

TEMA 2. FUNDAMENTOS DE GUIAS OPTICAS INTEGRADAS

Introducción

Electrónica: cuello de botella $\rightarrow$ ancho de banda $\Rightarrow$ Pasar a fotónica
transmisión $\rightarrow$ fibra óptica
procesado $\rightarrow$ circuitos fotónicos

Circuitos fotónicos $\rightarrow$ usan guía óptica integrada

- long. de onda
- aplicación



Materiales:

- contraste de índices ($\uparrow \rightarrow$ tamaño $\uparrow$)
- absorción
- efecto no lineales

Guías Ópticas Planares

- Evitamos Maxwell
- Teoría de rayos

$$\text{Snell } n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

1 Total Internal Reflection (TIR)

$$\theta > \theta_c$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 > n_2, n_3$$

2 Vertical standing wave condition

$$2hk_y + \phi_u + \phi_l = 2m\pi$$

$$k_y = k \cos \theta = k_0 n_1 \cos \theta$$

TE y TM
 n_1 y n_2

modos m

$$k_y = k_0 n_1 \cos \theta = \frac{2m\pi - \phi_u - \phi_l}{2h}, m=0, 1, \dots, m_{\max}$$

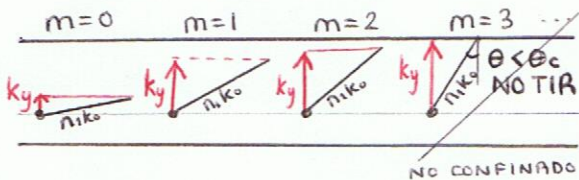
cada m implica un ángulo θ cada vez menor
 $m_{\max}$ a partir del cual $\theta < \theta_c$

Guía planar simétrica ($n_2 = n_3$) $\phi_u = \phi_l$



1 ignorar posibles soluciones aquí

Nº de modos $(\lfloor m_{\max} \rfloor + 1)$



En guías simétricas existe SIEMPRE el modo guiado $m=0$ para cada polariz. Modo fundamental. Frec. corte cero

$$k_y = k_0 n_1 \cos \theta = \frac{2m\pi - \phi_u - \phi_l}{2h} \approx \frac{2m\pi}{2h}$$

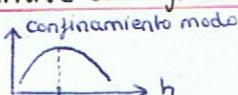
$$\theta_1 = \theta_c \leftrightarrow m_{\max}$$

Si Exigimos $m_{\max} < 1$
Condición monomodo
$$\frac{h}{\lambda} \leq \frac{1}{2\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

$$m_{\max} = \frac{h k_0 n_1 \cos \theta_c}{\pi} \quad \cos^2 \theta_c = 1 - \sin^2 \theta_c = 1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$$

$$m_{\max} = 2\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \frac{h}{\lambda}$$

Límite de difracción



Máximo confinamiento guía monomodo $h \approx \frac{\lambda}{2n_1}$

Fresnel

Reflexión al cambiar de medio

$$\frac{n_2}{n_1}$$

$$E_i$$

$$E_r = r \cdot E_i$$

$$r = |r| e^{i\phi}$$

$$r_{TE} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_1 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}$$

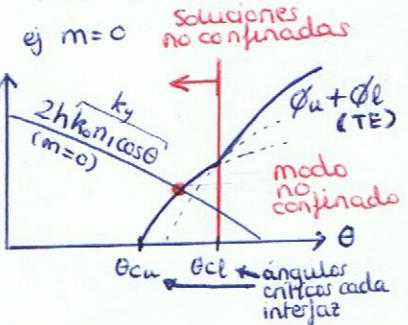
$$r_{TM} = \frac{n_2^2 \cos \theta_1 - n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_2^2 \cos \theta_1 + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}$$

$\Rightarrow |r| = 1$ si hay TIR
 $\Rightarrow \phi$ depende de θ cambio de fase polariz n_1, n_2

$$\phi_{TE} = 2 \tan^{-1} \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}{\cos \theta_1}$$

$$\phi_{TM} = 2 \tan^{-1} \frac{\sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2} \sin^2 \theta_1 - 1}}{\frac{n_2}{n_1} \cos \theta_1}$$

En guías asimétricas NO SIEMPRE existe un modo guiado $m=0$ (especialmente si hay bajo contraste de índices)



solución:
 $\rightarrow$ aumentar $2hk_y$ índice n_1 $\rightarrow$ espesor
 $\rightarrow$ disminuir θ_c (contraste índices)
(puede ser guiada solo una polarización)

Teoría electromagnética

Perfil Modal calculable

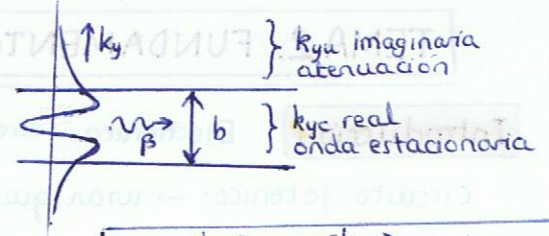
$$k_{yi}^2 + \beta^2 = k_0^2 n_i^2$$

Ecs. Maxwell

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_m \epsilon_m \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \mu_m \epsilon_m \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \rightarrow \vec{E}_x = \begin{cases} E_u e^{-j k_{yu} (y - b/2)} \cdot e^{-i \beta z} \cdot e^{j \omega t} \\ E_c e^{-j k_{yc} y} \cdot e^{-i \beta z} \cdot e^{j \omega t} \\ E_l e^{+j k_{yl} (y + b/2)} \cdot e^{-i \beta z} \cdot e^{j \omega t} \end{cases}$$

$E_x(y)$



condiciones de contorno

$$\tan^{-1} \left[\frac{k_{yl}}{k_{yc}} \right] + \tan^{-1} \left[\frac{k_{yu}}{k_{yc}} \right] = k_{yc} h + m\pi$$

Expresión para los modos idéntica a la obtenida por rayos

Métodos numéricos (FDTD y BPM)

Velocidades

$$E(z, t) = E_0(z - v_g t) e^{i(\beta z - \omega t)}$$



Velocidad de fase:

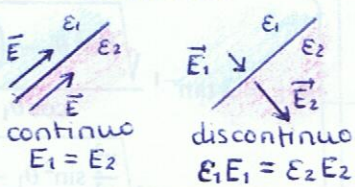
$$v_p = \frac{c}{n_{eff}} = \frac{\omega}{\beta}$$

Velocidad de grupo

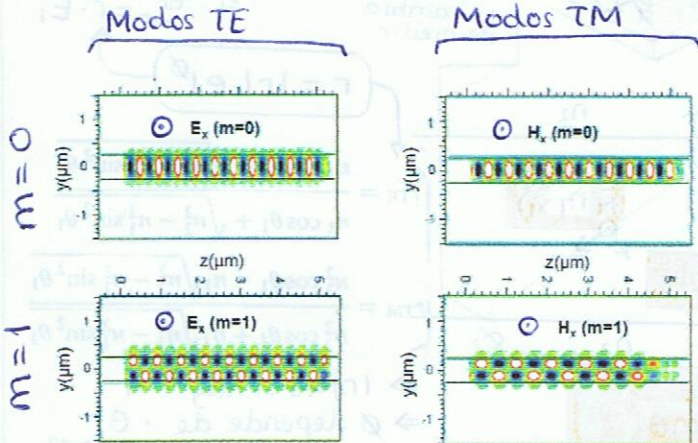
$$v_g = \frac{c}{n_g} = \frac{\partial \omega}{\partial \beta}$$

si n_{eff} no varía en frecuencia (no dispersivo)
 $n_g = n_{eff}$

Recuerda:

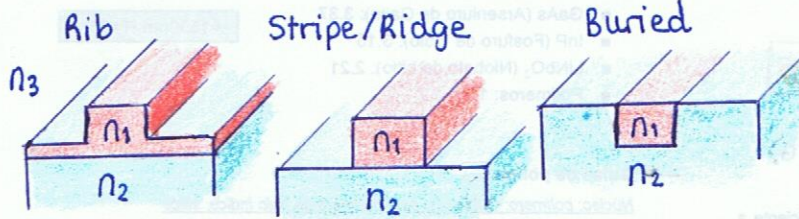


E_y sería discontinuo
 E_z sería continuo



Guías ópticas rectangulares

$n_1 > n_2, n_3$ confinamiento por TIR



$$n_2, n_3 < n_{eff} < n_1$$

lo dan los simuladores
 $\beta = k_0 n_{eff}$

Estrictamente no es TE y TM pero se llaman así inspirándose en la guía planar vista de lado según qué campo PREDOMINE en X.

Contraste de índices

$$\Delta n = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1}$$

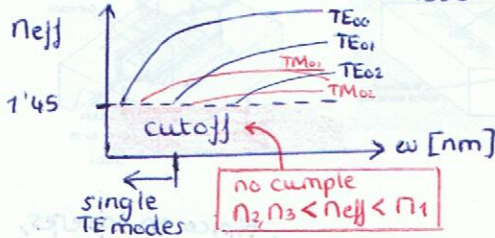
(límite de difracción) menor

- $\Delta n \uparrow \Rightarrow$
- 😊 - Confinamiento mayor
 - 😊 - Permite curvatura mayor
 - 😞 - Acoplo a fibra complicado
 - 😞 - Pérdidas de propagación mayores

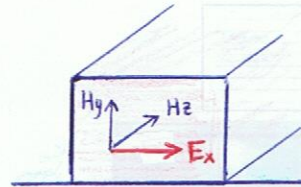
Transmisión monomodo/multimodo

Suele calcularse con métodos numéricos (BPM: Beam Propagation Method)

ej: $n_1 = 3.47, n_2 = 1.45, n_3 = 1, h = 220 \text{ nm}, \lambda = 1550 \text{ nm}$

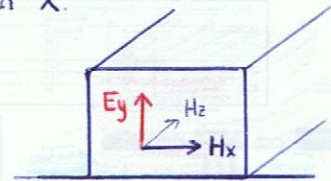


Polarización



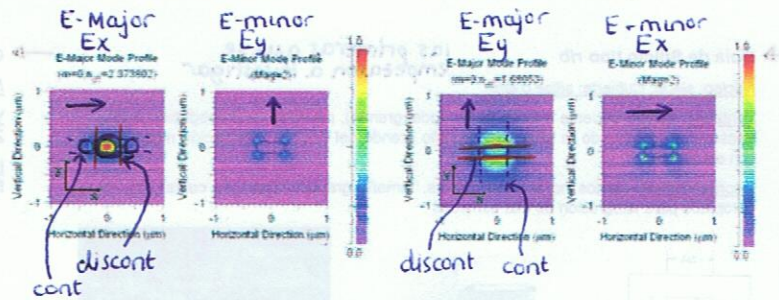
TE

• Predomina Ex



TM

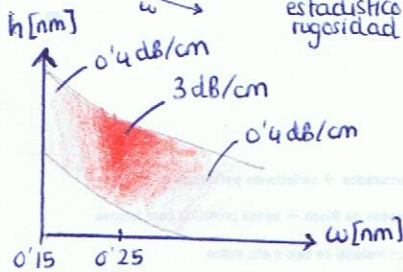
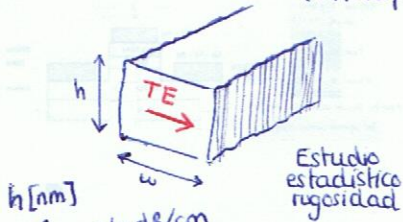
• Predomina Ey



