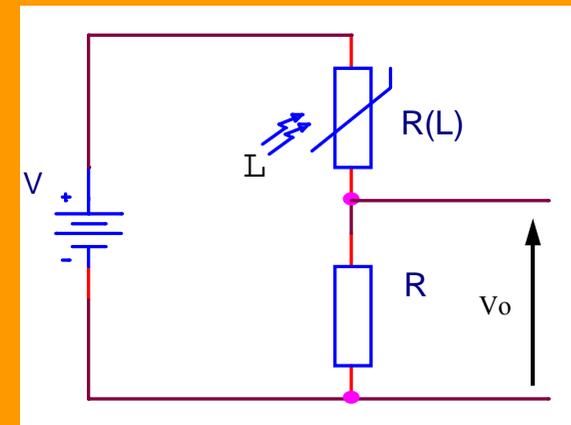
Célula Fotoconductor

- Estructura física
 - Ventana permite paso luz
 - Material fotoconductor sobre sustrato cerámico, gran longitud con poco área aumentar R_0
 - Electrodo conexión exterior



Circuitos acondicionadores

- Circuitos potenciométricos
- 2 ramas equilibrar a cero condición inicial (efecto luz ambiente)
- Limitar potencia evitar problemas autocalentamiento
- Uso común control encendido farolas, ...



$$V < 2\sqrt{\delta\Delta TR}$$

HOJA CARACTERÍSTICAS



Uniones PN fotoconductoras

Fotodiodos. Principio funcionamiento

- Entre la zona P y zona N existe una zona no dopada intrínseca, donde se absorben los fotones con una energía que depende de la longitud de onda:

$$\lambda_h (\text{nm}) = \frac{1240}{E_h (\text{eV})}$$

- Esta energía libera electrones y huecos que generan una corriente eléctrica proporcional a la cantidad de luz que incide

Según λ +- energética la radiación. Según material hace falta +- energía

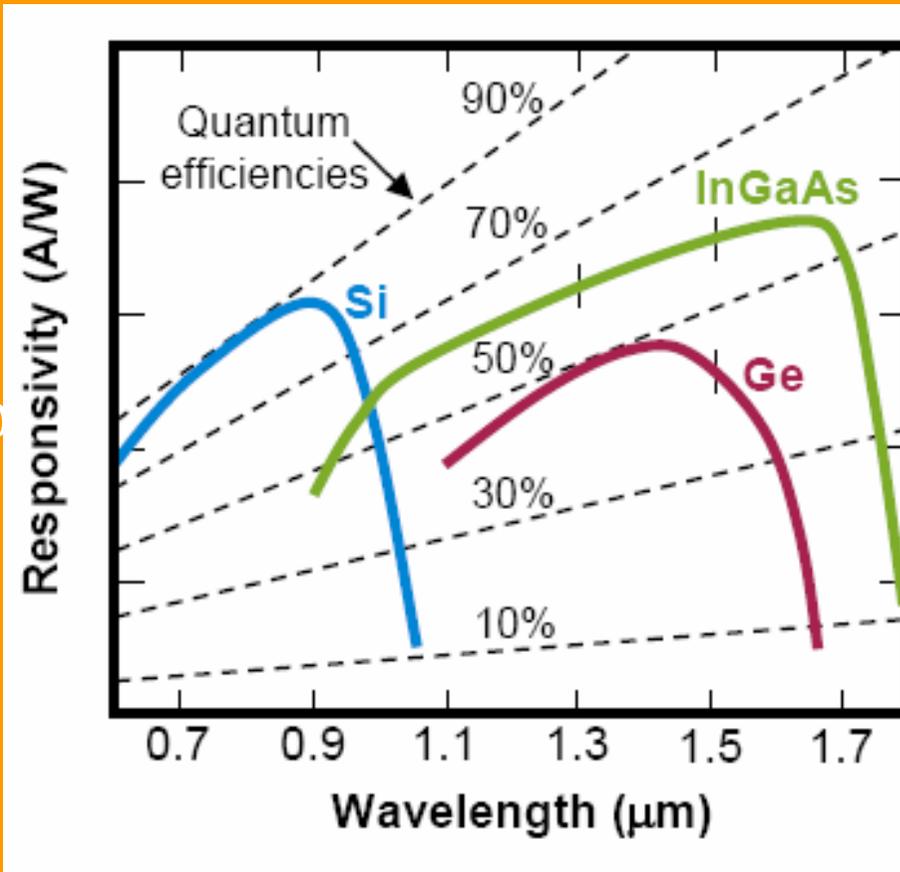
Dpto de Tecnología Electrónica

Semiconductor	Energía de la banda prohibida, $E_h(\text{eV})$	Longitud de onda de corte, $\lambda_h(\text{nm})$
Si	1,12	1100
Ge	0,66	1870
InP	1,35	910
InGaAsP	0,89	1400
InGaAs	0,75	1650

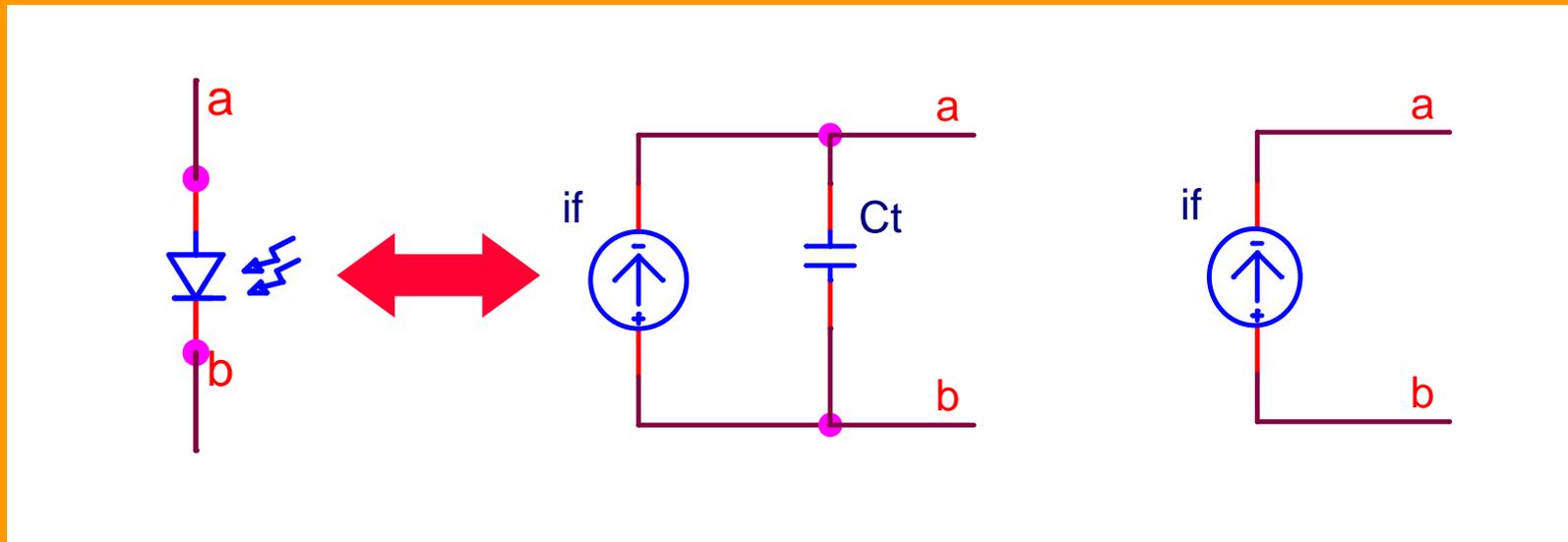
Respuesta espectral

Generan fotocorriente proporcional a la potencia óptica polarizados en inversa,

- Responsividad (A/W) = $f(\lambda)$ según el material
- Más ancha $R(\lambda)$ y más rápido frente a LDR



Modelo fotodiodos



(a)

(b)

**Simplificado polarizado inversa y
corriente oscuridad \ll corriente fotogenerada**

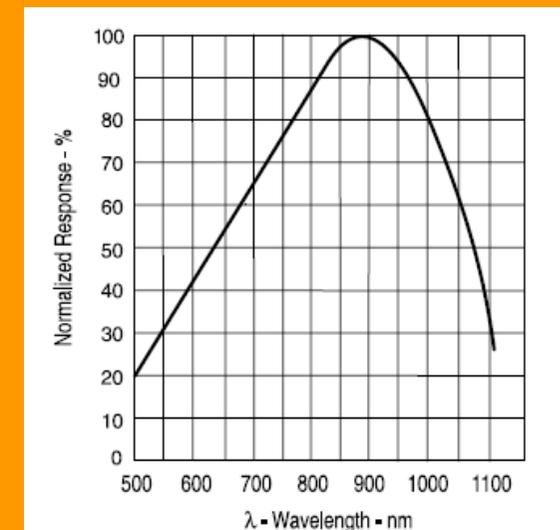
Características fotodiodos

- **Sensibilidad (A/W)** (bajas corrientes)
- $\Delta I_{\text{fotodiodo}} / \Delta P_{\text{luminosa}}$ (IF-D91, $0.4 \mu\text{A}/\mu\text{W}$ @ 860nm)
- **Muy lineal**, Superficie activa (**BPW34**, **BPW21** 7.5mm^2)
- Respuesta espectral (IF-D91, 400-1100nm)
- Capacidad, Tiempo de subida (IF-D91, 4pF, 5ns)
- Corriente de oscuridad (IF-D91, $<6 \text{nA}$) Ruido



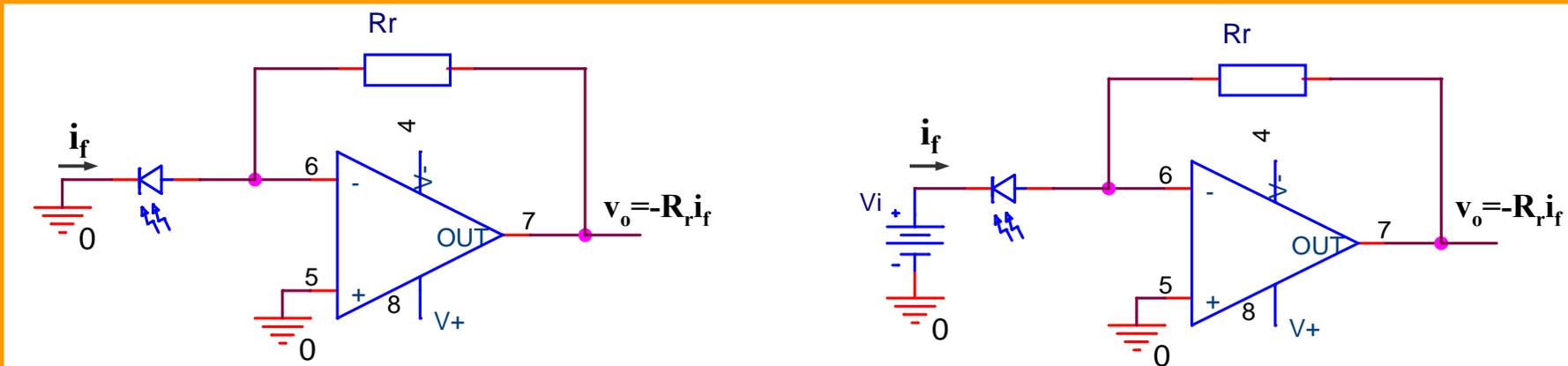
CHARACTERISTICS ($T_A=25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Wavelength for Maximum Photosensitivity	λ_{PEAK}	-	880	-	nm
Spectral Bandwidth (S=10% of S_{MAX})	$\Delta\lambda$	400	-	1100	nm
Rise and Fall Times (10% to 90% and 90% to 10%) ($R_L=50 \Omega$, $V_R=20\text{V}$, $\lambda=850 \text{nm}$)	t_r, t_f	-	5	-	ns
Total Capacitance ($V_R=20 \text{V}$, $E_F=0$, $f=1.0\text{MHz}$)	C_T	-	4	-	pF
Responsivity min. @ 880 nm @ 632 nm	R	-	.4 .2	-	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$ $\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Reverse Dark Current ($V_R=30 \text{volts}$, $E_F=0$)	I_D	-	-	60	nA
Reverse Breakdown Voltage	$V_{(\text{BR})R}$	60	-	-	V
Forward Voltage	V_f	-	1.2	-	V



