

Recherches en Photonique

**Un domaine en pleine évolution:
Des télécoms à l'économie « verte »
De l'optique conventionnelle à la nanophotonique
La photonique science diffusante et
pluridisciplinaire**

Premiers développements (années 80)

- **Matériaux pour l'optique: cristaux, verres, diélectriques, ...**
- **Lasers et systèmes laser: optique fondamentale et applications**
- **Fibres optiques et composants semiconducteurs III-V pour l'optoélectronique : télécommunications optiques**
- **Stockage optique sur disque : la diode laser s'impose comme composant à grande diffusion**

- **En France: soutiens DGA et Télécom (CNET, ALCATEL, THOMSON-CSF, SAGEM, ...)**
- **En Asie: applications « grand public »**

Le Boom des télécoms (années 90)

- **Photonique sur semiconducteurs III-V**
 - filière InGaAsP/InP (1,3 μ m -1,5 μ m)
 - filière AlGa(In)As(P)/GaAs ($\lambda < 1 \mu$ m, puissance)
- **Sources et fonctions optiques pour les réseaux multiplexés en longueur d'onde**
- **Montée d'Internet , vers les datacoms:**
 - Du réseau de transport aux réseaux d'accès
 - La fibre chez l'abonné (FTTH)?

Pendant ce temps là ...

- **Une photonique sur silicium ?**
 - **Fonctions passives: guidage optique, interférométrie**
 - **Apport des microsystèmes: MOEMs (Micromiroirs, capteurs, ..)**
 - **MAIS :**
 - pas de source Si,
 - pas de concept générique (diversité de l'optique),
 - Taille des composants optiques
- **Nanotechnologies et nouveaux concepts issus de la nanophotonique:**
 - **Microcavités, cristaux photoniques, métamatériaux, fibres microstructurées, îlots quantiques**

Première Roadmap pour les communications optiques coordonnée par le MIT (2005)

Electronic-Photonic Convergence

	1990	2000	2010	2020	2030
PHOTONICS					
Driver	Fiber, lasers, detectors	MUX, EDFA	Metro-fiber, PLC Transceiver	μ Ph ICs FTTH	Pervasive, μ Ph ICs
Transmission Application	ETDM WAN	DWDM WAN	Security Acces/SAN/LAN	1 Gb/s Access 10 Tb/s WAN	Optical switching systems
Trend	Fiber	Fiber pigtail	Boards, Servers	Optical MCM	Optical Nodes
ELECTRONICS					
Driver	IC: Al/SiO ₂ GaAs	IC: Cu/SiO ₂ InP	Optical bus	On-chip optical interconnects	Optical switch
Processing Application	S/DRAM, ASIC, μ Proc MIMIC	DSP, μ Proc TIA	Parallel processing	E-P signal conditioning E-P signal processing	Pervasive, E-P signal processing
Trend	Yield Yield	Shrink Yield	Optical interconnection	E-P design	Photonic logic

<http://mph-roadmap.mit.edu>

<http://mphotronics.mit.edu>

Timeline for commercial deployment

Microphotonique Si pour les interconnexions à courte distance (<1km)

Materials Platform: Silicon

- Potential
 - Dense E-P integration with CMOS
 - Leverage from silicon processing infrastructure
 - Very low cost integration
 - High volume production
 - New applications with E-P convergence
- Barriers
 - **Light sources**
 - Packaging and interconnection infrastructure

Has potential to provide the majority of low-cost photonic interconnects in the medium to long term

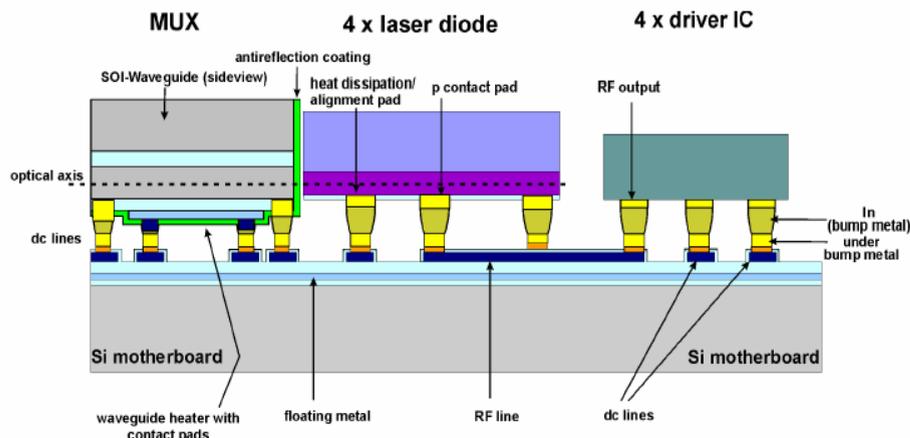
Objectif: intégration des III-V sur Si

CTR: Phase 2 Technology Targets

- **Materials**
 - large area wafers; component integration compatibility
- **Processes**
 - tool standardization, common processes, process control, process integration
- **Packaging Infrastructure**
 - **an optical chip carrier without a permanent fiber attach**
 - chips; boards; backplanes; interbox; LAN; FTTH; MAN; WAN
- **Test**
 - common test platform; wafer level testing; global standard test
- **Design**
 - common design tools; common form factors; reduce complexity; focus on functionality
 - methodology for electronic/photonic partitioning
 - photonic circuit theory to support appropriate simulation tools

Utilisation du SOI comme banc d'intégration de l'optique et de la microélectronique

