

INTRODUCCIÓN A LA FOTÓNICA INTEGRADA

Pablo A. Costanzo Caso (pcostanzo@ib.edu.ar)

Laboratorio de Investigación Aplicada en Telecomunicaciones (LIAT)
Instituto Balseiro, CNEA

Simposio Argentino de Sistemas Embebidos (SASE 2022)
17 a 19 de Agosto de 2022, La Plata, Argentina



Comisión Nacional
de Energía Atómica



- ❑ Acerca del LIAT
- ❑ Introducción a la Fotónica
- ❑ Introducción a la Fotónica Integrada
- ❑ Fotónica Integrada en el LIAT-DMNT (CNEA)
- ❑ Conclusiones

- ❑ **Acerca del LIAT**
- ❑ Introducción a la Fotónica
- ❑ Introducción a la Fotónica Integrada
- ❑ Fotónica Integrada en el LIAT-DMNT (CNEA)
- ❑ Conclusiones

Acerca del LIAT

■ ¿Dónde estamos?

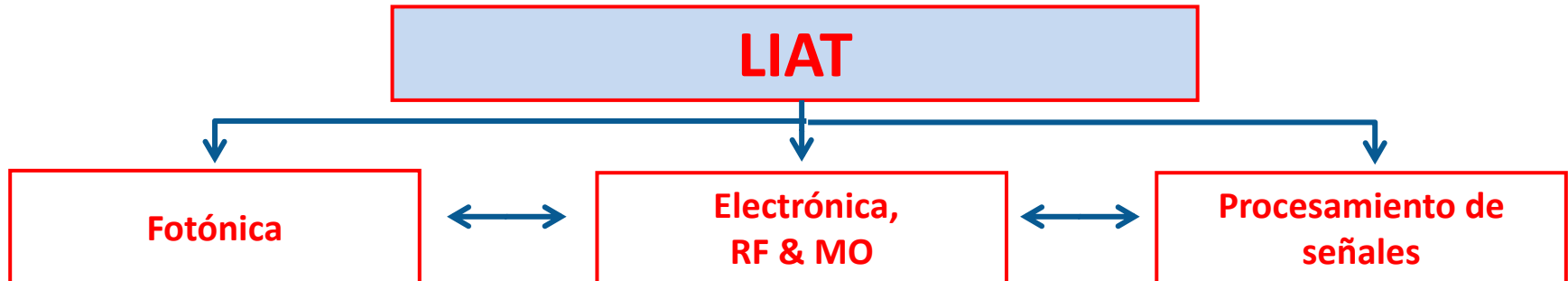
Centro Atómico Bariloche (CNEA)
Bariloche, Río Negro, Argentina



■ Estructura



- ¿Qué hacemos?
 - Investigación Aplicada
 - Desarrollo de tecnología
 - Transferencia de tecnología
 - Formación de RRHH (DR, MAG, ING)
- Líneas de I+D+i



Proyectos transversales

- Comunicaciones ópticas y microondas
- Comunicaciones satelitales
- Sistemas de Radar

- ¿Quiénes somos?

21 INTEGRANTES

- 5 Investigadores (3 CONICET, 1 CNEA, 1 UNCUYO)
- 4 Profesionales (CNEA)
- 1 Posdoc (CONICET)
- 7 Doctorandos (5 CONICET, 1 CNEA, 1 EMP)
- 2 Mastrandos (CNEA)
- 2 Estudiantes IT (CNEA)

■ Facilidades

- Laboratorio ~100m²
- CNC p/ fabricación PCB y mecanizado.
- Impresoras 3D
- Acceso a salas limpias de CNEA

■ Instrumentos

Electrónica, RF y MO

- Osciloscopios: 100G (sampling), 20Gsps (real time)
- VNA: 43GHz y 26.5GHz, PNA-X 26.5GHz
- Spectrum Analyzer 43GHz, Power Meter 43GHz, Signal Generator 43GHz
- AWG 1.2Gsps

Óptica

- Láseres fs, ps, ns, tunable banda C
- Fotodetectores 45G, 25G, 12G, 5G
- Moduladores 40G
- OSAs, OTDRs, Analizador de redes ópticas, DC, PMD, AP



Acerca del LIAT



Acerca del LIAT



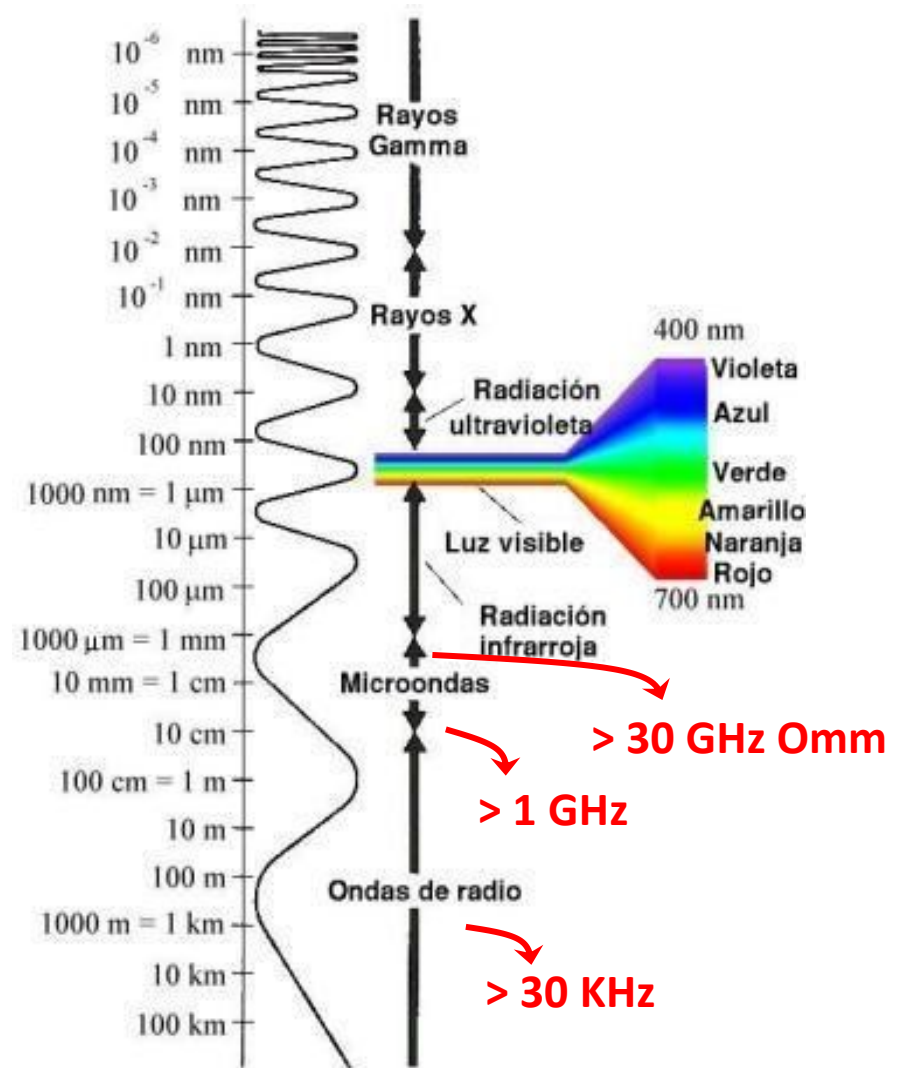
- ❑ LAS FACILIDADES, LABORATORIOS E INSTRUMENTOS ESTÁN **DISPONIBLES** PARA ESTABLECER VÍNCULOS Y COLABORACIONES.
- ❑ POSICIONES ABIERTAS PARA DOCTORES
- ❑ BECAS MAESTRIA

- ❑ Acerca del LIAT
- ❑ **Introducción a la Fotónica**
- ❑ Introducción a la Fotónica Integrada
- ❑ Fotónica Integrada en el LIAT-DMNT (CNEA)
- ❑ Conclusiones

- ¿Qué entendemos por Fotónica?
 - Fotónica es el campo de la ciencia y la ingeniería que abarca los fenómenos físicos y las tecnologías asociadas con **la generación, transmisión, manipulación, detección y utilización de la luz**.
 - Es un tema **multidisciplinario** que vincula áreas de la **ingeniería** (electrónica, materiales, aeronáutica, mecánica, etc), **física, química, y naturales/biológicas** (medicina, agronomía, medio ambiente), entre otras.
- La Fotónica es muy parecida a la Electrónica, pero...¿Cuál es la diferencia?
 - Era de la Información, Internet, normalmente los **datos se codifican en fotones** para transmitirlos, mientras que se convierten en **electrones para procesarlos, ¿Por qué?**
 - La diferencia fundamental es que los **electrones interaccionan** entre sí, aun en el vacío
 - procesamiento, operaciones no lineales, etc
 - Mientras que la **interacción de fotones** requiere de un **material** apropiado. No obstante, utilizando portadoras entre 150 y 300THz pueden transmitirse cientos de km sin regeneración y a muy alta velocidad.

Introducción a la Fotónica

- Espectro Electromagnético



Introducción a la Fotónica

■ Espectro Electromagnético

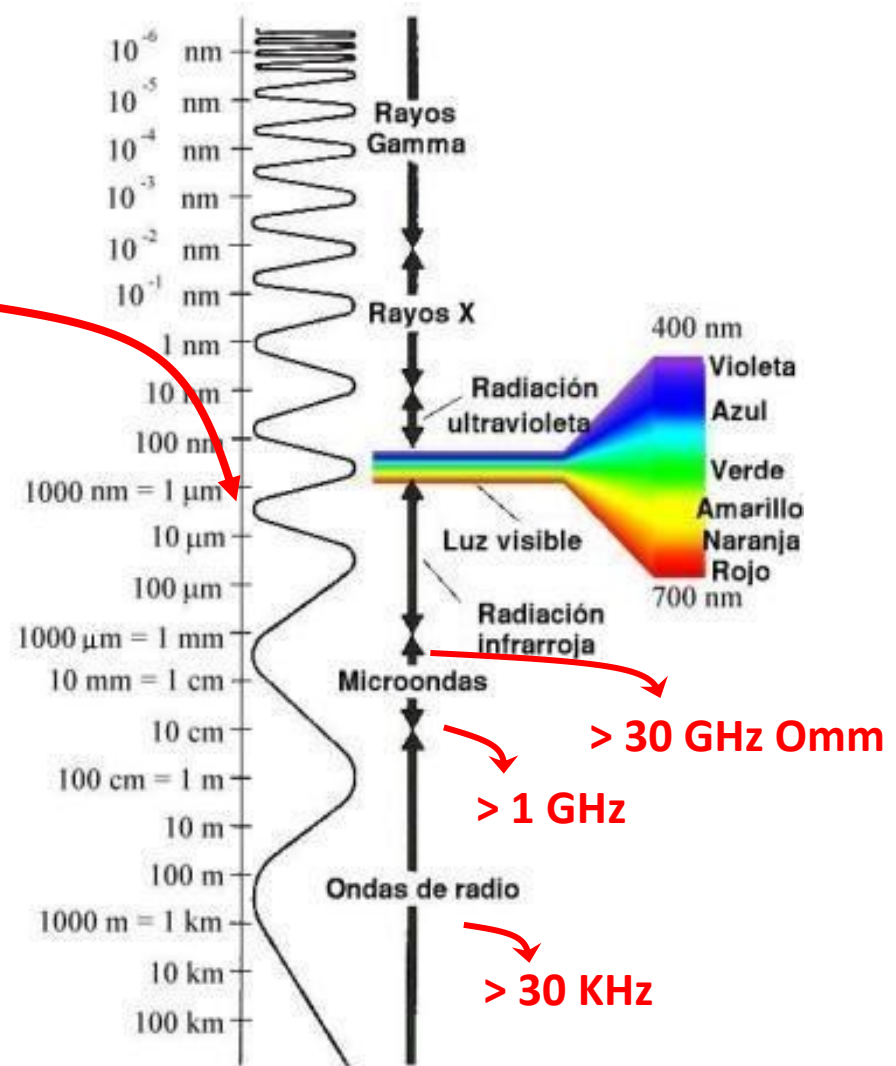
■ Comunicaciones por Fibra Óptica (1550nm)

... algunos números

- Rango: 700 nm – 2000 nm
- BWCH: 0,8 nm → 100 GHz
- Portadoras: 1550 nm → ~190 THz

... más números

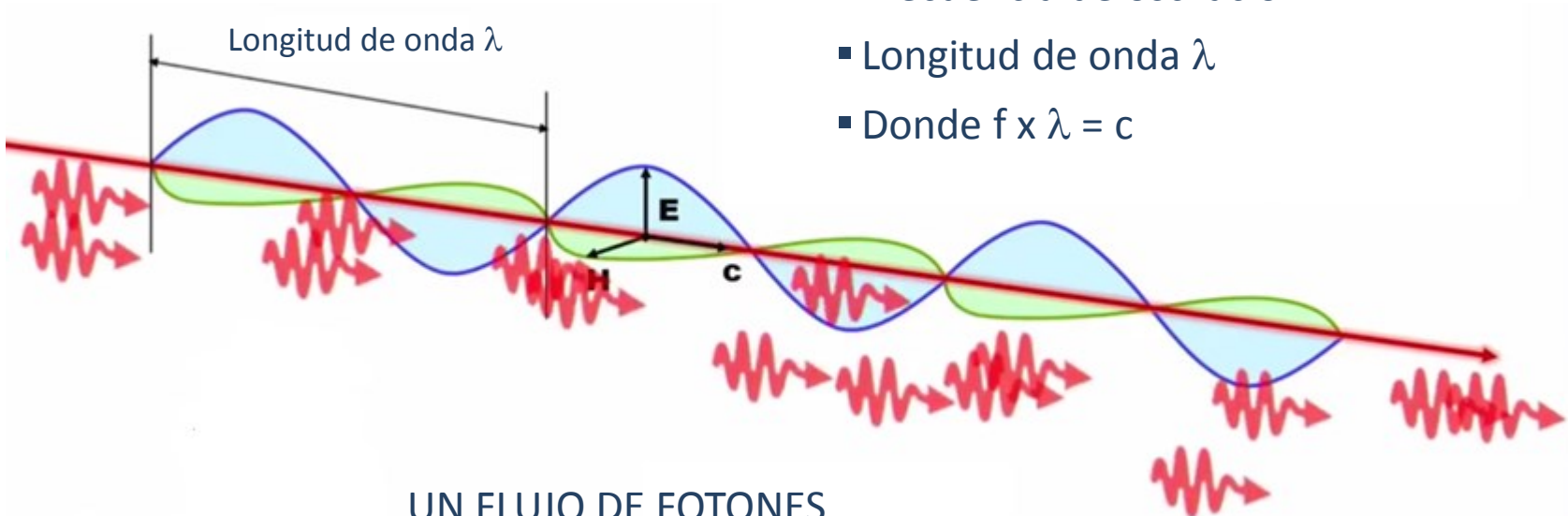
- 0 – 1 GHz → 100 K canales de voz
- 0,8 nm → 100 M canales de voz



- ¿Qué es la luz?