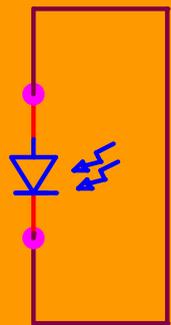
Acondicionamiento fotodiodos

Convertidores I-V

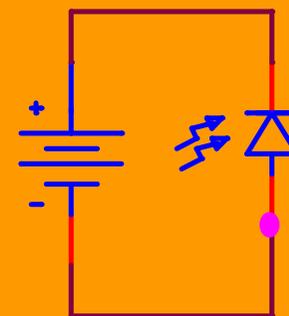
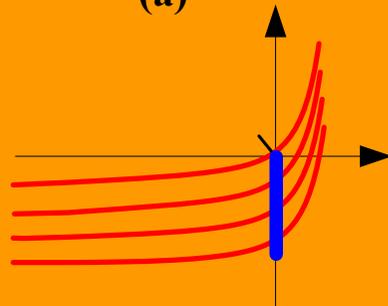


(a)

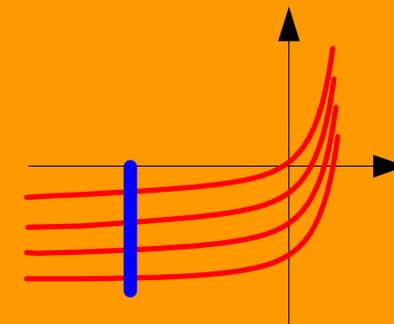
(b)



(a)



(b)



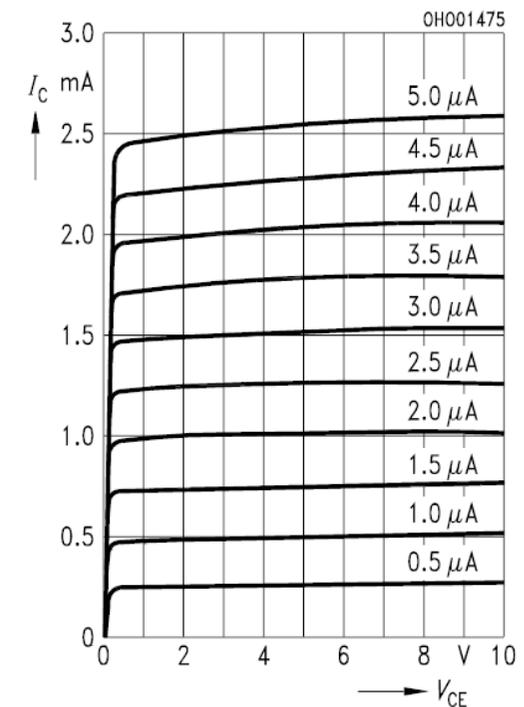
Uniones PN fotoconductoras

Fototransistores. Principio funcionamiento

- Se trata de un transistor con su base expuesta a la radiación luminosa, generándose una corriente de base directamente proporcional a la potencia óptica

$$i_c = \beta_T i_{fp}$$

Output Characteristics $I_C = f(V_{CE})$,
 $I_B = \text{parameter}$



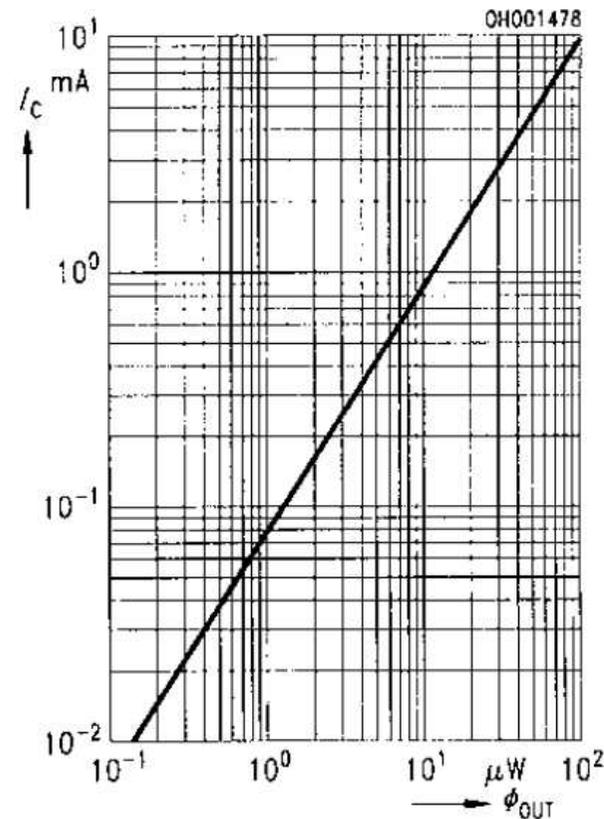
Características fototransistores

- **Sensibilidad (A/W)**
(corrientes mayores)

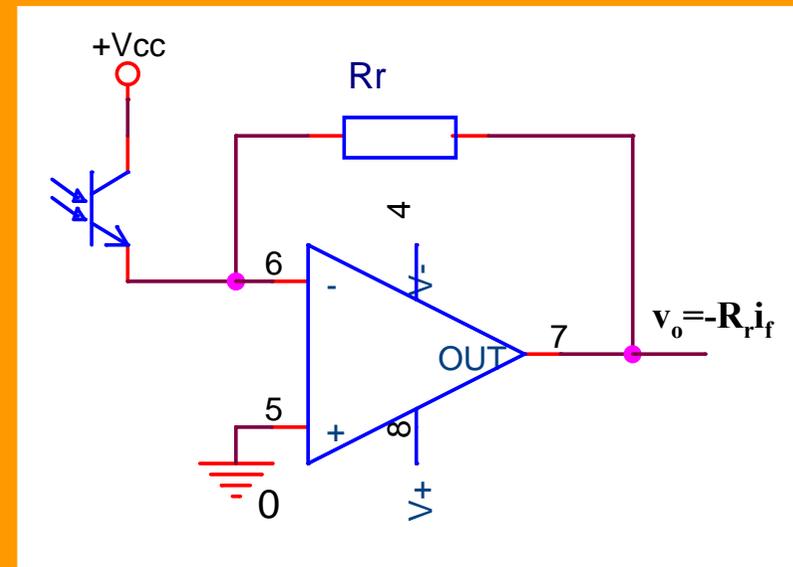
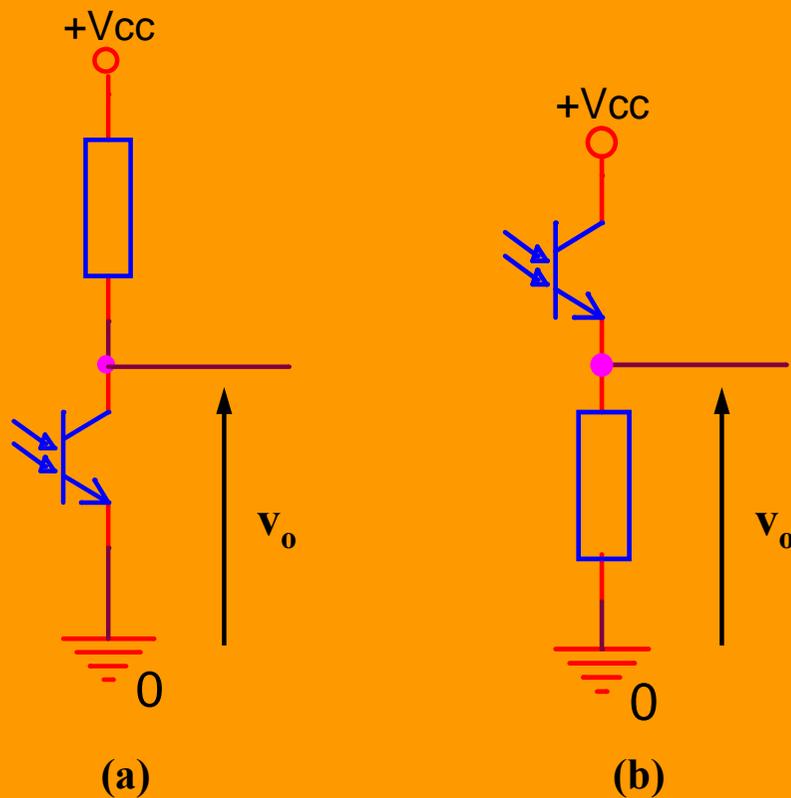
$\Delta I_{\text{fotodiodo}} / \Delta P_{\text{luminosa}}$ (\sim mA para 1lux)

- **hfe de 380-500**
- **Buena linealidad** (según componente) (**SFH350**)
- Respuesta espectral (misma, 400-1100nm, máx 850nm)
- Capacidad, Tiempo de subida (más lento, 20 μ s, **BPW96**-2 μ s)
- Corriente de oscuridad (SFH350, <1nA) Ruido

Photocurrent $I_C = f(\Phi_{\text{OUT}})$, $V_{\text{CE}} = 5 \text{ V}$,
 $\lambda = 560 \dots 950 \text{ nm}$

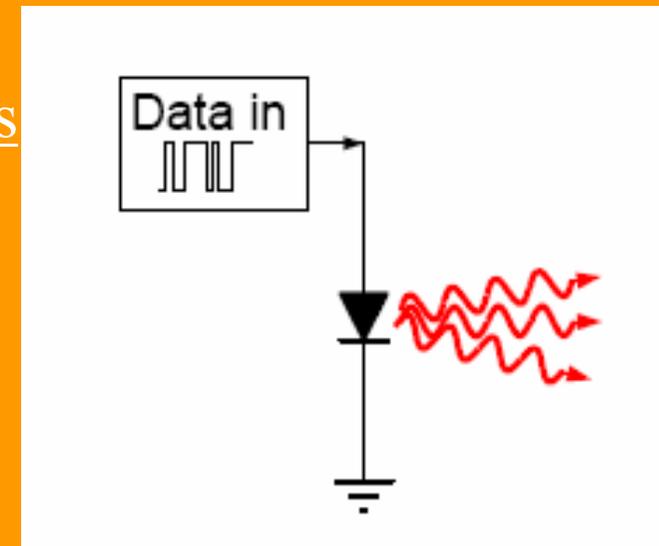


Acondicionamiento fototransistores

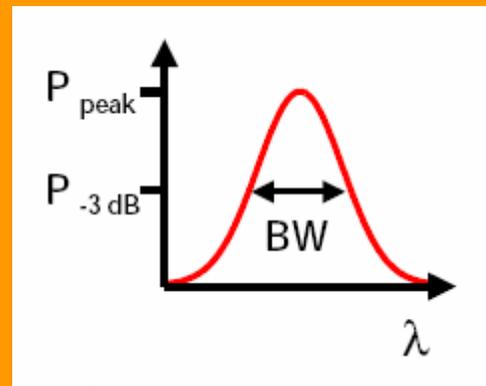


Emisores

- **LED (Light Emitting Diode):**
 - Emisión espontánea. Diodos polarizados en directa con corriente adecuada
 - Baratos, más comunes a
 - 650, 780, 850, 1300nm
 - Potencia total pocos μW
 - Anchura espectral de 30-100nm
 - No polarizados



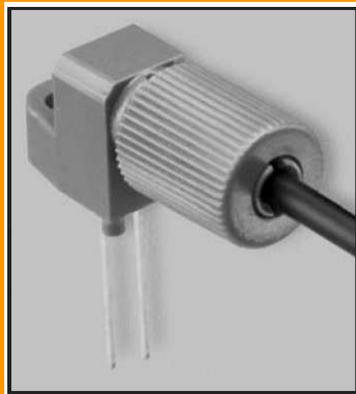
FWHM



LED encapsulado FO plástico

Plastic Fiber Optic Super-Bright LED

IF-E97



Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Peak Wavelength	λ_{PEAK}	650	660	670	nm
Spectral Bandwidth (50% of I_{MAX})	$\Delta\lambda$	-	40	-	nm
Output Power Coupled into Plastic Fiber (1 mm core diameter). Distance Lens to Fiber ≤ 0.1 mm, 1 m polished fiber, $I_F=20$ mA	Φ_{min}	250 -6.0	325 -4.9	425 -3.7	μ W dBm
Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) ($I_F=20$ mA)	t_r, t_f	-	.5	-	μ s
Capacitance (F=1 MHz)	C_0	-	30	-	pF
Forward Voltage ($I_F=20$ mA)	V_f	1.7	1.9	2.1	V

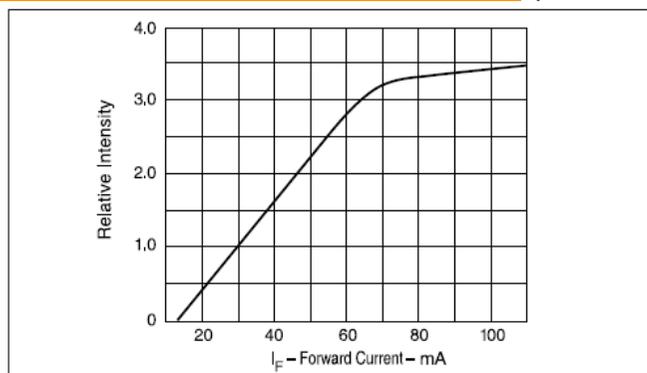


FIGURE 1. Normalized power launched versus forward current.