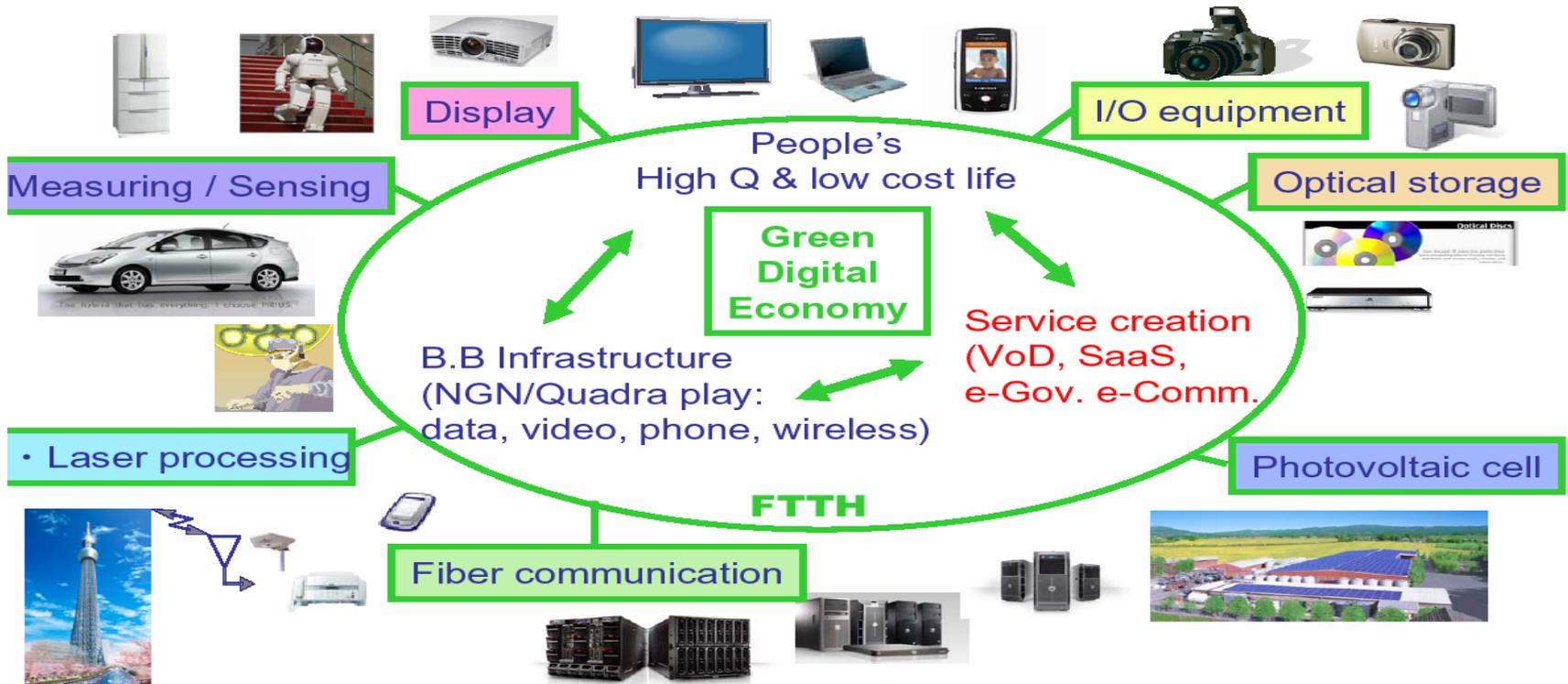
Amended integration concept (Si-optical bench)



- Main advantages:**
- No deep trenches
 - Smaller SOI footprint (cost)
 - Higher yield