UNA ONDA EM

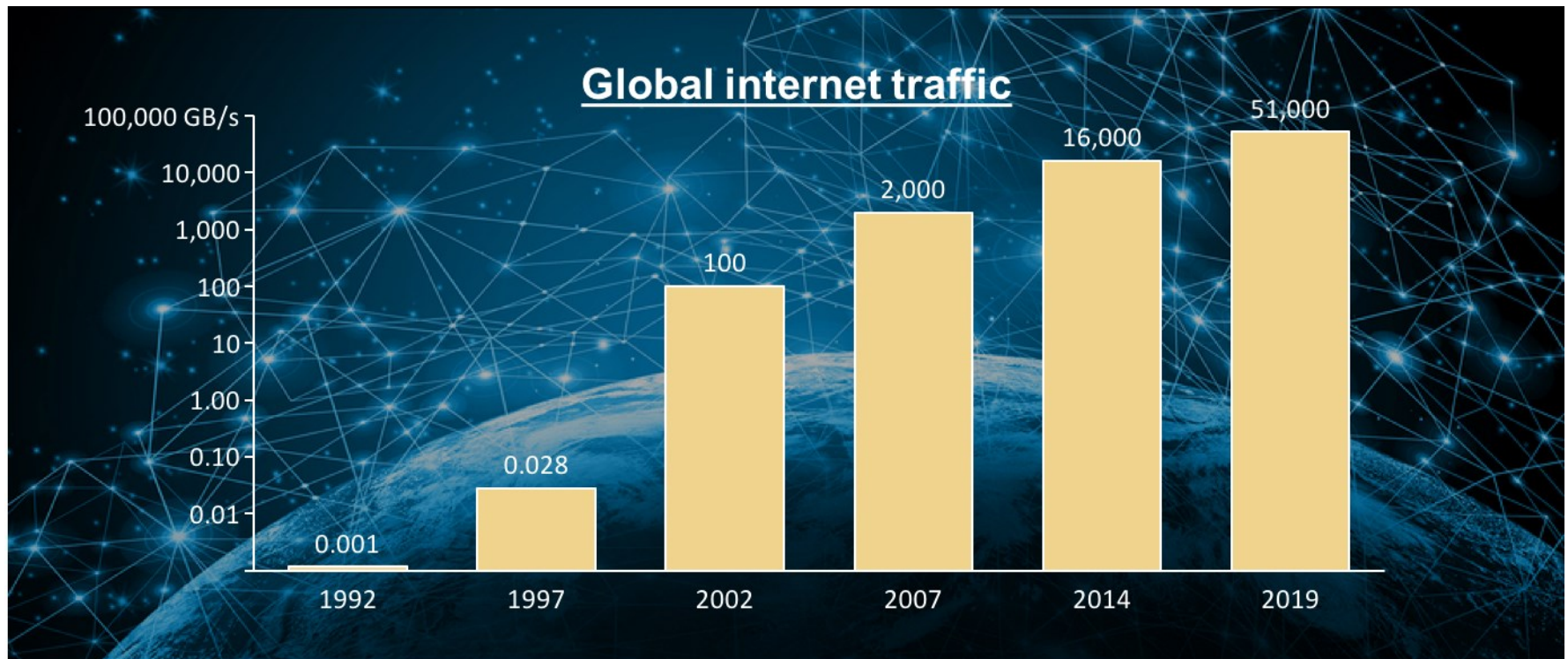
- Se propaga a la velocidad de la luz c
- Campo eléctrico y magnético E y H
- Frecuencia de oscilación f
- Longitud de onda λ
- Donde $f \times \lambda = c$



UN FLUJO DE FOTONES

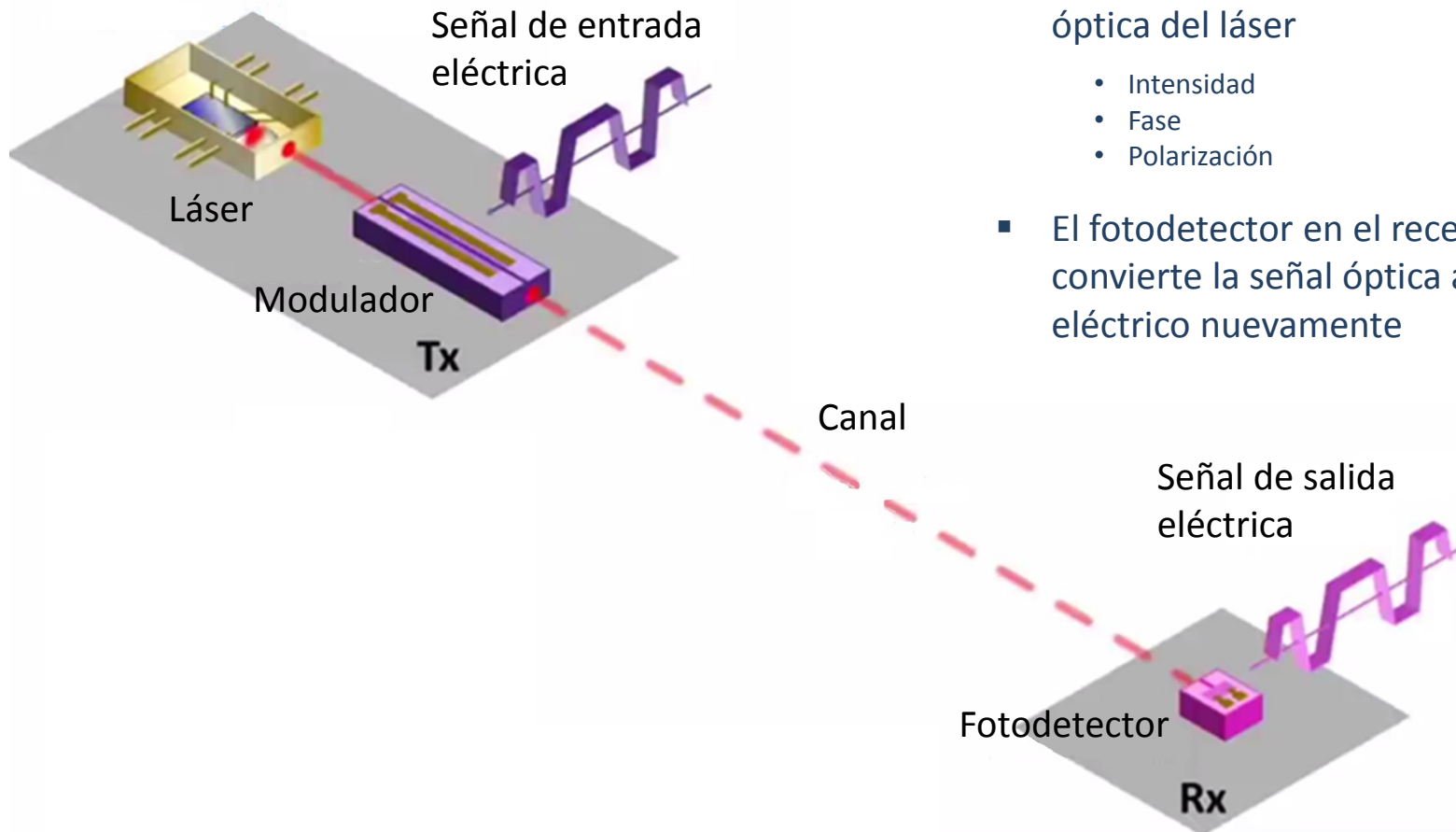
- Con energía $E = h \times f$

- El “motor” de la **fotónica** son las Comunicaciones ópticas



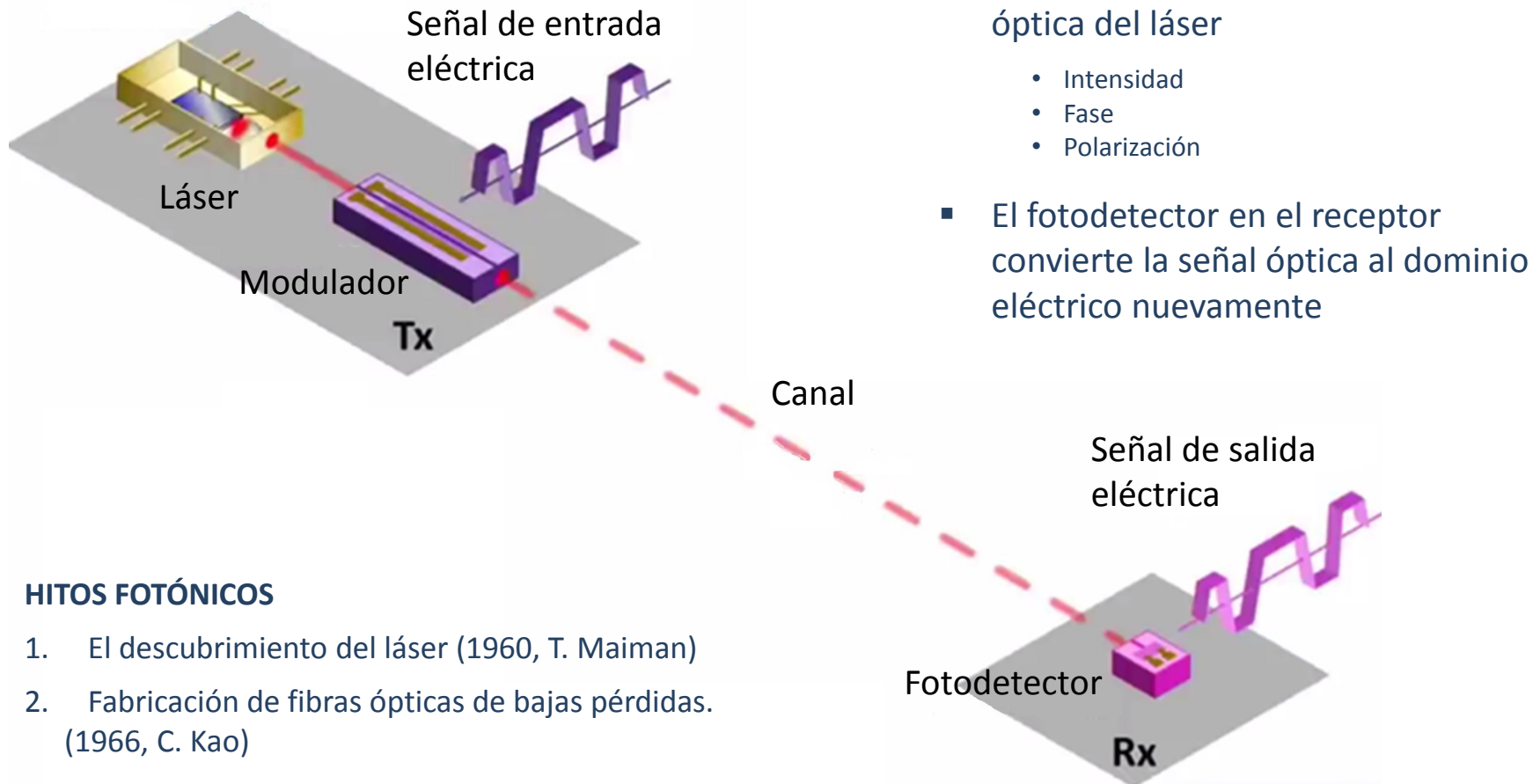
Source: Cisco VNI, 2015

■ Enlace óptico



- Señal eléctrica modula la portadora óptica del láser
 - Intensidad
 - Fase
 - Polarización
- El fotodetector en el receptor convierte la señal óptica al dominio eléctrico nuevamente

■ Enlace óptico



HITOS FOTÓNICOS

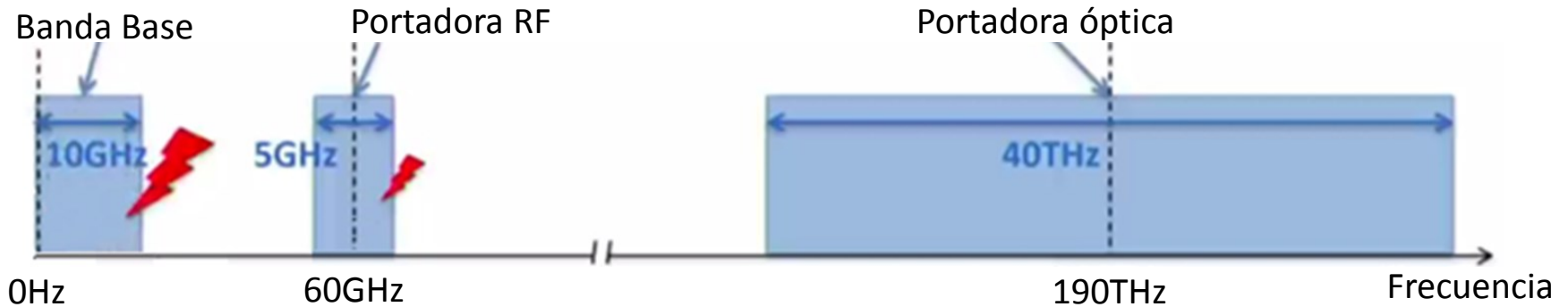
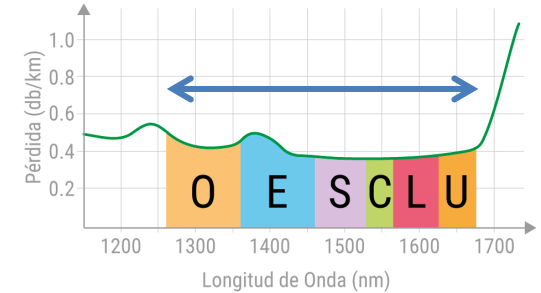
1. El descubrimiento del láser (1960, T. Maiman)
2. Fabricación de fibras ópticas de bajas pérdidas. (1966, C. Kao)

Introducción a la Fotónica

- Ancho de banda de la Fibra Óptica
- Capacidad máxima del canal C [bps] (Teorema de Shannon)

$$C = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR})$$

B : ancho de banda utilizado [Hz]
SNR: Relación Señal a Ruido)

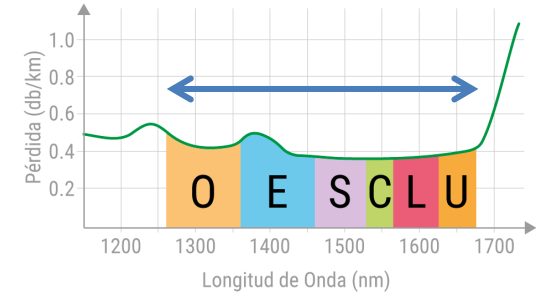


Introducción a la Fotónica

- Ancho de banda de la Fibra Óptica
- Capacidad máxima del canal C [bps] (Teorema de Shannon)

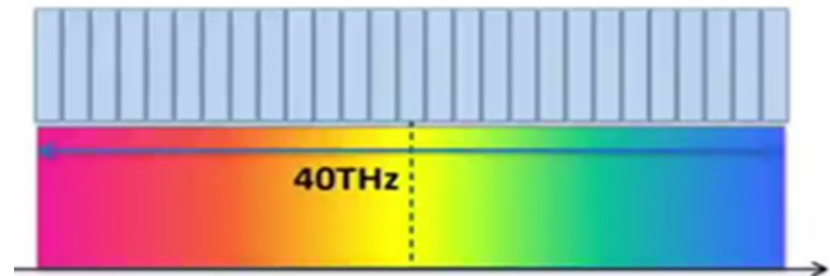
$$C = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR})$$