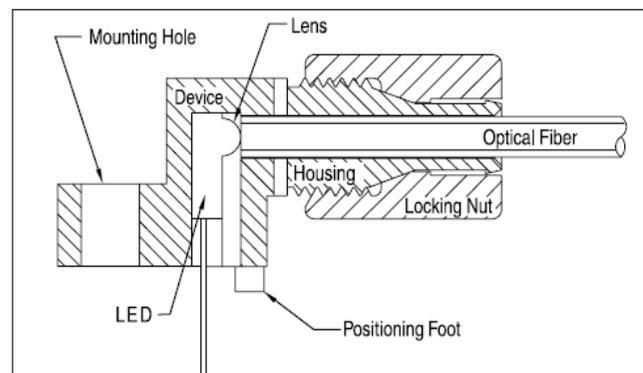
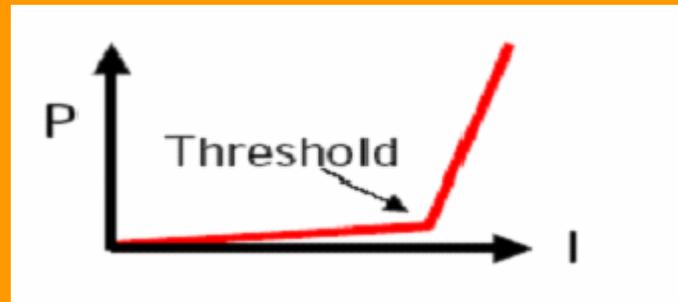


FIGURE 3. Cross-section of fiber optic device.

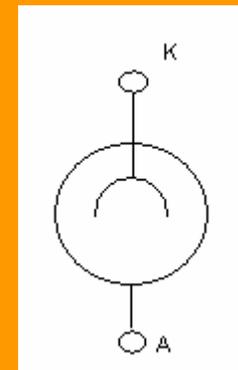
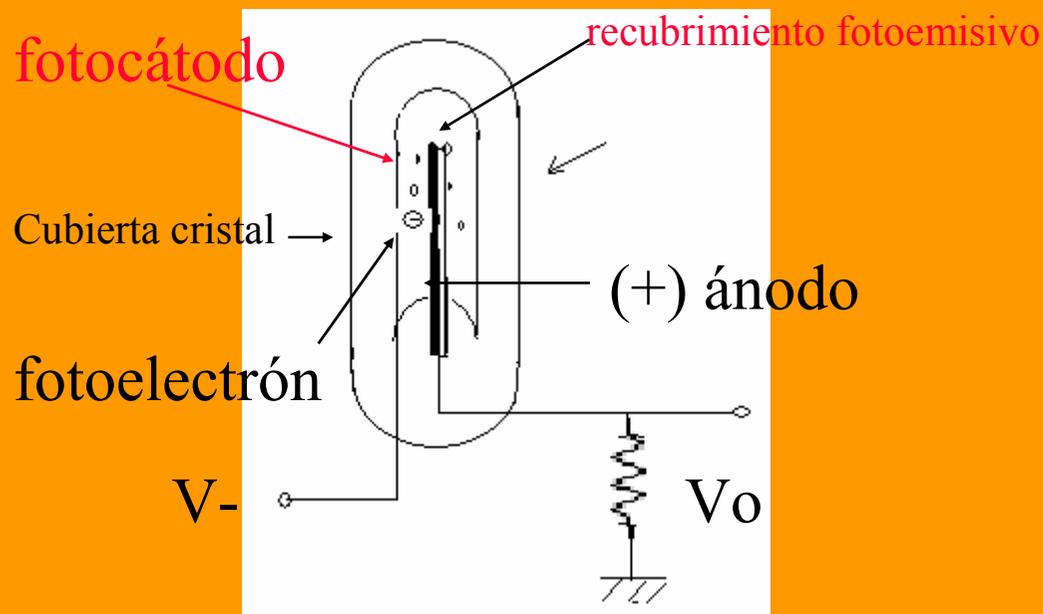
Emisores. LASER

- **LASER** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
 - Emisión estimulada de la luz confinada en una cavidad resonante.
 - Polarizados en directa con I adecuada
 - Potencia total mW-W
 - Anchuras espectrales menores



Transductores fotoemisivos

“Emisión de e^- cuando se ilumina un metal”



Símbolo

Se genera corriente proporcional a la luz incidente
Corrientes pequeñas, muy lineal, respuesta espectral según cristal



Tubo fotomultiplicador

- **PMT (Photomultiplier Tube):** Además del ánodo y fotocátodo, existe un multiplicador de e^- constituido por varios electrodos (llamados dinodos); cada uno de los cuales emite varios e^- , al incidir un e^- , acelerados por la ddp entre ellos.
- Posee efecto fotomultiplicador o ganancia, gran linealidad, respuesta rápida pero requiere tensiones alimentación elevadas y es frágil

¿Símbolo?



Fotomultiplicadores. Características

- Respuesta espectral: sensibilidad (corriente de salida/potencia incidente) frente a la longitud de onda relativa al fotocátodo
- Ganancia: Relación entre la corriente del ánodo y la del fotocátodo
- Corriente de salida cuando no incide luz en el fotocátodo
- Tiempo de respuesta (ns)
- Ejemplo: **Hojas R928 Hamamatsu**

Sensores de fibra óptica. Introducción

Gran difusión de aplicaciones con FO

- Luz infrarroja o visible
- Guiada por una fibra de vidrio o polímero
- Insensible interferencias electromagnéticas
- Barata y de bajo peso



- Transmite gran cantidad de datos a cortas y largas distancias

2.5 Gb/s 10- 40- 1000 Gb/s

- Abastece servicios: CATV, Datos, telefonía...



SFO. Ventajas e inconvenientes FO

■ ¿Ventajas?

- ☺ Insensibilidad interferencias electromagnéticas (son dieléctricos)
- ☺ Ligeras, robustas, flexibles, tamaño reducido (útil: biología, aviónica)
- ☺ Biocompatibles, seguras (químicamente inertes, no descargas eléctricas)
- ☺ Bajas pérdidas (según longitud de onda, independientes f).
- ☺ Gran ancho de banda, multiplexación
- ☺ Compatibilidad sistemas de telemetría y sensores distribuidos: Monitorización remota directa y continua.
- ☺ Gran sensibilidad (según tipo) y rango dinámico

■ ¿Inconvenientes?

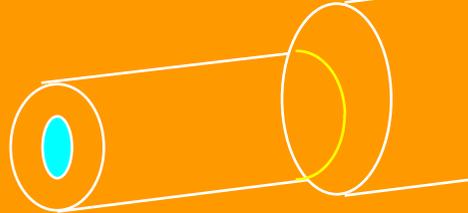
- ☹ Coste componentes y cambio tecnología frente existente
- ☹ Manejo y conectorización
- ☹ Efecto magnitudes espúreas en ocasiones

Estructura física FO

- ¿Qué son las fibras ópticas?

“Fibra capaz de propagar ondas luminosas de forma guiada”.

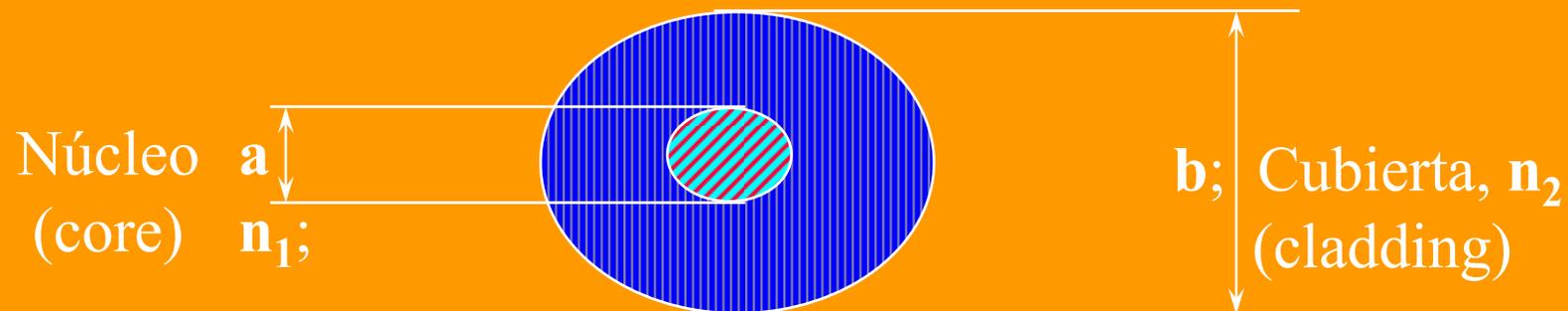
- ¿Cuál es su estructura física?. **2 materiales**