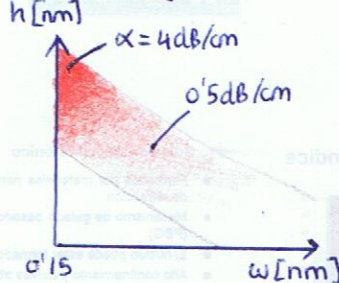
- Puede no predominar ni Ex ni Ey y no sabríamos cómo llamar al modo
- Si la guía es simétrica, existe siempre modo $m=0$ en ambas polarizaciones. Si no, se puede intentar una guía monomodo y con única polarización (difícil)

Pérdidas de propagación α (dB/cm)

- ↳ Absorción: Despreciable a bajas potencias
- ↳ Scattering: Rugosidad en las paredes (Principales pérdidas)



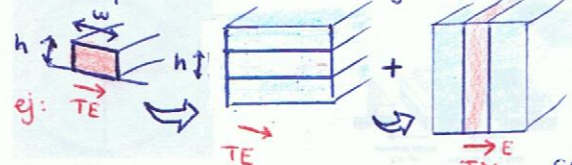
Disminuir la anchura del núcleo por debajo del límite de difracción hace que el modo "se salga" de la guía y le afecta poco la rugosidad



Método del índice efectivo

- Para aproximar con solución analítica
- Poco preciso cuando $\Delta n \uparrow$

① Descomponer guía rectangular en planar horizontal y vertical



② calcular índice efectivo de la guía horizontal

③ utilizar dicho índice efectivo como índice del núcleo de la vertical

cuidado con la polariz. (ver ejemplo)

Ejemplos de guías ópticas integradas

Índices de refracción de materiales más comunes:

- Silicio: 3.47
- Sílice (SiO_2): 1.45
- GaAs (Arseniuro de Galio): 3.37
- InP (Fosforo de Indio): 3.15
- LiNbO_3 (Niobato de Litio): 2.21
- Polímeros: 1.2 - 1.7

$\lambda = 1550\text{nm}$, $T = 25^\circ\text{C}$

Guías de Sílice (SiO_2)

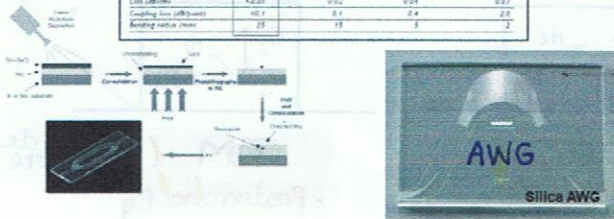
Núcleo: sílice dopada; **Cubiertas:** sílice

Ventajas: tecnología madura, pérdidas de propagación muy bajas, acoplo eficiente a fibra, posibilidad de ajuste mediante efectos térmicos

Inconvenientes: radio de curvatura grande (dispositivos grandes), efectos no lineales muy débiles, dificultad de integración con dispositivos activos

Table 1: Waveguide Properties and Propagation Characteristics of Four Kinds of Waveguides

Waveguide	Low S	Medium S	High S	Super-high S
Index difference (%)	0.2	0.45	0.75	1.5 - 2.0
Core size (μm)	3-6	3-7	4-6	4-6 (3-5)
Loss coefficient	0.2-0.3	0.02	0.02	0.02
Coupling loss coefficient	0.1	0.1	0.4	0.2
Bending radius (mm)	25	15	5	2



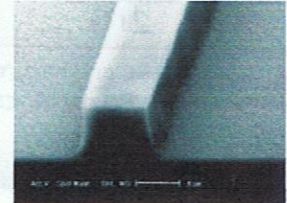
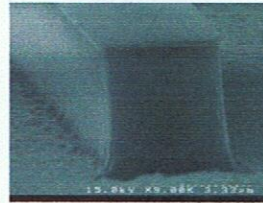
Guías de polímeros

Núcleo: polímero; **Cubiertas:** aire, polímero de bajo índice, sílice

Similar al caso de las guías de sílice

Algunos polímeros pueden diseñarse para tener efectos no lineales altos $\rightarrow$ muy apropiado para aplicaciones no lineales

El índice de refracción puede variar en un rango relativamente amplio



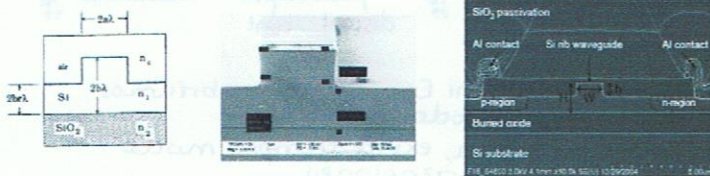
Guía de Silicio tipo rib

Núcleo: silicio; **Cubierta:** sílice o aire

Ventajas: acoplo eficiente a fibra (perfil modal grande), pérdidas de propagación bajas, transmisión monomodo (a pesar del tamaño grande del núcleo), integración monolítica con electrónica

Inconvenientes: efectos no lineales débiles, tamaño grandes (radio de curvatura), no apropiado para integración de alta densidad

las primeras que se empezaron a investigar

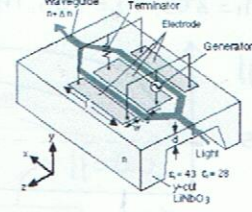
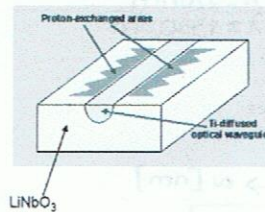


Guías de Niobato de Litio (LiNbO_3)

Núcleo: Titanio difundido en LiNbO_3 ; **Cubierta:** LiNbO_3 o aire

Ventajas: tecnología madura, alto coeficiente electro-óptico (moduladores Mach-Zehnder), acoplo eficiente a fibra

Inconvenientes: integración de baja densidad, sensible a la polarización, no permite fabricación en masa (no usa máquinas estándar electrónica)



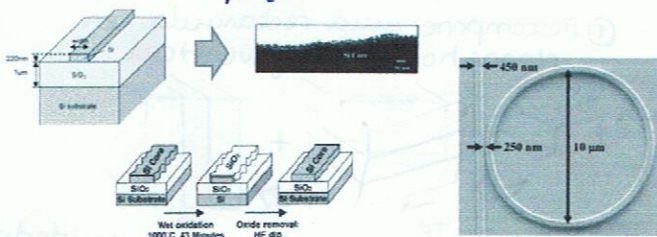
Guía de Silicio tipo strip (silicon wires)

Núcleo: silicio; **Cubierta:** sílice o aire

Ventajas: alto confinamiento, integración de alta densidad, posibilidad de fabricación en masa, integración monolítica con electrónica

Inconvenientes: pérdidas de propagación ($>1\text{dB/cm}$), efectos no lineales débiles, efecto electro-óptico despreciable, acoplo a fibra ineficiente

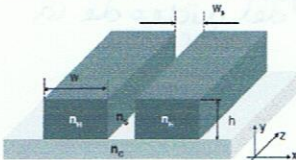
$\rightarrow$ bajo efecto electro-óptico



pérdidas están bajando a $< 5\text{dB/cm}$

Otros mecanismos de guiado

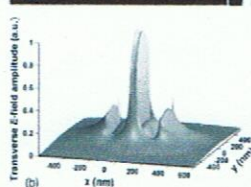
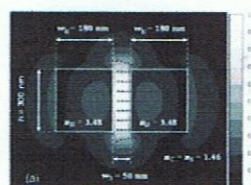
Guía tipo slot: confinamiento y guiado de luz en material de bajo índice



ESTRUCTURA: región (slot) con un material de bajo índice situado entre dos guías de alto índice (silicio)

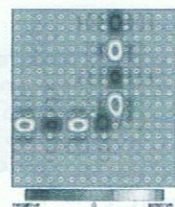
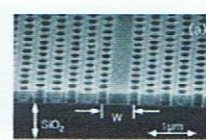
MECANISMO DE GUIADO: basado en la discontinuidad del campo eléctrico en las interfaces con el material de alto índice $\rightarrow$ modo guiado existe sólo para la polarización TE

APLICACIONES: introducción de materiales en la slot $\rightarrow$ sensores fotónicos, efectos no lineales (conmutación)



Guías en cristal fotónico

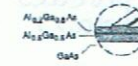
- Formados por materiales nanoestructurados $\rightarrow$ variaciones periódicas en el índice de refracción
- Mecanismo de guiado basado en modos de Bloch $\rightarrow$ banda prohibida para fotones (PBG)
- El núcleo puede estar formado por un material de bajo o alto índice
- Alto confinamiento y curvas abruptas



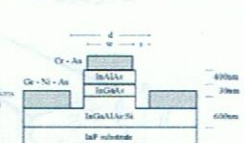
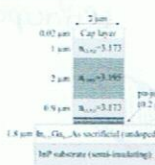
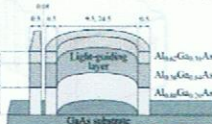
Guías plasmónicas

Heteroestructuras III-V

Guía de GaAs tipo rib



Heteroestructura AlGaAs/GaAs



TEMA 3: ESTRUCTURAS FUNCIONALES BÁSICAS

GUIA ÓPTICA

Confinamiento transversal a propagación

TIR

$$n_1 > n_2, n_3$$

A mayor contraste

- mas confinamiento
- menor tamaño
- mas pérdidas por rugosidad

Modos: conjunto discreto TE y TM - interesa monomodo

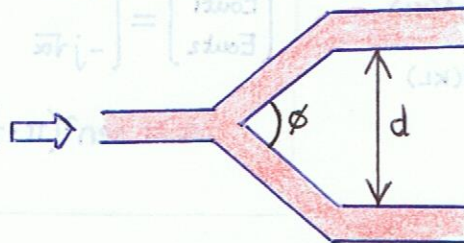
$m=0$ → depende del contraste, dimensiones y λ
en un cierto ancho de banda

$$E(x, y, z, t) = E_0(x, y) e^{(-\alpha + j\beta)z} e^{j\omega t}$$

rugosidad (no la da el simulador) $\beta = k_0 n_{eff}$
 $n_{cla} < n_{eff} < n_{core}$

UNION EN Y

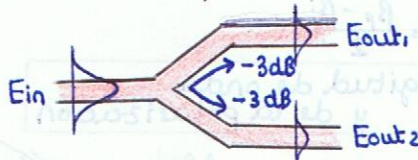
- amplio espectro
- muy baja dependencia con la polarización



Para d fijo:

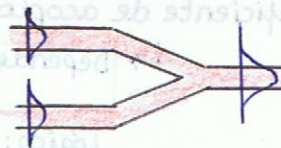
- $\phi \uparrow$ → mas compacta
- mas pérdidas por radiación

• Divisor de potencia



$$E_{out1} = E_{out2} = \frac{E_{in}}{\sqrt{2}}$$

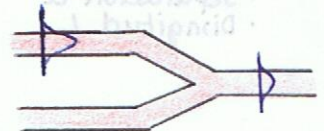
• Combinador de potencia



$$E_{out} = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_{in1} + E_{in2})$$

suma en campo incluye fase!

cuidado:



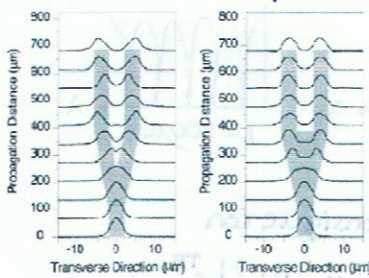
si entra sólo por un brazo, a la salida la potencia se divide en dos.