B: ancho de banda utilizado [Hz]
SNR: Relación Señal a Ruido)

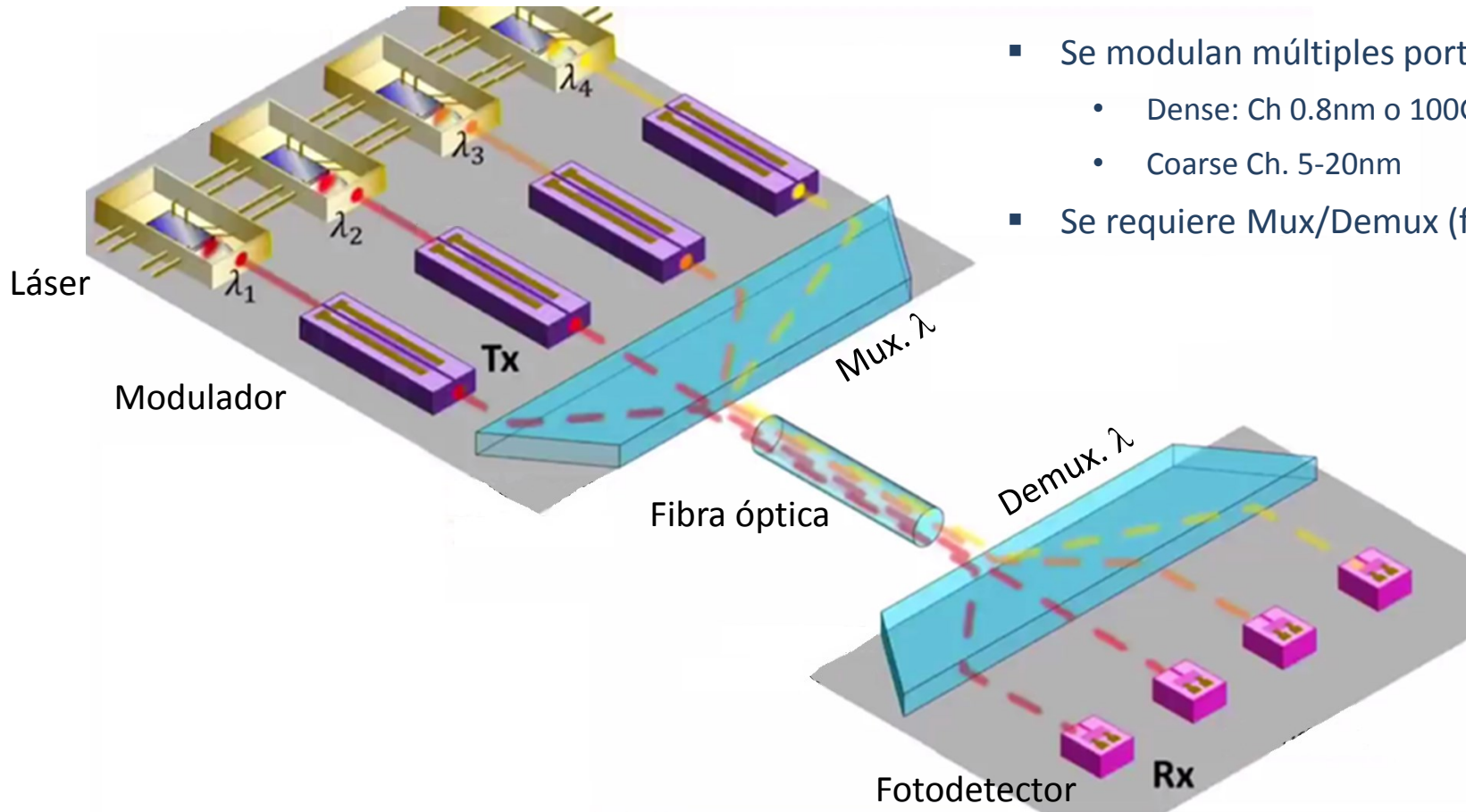


- Ancho de banda disponible: 1250-1650nm (40THz)
- No es posible modulación directa ni detección en semejante ancho de banda

→ **Wavelength Division Multiplexing (WDM)**

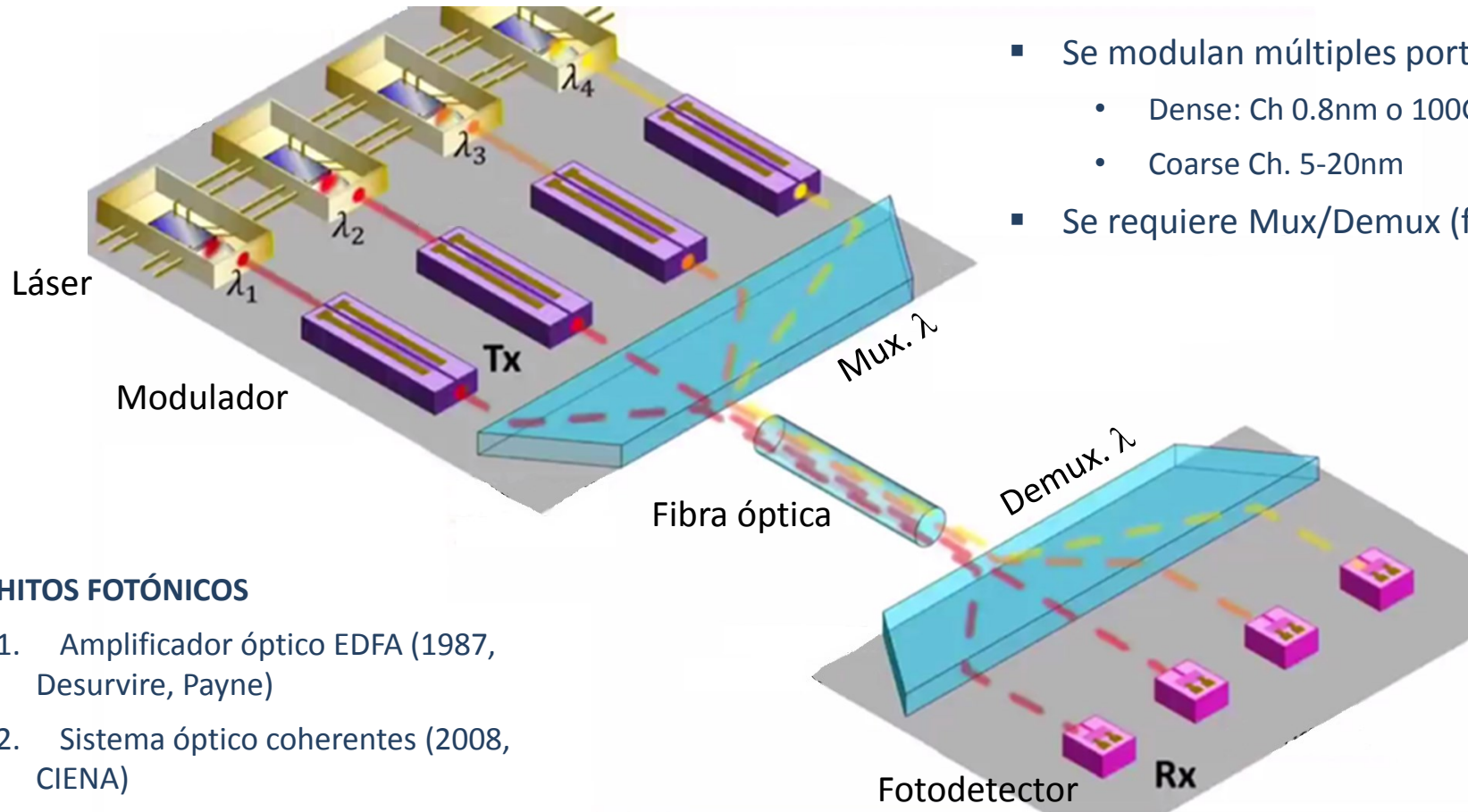


■ Enlace óptico WDM



- Se modulan múltiples portadoras
 - Dense: Ch 0.8nm o 100GHz
 - Coarse Ch. 5-20nm
- Se requiere Mux/Demux (filtros)

■ Enlace óptico WDM



- Se modulan múltiples portadoras
 - Dense: Ch 0.8nm o 100GHz
 - Coarse Ch. 5-20nm
- Se requiere Mux/Demux (filtros)

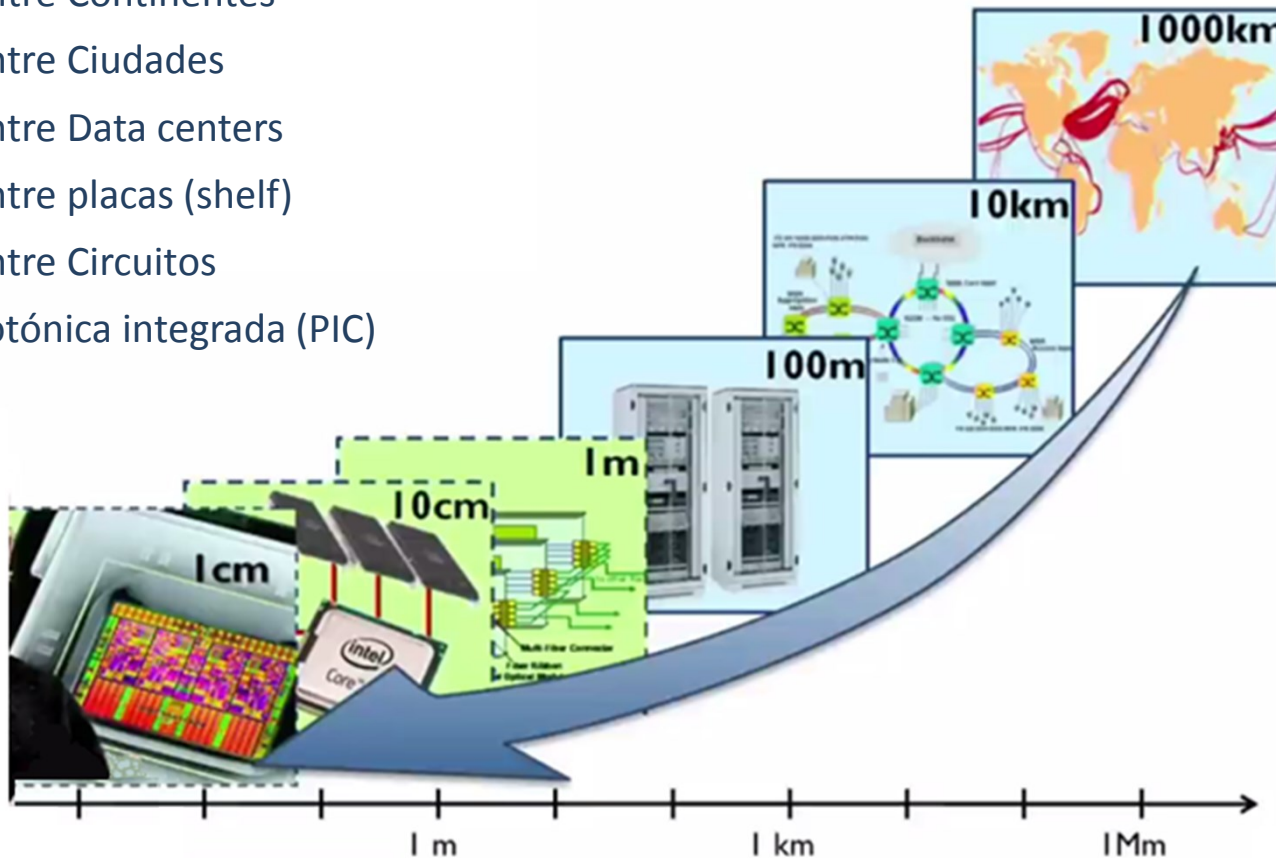
HITOS FOTÓNICOS

1. Amplificador óptico EDFA (1987, Desurvire, Payne)
2. Sistema óptico coherentes (2008, CIENA)
3. Photonics IC, Multi-Project Wafer (2008, TU Eindhoven)

Introducción a la Fotónica

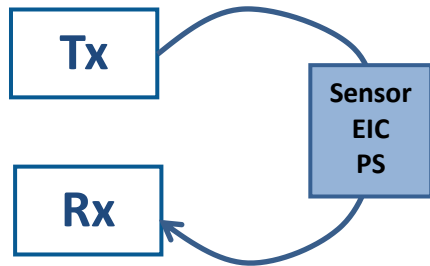
■ Enlaces ópticos. Escalas

1. Entre Continentes
2. Entre Ciudades
3. Entre Data centers
4. Entre placas (shelf)
5. Entre Circuitos
6. Fotónica integrada (PIC)



Introducción a la Fotónica

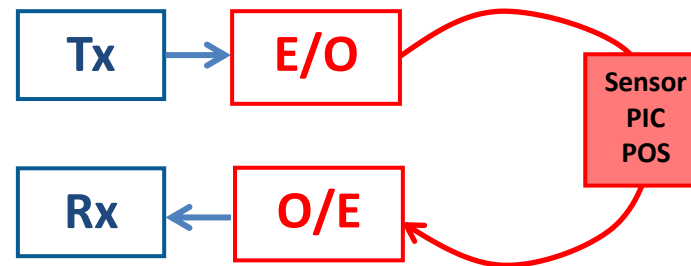
Tecnología Electrónica



CANAL

- Cobre (cable)
- Guía de onda, PCB
- Elec. Int. Circuits
- Proc. Señales

Tecnología Fotónica (híbrida)

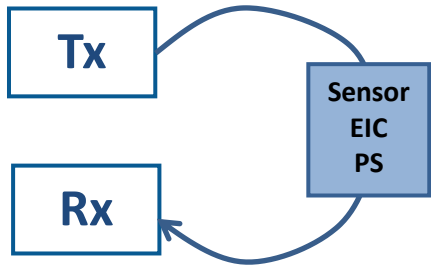


CANAL

- Fibra óptica
- Guía de onda
- Phot. Int. circ.
- Proc. Opt. Señ.

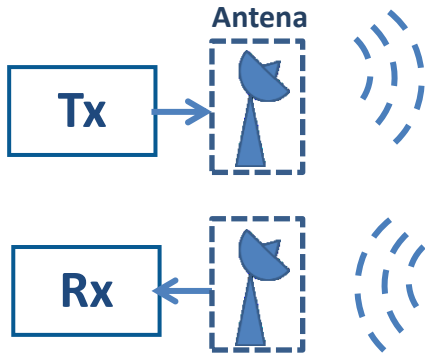
Introducción a la Fotónica

Tecnología Electrónica



CANAL

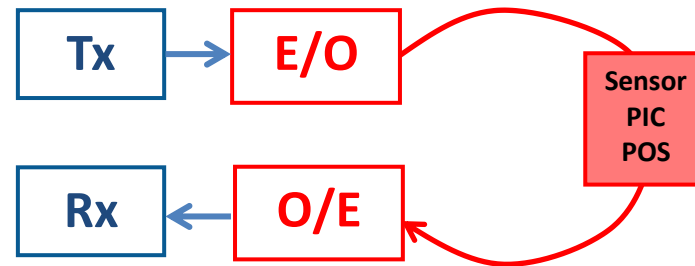
- Cobre (cable)
- Guía de onda, PCB
- Elec. Int. Circuits
- Proc. Señales



CANAL

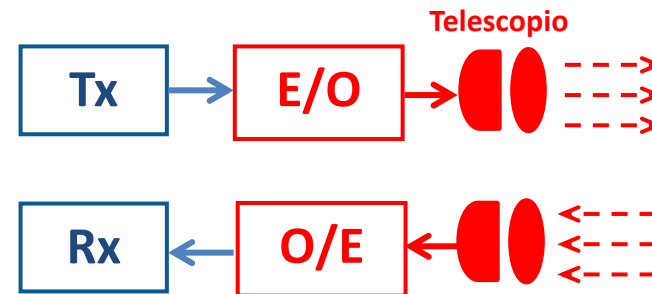
- Inalámbrico

Tecnología Fotónica (híbrida)



CANAL

- Fibra óptica
- Guía de onda
- Phot. Int. circ.
- Proc. Opt. Señ.