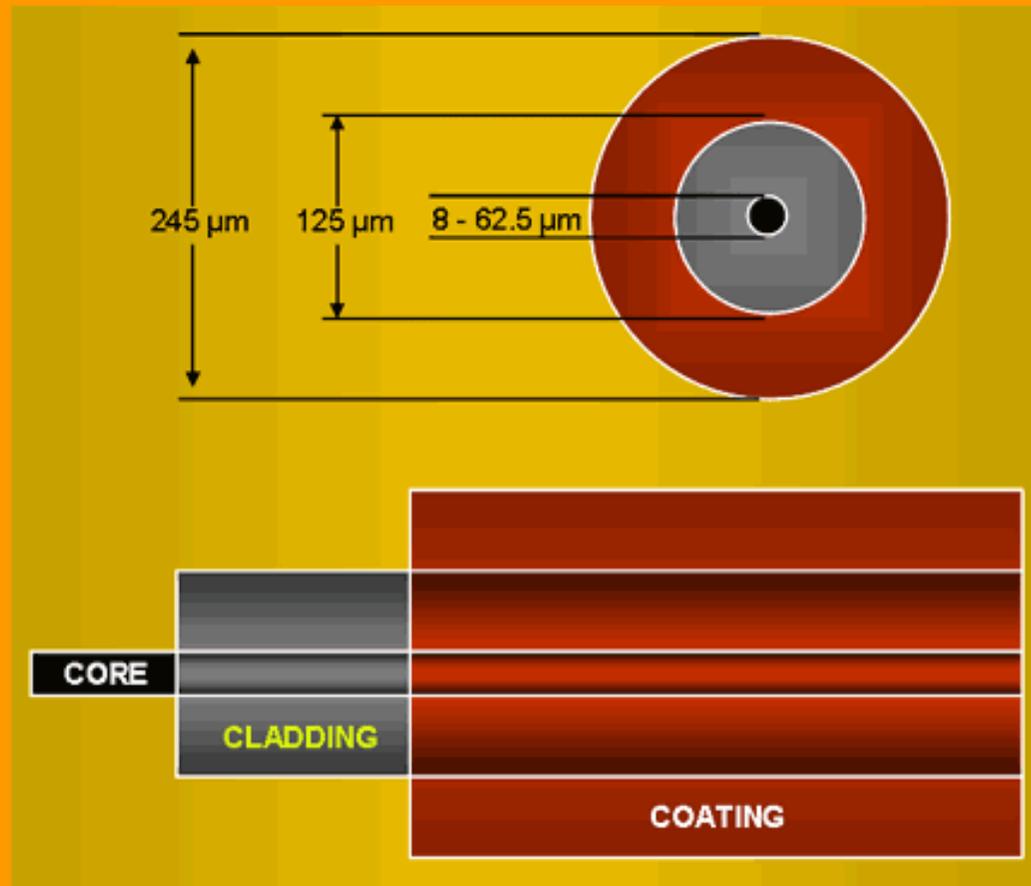
Indices
refracción distintos

Sección transversal

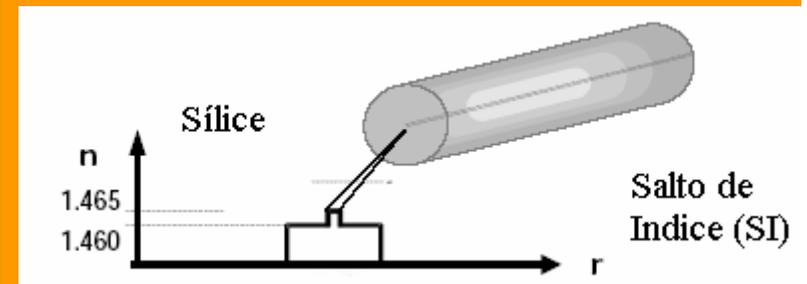
$$n_1 > n_2$$



Estructura FO. Algunos datos



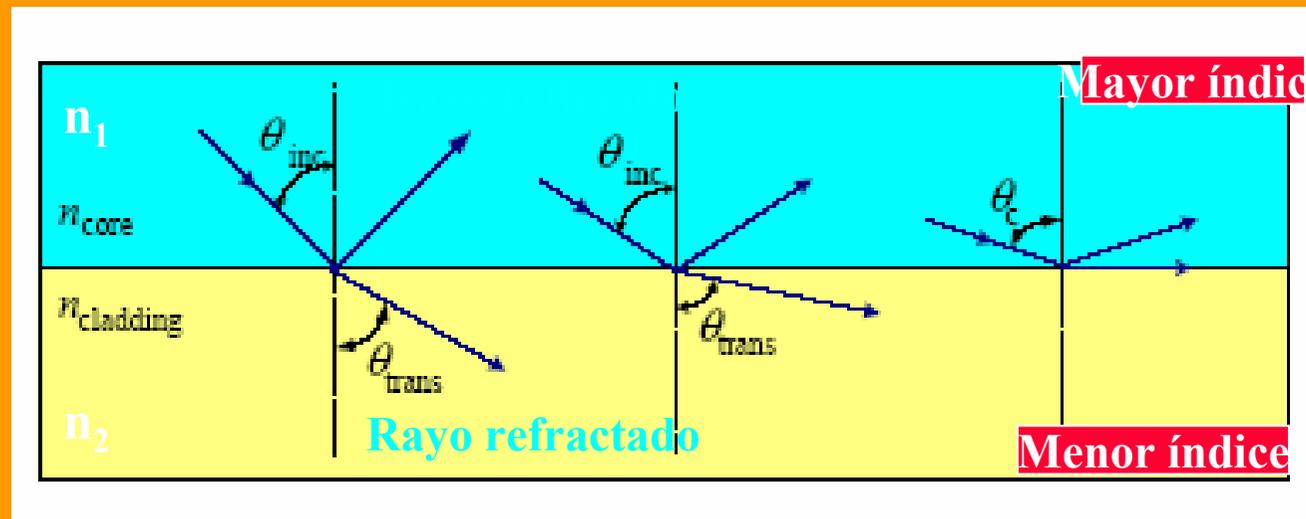
Diferencia índices pequeña



FO. Principios básicos.

- ¿Cuál es su principio de funcionamiento? *Guiado de la luz en el núcleo.*
- Descripción: **Teoría de rayos (Óptica geométrica).**

Ley Snell: $n_1 \sin \theta_{\text{inc}} = n_2 \sin \theta_{\text{trans}}$. $n_1 > n_2$ luego $\theta_{\text{trans}} > \theta_{\text{inc}}$, si $\theta_{\text{trans}} = 90^\circ$, ángulo incidente crítico $\theta_c = \arcsen(n_2/n_1)$, TODA LA LUZ CONFINADA FIBRA.



REFLEXIÓN TOTAL

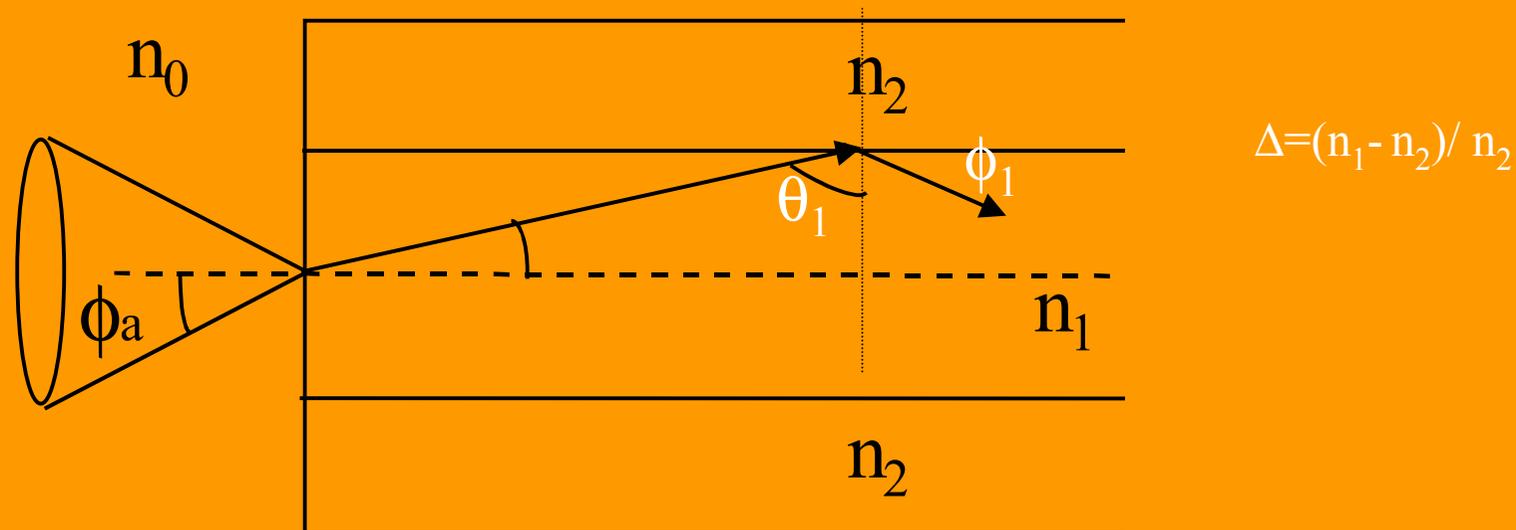
$$\theta_{\text{inc}} > \theta_c$$

FO. Parámetros. Acoplo luz

¿Qué luz se acopla a la entrada y se transmite por FO?

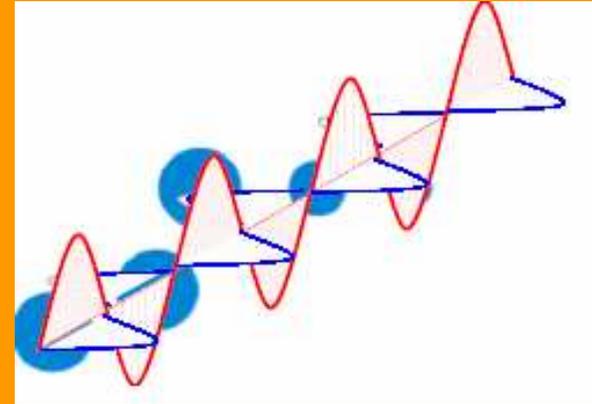
Sólo los rayos que inciden con un ángulo menor a Φ_a se propagan

- CONO ACEPTANCIA $2 \Phi_m$ (MÁXIMO). $\Phi_m > \Phi > 0$ (modo guiado).
- APERTURA NUMÉRICA; $AN = \sin \Phi_a = (n_{\text{núcleo}}^2 - n_{\text{cubierta}}^2)^{1/2} \approx n_1(2\Delta)^{1/2}$



FO. Parámetros. Ondas electromagnéticas

Terminología :

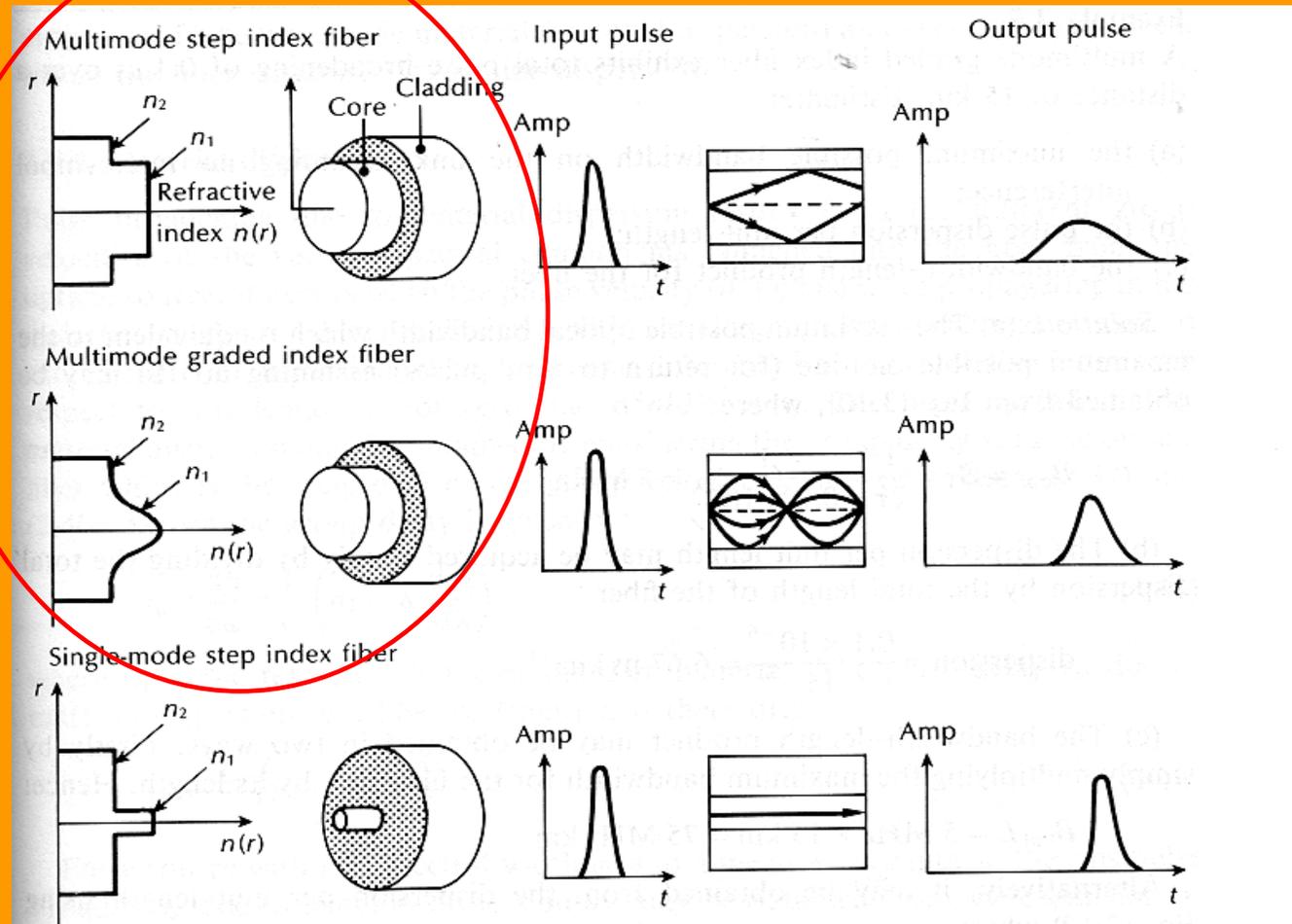


$\beta = 2\pi/\lambda$ (vacío), $\beta = 2\pi n(\lambda)/\lambda$ (medio índice refracción n) β Constante de propagación,