Es porque sólo se tx la componente par (de la pot?)

$$I_1 = I_{1/2} + I_{1/2}$$

• Optimización de la bifurcación (pérdidas) → varios artículos

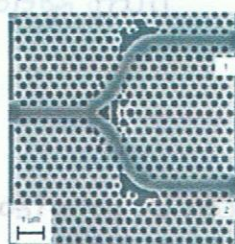
convencional index-tapered



low loss ultra small

Schematic	Loss
(a) 0.5 μm, 15°	2.0 dB
(b) 0.8 μm	0.5 dB
(c) 0.4 μm, 4.2 μm	0.5 dB
(d) 0.8 μm	0.1 dB
(e) 0.9 μm	0.3 dB
(f) 5.85 μm	0.1 dB

photonic crystal



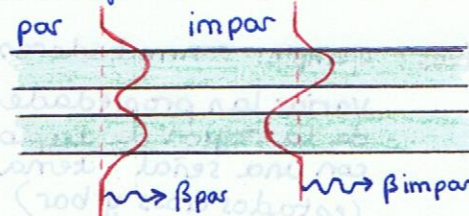
no es fácil. Está optimizado con algoritmos genéticos

ACOPLADOR DIRECCIONAL

Dos modelos: Supermodos y Acoplo de modos

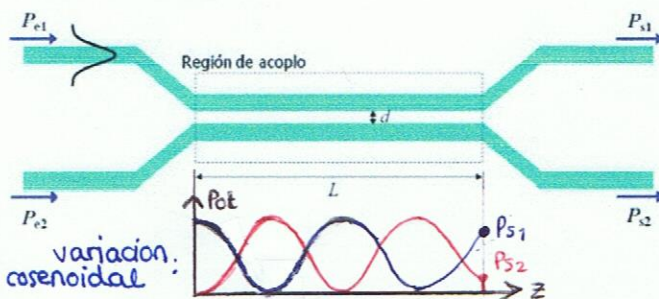
• Teoría de supermodos

En la región de acoplo existen dos modos:



El desfase relativo entre los dos modos varía con la propagación

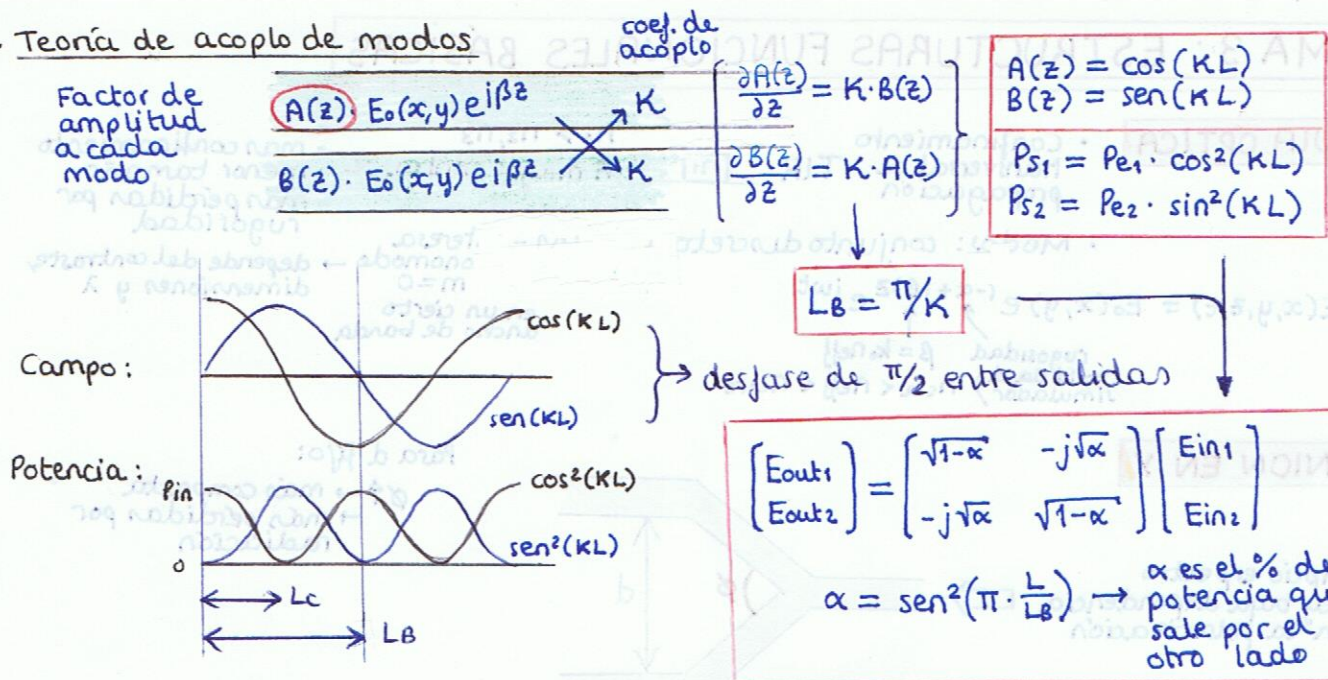
$$L_B = \frac{2\pi}{|\beta_p - \beta_i|}$$



L_c : longitud de acoplo

$2L_c$: L_B : longitud de batido

Teoría de acoplo de modos



Parámetros básicos

- separación d
- Longitud L

$$d \downarrow \rightarrow \kappa \uparrow \rightarrow L_B \downarrow$$

- Coeficiente de acoplo: $\kappa = \frac{\pi}{L_B} = \frac{\beta_e - \beta_o}{2}$

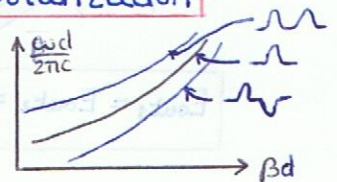
$L \rightarrow$ Depende de la longitud de onda y de la polarización

Lógico:

$$\beta_e = k_0 \cdot n_e = \frac{2\pi}{\lambda} n_e$$

$$\beta_o = k_0 \cdot n_o = \frac{2\pi}{\lambda} n_o$$

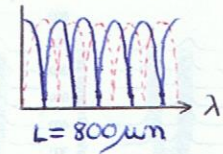
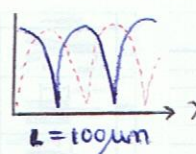
Mayor acoplo



Aplicaciones

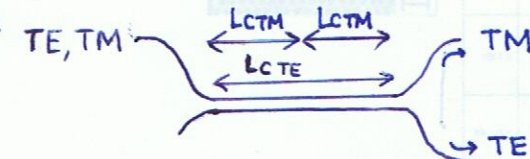
- Divisor/combinador de potencia a 3dB ($\alpha = 50\%$)
- Divisor de potencia 1:99 ($\alpha = 1\%$) $\rightarrow$ "tomar una muestra"
- Aprovechar dependencia con λ : multiplexador/demultiplexador, filtro óptico

A mayor L , más afecta un cambio en λ



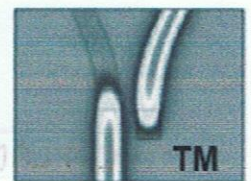
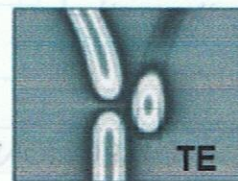
- Aprovechar la dependencia con la polarización

separador de polarización

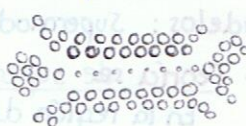


se consigue con

$$L_C^{TM} = m \cdot 2L_C^{TE}$$



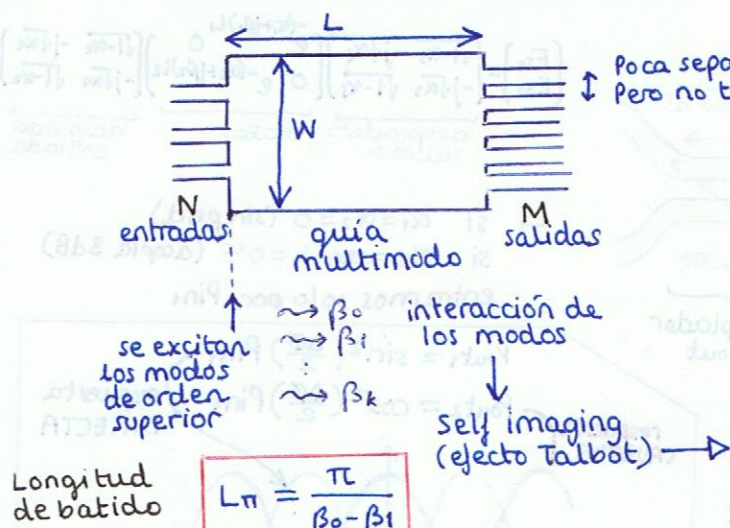
- Acopladores con cristales fotónicos



Reducción de la longitud

- Activos: ejemplo: Conmutadores
variar las propiedades de la región de acoplo con una señal externa (estados cross y bar)

INTERFEROMETRO MULTIMODO (MMI)



$$L\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1}$$

$$L\pi = \frac{4ncW_{eff}^2}{3\lambda}$$

$$W_{eff} = W + \frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{n_{cd}}{n_c} \right)^{2\sigma} (n_c^2 - n_{cd}^2)^{1/2}$$

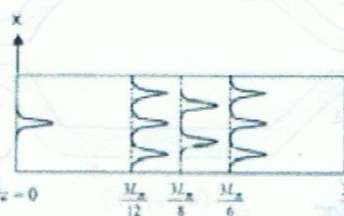
nucleo cubierta

Expresiones obtenidas mediante análisis 2D

En 3D se tiene altura h

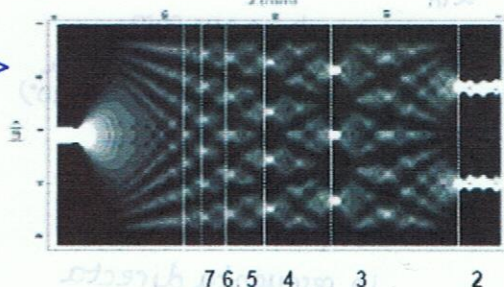
- Comenzar con $h \ll W$
- Hacer simulaciones numéricas

Poca separación para minimizar W y por tanto L
Pero no tan pequeña como para tener acople



$$L_N \times N = \frac{3L\pi}{N}$$

$$L_1 \times N = \frac{3L\pi}{4N}$$



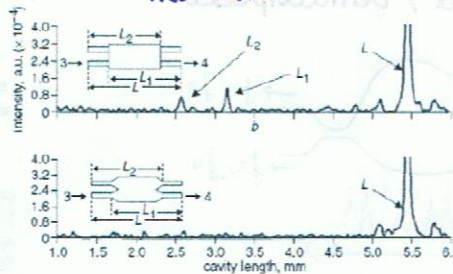
Ventajas:

- Funcionamiento en amplio espectro
- Baja dependencia con la polarización
- Tolerancia alta a desviaciones en fabricación

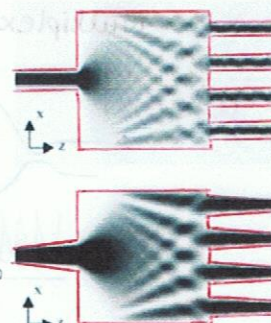
Optimizar guías entrada/salida:

- minimizar reflexiones → Fabry Perots
- reducir pérdidas de transmisión (tapered)

Cavidades/Resonancias

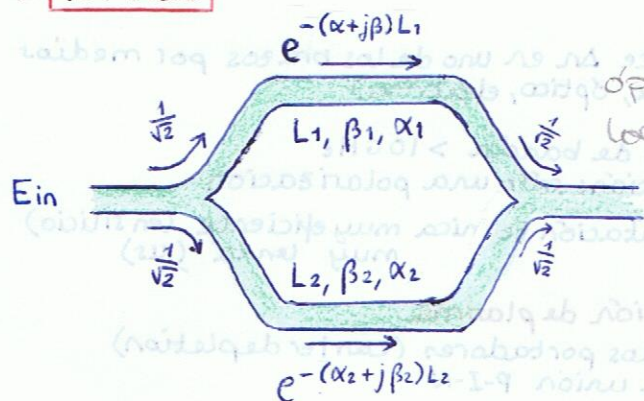


Pérdidas



INTERFERÓMETRO MACH-ZENDER

→ 1x1 MZI



Se basa en la interferencia de 2 señales ópticas q parten de un mismo origen y recorren longitudes efectivas ≠ ⇒ dif. fase ⇒ dif. pot. en out

$$E_{out} = \frac{1}{2} (e^{-(\alpha_1 + j\beta_1)L_1} + e^{-(\alpha_2 + j\beta_2)L_2}) E_{in}$$