Un vaste marché pour la photonique

Photonics market keeps growing in the **Green Digital Economy**

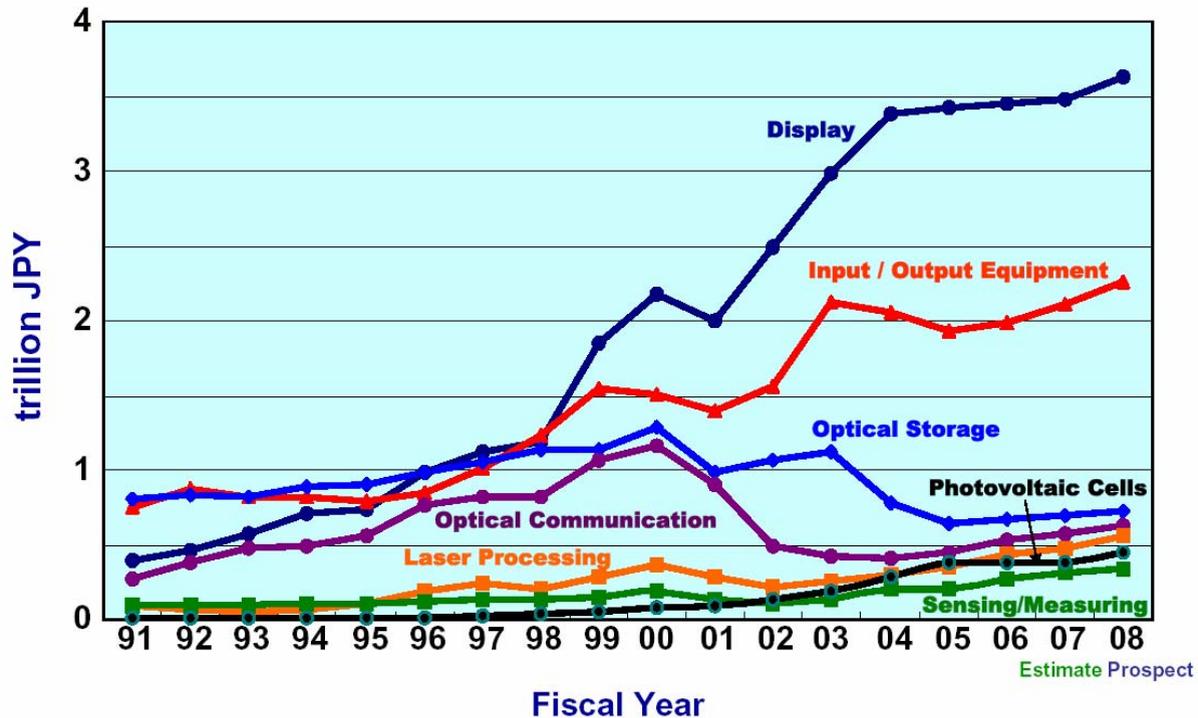


“Photonics 21”, Brussels, Dec. 9, 2008

K. Tatsuno

De nouveaux marchés

Photonics production by field in Japan



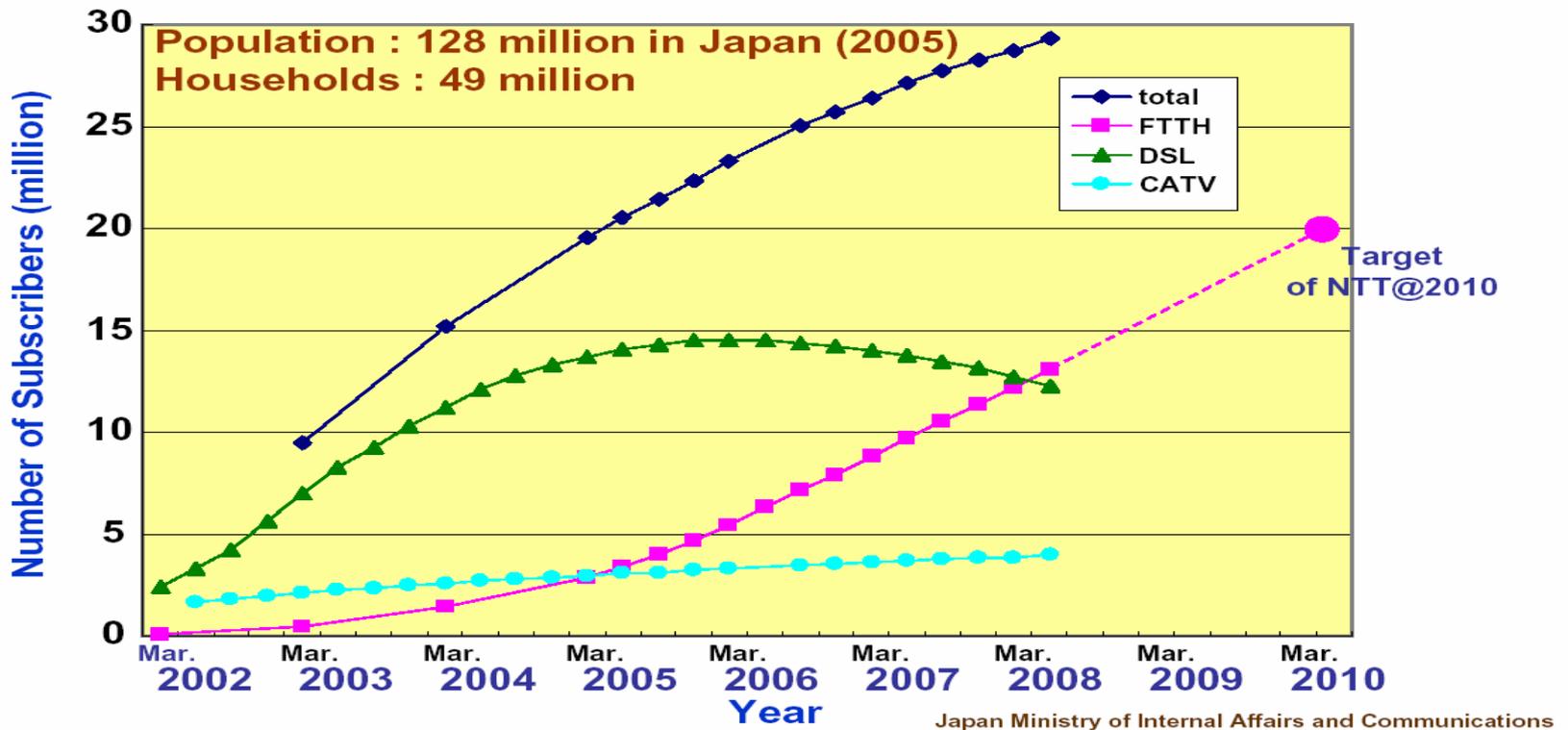
Source: OITDA

“Photonics 21”, Brussels, Dec. 9, 2008

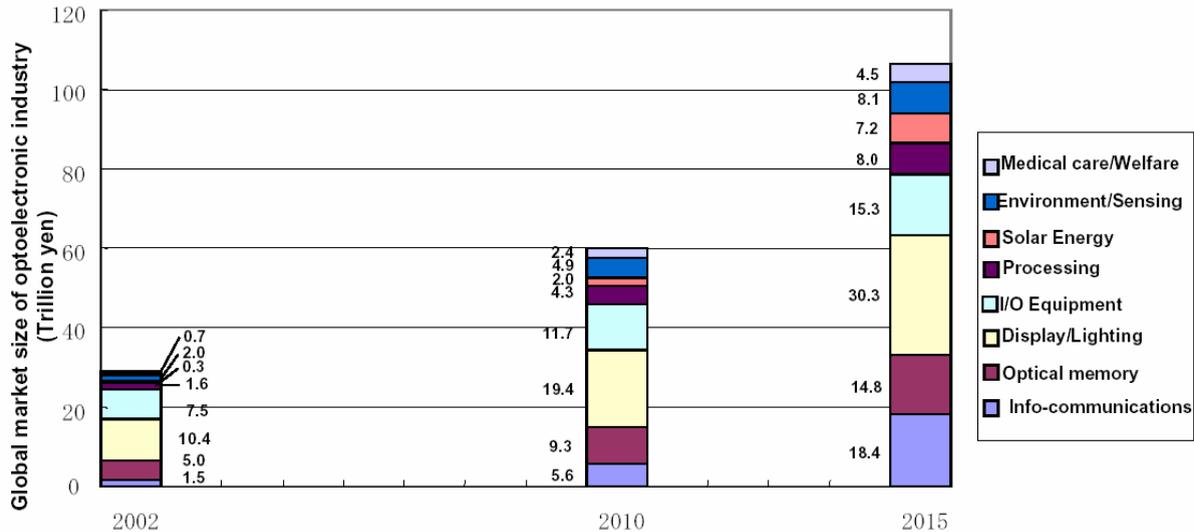
K. Tatsuno

Pari de la fibre chez l'abonné (FTTH)

Broadband subscribers in Japan



World wide photonics market prediction



- Display/Lighting, Communications, I/O Equipment and optical memory
- Solar energy and Medical care/welfare will have higher growth rate than others.