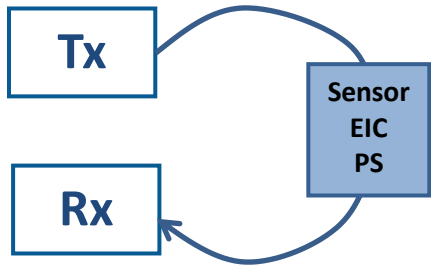


CANAL

- Inalámbrico (FSO)

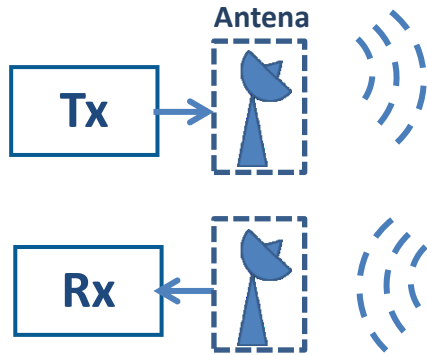
Introducción a la Fotónica

Tecnología Electrónica



CANAL

- Cobre (cable)
- Guía de onda, PCB
- Elec. Int. Circuits
- Proc. Señales

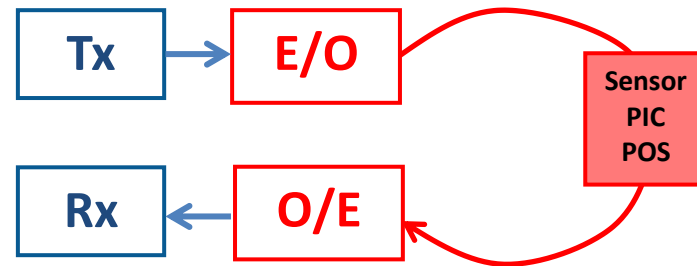


CANAL

- Inalámbrico

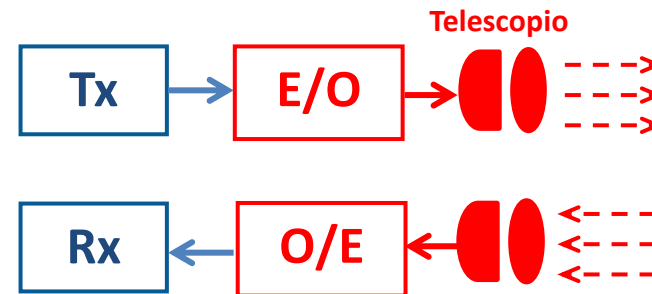
Tecnología de Radio sobre Fibra (RoF)

Tecnología Fotónica (híbrida)



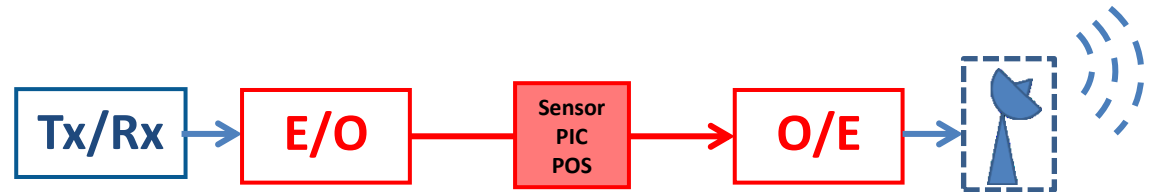
CANAL

- Fibra óptica
- Guía de onda
- Phot. Int. circ.
- Proc. Opt. Señ.



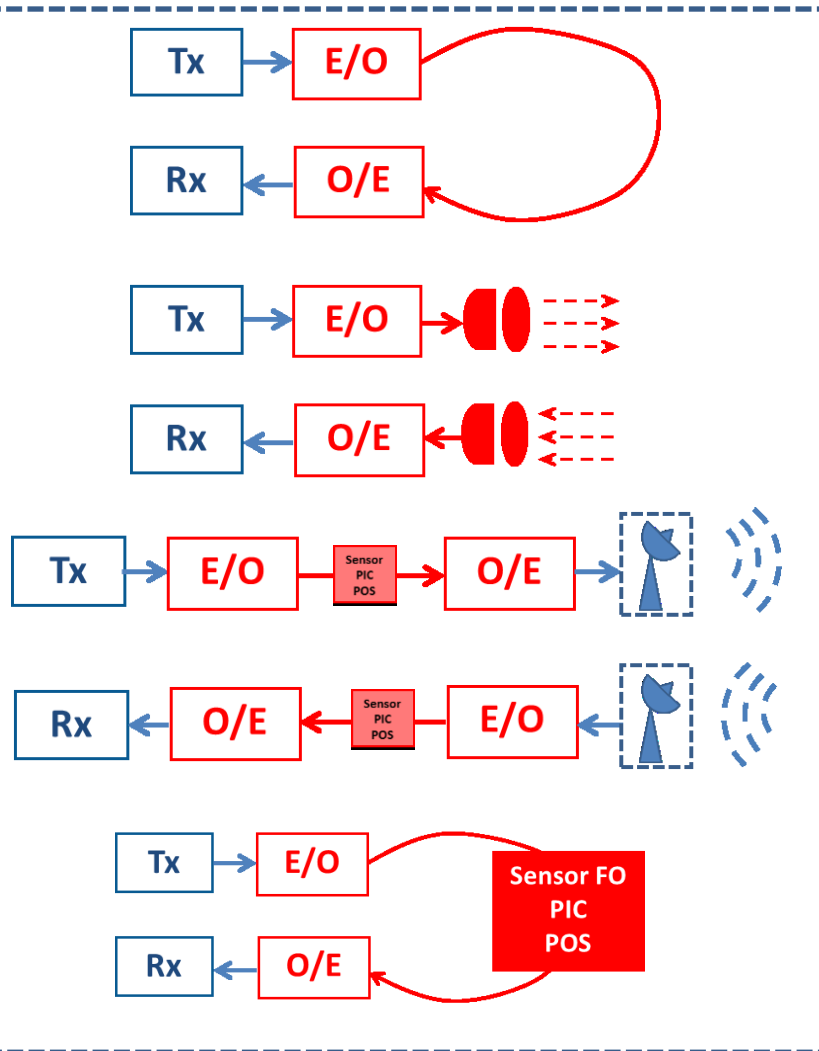
CANAL

- Inalámbrico (FSO)



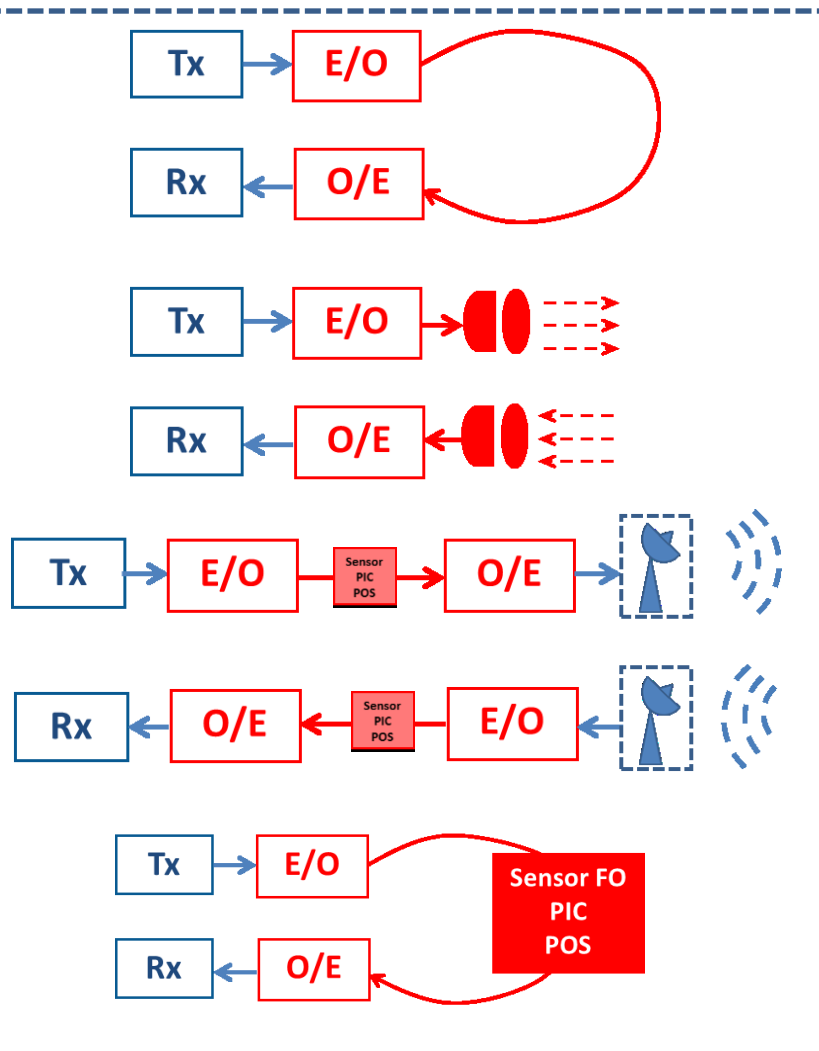
Introducción a la Fotónica

¿Por qué se consideraría una solución **fotónica**?



Introducción a la Fotónica

¿Por qué se consideraría una solución **fotónica**?

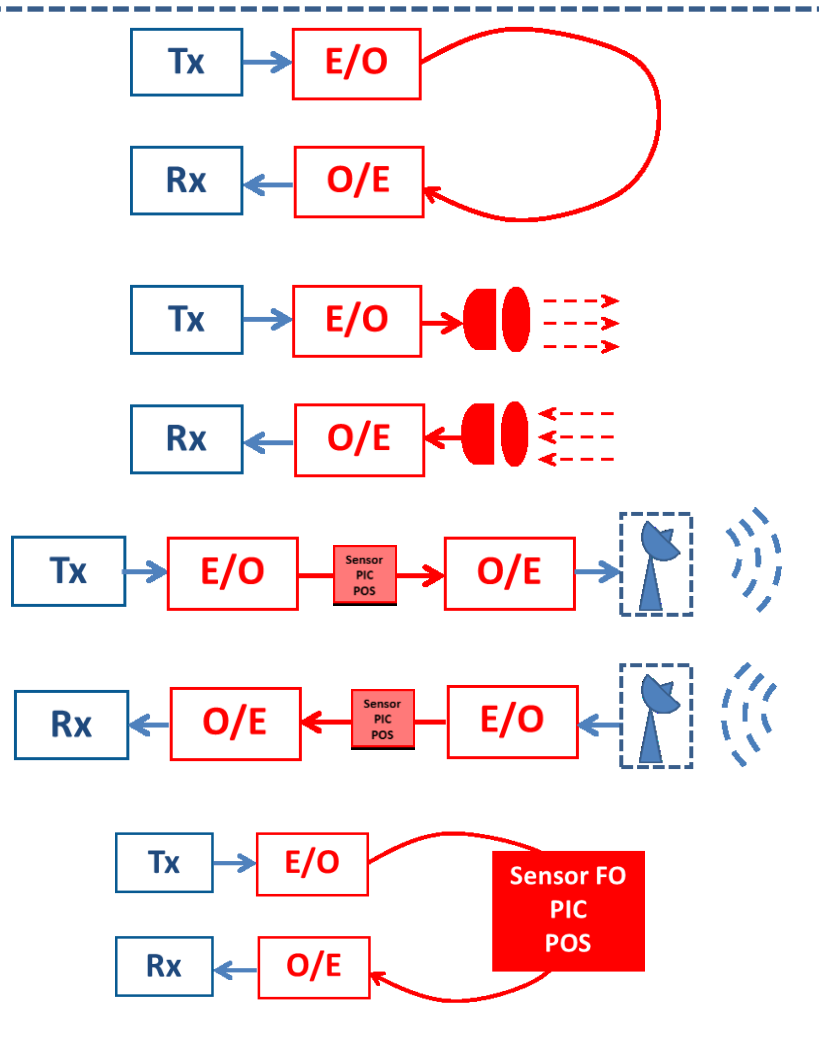


- Volumen/tamaño
- Masa
- Ancho de banda (atenuación y dispersión)
- EMI (inmunidad)
- Potencia/Consumo
- Uso del espectro
- Lo requiere la aplicación
- Complejidad
- Flexibilidad
- Costo

Característica	FIBRA	COAXIAL
Peso	1.7 kg/km	567 kg/km
Atenuación	0.2 dB/km	360 dB/km @ 2 GHz ^(*)

Introducción a la Fotónica

¿Por qué se consideraría una solución en **fotónica integrada**?