→ si $\alpha_1 L_1 = \alpha_2 L_2$

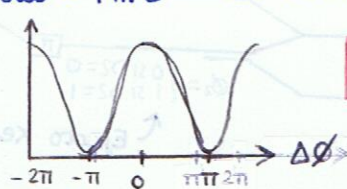
$$\begin{aligned} E_{out} &= e^{-\alpha L} E_{in} \cdot \frac{1}{2} (e^{-j\beta_1 L_1} + e^{-j\beta_2 L_2}) \\ &= e^{-\alpha L} E_{in} \cdot e^{-j\beta_1 L_1} \cdot \frac{1}{2} (1 + e^{-j\Delta\phi}) \\ &= e^{-\alpha L} E_{in} \cdot e^{-j\beta_1 L_1} \cdot e^{-j\frac{\Delta\phi}{2}} \cdot \left[\frac{e^{j\frac{\Delta\phi}{2}} + e^{-j\frac{\Delta\phi}{2}}}{2} \right] \\ &= e^{-\alpha L} E_{in} \cdot e^{-j\beta_1 L_1} \cdot e^{-j\frac{\Delta\phi}{2}} \cdot \cos(\Delta\phi/2) \end{aligned}$$

→ si $\alpha_1 L_1 \neq \alpha_2 L_2$

se degrada el

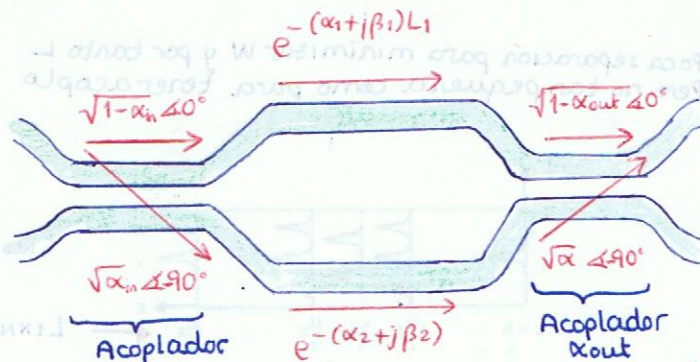
$$\text{ratio de extinción} = 10 \log \left(\frac{P_{max}}{P_{min}} \right)$$

$$P_{out} = P_{in} e^{-2\alpha L} \cos^2(\Delta\phi/2)$$



$$\Delta\phi = \beta_2 L_2 - \beta_1 L_1$$

→ 2x2 MZI



¡No olvidar el desfase! → hace que para $\Delta\phi=0$, la potencia salga por la salida cruzada (y fase -90°)

→ si $\alpha_{in} = \alpha_{out} \neq 0.5$
Acopladores no son 3dB

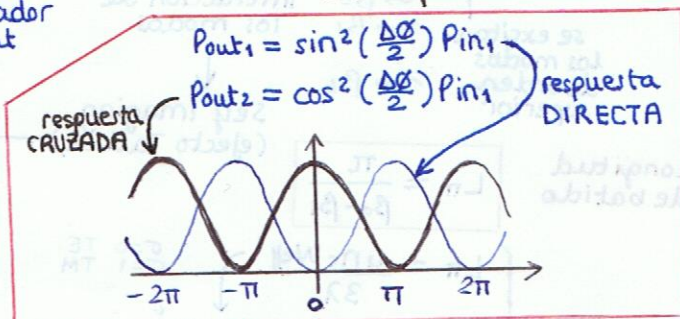
- La respuesta directa mantiene buena relación de extinción si $\alpha_{in} = \alpha_{out}$
- La respuesta cruzada empeora su relación de extinción

Recuerda: el acoplador depende de λ y de polariz.

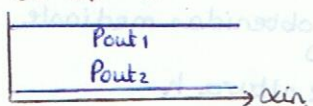
(IMM) multiplicación de matrices:

$$\begin{bmatrix} E_{s1} \\ E_{s2} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sqrt{1-\alpha_s} & -j\sqrt{\alpha_s} \\ -j\sqrt{\alpha_s} & \sqrt{1-\alpha_s} \end{bmatrix}}_{\text{acoplador salida}} \underbrace{\begin{bmatrix} e^{-(\alpha_1+j\beta_1)L_1} & 0 \\ 0 & e^{-(\alpha_2+j\beta_2)L_2} \end{bmatrix}}_{\text{brazos}} \underbrace{\begin{bmatrix} \sqrt{1-\alpha_e} & -j\sqrt{\alpha_e} \\ -j\sqrt{\alpha_e} & \sqrt{1-\alpha_e} \end{bmatrix}}_{\text{acoplador entrada}} \begin{bmatrix} E_{e1} \\ E_{e2} \end{bmatrix}$$

→ si $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ (sin perd.)
si $\alpha_{in} = \alpha_{out} = 0.5$ (acopla 3dB)
entramos solo por P_{in1}

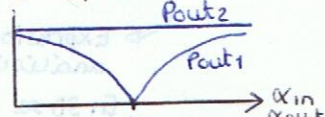


Respuesta directa en $\Delta\phi = \pi$



$\alpha_{in} = \alpha_{out}$
+ es posible

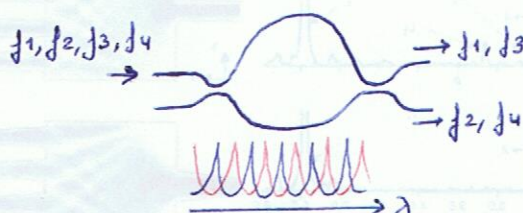
Respuesta cruzada en $\Delta\phi = 0$



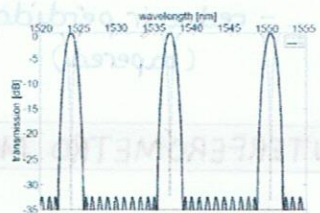
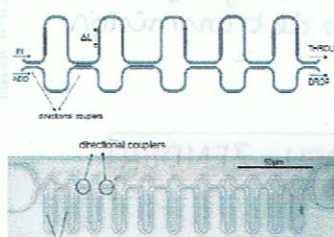
$\alpha_e = \alpha_s = 50\%$
+ es posible

Aplicaciones

- Multiplexor / Demultiplexor



- Filtros ópticos (MZI en cascada)



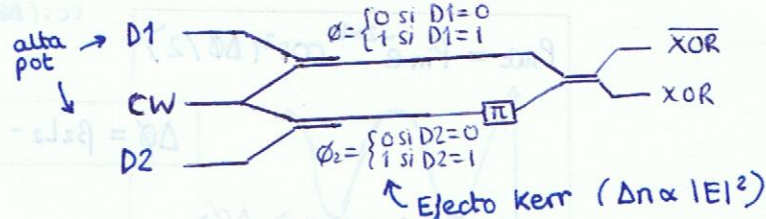
- Modulador: Inducir un cambio de índice Δn en uno de los brazos por medios externos (acústico, térmico, óptico, eléctrico)

→ Modulador electro-óptico: - ancho de banda > 10 GHz
- limitación: sólo una polarización

→ Conmutador termo-óptico: - conmutación térmica muy eficiente (en silicio)
muy lenta (μs)

→ Modulador electro-óptico por dispersión de plasma
campo eléctrico externo vacía los portadores (carrier depletion)
lo cual varía n . Requiere unión P-I-N

- Conmutador todo-óptico:

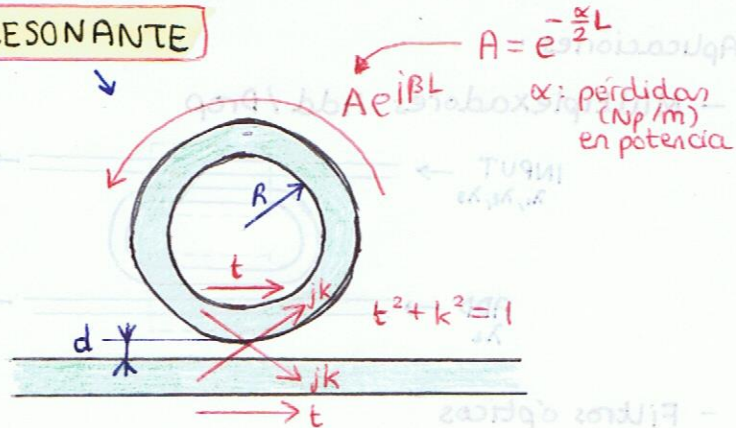


all optical XOR

- CAVIDAD RESONANTE / ANILLO RESONANTE

Contaminamiento del campo electromagnético en todas las direcciones

soluciones de campo para ciertas frecuencias discretas (modos resonantes)



- Anillo sin pérdidas $A=1$

$$\frac{E_{out}}{E_{in}} = t - k^2 e^{i\beta L} \left. \begin{array}{l} - k^2 t e^{i2\beta L} \\ - k^2 t^2 e^{i3\beta L} \\ - \dots \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{en resonancia} \\ \text{se suman} \\ \text{en fase} \end{array}$$

$$= t - k^2 (e^{i\beta L} + t e^{i2\beta L} + t^2 e^{i3\beta L} + \dots)$$

$$= t - k^2 \frac{e^{i\beta L}}{1 - t e^{i\beta L}}$$

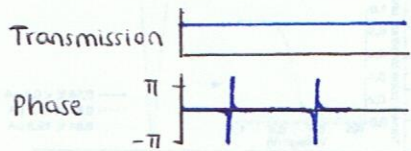
$$E_{out} = E_{in} \cdot \frac{1 - e^{i\beta L}}{1 - t e^{i\beta L}}$$

Resonancia: $\beta L = m \cdot 2\pi$

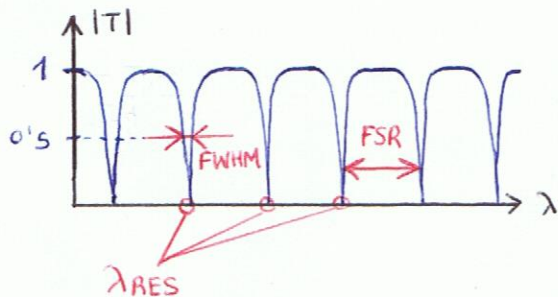
$$\lambda_{\text{RES}} = \frac{n_{\text{eff}} \cdot L}{m}$$

→ Fuera de reson. $E_{out} = 1$

→ En resonancia $E_{out} = -1$



Características :



- Anillo con pérdidas ($A < 1$)

$$\frac{F_{out}}{F_{in}} = t - k^2(Ae^{i\beta L} + A^2e^{2i\beta L}t + A^3e^{3i\beta L}t^2 + \dots)$$

$$= t - k^2 \frac{Ae^{i\beta L}}{1 - Ae^{i\beta L}}$$

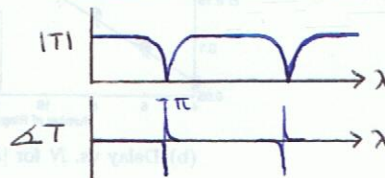
$$E_{out} = E_{in} \cdot \frac{t - A e^{i\beta L}}{1 - t A e^{i\beta L}}$$

$$A = e^{-\frac{\alpha}{2}L}$$
$$t = \sqrt{1 - k^2}$$

↑
acoplo

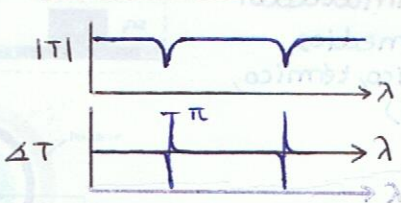
→ En resonancia $e^{i\beta L} = e^{i2\pi m} = 1 \rightarrow E_{out} = E_{in} \frac{t - A}{1 - tA}$