November, 2004

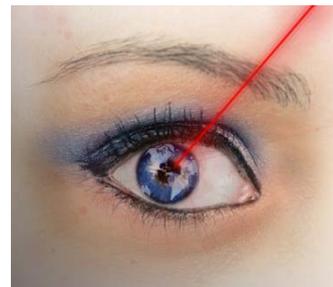
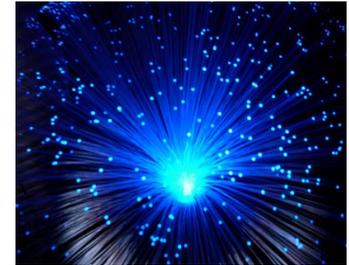
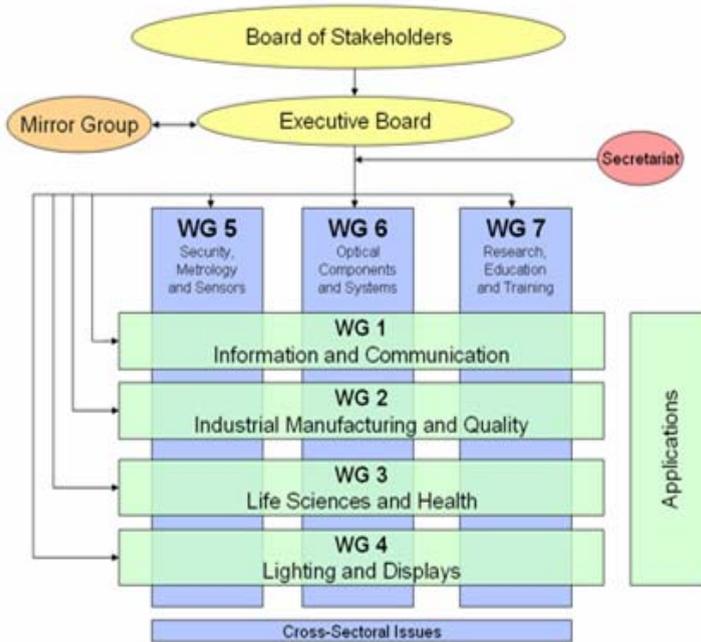
Source: OITDA

“Photonics 21”, Brussels, Dec. 9, 2008

K. Tatsuno

Nouvel essor européen malgré l'éclatement de la bulle télécom: plateforme européenne PHOTONICS21

PHOTONICS21: le siècle du Photon!



©VDI Technologies

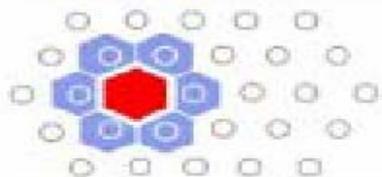
Priorités européennes IST

- **To develop advanced materials, solid-state sources and micro- and nano-scale photonic devices, and to integrate photonic functions in micro/nanoelectronics components ('Photonic system on a chip').**
- **Projects are expected to address research challenges for mid-term to long-term industrial exploitation in one or more of the following application contexts:**
 - **"Information technologies for health care and life science": bio-photonic functional components and sub-assemblies;**
 - **"Communications and Infotainment": components and subsystems for low-cost or high-performance;**

Une première roadmap dédiée à la nanophotonique



MONA Road Map 1st edition 2007



MONA
Merging Optics & Nanotechnologies



A European roadmap for photonics and nanotechnologies

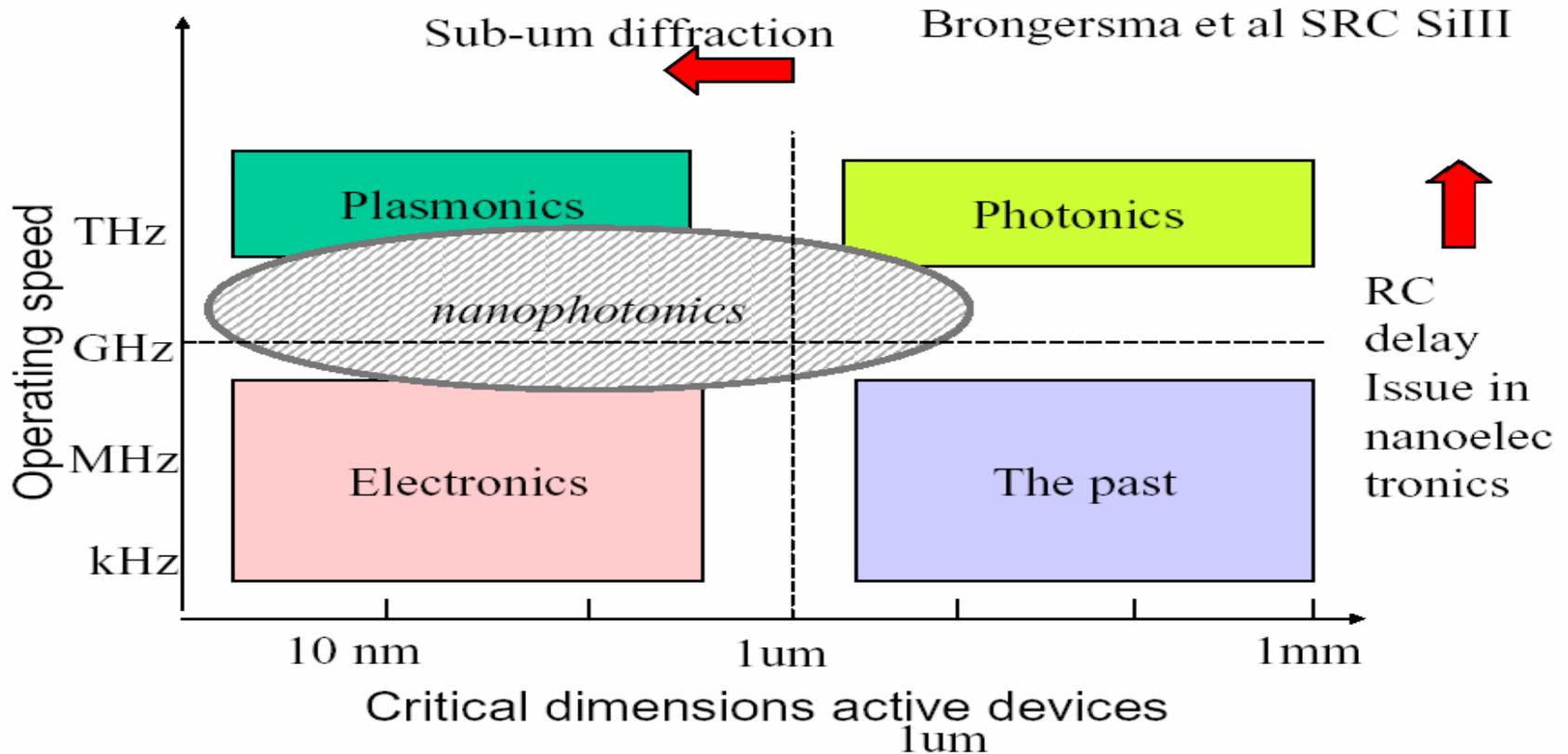
Selected key nanomaterials:

- Quantum dots and wires in Si, III-V and II-VI
- Plasmonic nanostructures
- High-index-contrast Si and III-V nanostructures
- Carbon nanotubes
- Integration of electronics with photonics
- Nanoparticles in glasses or polymers

Dr Laurent Fulbert

Photonics Concertation Meeting 17-18 September 2008 Barcelona

Operating speed and critical dimensions



Photonics Concertation Meeting 17-18 September 2008 Barcelona

Structures de confinement pour la nanophotonique



Electrons, photons & phonons

Electron localiser

Nanostructures

- Molecules
- Polymers
- Fullerenes
- Nanotubes
- Supramolecular structures
- Metal islands
- Quantum wells
- Quantum wires
- Quantum dots

Plasmons

Photon localiser/guide

Microsystem

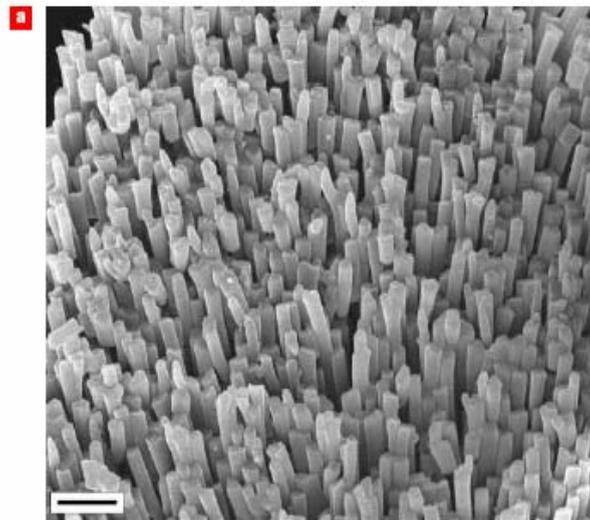
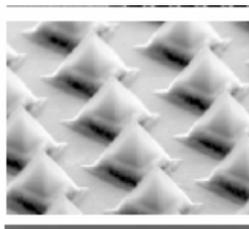
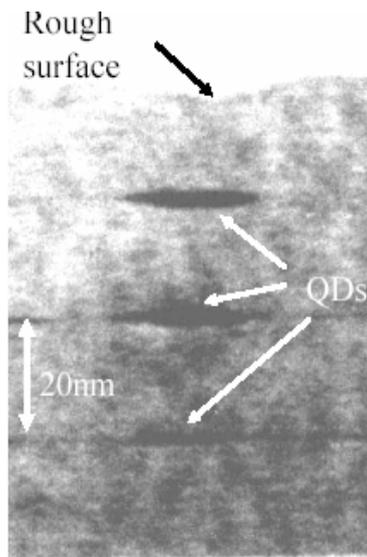
- Microcavities & **Microspheres**
- Photonic and quasi crystals
- Waveguides

Phonon localiser/guide

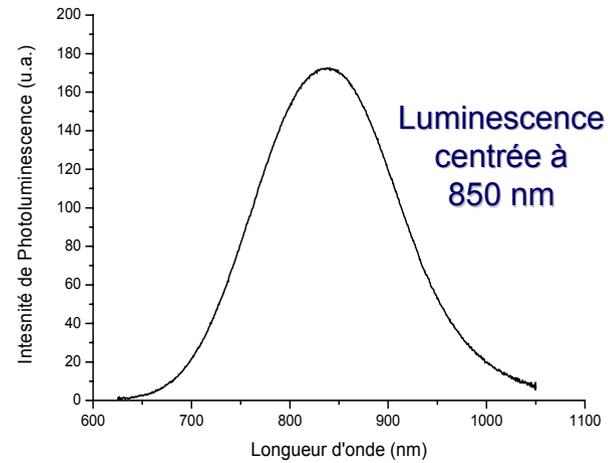
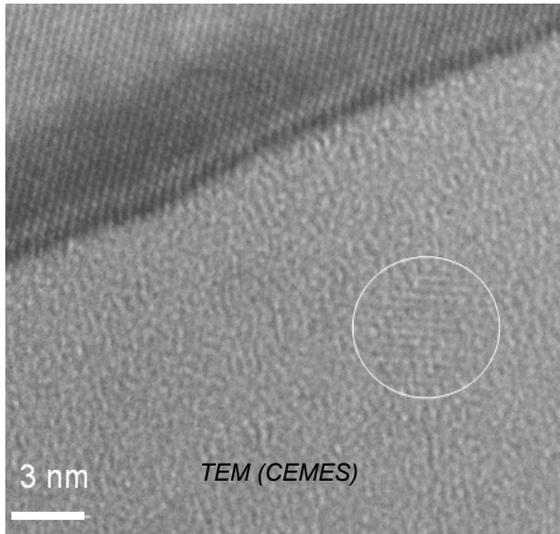
Various system

- Acoustic cavities
- Phononic crystals
- Phonon Waveguides

Ilots et fils quantiques pour la nanophotonique



Nanocristaux de silicium pour l'émission



Nanophotonique, voie pour améliorer la fonctionnalité des composants et leur intégration en sous-systèmes