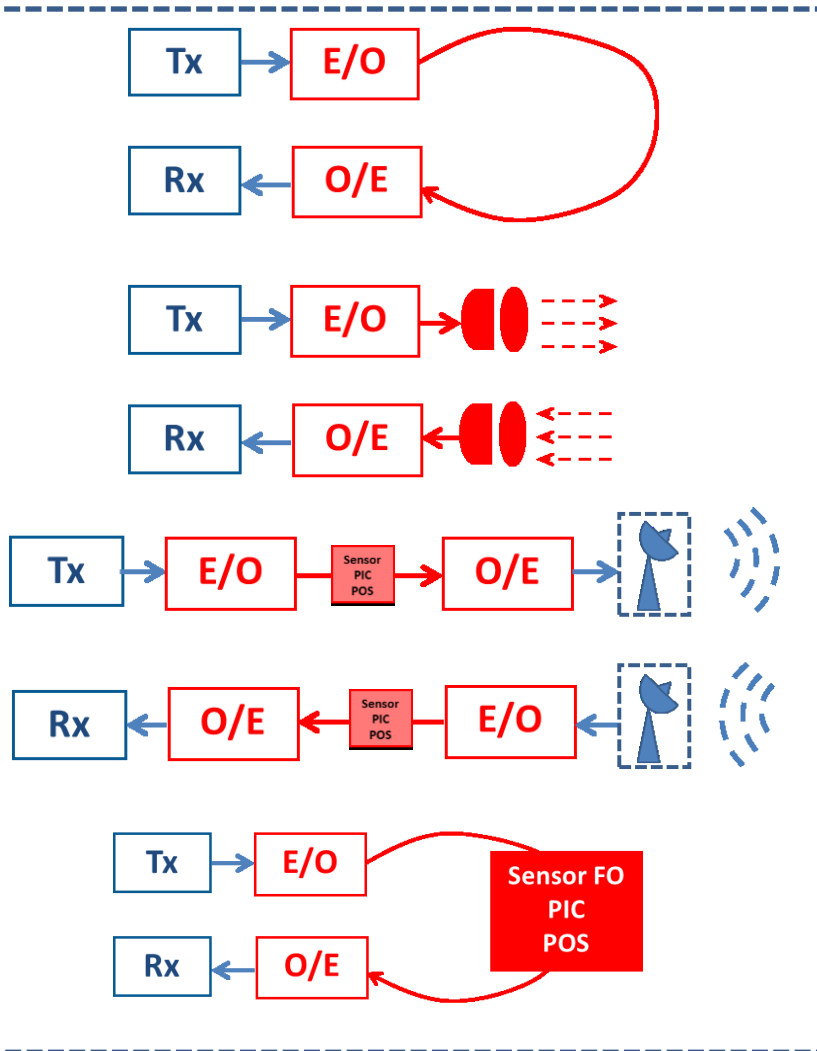


Recordar que estamos procesando LUZ con:

1. Láser
2. Lentes, prismas
3. Moduladores
4. Filtros espaciales y espectrales
5. Polarizadores
6. Espejos
7. Phase shifters
8. Amplificadores

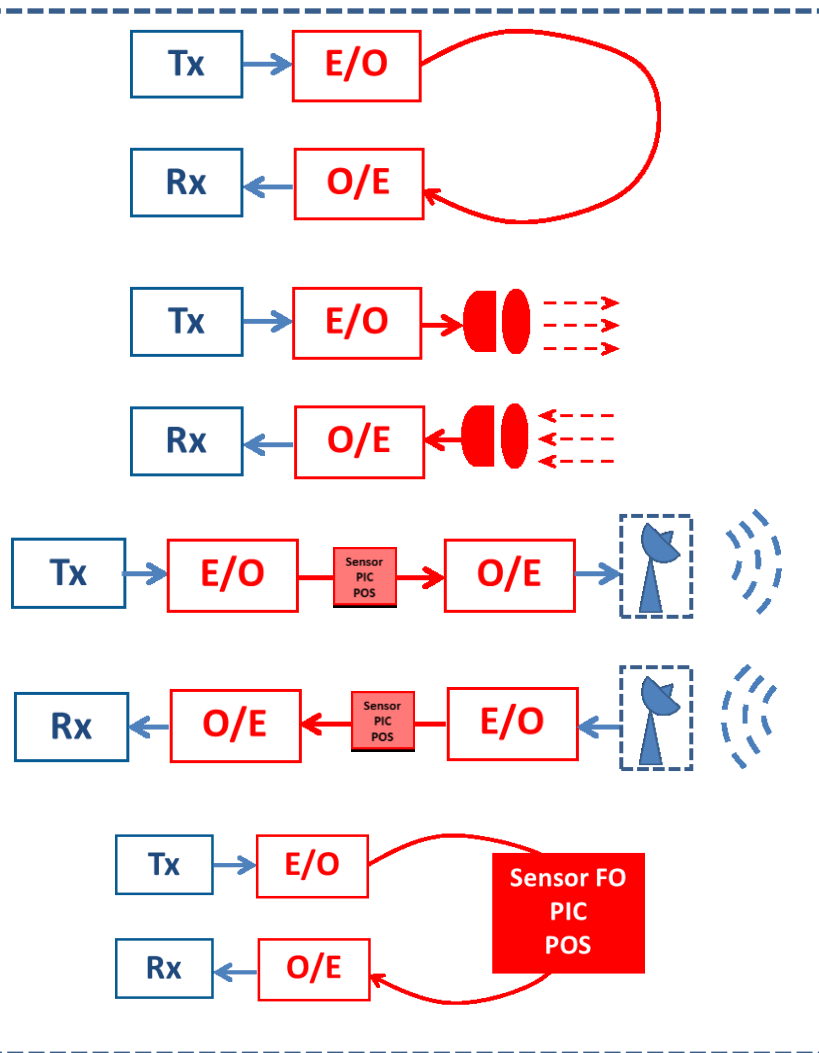
Introducción a la Fotónica

¿Por qué se consideraría una solución en **fotónica integrada**?



Introducción a la Fotónica

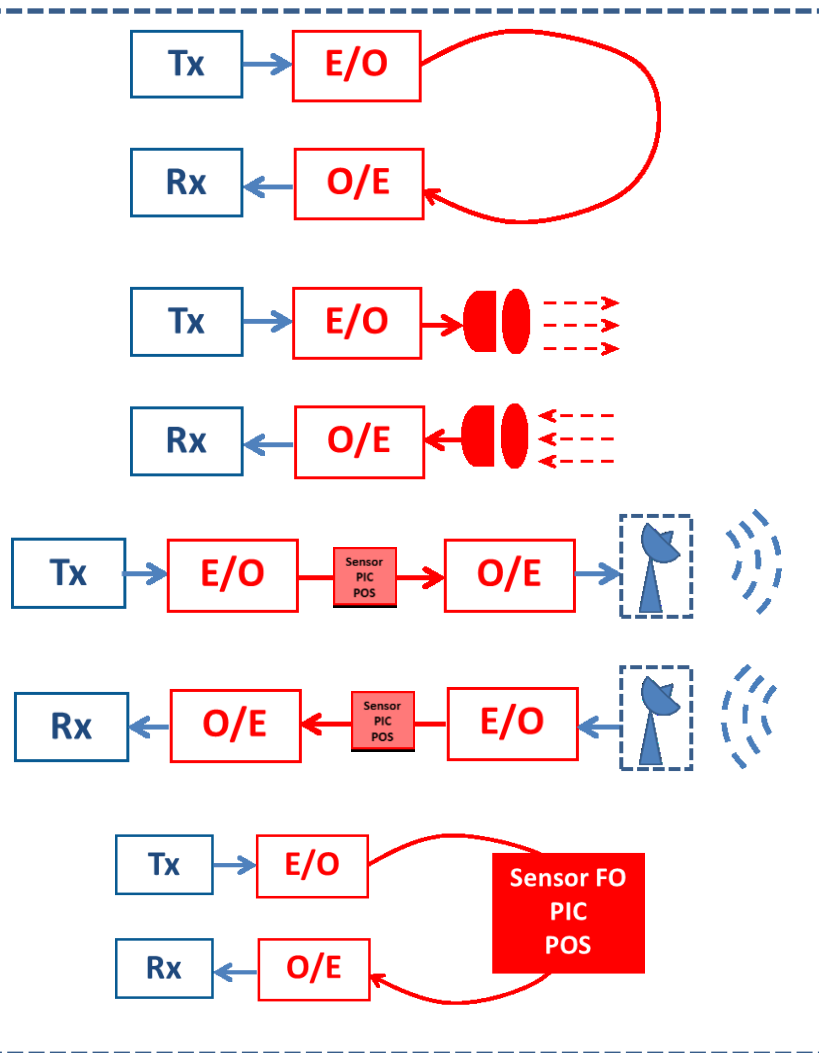
¿Por qué se consideraría una solución en **fotónica integrada**?



Fuente Bogaerts 2021

Introducción a la Fotónica

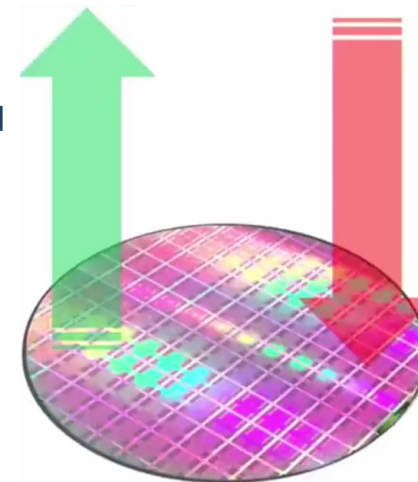
¿Por qué se consideraría una solución en **fotónica integrada**?



Procesar LUZ en un CHIP

Confiabilidad
Desempeño
Funciones
complejas

Costos
Consumo

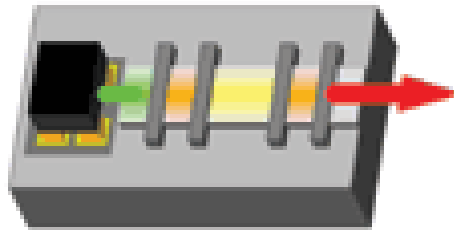


- ❑ Acerca del LIAT
- ❑ Introducción a la Fotónica
- ❑ **Introducción a la Fotónica Integrada**
- ❑ Fotónica Integrada en el LIAT-DMNT (CNEA)
- ❑ Conclusiones

Introducción a la Fotónica Integrada

- Bloques Funcionales

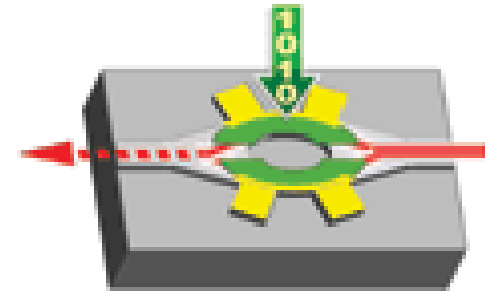
1) Light Source



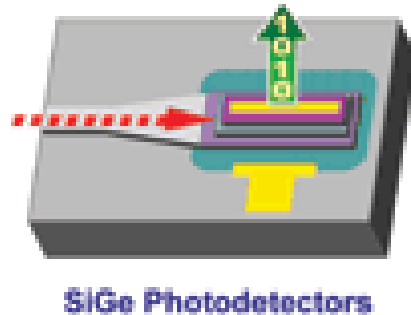
2) Guide Light



3) Modulation



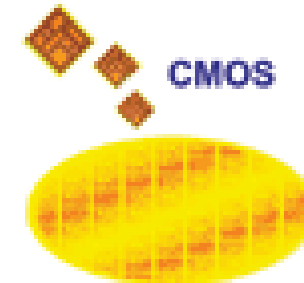
4) Photo-detection



5) Low Cost Assembly

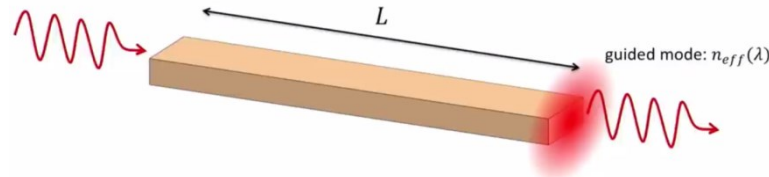


6) Intelligence

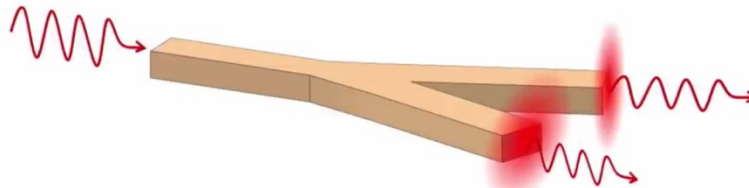


■ Componentes pasivos

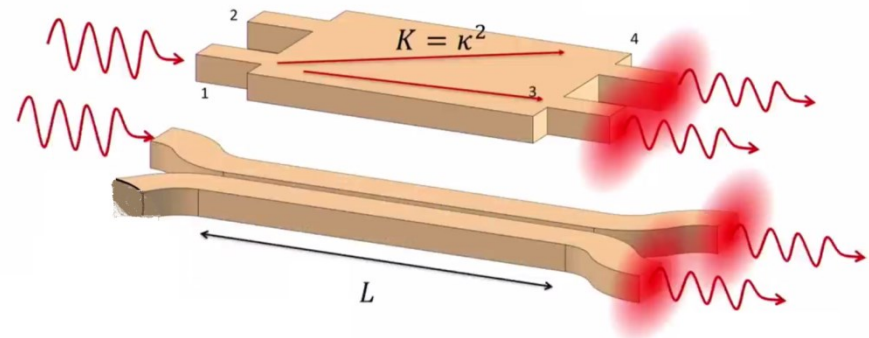
- Guía de onda
Pérdidas, índice efectivo, modos



- Splitter



- 2x2 Coupler
MMI
Direccional



- Componentes pasivos

- Filtro de Canal



- Filtro interleaver



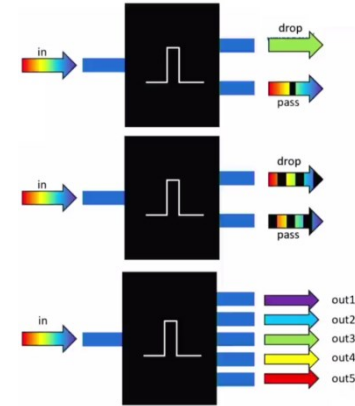
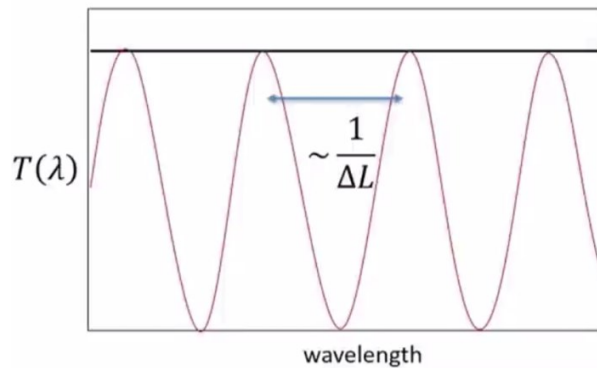
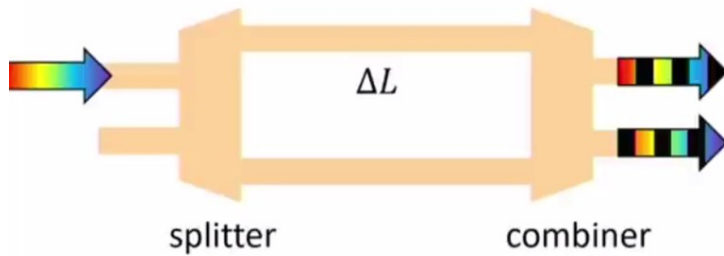
- Filtro Mux/Demux