↳ Acople crítico $A = t$


$$E_{out} = 0$$
$$F_{ase} = \pi$$

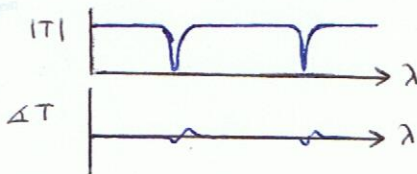
Relación de
extinción máxima

L Sobrecoplado: $A > t$

$$E_{out} < 0$$

$$\rightarrow \begin{cases} |E_{out}| > 0 \\ \text{Phase} = \pi \end{cases}$$

Los nombres tienen sentido si pensamos que k es el acoplo

↳ Subacoplado $A < t$

$$E_{out} > 0$$
$$\rightarrow \begin{cases} |E_{out}| > 0 \\ F_{ase} = 0 \end{cases}$$


$$\lambda_{RES} = \frac{n_{eff} \cdot L}{m}$$

$$FSR = \frac{\lambda_{RES}^2}{n_g \cdot L}$$

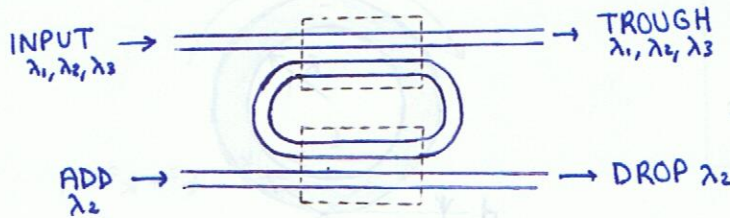
$$Q = \frac{\lambda_{RES}}{FWHM}$$

- Parámetros: Radio $R \rightarrow L = 2\pi R \rightarrow \lambda_{RES}, FSR$

Separación entre guías $d \rightarrow k \rightarrow Q$, FWHM
de acople

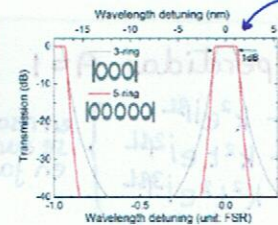
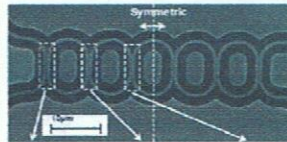
• Aplicaciones :

- Multiplexadores Add / Drop



- Filtros ópticos

Respuesta en amplitud de agrupaciones de anillos resonantes acoplados



banda muy plana

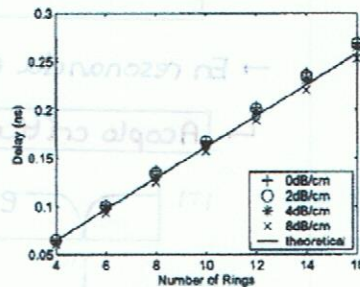
alto rechazo fuera de la banda

- Líneas de retardo ópticas / compensadores de dispersión

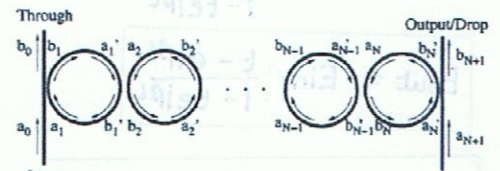
La respuesta en fase cambia bruscamente en la resonancia

$$\tau_g = \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \uparrow \uparrow$$

$\nabla g \downarrow \downarrow \rightarrow$ retarder



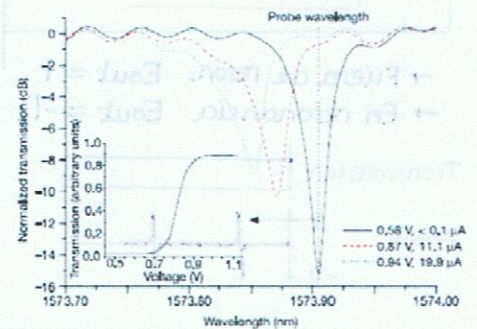
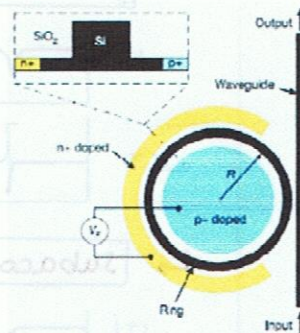
(b) Delay vs. N for $|\kappa| = 0.1$.



Compromiso entre retardo, ancho de banda y pérdidas

- Modulador / conmutador

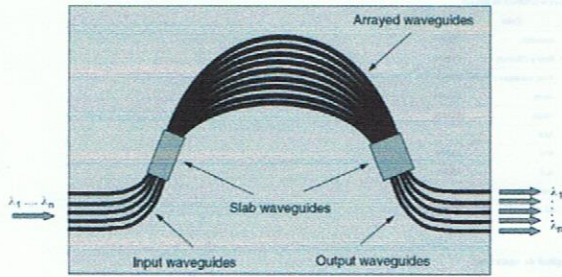
Inducir Δn por medios externos (acústico, térmico, óptico, eléctrico)



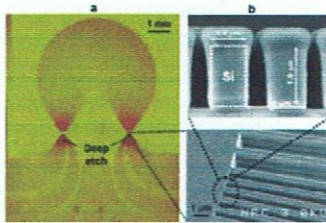
$$\frac{1}{Q} = \frac{\text{FWHM}}{\text{FSR}} = \frac{\Delta \omega}{\omega}$$

ARRAYED-WAVEGUIDE GRATINGS

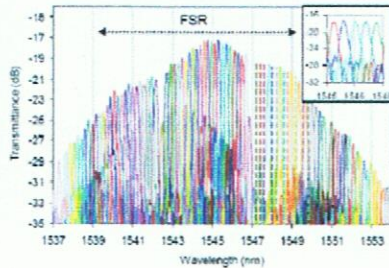
- Los *arrayed waveguide gratings* (AWG) se usan generalmente como (de)multiplexores en redes ópticas WDM
- Esta formado por dos acopladores en estrella que conectan un conjunto de guías ópticas de diferente longitud



- Actualmente se implementan en Silíce = bajo índice = gran tamaño
- AWGs en tecnología de Silicio
 - Reducción del tamaño debido al alto contraste de índices
 - Algunas demostraciones experimentales



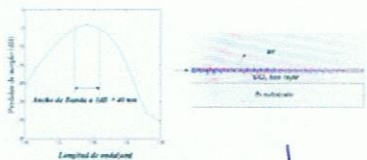
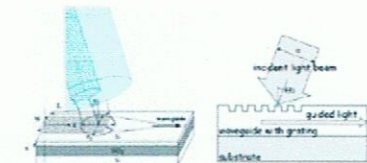
AWG 50 canales (8x8mm²)



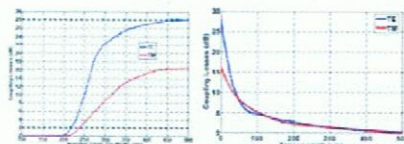
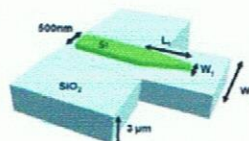
ESTRUCTURAS DE ACOPLO FIBRA-GUÍA

- Altas pérdidas de acoplo (>15dB) entre fibra óptica y guías ópticas nanofotónicas debido principalmente a la gran diferencia de tamaños → necesidad de estructuras de acoplo

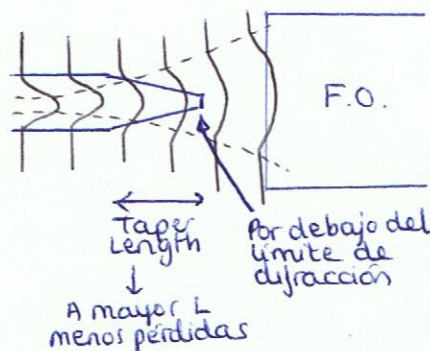
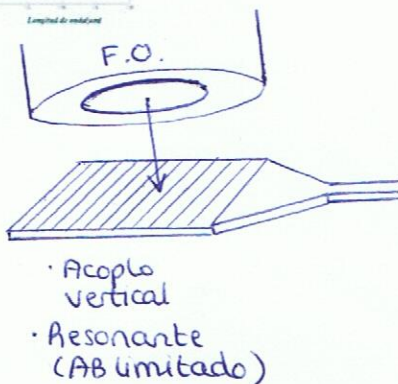
GRATING COUPLER



INVERTED TAPER



TÉCNICA DE ACOPLO	Inverted taper	Grating coupler
Posibilidad de testeo a nivel de oblea	Baja (acoplo horizontal)	Alta (acoplo vertical)
Pérdidas de acoplo	~ 1dB	> 3 dB (puede mejorarse con diseños más complejos)
Ancho de banda	>100nm	~ 40 nm
Polarización	Insensible (Puede funcionar para ambas polarizaciones)	Sensible (Funciona a una sola polarización)
Longitud de acoplo	~ 100μm	~ 40μm (~300μm) (Grating + estructura de acoplo horizontal)



DISPOSITIVOS ACTIVOS: EMISORES / DETECTORES

Emisión

Detección

LÁSER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation):

- Basado en el efecto de emisión estimulada para generar luz coherente y monocromática al ser excitado por una señal eléctrica
- Grandes retos en nanofotónica: láser en silicio

LED (Light Emitting Diode)

- Basado en el efecto de emisión espontánea para generar luz quasi-monocromática al ser excitado por una señal eléctrica

Fotodiodo

- Semiconductor sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja de forma que se genera una circulación de corriente eléctrica cuando es excitado por luz
- Fotodetectores SiGe → compatibles CMOS, detección a 1550 nm

Compuestos empleados en la construcción de LED

Compuesto	Color	Long. de onda
Arsenuro de galio (GaAs)	Infrarrojo	850nm
Arsenuro de galio y aluminio (AlGaAs)	Rosa y rojo	650nm
Arsenuro de galio y aluminio (AlGaAsP)	Rosa, naranja y amarillo	630nm
Induro de galio (GaIn)	Naranja	590nm
Nitruro de galio (GaN)	Verde	525nm
Seleniuro de zinc (ZnSe)	Azul	-
Nitruro de galio e indio (InGaIn)	Azul	450nm
Carbono de silicio (SiC)	Azul	400nm
Diamante (C)	Violeta	-
Óxido de zinc	En desarrollo	-

Material	Longitud de onda (nm)
Silicio	100-1100
Germanio	800-1700
Indio galio arsenico (InGaAs)	800-2600
Óxido de zinc	<1000-3500



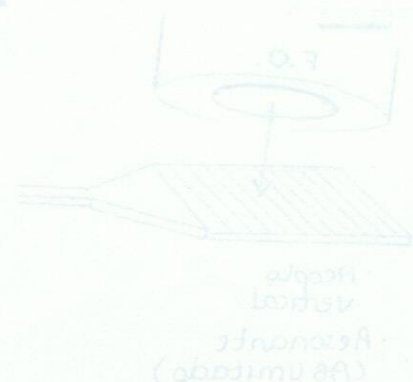
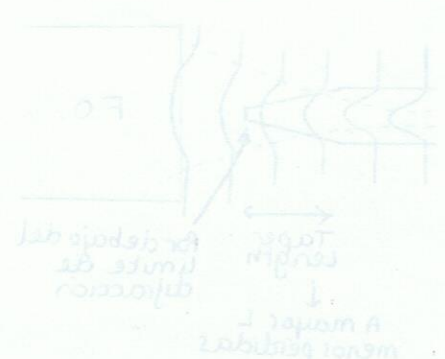
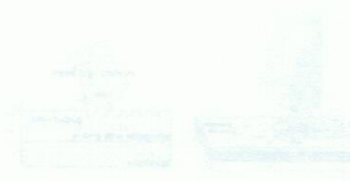
ESTRUCTURAS DE ACOPLO FIBRA-GUÍA

Alta pérdida de acoplo (>10dB) entre fibra óptica y guías ópticas nanofotónicas debido principalmente a la gran diferencia de tamaño → necesidad de estructuras de acoplo

INVERTED TAPER



GRATING COUPLER



TEMA 4: FOTÓNICA EN SILICIO

INTRODUCCIÓN

Origen:

1987: "Electrooptic effects in Silicon"
1991: "Optical waveguides in SIMOX"

90s: Dispositivos ópticos pasivos

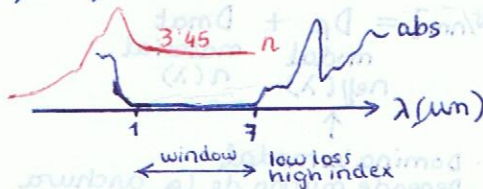
Previsto: Despliegue comercial

- Investigación: IMEC, CEA-Leti
- Empresas: IBM, Intel, Kotura, Luxtera, ...