✓ Modos guiados: “*Tienen su energía confinada mayoritariamente en el núcleo de la fibra.*”

- se propaga sólo 1 modo, **FIBRA MONOMODO (SM)**,
- se propagan más modos, **FIBRA MULTIMODO (MM)**

Tipos de FO





Parámetros FO medio transmisión

- **Atenuación.** $A = 10 \log(P_{out}/P_{in})$. dB/Km ó dB/m
 - Depende de λ , materiales. Ventanas comunicaciones
- **Distorsión.** Ensanchamiento temporal experimentado pulso
 - Depende λ , materiales, distancia, fuente de luz.
 - Unidades producto ancho de banda x longitud:
 - MULTIMODO: MHz x Km,
 - MONOMODO: GHz x Km x nm



Tabla comparativa Parámetros FO

Tipo FO	NA	Atenuación	BWxDistancia	Tipo
1 mm Plástico	0.5	0.2 dB/m @ 660nm	4 MHz x Km	SI-M (1)
100/140 (2)	0.2-0.3	5 dB/Km @ 850nm	20 MHz x Km	SI- M
62.5/125 (3)	0.27	0.7 dB/Km @ 1.3 μ m	500-1200 MHxKm	GI-M
50/125 (4)	0.21	0.5 dB/Km @ 1.3 μ m	500-1500 MHxKm	GI-M
9/125 SI/SM (5)	0.1	0.35 dB/Km @ 1.3 μ m 0.25dB/Km @ 1.5 μ m	125 GHz x Km x nm 25 GHz x Km x nm	SI-SM

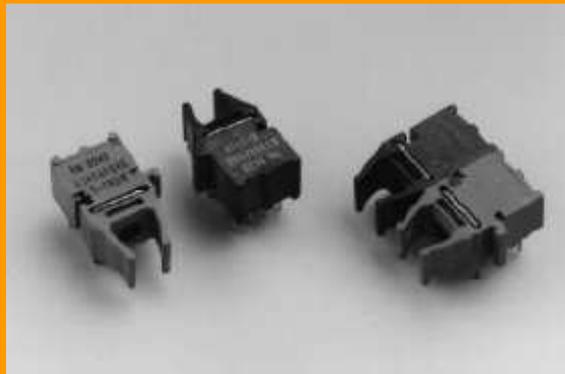
(1) Step-Index Multimode

(2) Cristal

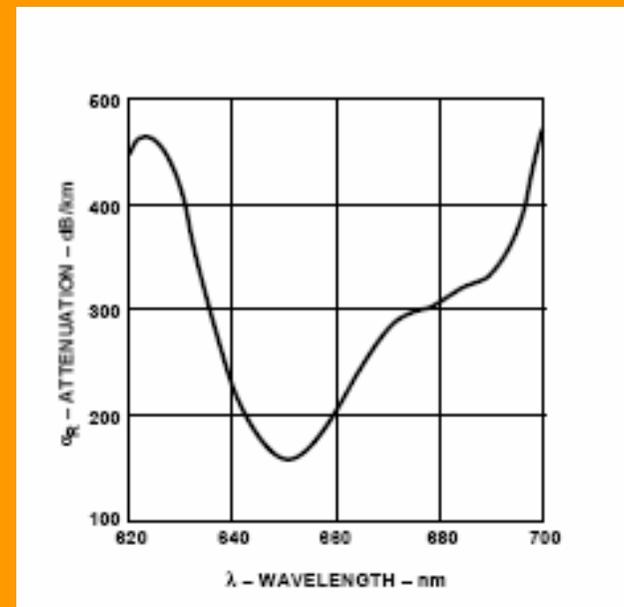
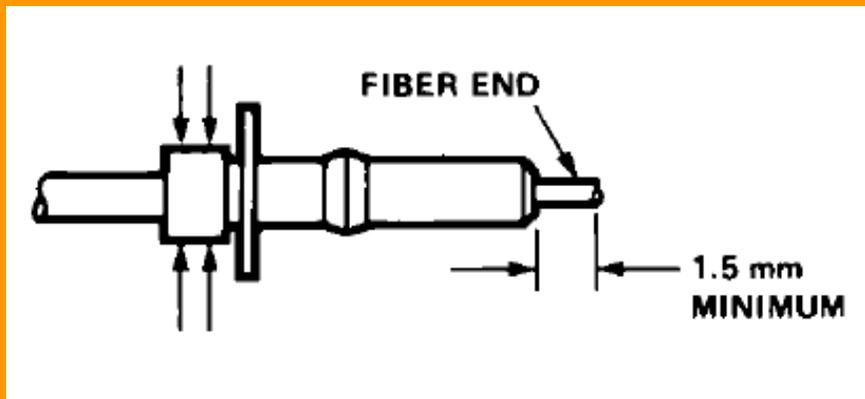
(3) Silice/

(4) Step-Index/Single Mode

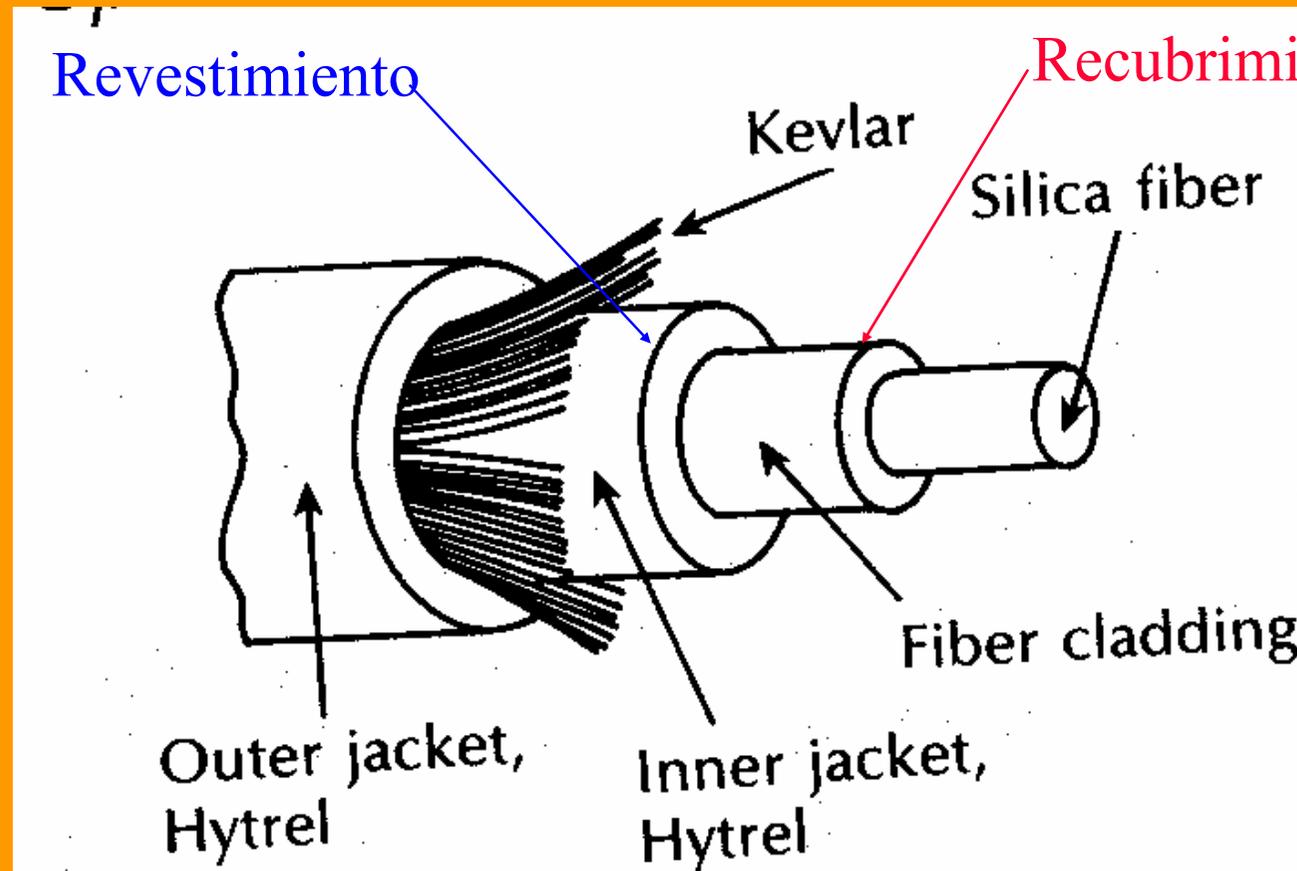
Hoja características FO plástico



HFBR-15XX



Cables FO. Estructura física



Tipos Conectores FO

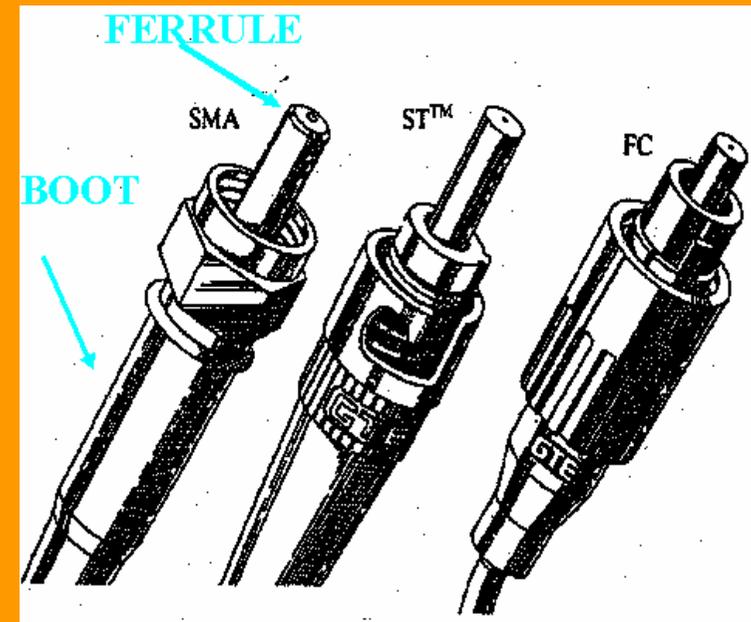
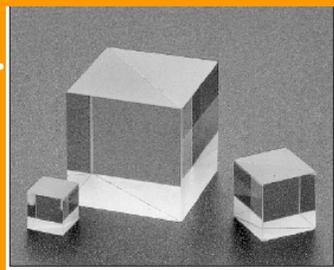


Foto del latiguillo VF45 a VF45

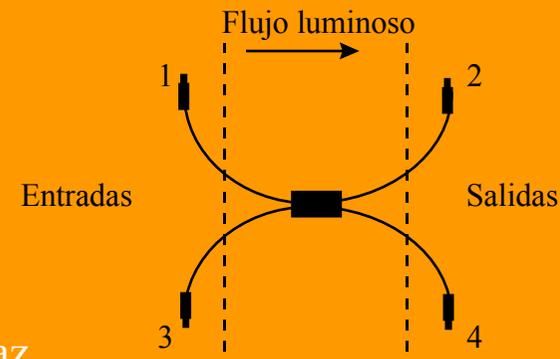
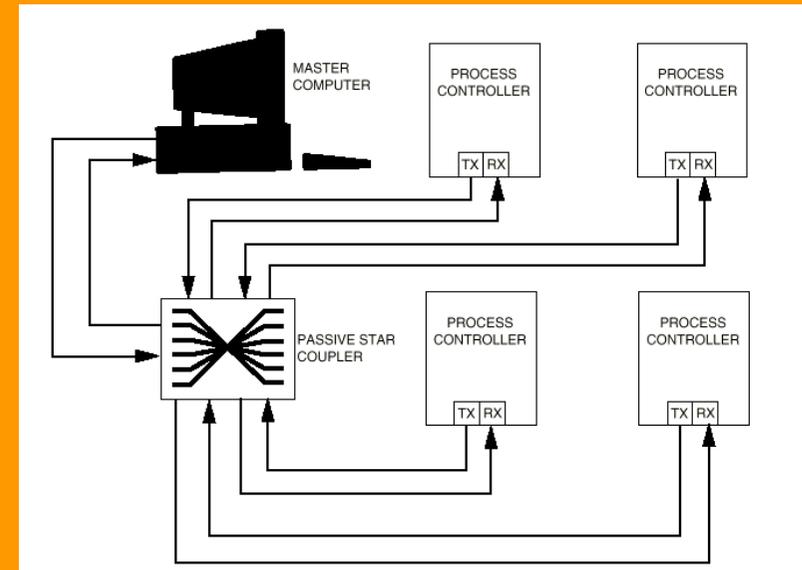
Dispositivos pasivos asociados

- División potencia óptica.
Distribución espacial:
 - Acopladores 2x2.
 - Divisores en Y
 - Acopladores en estrella
- Conexión FO entre sí.
Acoplador-conector.