DATAKOM and TELECOM trend: from discrete components to subsystems

Butterfly Laser Module

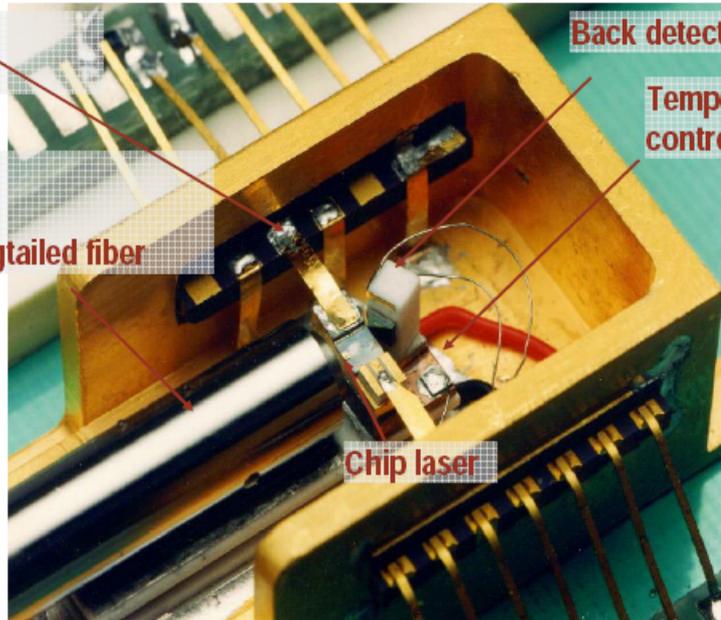
Electrical / RF connections

Optical coupling:
Lens+Optical
Isolator+Lens+pigtailed fiber

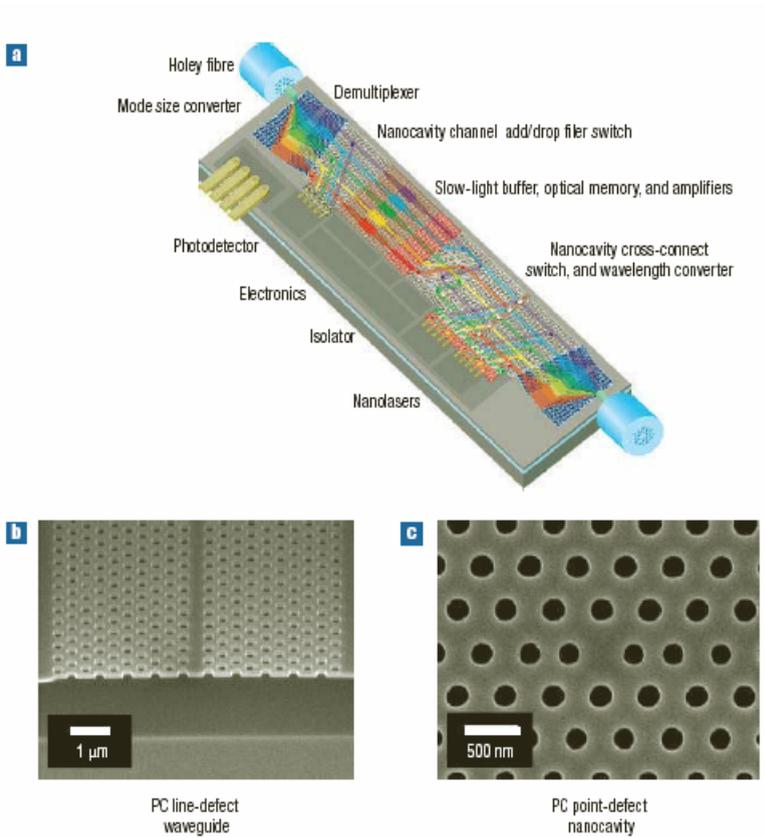
Back detector

Temperature control

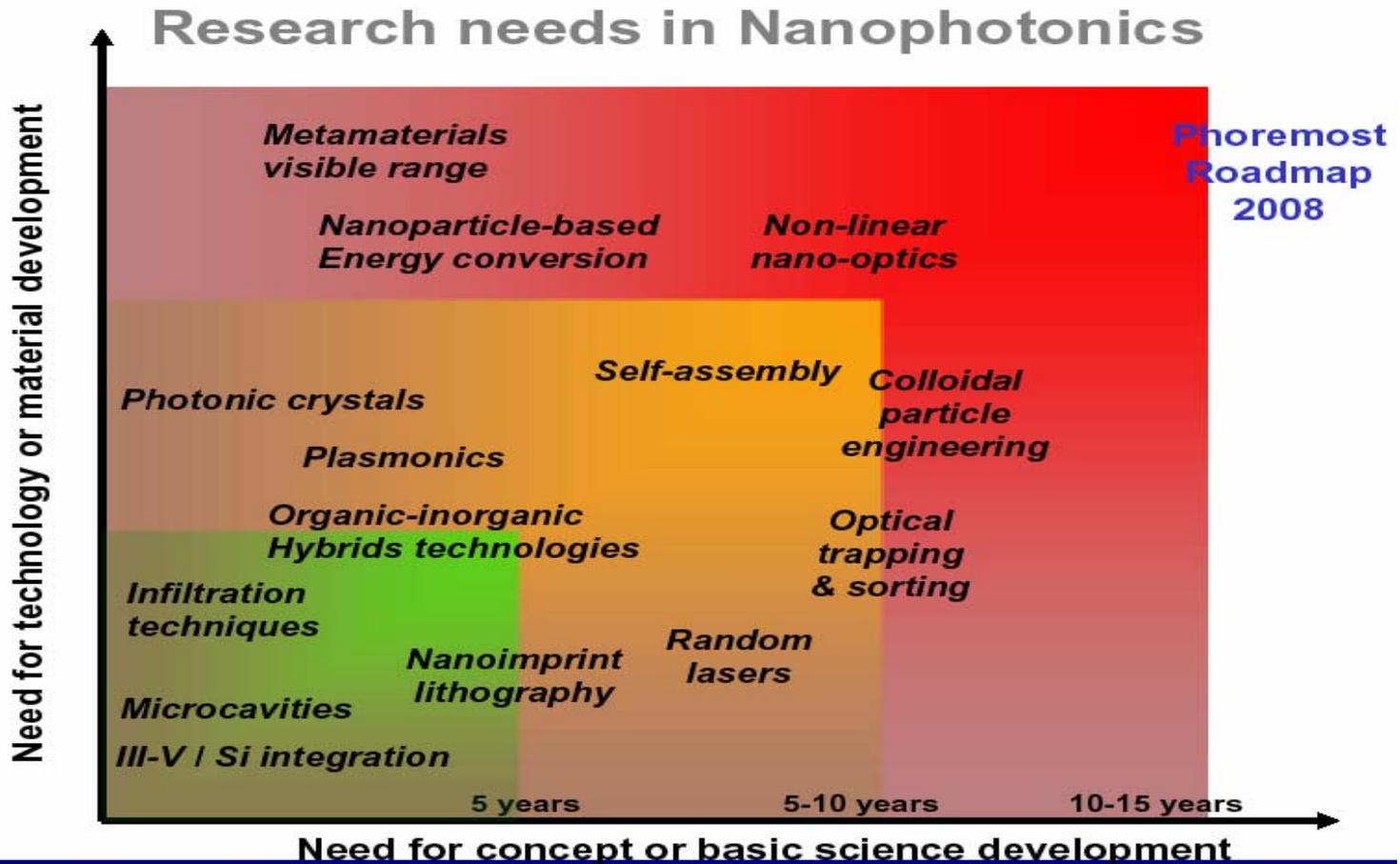
Chip laser



Intégration de l'électronique avec la nanophotonique ?