Propiedades del silicio

VENTAJAS

Región $1.1\mu\text{m} - 7\mu\text{m}$ { - absorción despreciable
- alto índice



DESVENTAJAS

- Baja eficiencia de emisión (laser)
- No tiene efecto electro-óptico
- Transparente en $1.3 - 1.6\mu\text{m}$
↳ no usable en detección

Actualidad

No silicio. Componentes caros y voluminosos
moduladores (LiNbO₃), láseres (InP)(GaAs),
Detectores (Ge)

→ No fabricación en masa

→ Ensamblado complejo y delicado } solución

Nanofotónica en silicio

Tecnologías de fabricación e infraestructuras compatibles con microelectrónica

- Integración ultra alta
- Fabricación en masa
- Bajo coste
- integración con electrónica
- repetitividad

(+) las ventajas de la óptica

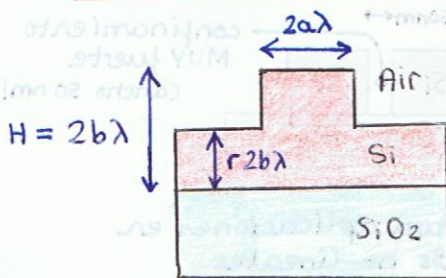
- Ancho de banda
- Alta velocidad
- Menor consumo
- Inmunidad a interferencias

Aplicaciones de interés

- Optical interconnects
Cobre limitado a 10GHz. rack-to-rack
board-to-board
chip-to-chip
- Redes de telecomunicación
 - Redes FTTH (Fiber-to-the-home) → demanda componentes
 - Redes radio-fibra
- Lab-on-a-chip: (Bio)sensores fotónicos

GUIAS FOTÓNICAS EN SILICIO

→ GUÍAS RIB EN SILICIO



- Primeras que se publicaron

- Condición monomodo:

$$\text{si } 2br\lambda \uparrow \rightarrow 0.5 \leq r \leq 1$$

$$\text{si } 2b\lambda < 4\mu\text{m} \rightarrow \frac{a}{b} \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}}$$

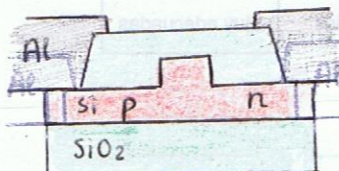
Don dimensioner muy grandes

$$\text{ej: } \lambda = 1.55\mu\text{m}$$

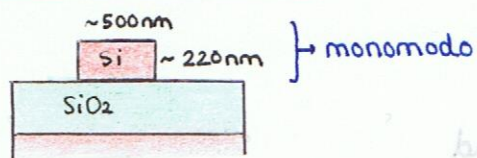
$$H = 7.5\mu\text{m}$$

→ Las obleas ahora tienen 220nm de silicio → ya no sirven

- Fácil conectar electrodos para cambiar portadores libres (Δn)



→ GUIAS STRIPE EN SILICIO



• Pérdidas de propagación

Dependen de la rugosidad de las paredes



$\sigma = 5 \text{ nm}$
 $\rightarrow L = 10 \text{ dB/cm}$

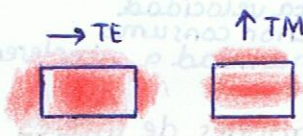
Más pérdidas a mayor altura

Distintos grupos han conseguido distintos resultados

- MIT $\rightarrow 32 \text{ dB/cm}$
- Cornell $\rightarrow 5 \text{ dB/cm}$
- IMEC $\rightarrow 2.4 \text{ dB/cm}$

• Para medirlas: método cut-back
 medir longitudes cada vez mayores y
 interpolar la recta

• TE más pérdidas por tener mas campo en las paredes



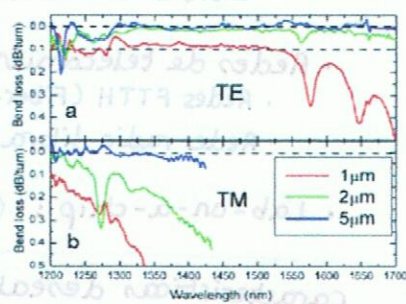
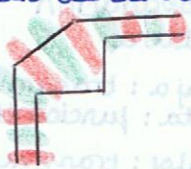
• Pérdidas por curvatura



• Distintas para TE y TM

• Pérdidas despreciables para $R > 5 \mu\text{m}$

• Geometrías especiales permiten reducir el radio de curvatura



OBLEAS SOI (Silicon-on-insulator)

Núcleo	Si
Cubierta Inferior	SiO ₂
Substrato	Si

$\sim 220 \text{ nm}$
 $(1 \mu\text{m} - 3 \mu\text{m})$

$750 \mu\text{m}$

más baratas que cualquier otro semiconductor

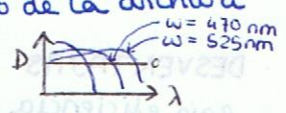
- Deposición resina
- Exposición por litografía
 - $\rightarrow$ e-beam (lento) (más rápido para sólo 1 chip)
 - $\rightarrow$ deep-uv (toda la oblea de golpe)
- Revelado (quitar resina)
- Ataque (quitar Si) (mezcla gases)

• Dispersión cromática

$$D = D_{\text{modal}} + D_{\text{material}}$$

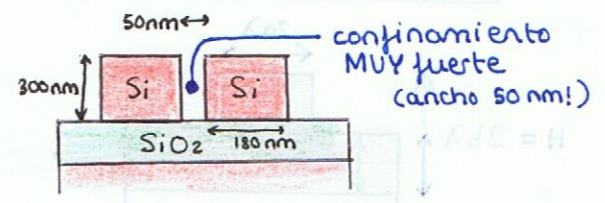
$\uparrow$
 $n_{\text{eff}}(\lambda)$ $n(\lambda)$

• Domina la modal
 • Depende mucho de la anchura de la guía



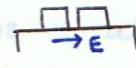
- $D = 100 \times$ la de F.O. (12 ps/nm.km)
- Pero longitudes 10^{-6} órdenes de magnitud $\rightarrow$ afecta mucho menos

→ GUIAS SLOT EN SILICIO



• Util para aplicaciones en efectos no lineales

• Vertical:



- Difícil de llenar el hueco tan finito
- Alto confinam. **TE**

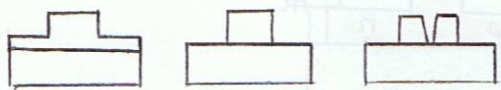
• Horizontal:



- bajo índice
- Alto confinamiento **TM**

→ COMPARACIÓN GUIAS EN SILICIO

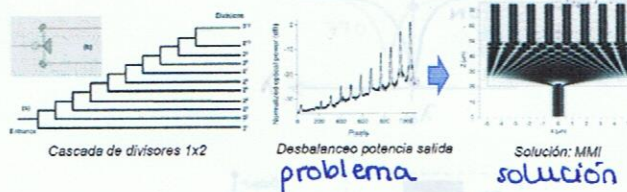
	Rib	Stripe	Slot
Confinamiento del campo	Bajo	Alto	Muy alto
Pérdidas por rugosidad	Bajas (0.1 dB/cm)	Elevadas (2-5 dB/cm)	Elevadas (5-10 dB/cm)
Radios de curvatura mínimos	Altos (cientos de micras)	Bajos (algunas micras)	Bajos (algunas micras)
Acoplo a fibra	Eficiente	Ineficiente	Muy ineficiente
Integración densa	No factible	Factible	Factible
Aplicaciones no lineales	No adecuadas	Adecuadas	Muy adecuadas



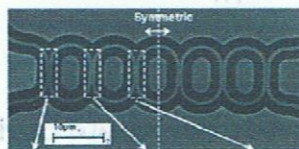
DISPOSITIVOS PASIVOS

Funcionalidades del Tema 3 con guías rib y stripe

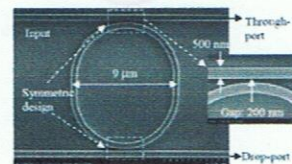
ejemplo: divisor/combinador 1xN



ejemplo: filtro con anillos



ejemplo: add/drop con anillos



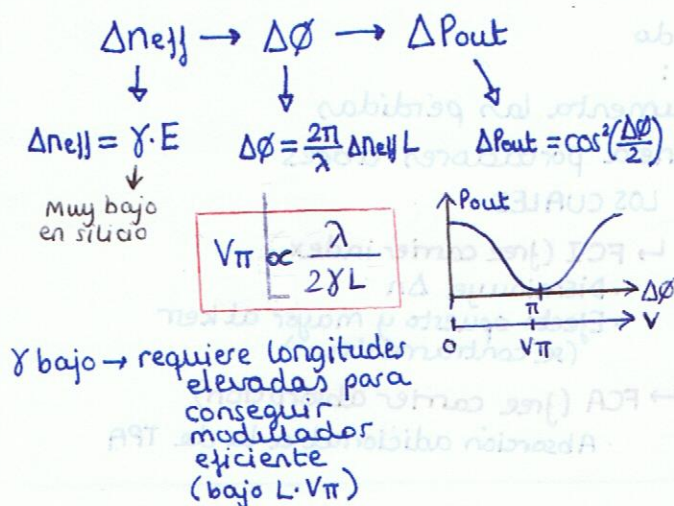
DISPOSITIVOS ACTIVOS

MODULADORES

Tradicionales (no silicio)

- Electro-ópticos (efecto Pockels)
 - $\Delta n = f(\vec{E}_{aplicado})$
 - Niobato de Litio (LiNbO_3)
 - Convierte modulación de fase en amplitud (interferómetro)
- Electro-absorción (efecto Franz-Keldysh)
 - $\alpha(\text{dB/cm}) = f(\vec{E}_{aplicado})$
 - Compuestos III-V