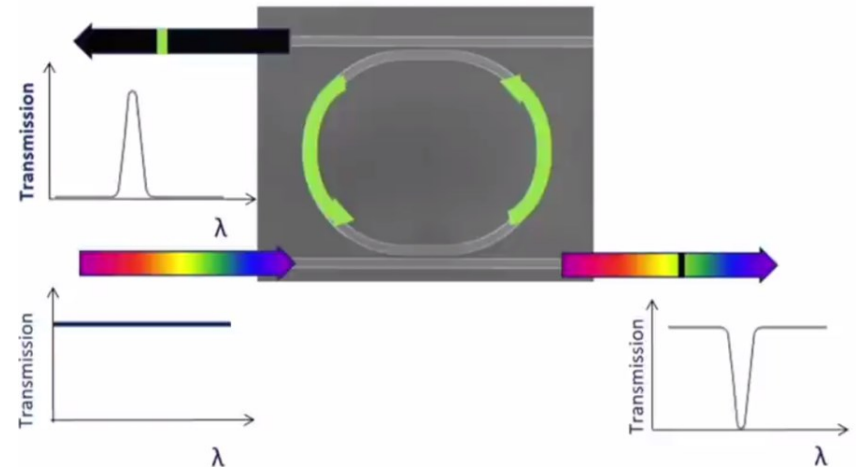
Introducción a la Fotónica Integrada

- Componentes pasivos

- Interferómetro Mach Zehnder

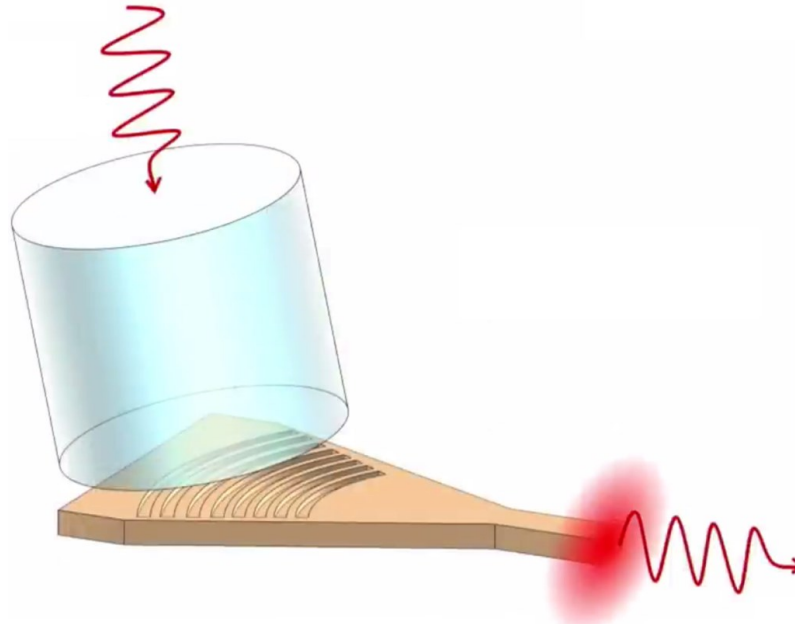


- Resonador óptico de anillo



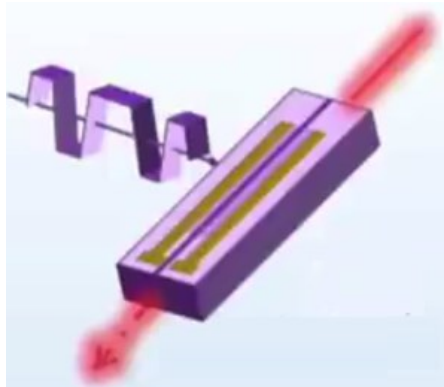
- Componentes pasivos

- Grating Coupler



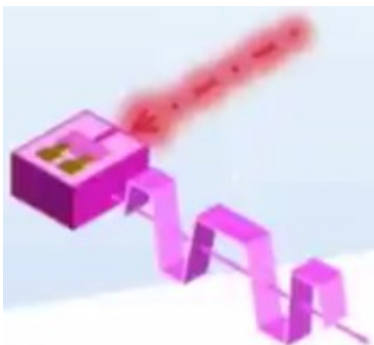
■ Componentes activos

➤ Moduladores



- Modulación de señal (rápidos)
 - Amplitud, fase (GHz a 100GHz)
- Conmutación (lentos, digitales)
 - Amplitud (kHz)
- Tecnologías
 - Térmicos
 - Inyección/extracción de portadores
 - Electroópticos

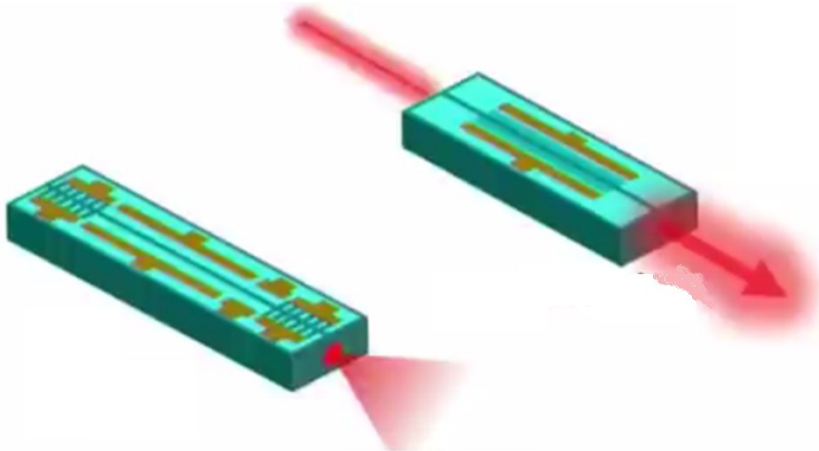
➤ Fotodetectores



- Fotodiodos
 - PIN, APD
 - El fotón absorbido crea un par e-h
- Semiconductores III-V (Vis, Telecom, MIR)
- Germanio (Telecom)
- Silicon (Vis, NIR)

- Componentes activos

- Láser y Amplificador



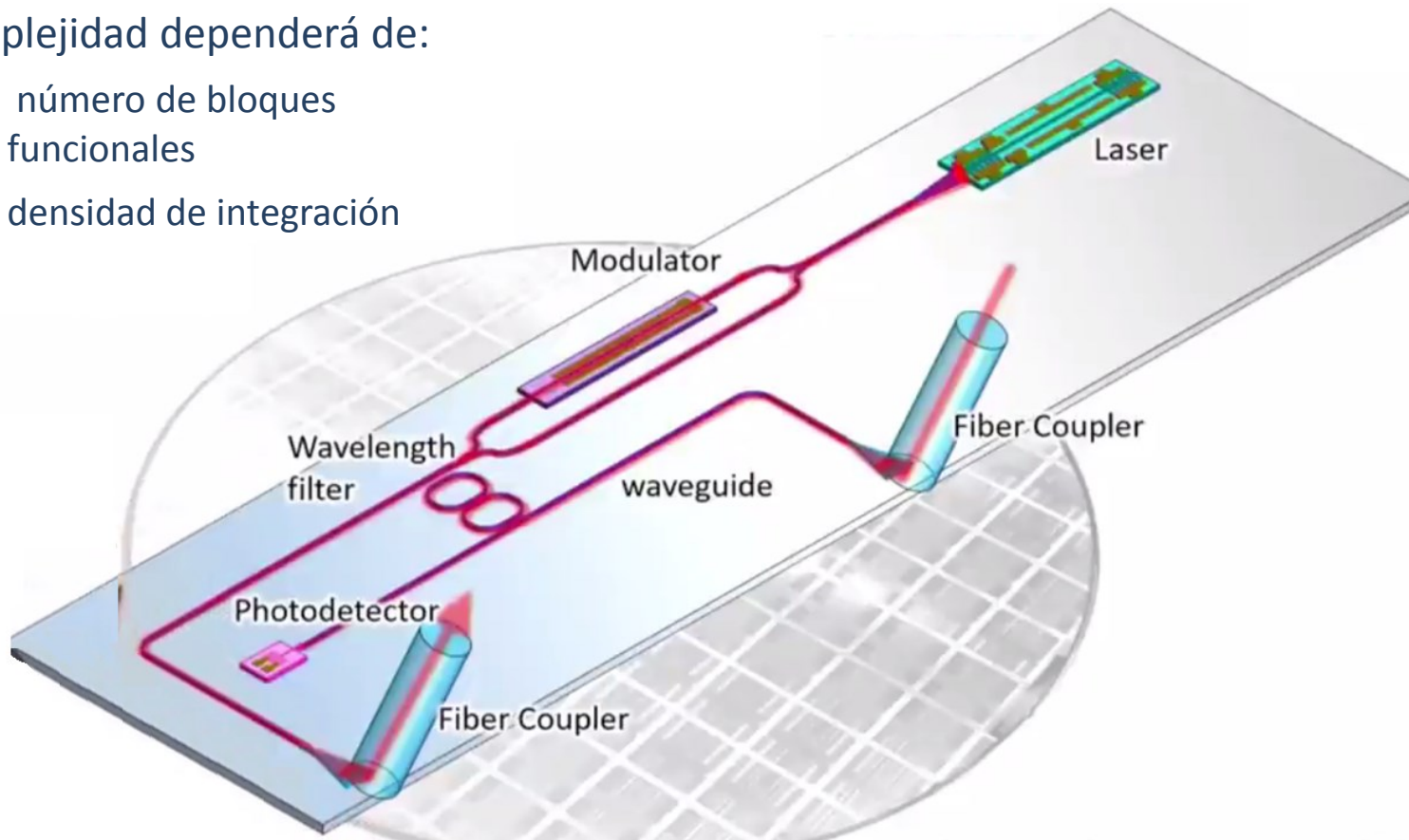
- Introduce ganancia óptica en el PIC
 - Semiconductores III-V, Ge, bombeados eléctricamente
 - Dopaje con Erblio de las guías
 - Ganancia paramétrica (FWM) en materiales no lineales

Introducción a la Fotónica Integrada

- Circuito fotónico integrado: incluye varias funciones en un chip

➤ Complejidad dependerá de:

- número de bloques funcionales
- densidad de integración

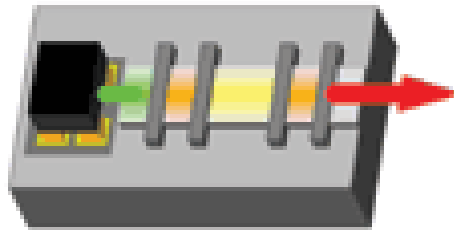


- Bloques Funcionales y tecnología de fabricación
 - Semiconductores III-V (InP, GaAs)
 - Niobato de Litio (LiNbO₃)
 - Polímero
 - Fotónica de Silicio
 - Silica-on-Silicon, Silica glass (fused Silica), Nitruro de Silicio

Introducción a la Fotónica Integrada

- Bloques Funcionales y tecnología de fabricación

1) Light Source

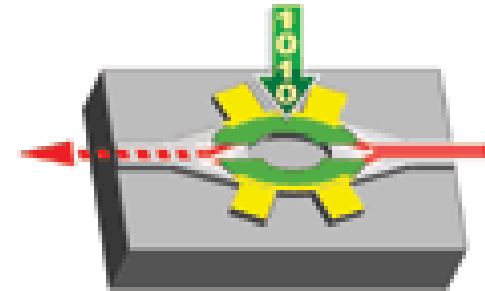


2) Guide Light

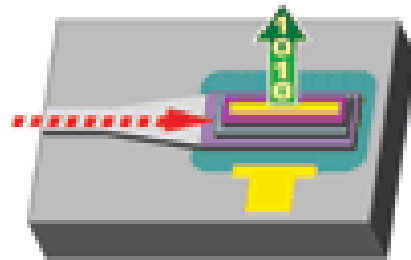


Waveguide devices

3) Modulation



4) Photo-detection



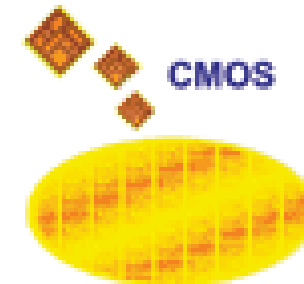
SiGe Photodetectors

5) Low Cost Assembly



Passive
Align

6) Intelligence



Introducción a la Fotónica Integrada

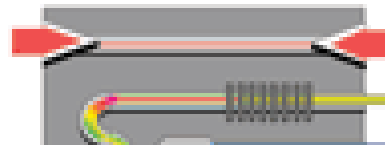
- Bloques Funcionales y tecnología de fabricación

1) Light Source



Semiconductores III-V
(InP, GaAs)

2) Guide Light



Vidrio, polímero,
Semiconductores III-V
Silicio

3) Modulation



Niobato de Litio
Polímero
Semiconductores III-V

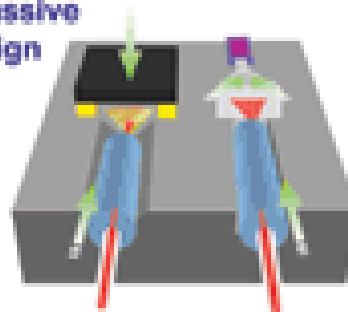
4) Photo-detection



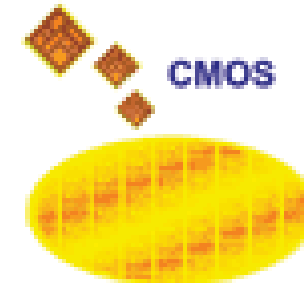
Semiconductores III-V
(InP, GaAs)

5) Low Cost Assembly

Passive
Align

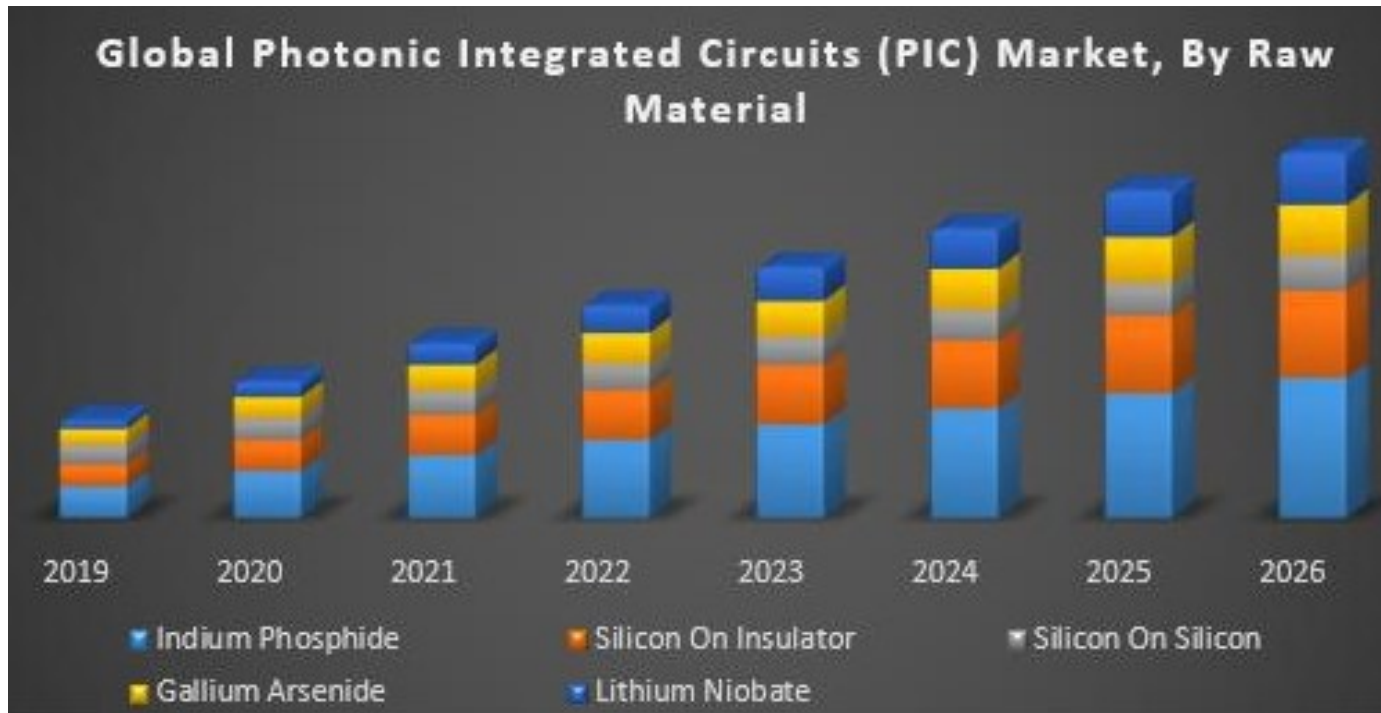


6) Intelligence



Introducción a la Fotónica Integrada

- Crecimiento del mercado de chips fotónicos



75% corresponde a tecnología de semiconductores

- ¿Qué tiene de especial el Silicio?