■ ...



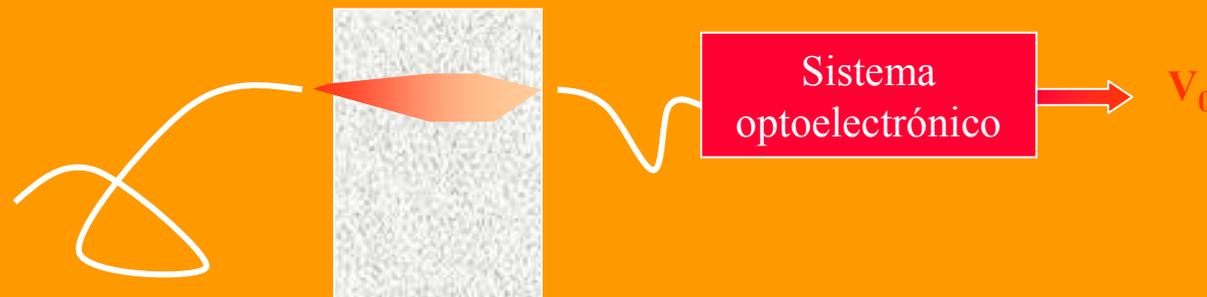
Melles-Griot. Divisores haz



Clasificación Sensores FO

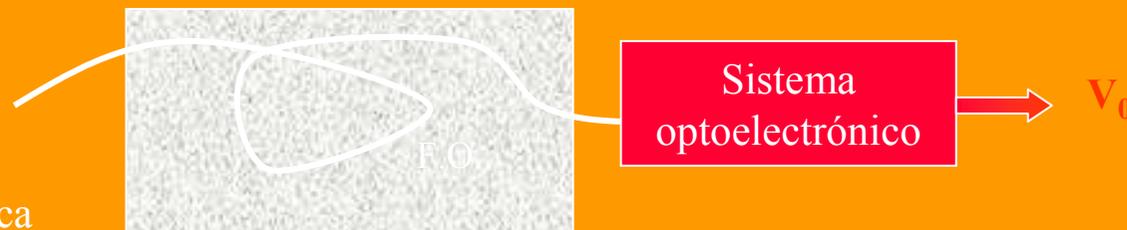
- FO transporta la luz que es modificada en un elemento externo por la magnitud a medir:
 - Reflexión, transmisión, fluorescencia

➤ Extrínsecos



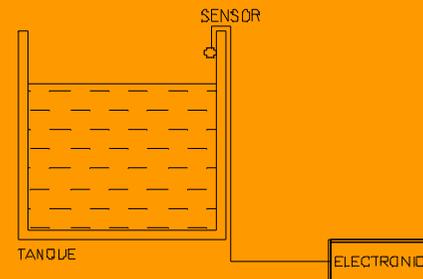
- Magnitud a medir afecta a los parámetros FO:
 - modulación amplitud, fase (interferometría), polarización luz, redes de Bragg $f(\lambda)$.

➤ Intrínsecos

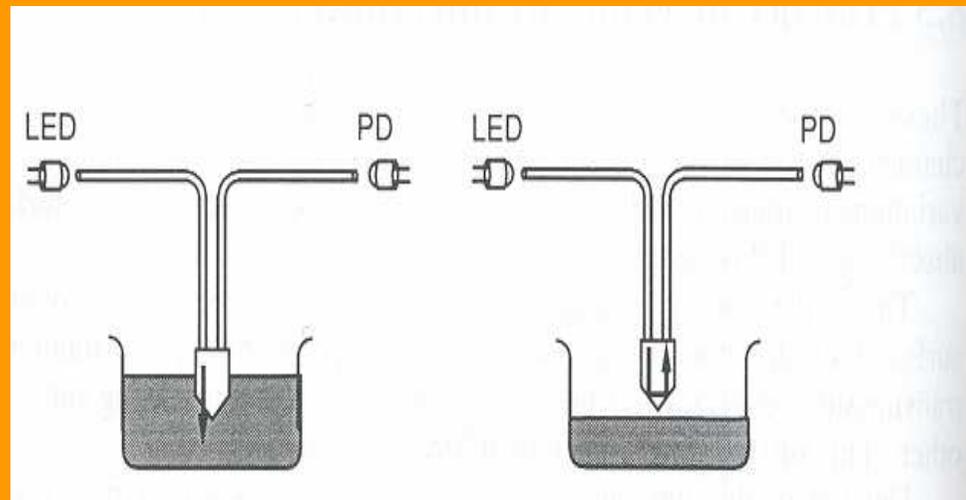


Sensores FO modulación amplitud

■ Reflexión



Puntual

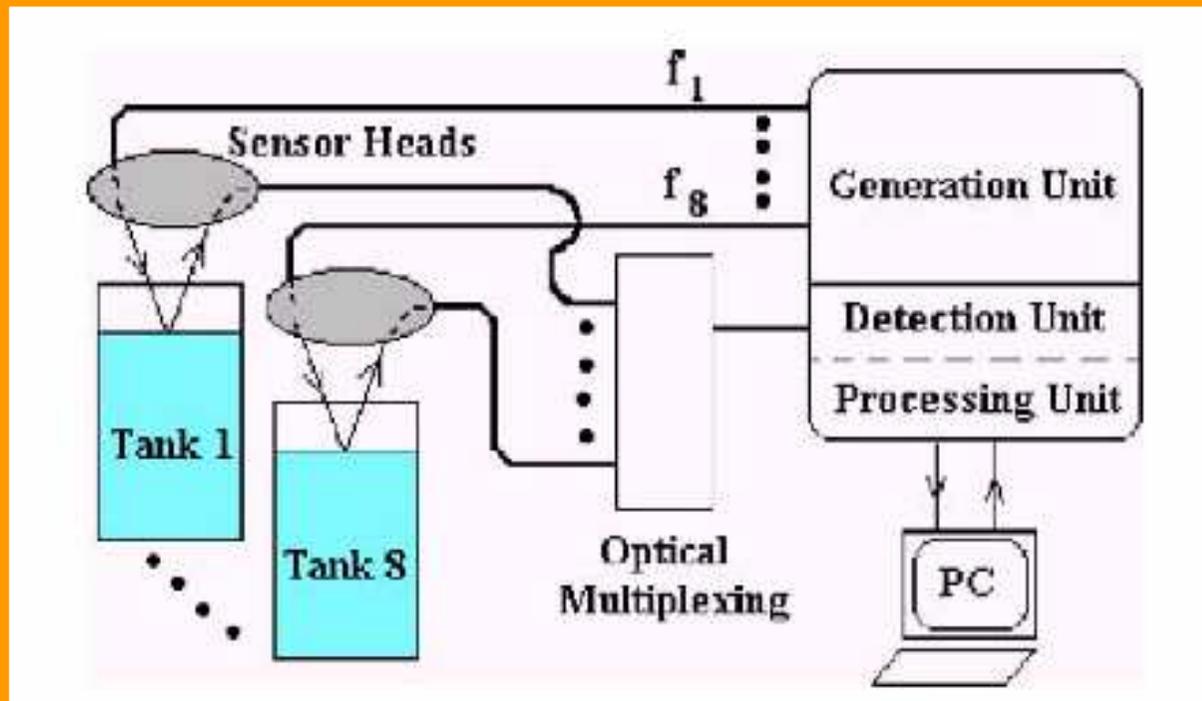


Instrumentación Electrónica I

Sensores FO modulación amplitud

Medida de nivel en depósitos

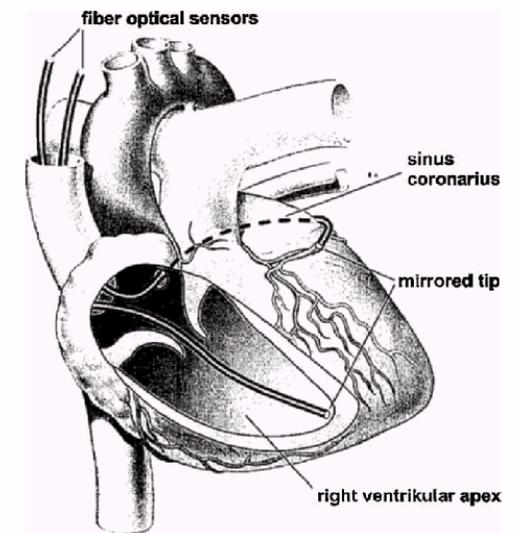
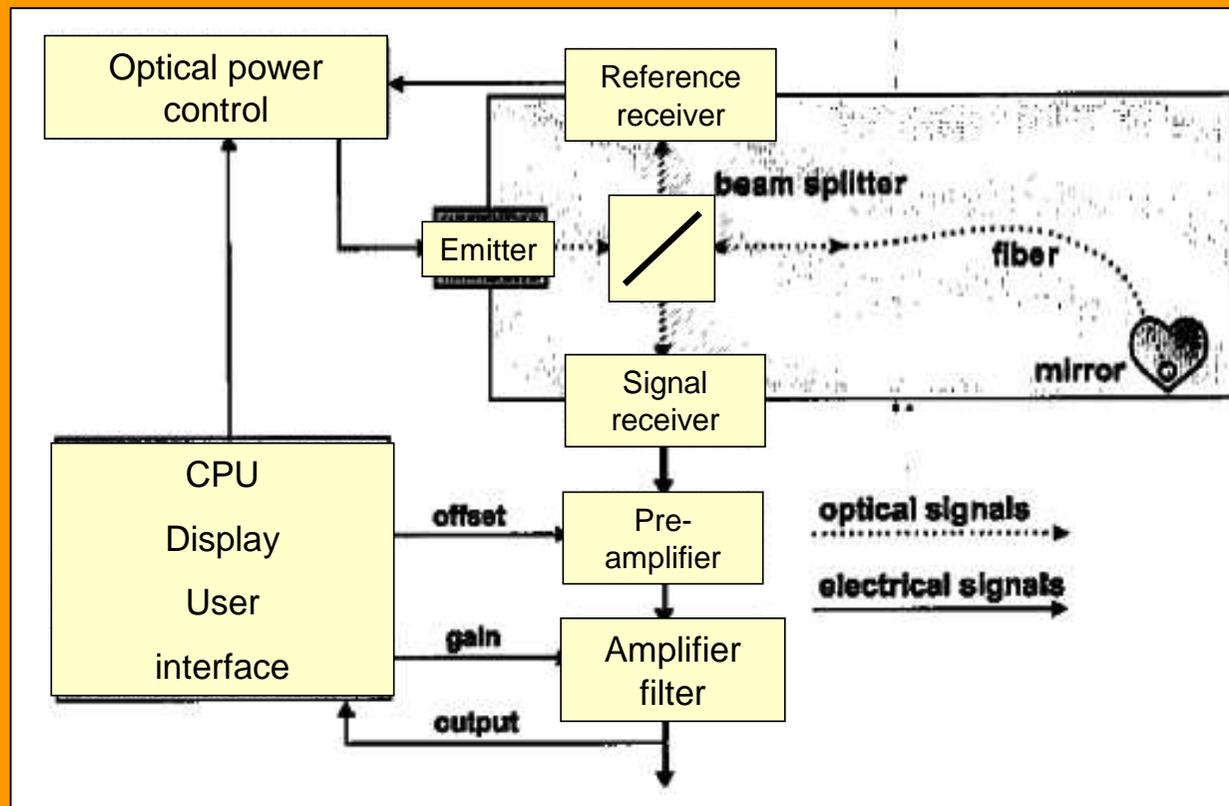
Continuo