Moduladores silicio basados en MZI



$L \uparrow \rightarrow$ tamaño grande
AB reducido
tiempo de recomb. de portadores en mod. directa
mayor tamaño electrodos: desadaptación señal eléctrica y óptica

ej. Intel: $L = 2.5 \text{ mm}$, 1 Gb/s 😞



Moduladores en silicio

$\rightarrow$ No hay efecto Pockels
 $\rightarrow$ Débil Franz-Keldysh

- Efecto térmico
 - índice de refracción $\frac{\partial n}{\partial T} = 1.86 \cdot 10^{-4} / \text{K}$
aumenta con la temperatura
 - lento y complicado (calentar homogéneamente)
- Efecto de dispersión de plasma
 - Portadores libres modifican el índice
 - Fórmulas básicas ($\lambda = 1550 \text{ nm}$)

parte real $\Delta n = -a \cdot N_e - b \cdot (N_h)^{0.8}$
parte imag $\Delta \alpha = c \cdot N_e + d \cdot N_h$

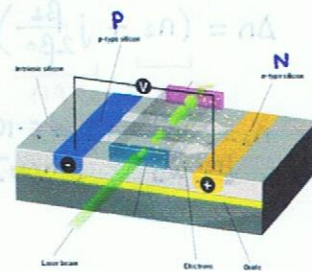
$N_e: n^\circ e^- \text{ libres}$
 $N_h: n^\circ h^+ \text{ libres}$
 $a, b, c, d: \text{ctes} > 0$

Los portadores libres se generan dopando el Silicio para formar uniones PN o PIN

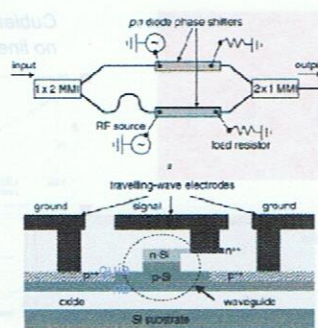
El índice de refracción varía al inyectar (polarización directa) o extraer (polarización inversa) portadores libres de la unión PN o PIN mediante la aplicación de un campo eléctrico externo (corriente eléctrica o voltaje)

A diferencia del efecto térmico, el índice de refracción disminuye al inyectar portadores libres (aunque la absorción aumenta)

El efecto de dispersión de plasma es el efecto más utilizado para implementar moduladores en silicio



ej: Artículo 2007. Intel. Efecto de disp. de plasma
Mejora la configuración de los electrodos para extraer portadores una vez inyectados, reduciendo el tiempo de recombinación
 $40 \text{ Gb/s} \rightarrow$ competitivo con comerciales



• Moduladores en silicio basados en anillo

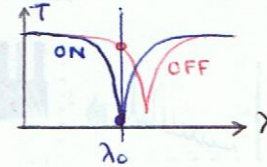


- MUCHO más pequeños (nm en vez de μm)

$$\lambda_{\text{RES}} = \frac{n_{\text{eff}} \cdot L}{m}$$

$$\Delta n_{\text{eff}} \rightarrow \Delta \lambda_{\text{RES}}$$

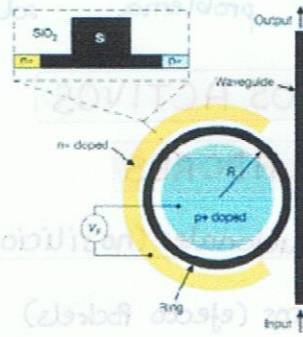
$$\Delta T(\lambda_0)$$



- Máxima relación de extinción con acople óptico

ejemplo: 1'5 Gb/s

- Aún no es comercial
- Limitado por recombinación de portadores



→ DISPOSITIVOS TODO-ÓPTICO

- modulación, conmutación, puertas lógicas
- basados en efectos no lineales (cuando la señal de entrada tiene alta pot.)

• Principales efectos no-lineales

- Efecto Kerr: $\Delta I \propto P_{\text{optica}}$

- Muy rápido
- Dos órdenes de magnitud mayor que sílice
- Aún así muy ineficiente en silicio

- Efecto TPA (two-photon absorption)

Variación $\text{Im}(n)$ en función de P_{optica}

$$\Delta n = \underbrace{(n_2 + j \frac{\beta_2}{2\beta_0})}_{\text{Kerr}} \cdot \underbrace{\frac{P_{\text{opt}}}{A_{\text{eff}}}}_{\text{TPA}}$$

$$n_2 = 3 \cdot 10^{-18} \text{ [m}^2/\text{W]}$$

$$\beta_2 = 5 \cdot 10^{-12} \text{ [m/W]}$$

Rápido
PERO:

- aumenta las pérdidas
- genera portadores libres

LOS CUALES

→ FCI (free carrier index)

- Disminuye Δn
- Efecto opuesto y mayor al Kerr (se contrarrestan)

→ FCA (free carrier absorption)

- Absorción adicional a la de TPA

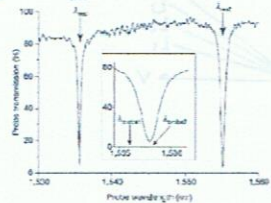
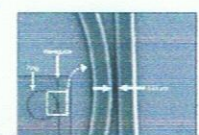
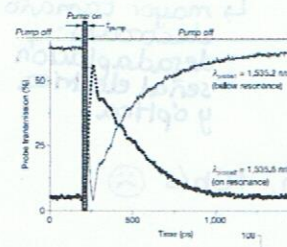
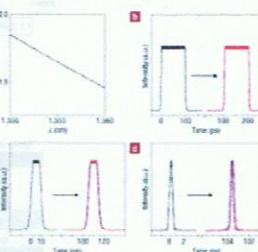
solución propuesta:

- Introducir materiales con alto coeficiente Kerr compatibles con silicio y CMOS
- Conmutación ultra rápida ($\sim \text{ps}$)

ejemplo: Usar FCI para modulación/conmutación

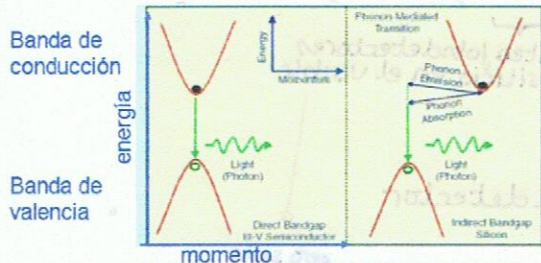
- tiempo de recombinación de portadores es largo ($> 10 \text{ ns}$) → limita el AB

Cubiertas de un polímero no lineal con n_2 elevado



→ EMISIÓN DE LUZ EN SILICIO

- La implementación de fuentes de luz es uno de los **grandes retos** de la fotónica en Silicio
- El Silicio es un material semiconductor de **bandgap** indirecto
 - Los estados de máxima y mínima energía de las bandas de valencia y conducción no tienen el mismo momento



Material con bandgap directo (GaAs):
La energía liberada en el proceso de recombinación de los electrones de la b.c. con los huecos de la b.v. da lugar a la emisión de fotones

Material con bandgap indirecto (Si)
La recombinación se produce mediante la absorción o emisión de un fonón (vibración) → proceso cuántico de 2º orden de probabilidad muy baja

- Consecuencia → la eficiencia de conversión electrón-fotón es del orden de 10^{-3} a 10^{-6} en Silicio mientras que es cercano a la unidad en GaAs

¿Posibles soluciones?

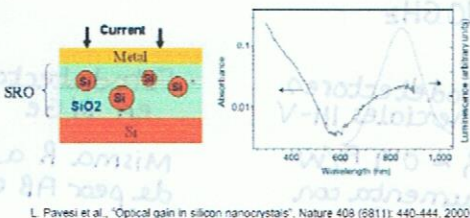
- Confinar espacialmente los electrones modificando su momento para superar la limitación de bandgap indirecto
- Introducir impurezas de tierras raras (Erbio) como dopantes activos
- Aprovechar el efecto Raman para conseguir ganancia (bombeo óptico)
- Usar láseres III-V acoplados en sustratos de Silicio mediante diferentes técnicas de fabricación y técnicas Flip-chip



① CONFINAMIENTO ESPACIAL DE LOS ELECTRONES

- El confinamiento espacial de un electrón da lugar a una ambigüedad en su momento que puede utilizarse para relajar la diferencia de momento existente aumentando así la probabilidad de emisión de luz
- Una solución propuesta para conseguir este confinamiento es el uso del nanocristales (nc) de Si embebidos en sílice

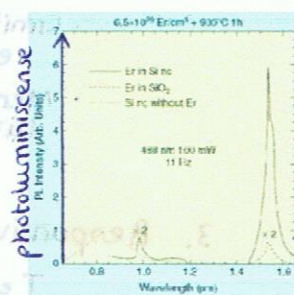
- La eficiencia y longitud de onda de la emisión depende del tamaño de los nc
- Se ha demostrado emisión de luz a 780 nm → no se puede propagar por guías de Silicio
- Algunos autores discrepan de que la emisión de luz se deba al confinamiento de los electrones



L. Pavesi et al., "Optical gain in silicon nanocrystals", Nature 408 (6811): 440-444, 2000.

② INTRODUCCIÓN IMPUREZAS COMO DOPANTES ACTIVOS

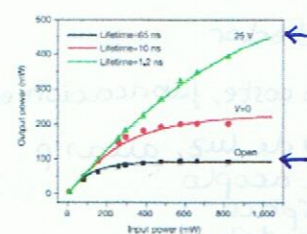
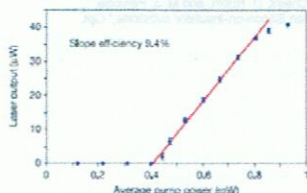
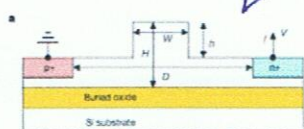
- El Er se utiliza para implementar fuentes de luz y amplificadores a 1550nm en fibra pero
 - La ganancia por unidad de longitud es baja
 - La inyección de corriente eléctrica es ineficiente ya que la sílice es un aislante
- Por otra parte, la emisión de luz del Silicio dopado con Er sólo es eficiente a temperaturas muy bajas
- Una solución propuesta es utilizar SiO₂ con nanocristales de Si
 - Se consigue mejorar la eficiencia a temperatura ambiente
 - Se reduce el voltaje necesario para alimentar el láser
 - Las potencias de salida demostradas son todavía bajas



D. Pacifici et al., "Erbium-doped Si nanocrystals: Optical properties and electroluminescent devices," Physica E16, pp. 331-40, 2003.

③ EFECTO RAMAN

- El efecto Raman es un efecto no-lineal que se basa en la generación de una longitud de onda a partir de otra por excitación de un fonón
- El efecto Raman en Silicio es cuatro órdenes de magnitud mayor que en sílice
 - Se ha propuesto para implementar fuentes ópticas → necesita otro láser para bombeo óptico → **láser que necesita un láser**
 - Aplicaciones más interesantes: amplificación y conversión de longitud de onda
- Sin embargo, la potencia máxima de salida está limitada por el efecto no-lineal de TPA (Two-photon absorption)
 - Generación de portadores libres que introducen absorción además de disminuir el índice de refracción
 - ¿Técnicas eliminación portadores libres? fuentes pulsadas o extracción eléctrica mediante una unión pn operando en polarización inversa

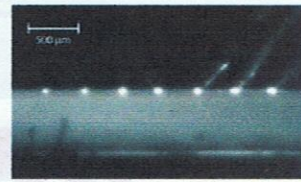
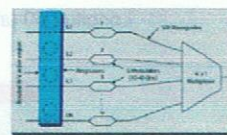
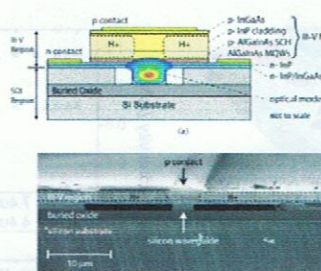


O. Boyraz and B. Jalali, "Demonstration of a silicon Raman laser," Opt. Exp. vol. 12, pp. 5269-5273, 2004.

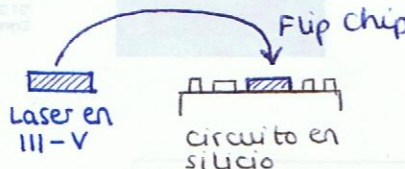
H. Rong et al., "An all-silicon Raman laser," Nature, vol. 433, pp. 292-294, 2005.