Un champ d'études fondamentales et technologiques

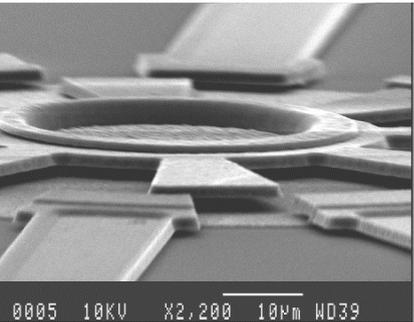


Photonics Concertation Meeting 17-18 September 2008 Barcelona

Recherches au LAAS

- **Sources laser et systèmes photoniques**
 - architecture horizontale et verticale, filière AlGa(In)As/GaAs
 - **Accroissement de fonctionnalités: îlots quantiques, nouveaux concepts de confinement, apport des cristaux photoniques, microoptique intégrée**
 - **Intégration photonique via cristaux photoniques 2D: vers des systèmes laser intégrés sur puce**
 - **Fonctions optiques intégrées sur silicium ou sur III-V: vers des capteurs optiques pour les systèmes embarqués et l'intelligence ambiante**
 - **Ouverture vers les systèmes fluidiques (optofluidique) pour la biologie et l'environnement**

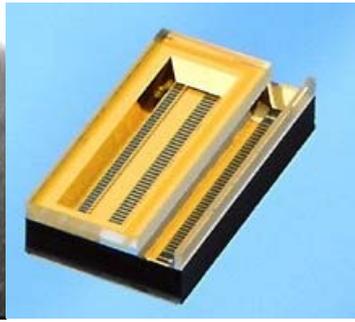
- Issus de la microélectronique → silicon based & Technologies compatibles
- Engagement fort du groupe dès 1990: acteur moteur en France
- Action par le biais des exemples:



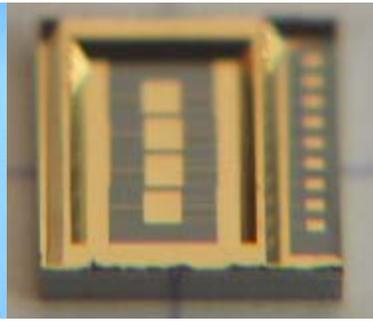
μ moteur



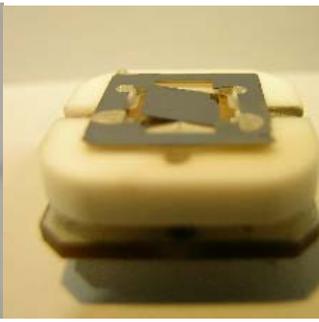
μ miroir N°1



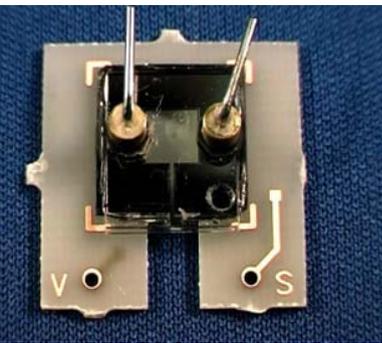
μ miroir N°2



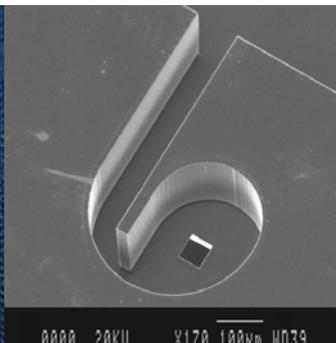
μ miroir N°3



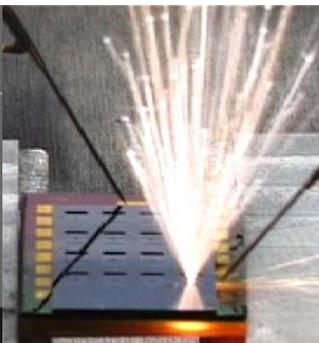
μ miroir N°4



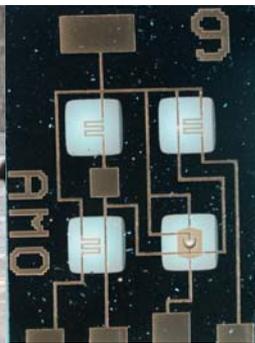
μ pompe



μ diode



μ propulseur



μ switch

... etc...

Systèmes électro mécanique de déviation

Orienté ou désorienté / l'axe de propagation

→ Digital: en tout ou rien

projection, interrupteur, ...

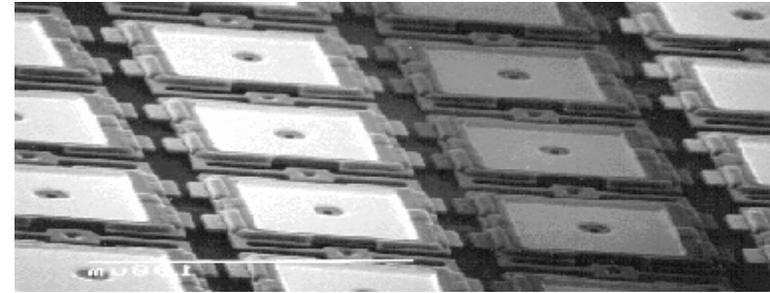
→ Analogique: progressivement

égaliseur de puissance, « robinet » optique

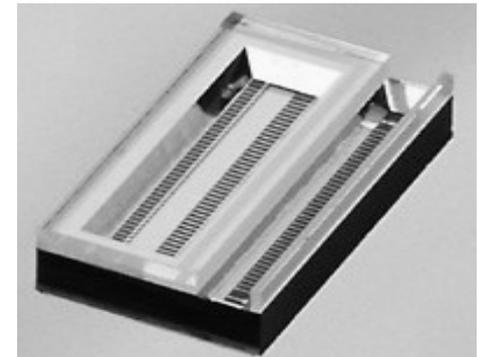
Rallonge le chemin optique suivant l'axe de propagation