C. Vázquez et al. *Multi-sensor system using plastic optical fibers for intrinsically safe level measurements*. Sensors and Actuators 116 (2004) 22–32

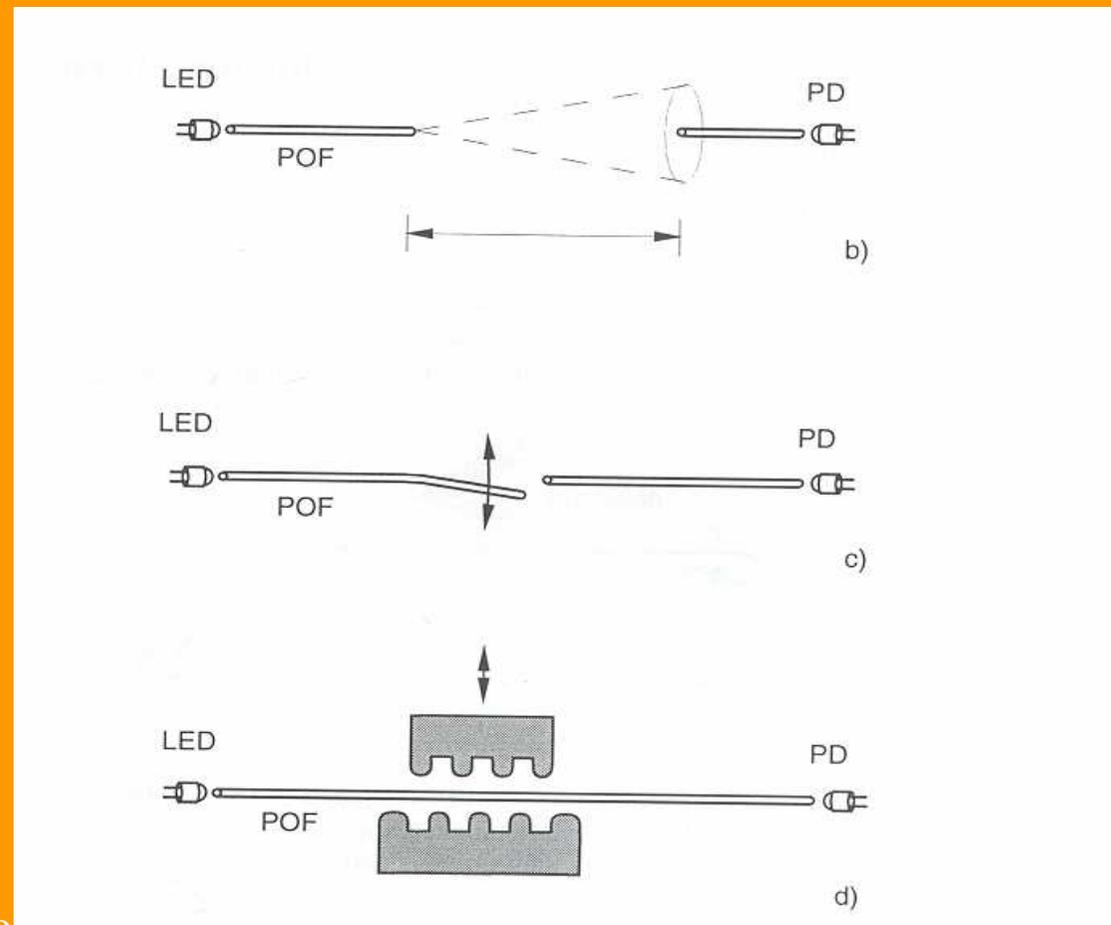
Sensores FO. Reflexión

Monitorización de contracciones cardíacas



Sensores FO modulación amplitud

■ Transmisión



distancia

vibraciones

deformaciones

Sensores FO. Transmisión I

Humedad relativa

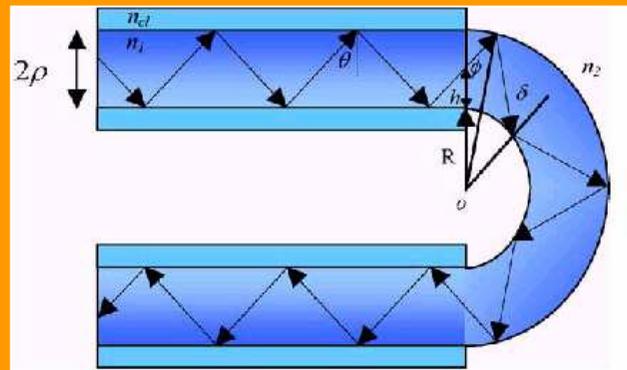
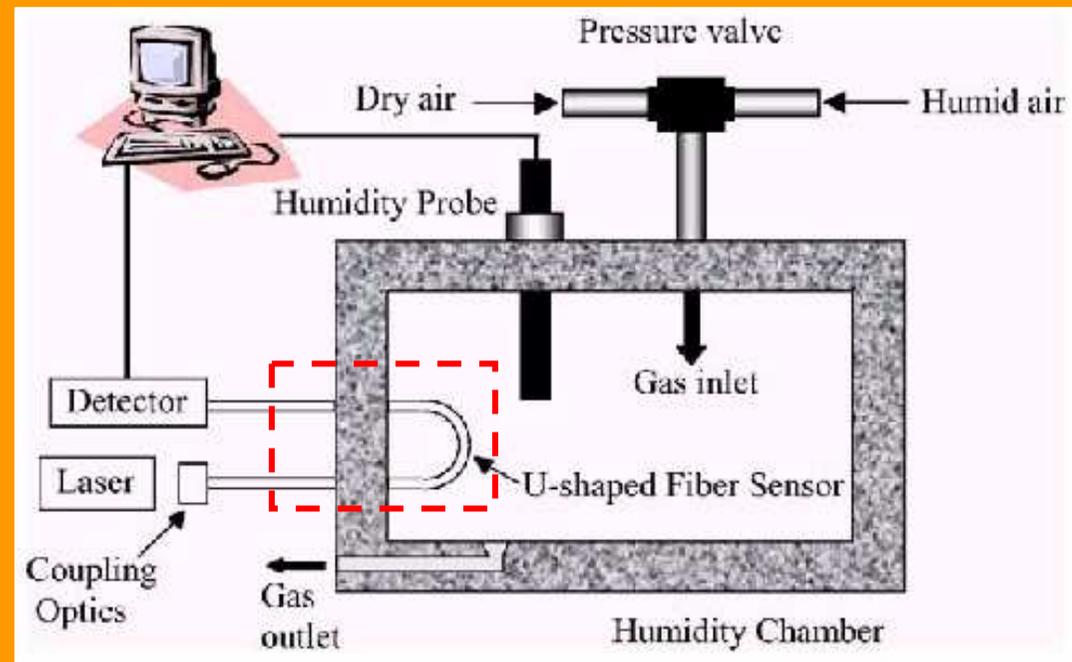


Fig. 1. Ray guidance in a U-shape optical fiber sensing probe.



Sunil K. Khijwania, Kirthi L. Srinivasan, Jagdish P. Singh: *An evanescent-wave optical fiber relative humidity sensor with enhanced sensitivity*. Sensors and Actuators B (2004) In press.

Sensores FO. Transmisión II



© 2005 Banner Engineering Corp.

Sensores FO microdeformaciones

“Las microdeformaciones en FO provocan pérdidas en la intensidad luminosa”.

Ejemplos Medida anomalías sistema masticador, presión y T.

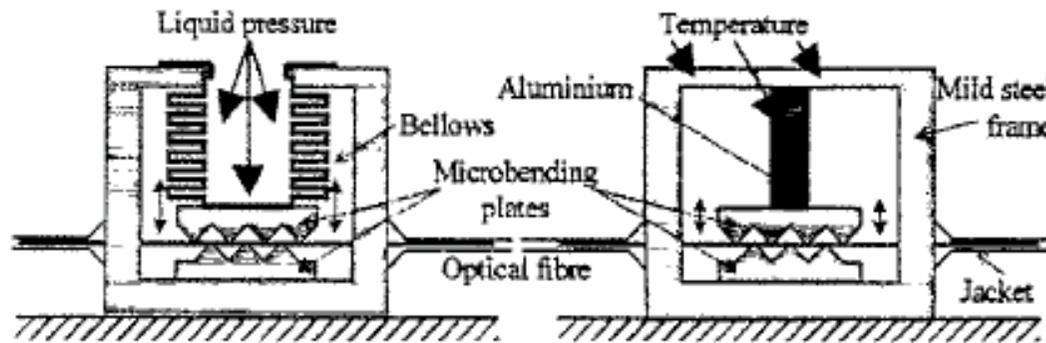
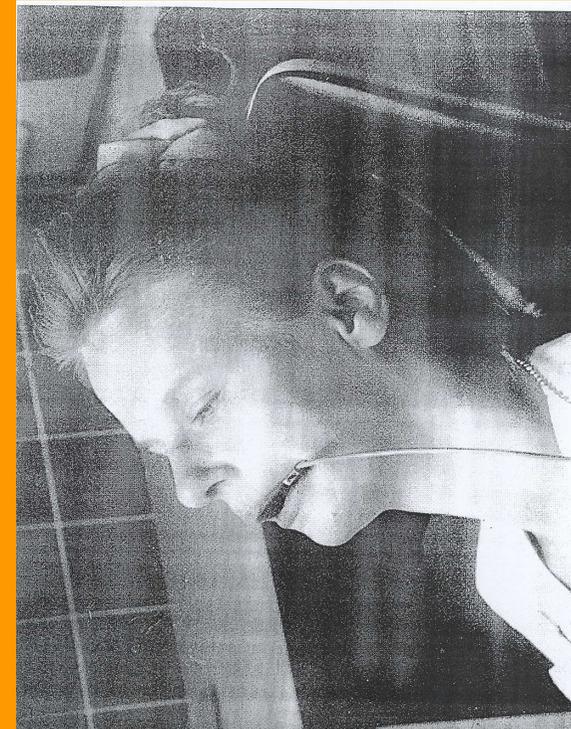
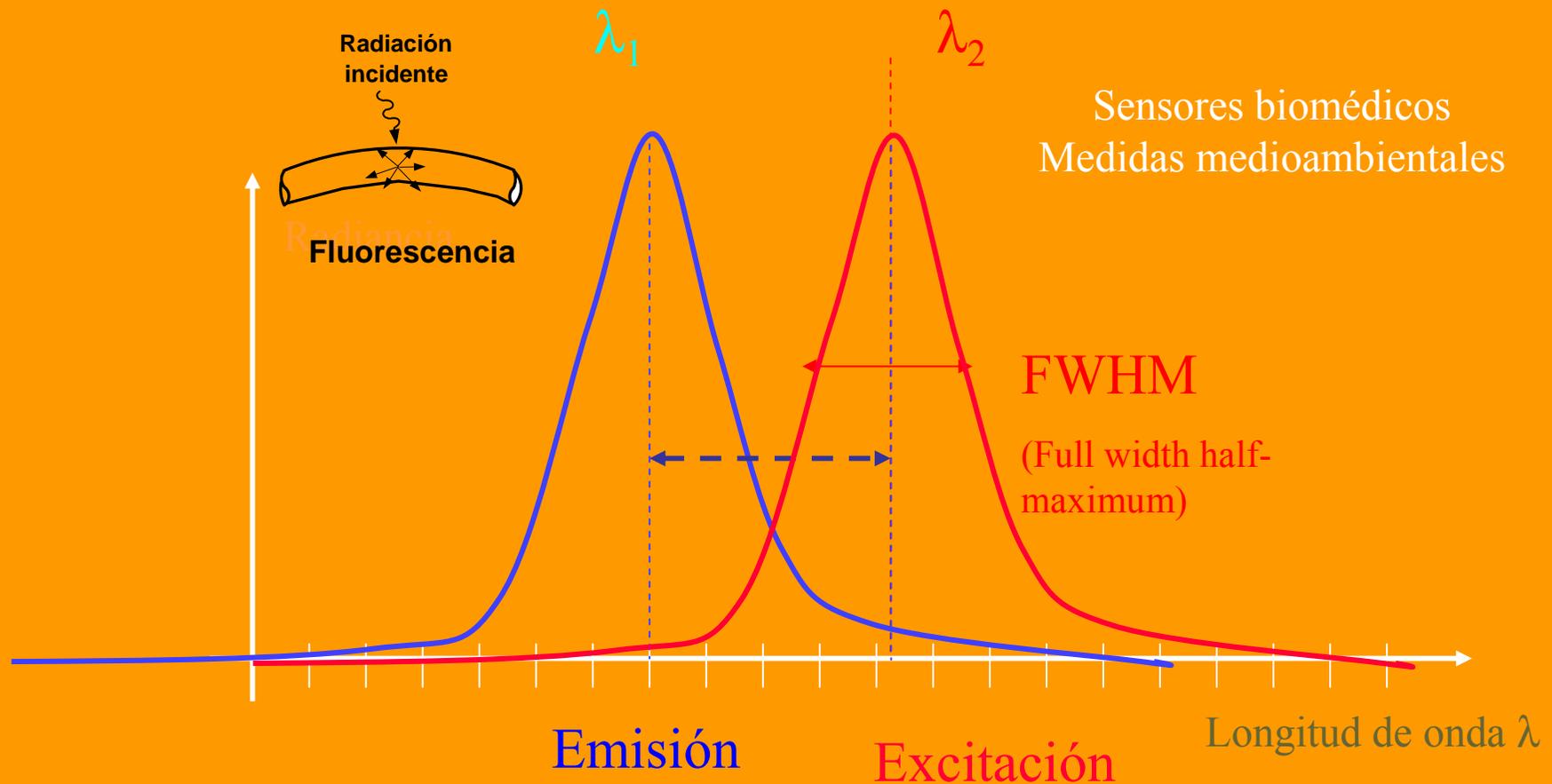