④ LÁSERES III-V ACOPLADOS A SUBSTRATOS DE SILICIO

Láser híbrido



A. W. Fang, H. Park, O. Cohen, R. Jones, M. J. Paniccia, and J. E. Bowers, "Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser," Opt. Express 14, 9203-9210 (2006)



extrayendo portadores (aplicar voltaje)
sin extraer portadores la pot. de salida se satura enseguida (TPA)

→ DETECCIÓN DE LUZ EN SILICIO

Silicio:

transparente $\lambda > 1.1 \mu\text{m}$ → No es posible detección de luz a 1550 nm

Solución: Dopar con Germanio

- Compatible con tecnología CMOS
- se requieren concentraciones $> 50\%$ que dificulta la fabricación

Parámetros claves:

1. Corriente de oscuridad (I_d)

- Corriente generada cuando no incide luz sobre el detector
- Interesa I_d baja para mayor sensibilidad

- 😊 Silicio puro: elevada calidad cristalina → I_d muy bajo (en el visible)
- ☹ Dopar con Germanio: dislocaciones en la cte de red ~ aumenta I_d

2. Ancho de banda

- Limitado por el tiempo de tránsito de los portadores hasta los contactos eléctricos
- Menor penetración de luz en material → capa delgada de fotodetector → mas facil y rápido extraer electrones hasta los electrodos
ej: penetración 2mm → AB 10 GHz

3. Responsividad (R)

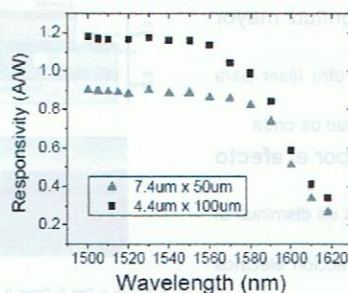
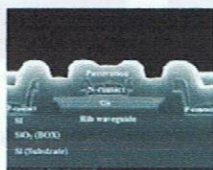
$$I_{\text{electrica}} = R \cdot P_{\text{optica}}$$

Fotodetectores comerciales III-V
 $R \sim 0.9 \text{ A/W}$
aumenta con el coef. de absorción

Fotodetectores en SiGe
Misma R a costa de peor AB e I_d

■ Fotodetector de Ge sobre SOI para 1550 nm (Intel)

- Longitud $50 \mu\text{m}$, $I_d = 169 \text{ nA}$, BW=31GHz, $R=0.89 \text{ A/W}$



T. Yin, R. Cohen, M. M. Morse, G. Sarid, Y. Chetrit, D. Rubin, and M. J. Paniccia, "31 GHz Ge n-i-p waveguide photodetectors on Silicon-on-Insulator substrate," Opt. Express 15, 13965-13971 (2007)

→ CONCLUSIONES

Fotónica en silicio: activo y prometedor

Ventaja: compatible CMOS - bajo coste, fabricación en masa, integración con microelectrónica

Inconvenientes:

- Dificultad fuentes de luz
- Altas pérdidas de acople
- Sin efecto electroóptico
- Efectos no lineales débiles

Aplicaciones:

- Interconexión óptica (diferentes niveles)
- Redes de telecomunicación de acceso
- Biosensores

TEMA 5. CRISTALES FOTOÓNICOS

1D

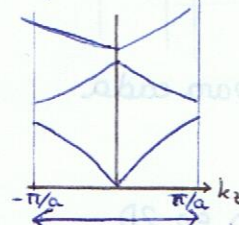
$$E_x(z) = E_0 e^{ik_0 z} \sum_n e^{i(k_0 + nG)z} = E_0 \sum_n e^{i(k_0 + nG)z}$$

$$\sum_n e^{i n G z} \quad G = \frac{2\pi}{a}$$

sumatorio de ondas planas cada $G = \frac{2\pi}{a}$

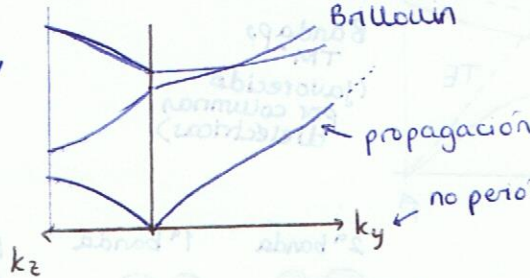


Contraste de índices $\Rightarrow$ siempre existe bandgap en k_z



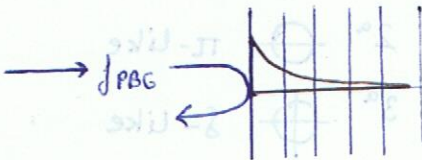
mayor bandgap a mayor contraste

Propagación en Y



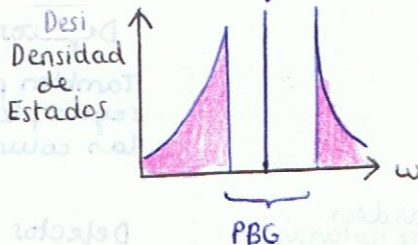
no periódico $\rightarrow$ no se replica

Modos evanescentes

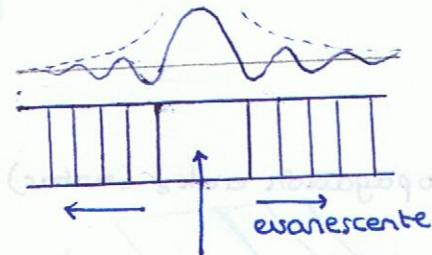


solución válida
No satisfacen simetría traslacional (no existen en el medio infinito)

Cavidades

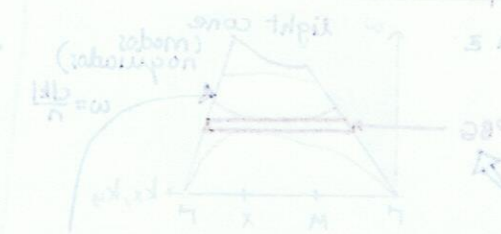


modo cavidad



La frec de resonancia de la cavidad baja para cavidades grandes (más dieléctrico)

Evanescentes en el aire por estar en el PBG
Evanescentes en el aire por estar fuera del cono de luz

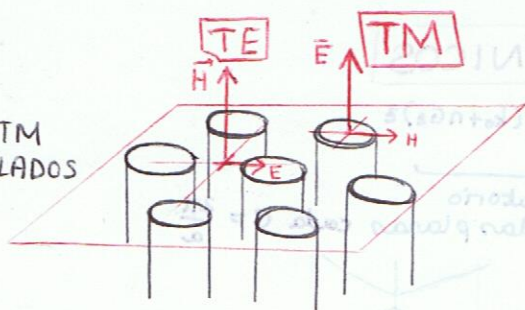


continua de estados
Y no se genera en
estas permitidas:
sólo algunas k



2D

TE y TM DESACOPLADOS

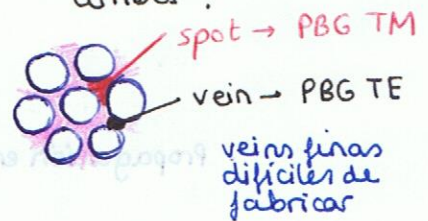


PBG diferentes para cada polarización

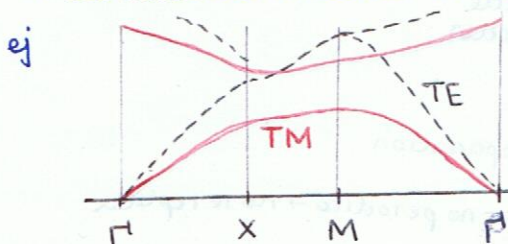
Bandgaps TM: favorecidos por $E \uparrow \uparrow$ aisladas

Bandgaps TE favorecidos por $E \uparrow \uparrow$ aisladas i.e. red de dieléctrico conectada

¿cómo conseguir ambos?

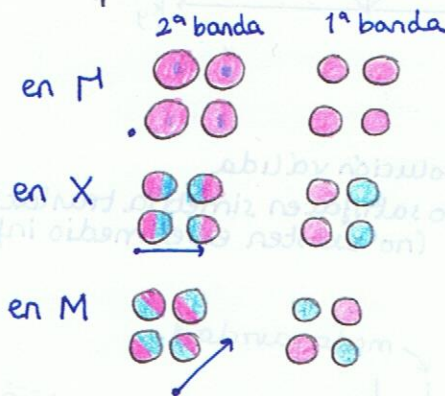
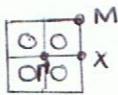


La zona de Brillouin es 2D



Bandgap TM (favorecido por columnas dieléctricas)

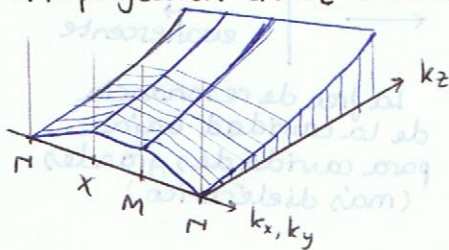
aspecto del campo igual en todas las celdas (no cambia fase)



La banda N tiene N-1 planos nodales (nulos) por columna

- 1ª σ -like
- 2ª π -like
- 3ª δ -like

Propagación en k_z (evitar)



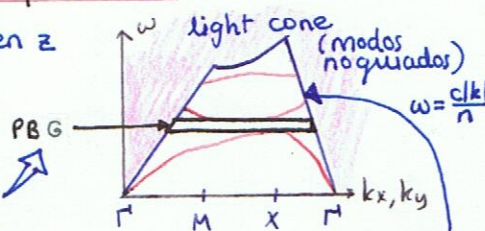
$k_z \uparrow$ → banderas se aplanan
→ luz guiada por cilindros dieléctricos

Si incluimos propagación en k_z se genera un continuo de estados que destruye la posibilidad de PBG

Cristales fotónicos planares



TIR en z



sólo algunos k_z están permitidos: ¡YA NO se genera un continuo de estados!

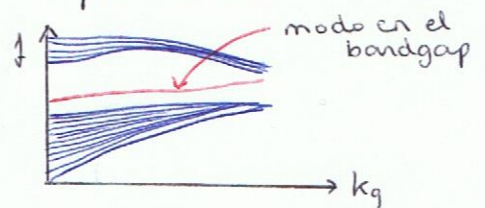
si $h \downarrow \rightarrow$ el modo no "ve" el cristal
si $h \uparrow \rightarrow$ muchos modos de orden sup destruyen el PBG

simetría respecto a $z=0$ { even (los antiguos TM)
odd (los antiguos TE)

Defectos puntuales

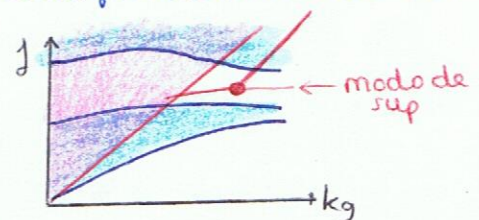
También pueden ser σ, π, δ -like según planos nodales en las columnas adyacentes

Defectos lineales



Estados superficiales

- Evanescentes en PhC por estar en el PBG
- Evanescentes en el aire por estar fuera del cono de luz



depende del plano de corte (inclinación, terminación)

Interesa cono de luz alto
bajo n alrededor
'puente' PhC suspendido en aire