Introducción a la Fotónica Integrada

- El Silicio no es un material fotónico muy bueno

1) Light Source



Band gap indirecto
(sin emisión)

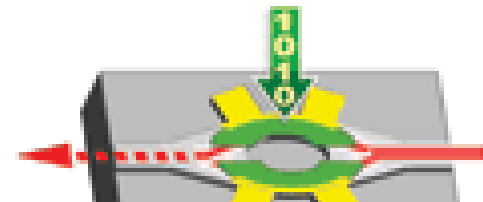
2) Guide Light



Pérdidas altas

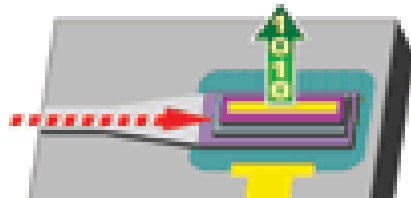
Waveguide devices

3) Modulation



No tiene un mecanismo
de modulación eficiente

4) Photo-detection



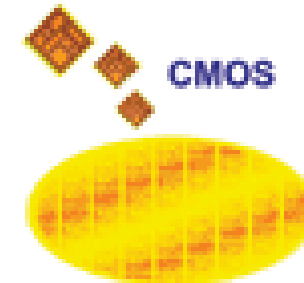
Absorción baja en λ
de telecomun.

5) Low Cost Assembly



Passive
Align

6) Intelligence



CMOS

Introducción a la Fotónica Integrada

■ ¿Por qué Fotónica de Silicio?

■ El Silicio tiene

- El Silicio tiene el know-how de la electrónica CMOS
- la compatibilidad CMOS
- la infraestructura disponible (reutilización)

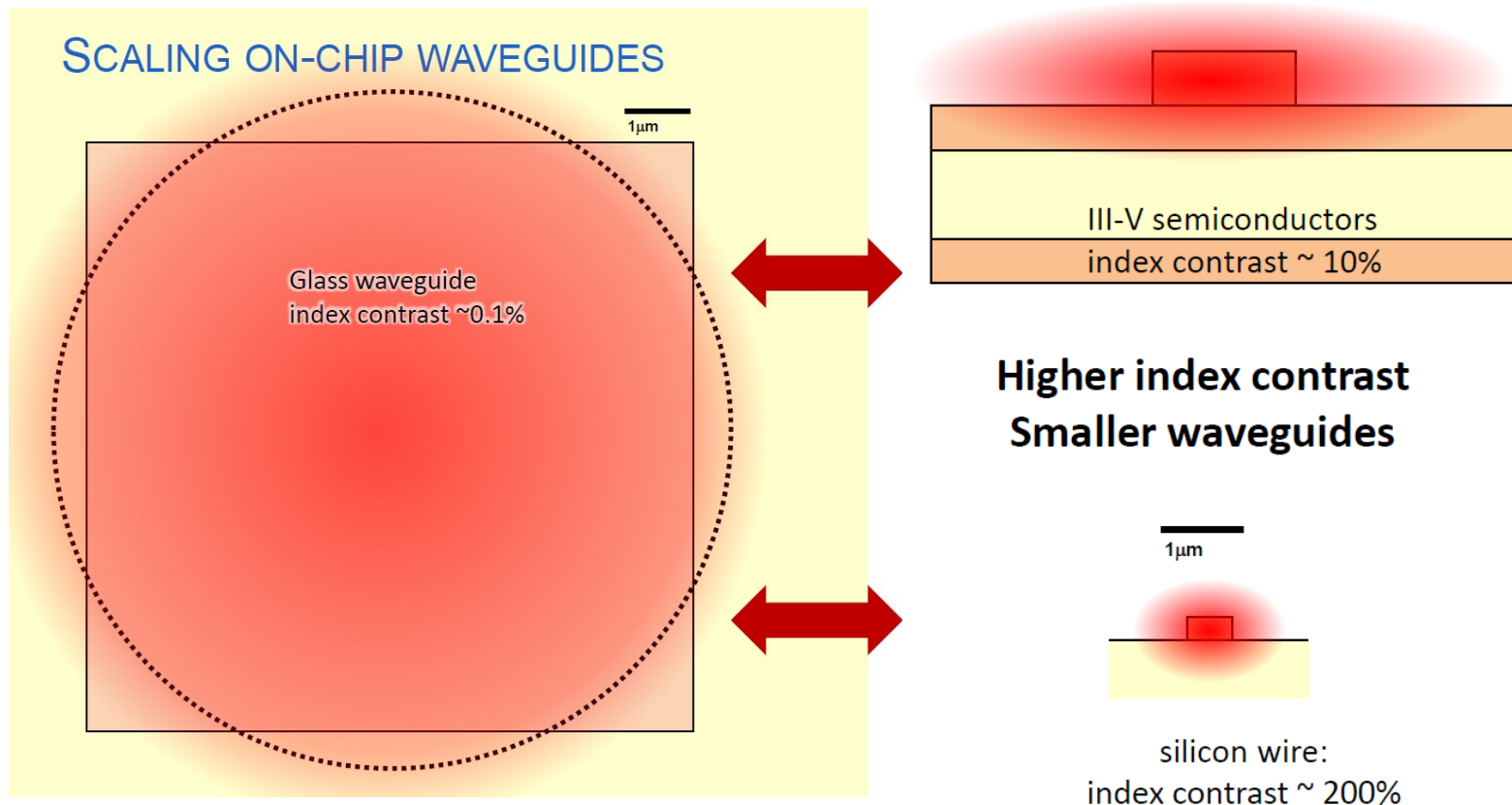
→ **Fabricación a gran ESCALA**



Fuente Yole development

- ¿Por qué Fotónica de Silicio?

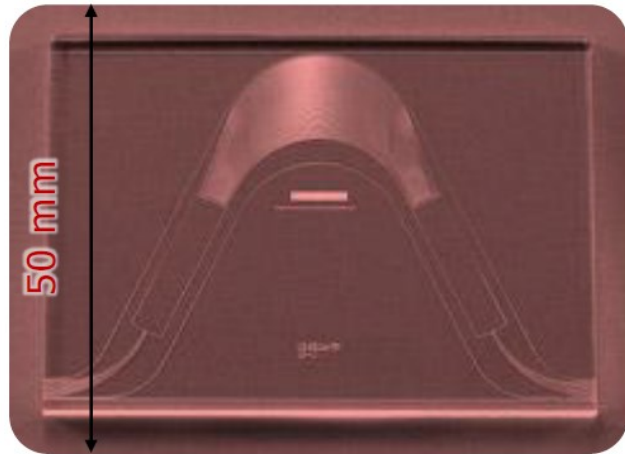
Guías de onda de ESCALA submicrométrica
→ alta densidad de integración



Introducción a la Fotónica Integrada

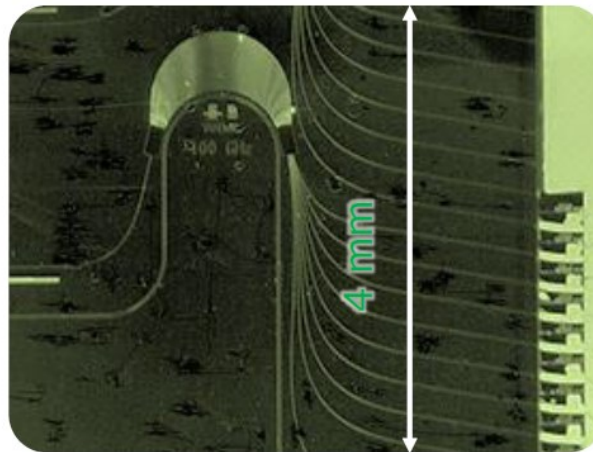
■ ¿Por qué Fotónica de Silicio?

Guías de onda de ESCALA submicrométrica
→ alta densidad de integración



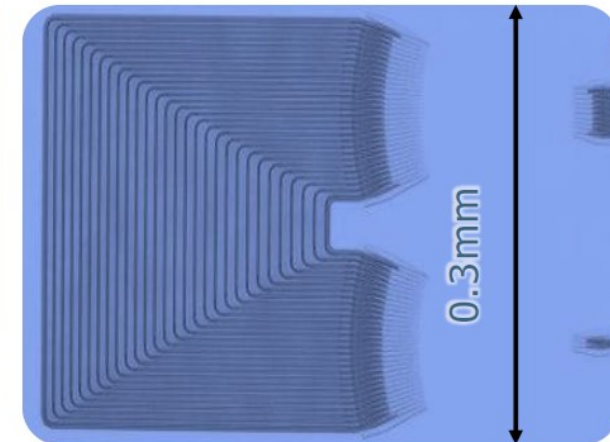
Silica on silicon

Contrast $\sim 0.01 - 0.1$
Mode diameter $\sim 8\mu\text{m}$
Bend radius $\sim 5\text{mm}$
Size $\sim 10\text{cm}^2$



Indium Phosphide

Contrast $\sim 0.2 - 0.5$
Mode diameter $\sim 2\mu\text{m}$
Bend radius $\sim 0.5\text{mm}$
Size $\sim 10\text{mm}^2$



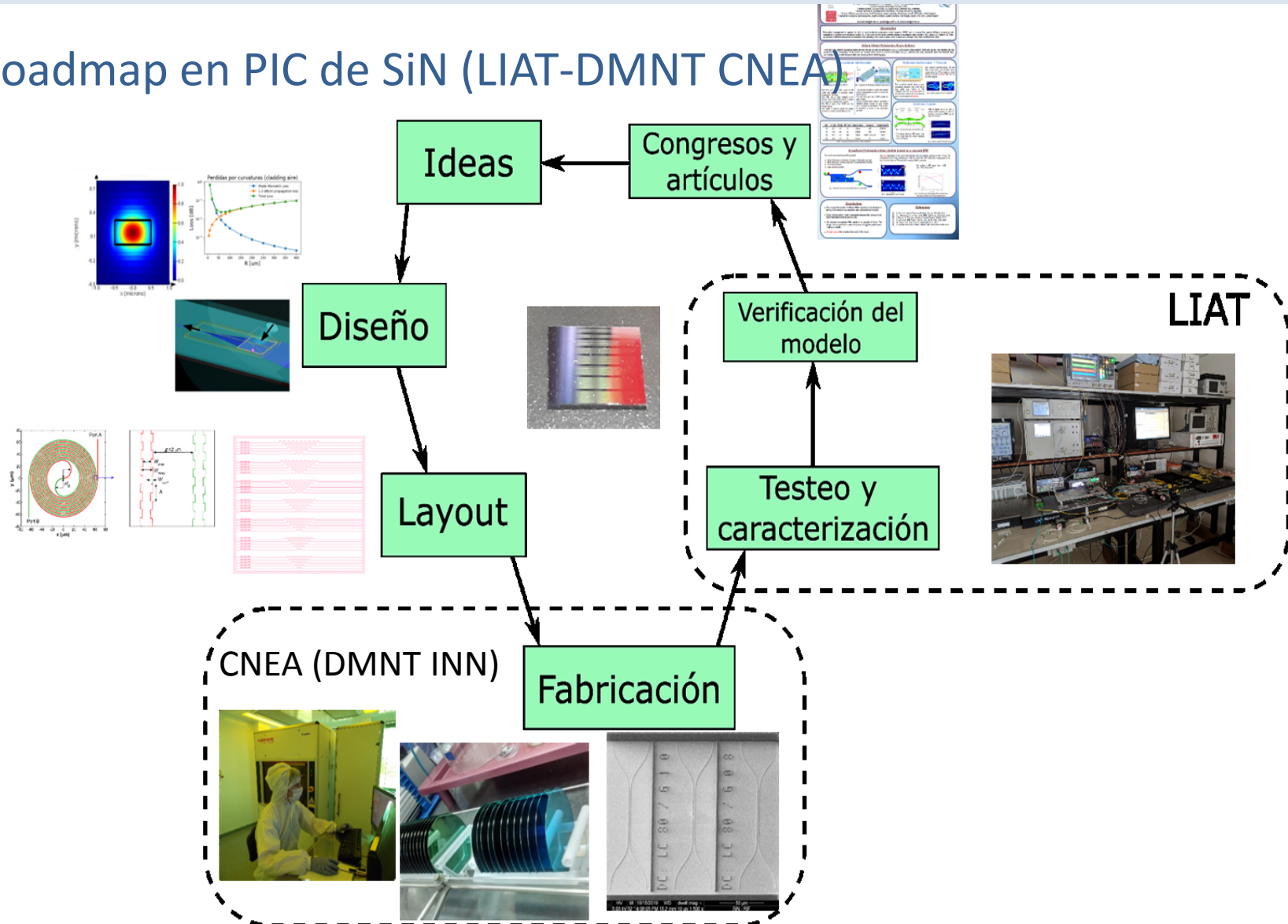
Silicon on insulator

Contrast $\sim 1.0 - 2.5$
Mode diameter $\sim 0.4\mu\text{m}$
Bend radius $\sim 5\mu\text{m}$
Size $\sim 0.1\text{mm}^2$

10000 ×

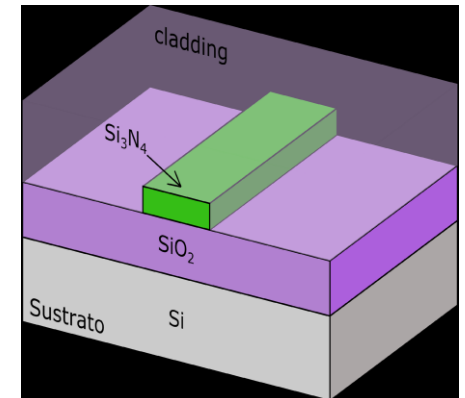
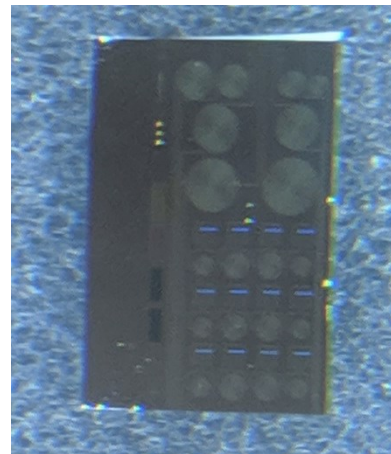
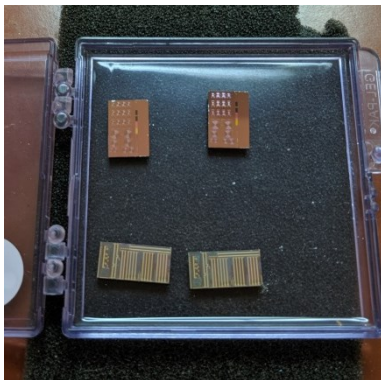
- ❑ Acerca del LIAT
- ❑ Introducción a la Fotónica
- ❑ Introducción a la Fotónica Integrada
- ❑ **Fotónica Integrada en el LIAT-DMNT (CNEA)**
- ❑ Conclusiones