Fig. 1. Liquid pressure and temperature microbending sensors.

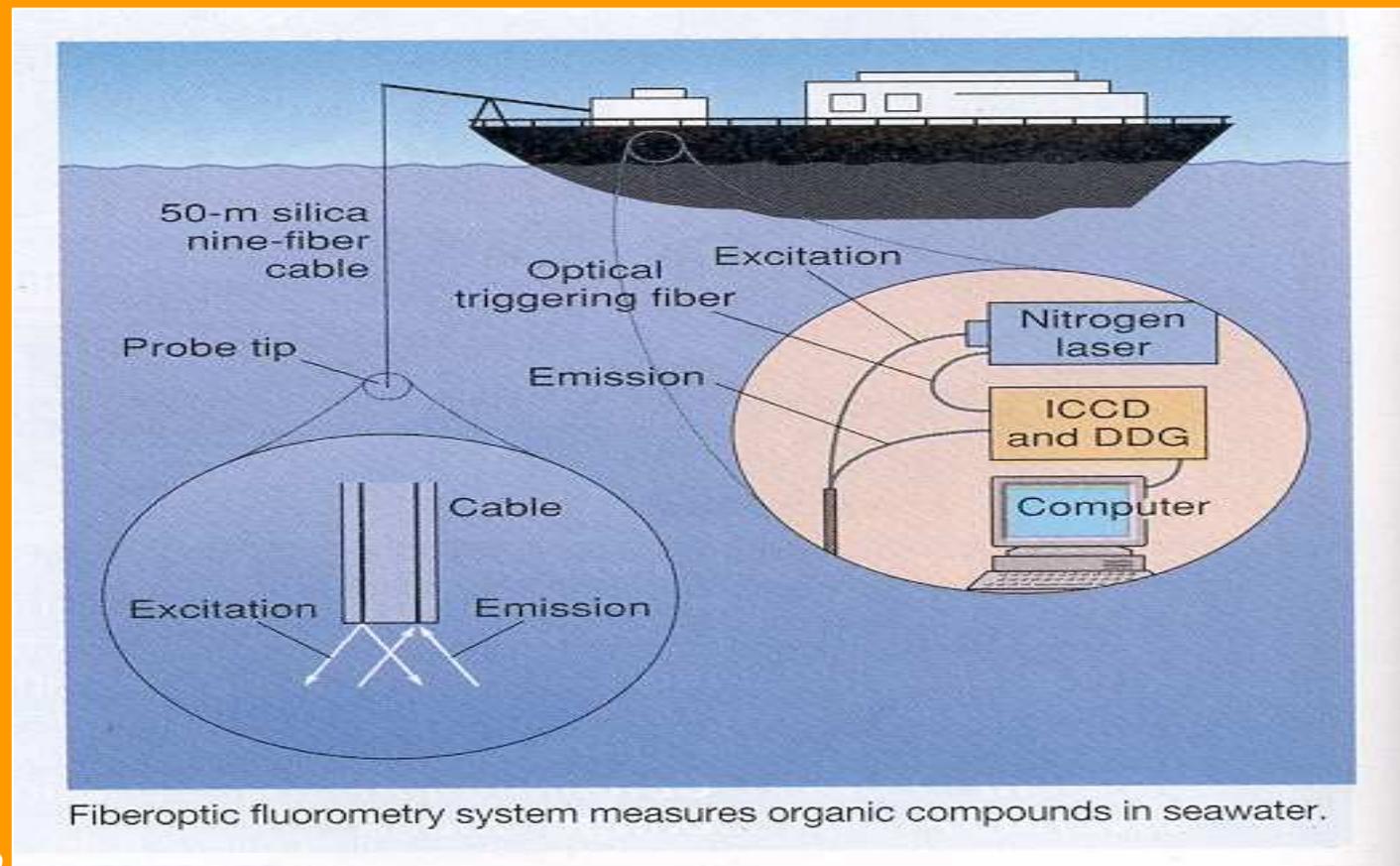
Sensores FO. Fluorescencia

Se envía un pulso de luz por FO que incita una radiación fluorescente en la sustancia de interés



Sensores FO. Fluorescencia

Detección de organismos en agua



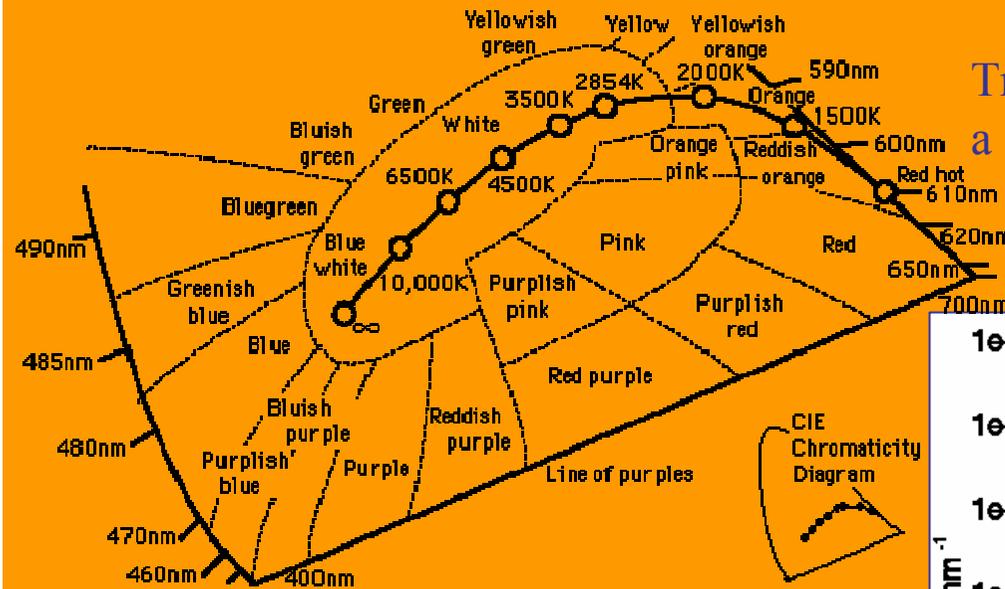


Circuitos acondicionadores.

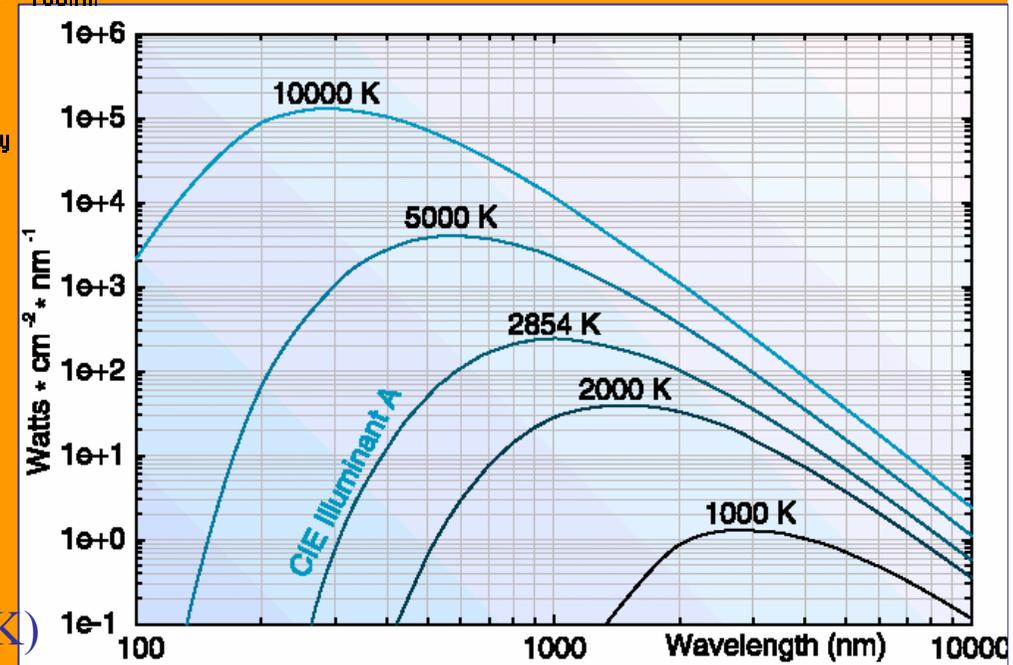
- Emisión: LED, láseres, driver circuitos realimentados con AO
- Recepción: fotodiodos, fototransistores encapsulados específicos, conversores I-V... Salida digital: Conversor luz-frecuencia: TSL230
- Kits específicos fabricantes Agilent Technologies

Instrumentación Electrónica I

Fuentes en la calibración I



Trayectoria curvas CIE de un cuerpo negro a diferentes T (K)



Radiación de un cuerpo negro a diferentes T (K)



Fuentes en la calibración II

Fuentes estándar utilizadas como fuentes blancas y sus T color correspondientes

Source	CIE Coordinates		Color Temperature	Description
	x	y		
A	.4476	.4075	2854K	Incandescent light
B	.3840	.3516	4874K	Direct sunlight
C	.3101	.3162	6774K	Indirect sunlight
D5000	.3457	.3586	5000K	Bright incand. light
D6500	.3127	.3297	6504K	Natural daylight
E	.3333	.3333	5500K	Normalized reference