■ Roadmap en PIC de SiN (LIAT-DMNT CNEA)



Diseño

- ▶ Diseño de dispositivos fotónicos integrados principalmente basados en la plataforma de Nitruro de Silicio (SiP y PLC).
 - Divisores de potencia Y-branch.
 - Acopladores direccionales (50/50, 10/90, etc.)
 - Grating couplers para acoplar la señal de la FO
 - Divisores de polarización (TE/TM)
 - Interferómetros Mach-Zehnder
 - Interferómetros multimodo (MMI)
 - Filtros basados en Redes de Bragg
 - Resonadores en anillo



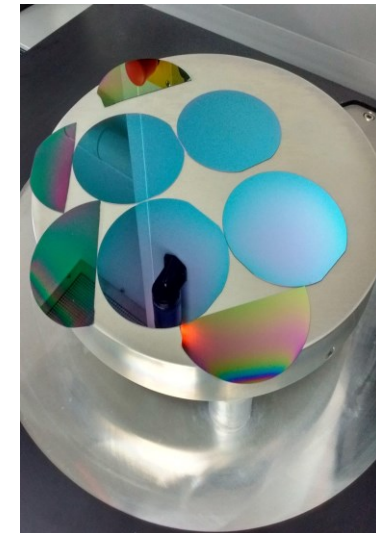
Plataforma de Nitruro de Silicio para la implementación de PICs

Fabricación: Obleas y PIC

- ▶ Fabricación de obleas con nitruro de silicio utilizando PECVD o LCPVD en el DMNT.
- ▶ Desarrollo del proceso de fabricación basado en la escritura directa con láser UV para definir guías de ondas de nitruro con una resolución menor a $1\mu\text{m}$. (no habría necesidad de hacer una máscara física para la fotolitografía)



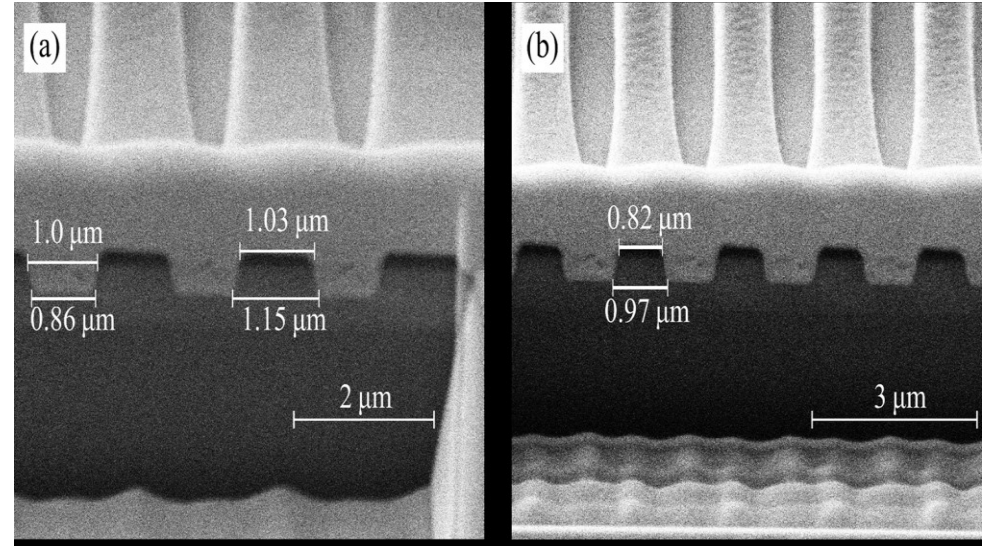
Obleas con crecimiento de SiO_2 sobre sustrato de Si mediante oxidación térmica (DES - CNEA)



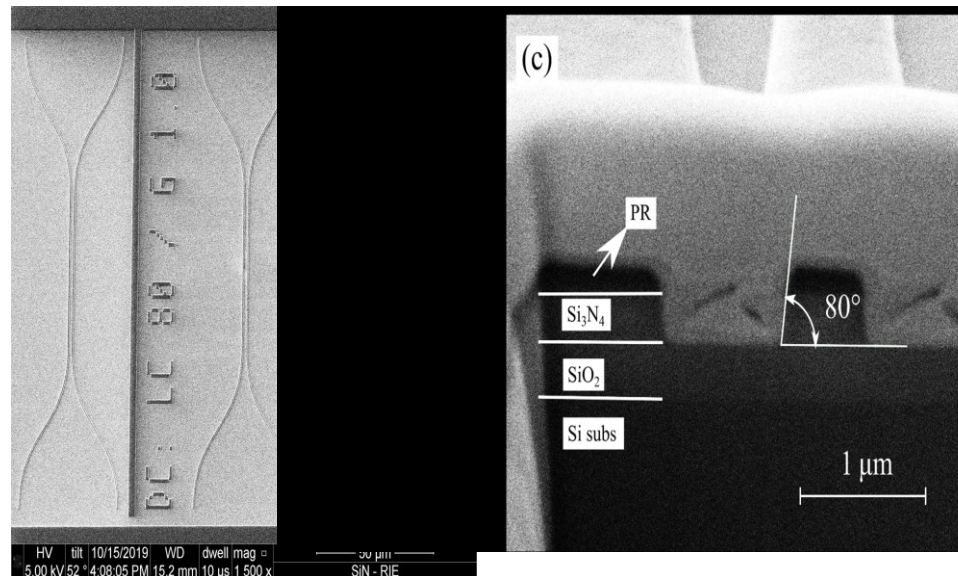
Depósito de 300nm de SiN utilizando PECVD.

Fabricación: Resultados

- ▶ Se obtuvieron buenos resultados definiendo las estructuras en el nitruro de silicio.
 - **800nm de resolución mínima** alcanzada en el ancho de las guías.



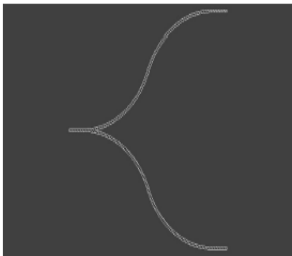
- ▶ Se tiene que que optimizar tanto la litografía como el ataque RIE del nitruro para un mayor control y repetitividad del proceso.



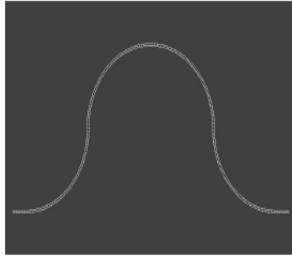
Imágenes tomadas con el SEM de las estructuras que fabricamos para calibrar los parámetros del proceso de fabricación.

Fabricación: Resultados

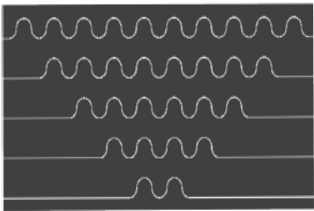
- ▶ Fabricamos los primero PICs con distintas estructuras para pruebas y caracterización de la plataforma de SiN.
- ▶ Diseñamos muestras de 1cm^2



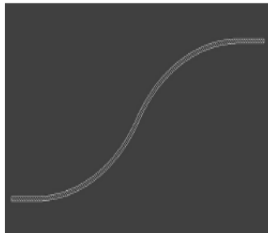
Ybranch.



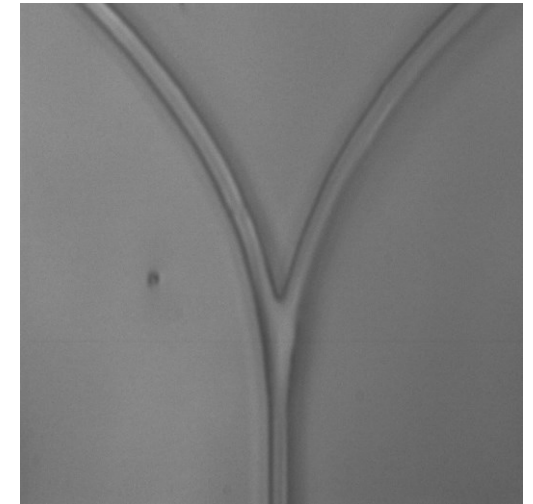
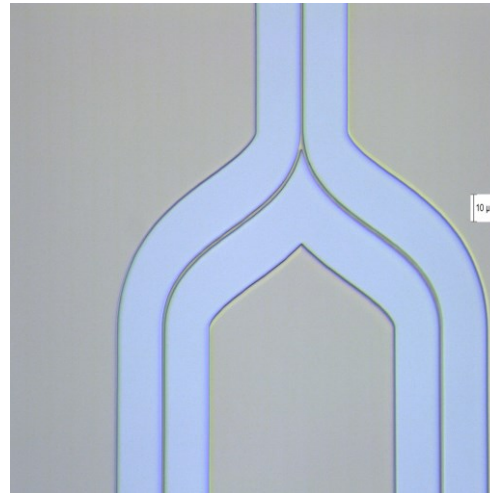
Sinusoide.



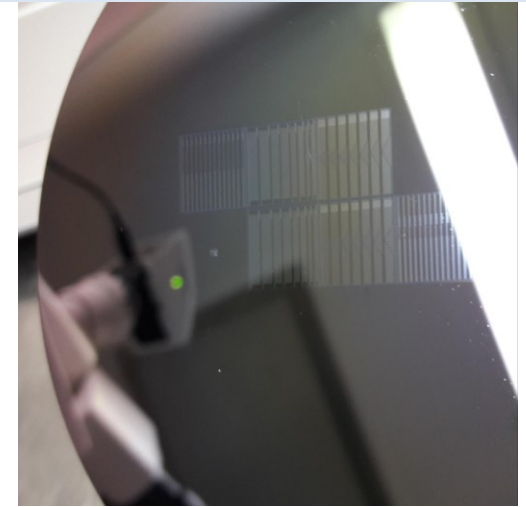
Medición de pérdidas.



Desviadores.

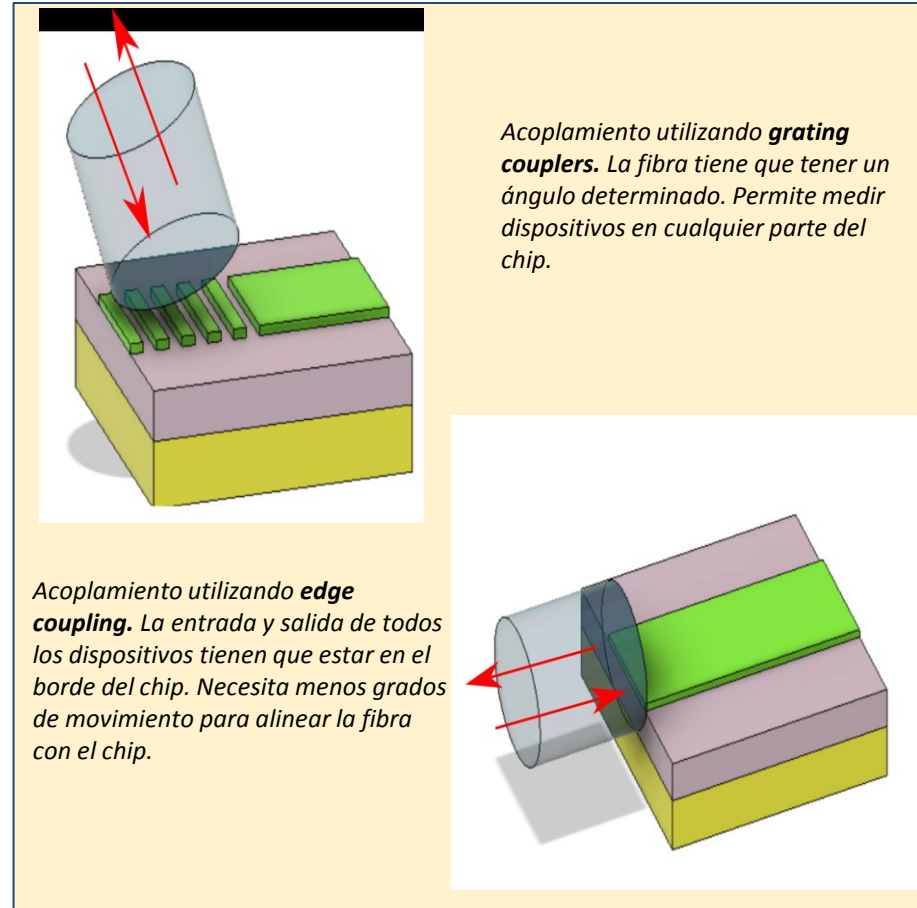
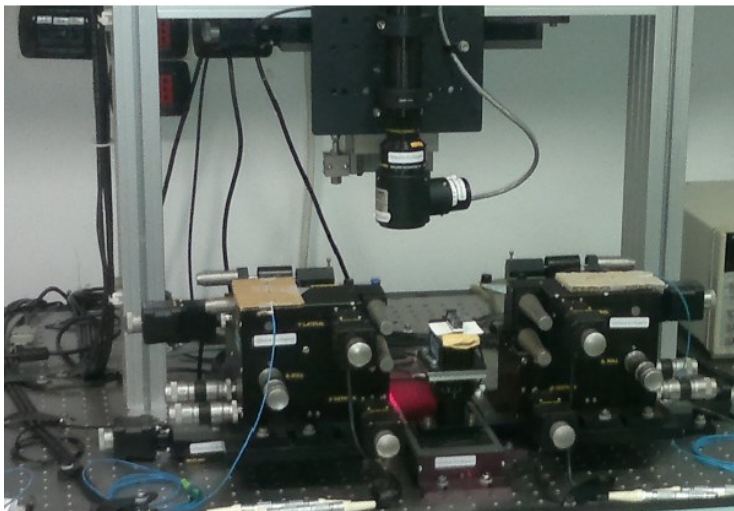


Divisores de potencia 50/50 del tipo Y-branch fabricados en Nitruro de Silicio.



Caracterización en el LIAT

- ▶ Caracterización de los dispositivos fabricados en el dominio óptico y eléctrico:
 - Medición de respuesta espectral y temporal de alta resolución (RF: DC a 43 GHz, pulso ns, ps y fs, banda óptica C).
 - Caracterización de pérdidas, dispersión y efectos no lineales, parámetros S, PDL, PDD.
- ▶ Es necesario contar con una estación de prueba para poder acoplar señal en los dispositivos (control de posición y térmico).



- ❑ Acerca del LIAT
- ❑ Introducción a la Fotónica
- ❑ Introducción a la Fotónica Integrada
- ❑ Fotónica Integrada en el LIAT-DMNT (CNEA)
- ❑ **Conclusiones**

- Los PIC son un realidad y la tecnología fotónica está presente en muchas aplicaciones.
- Las plataformas de fabricación de PIC están compitiendo con ventajas y desventajas y todas tienen alguna aplicación “nicho”
- La fotónica presenta compatibilidad con CMOS y capacidad de integración con muy alta densidad.
- En el LIAT y DMNT se están desarrollando, fabricando y por empezar a caracterizar PIC basados en nitruro de silicio (material con muy bajas pérdidas y bajo contraste de índice lo que implica guías mas grandes).

GRACIAS

...a los organizadores del SASE

...a los oyentes

...a los integrantes del LIAT, DMNT, técnicos del Lab. de Ingeniería IB.