→ Analogique

égaliseur de phase



Modulation d'amplitude



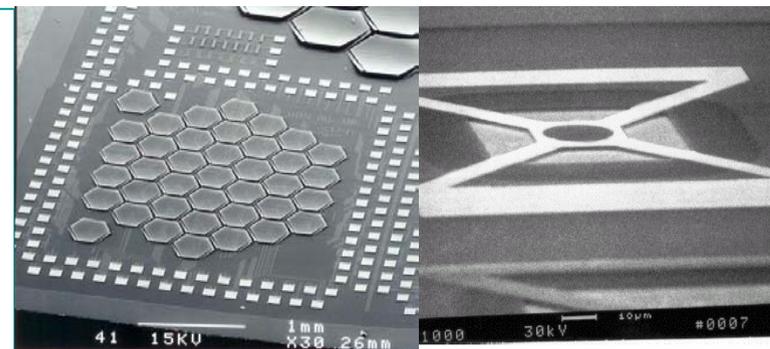
Manipulation de λ

Défauts intrinsèques:

● Espace segmenté, pas grande surface

> perte de niveau, diffraction dans le cas de faisceau large

● Pas transparent ou par zones

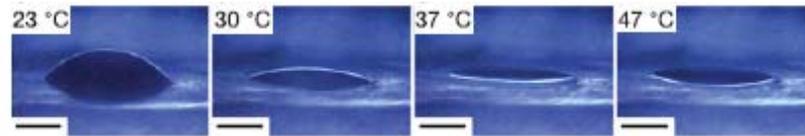
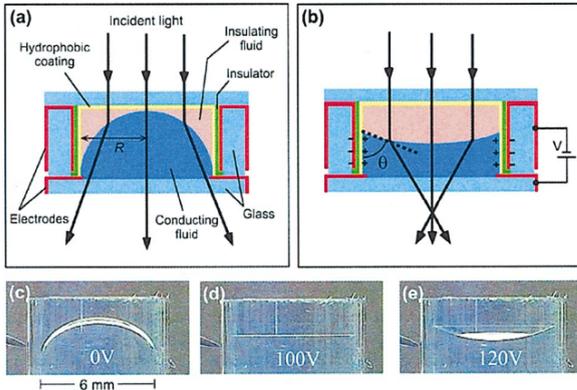
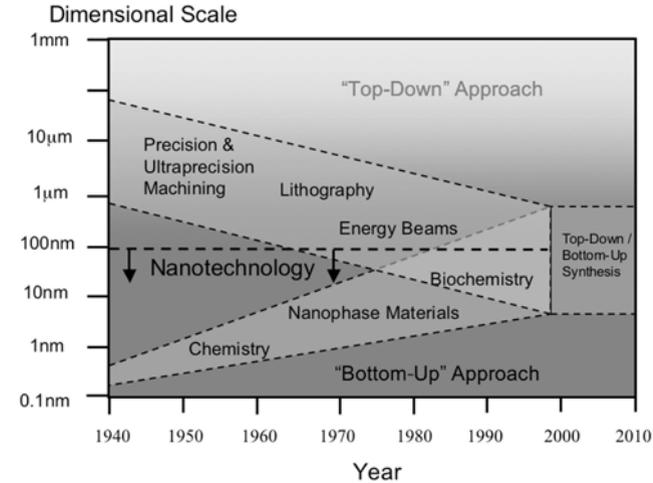


Modulation de phase

l'avenir ne nous semblent plus être lié à l'optique de commutation mais à l'optique fonctionnelle

Contexte récent

- Effort de miniaturisation de techniques de mise en forme (top-down)
- Construction naturelle & manipulation d'atome ou de molécules (bottom-up)
- Propriétés spécifiques exploitables des matériaux en nano et méso phase (soit individuellement, soit collectivement)



Actionnement par PNIPAM

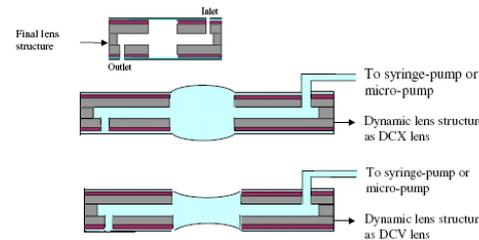


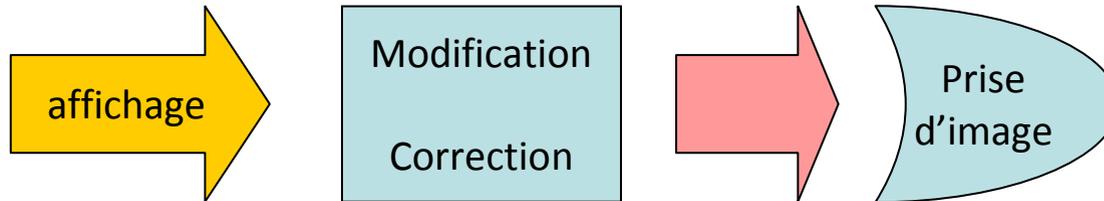
Figure 1. Fabrication process steps for variable focal length microlens systems.

Actionnement par pompe

Où introduire ces concepts:

les sources et les capteurs sont déjà développées et très concurrentiels

Les fonctions optiques:



Caractéristiques essentielles

<i>Les fonctions</i>	<i>Les <u>nouvelles</u> spécificités</i>	<i>Les technologies</i>	<i>Les applications</i>
Génération/affichage	<u>Adaptatif</u>	Silicium / Polymères ou Tout polymère	<i>Affichage:</i> Ecrans 3D Papier électronique
Fonctions correctives : - sur l'amplitude - sur la phase	<u>Multi points</u> <u>Grande surface</u>		<i>Correction:</i> Instrumentation Ophtalmie Fenêtrage
Puissance optique	<u>Bas coût voire très bas coût</u>		<i>Prise d'image:</i> Portable appareil photographique ...

1 – Développement des technologies et intégration de polymères structuraux ou compliant dans le concept d'optique adaptative.

2 – Développement des technologies à polymères fonctionnels

L'optique dans les domaines hyperfréquences et temps-fréquence

Optique micro-onde

Une conférence spécifique : IEEE Microwave Photonics (MWP)

Deux réseaux européens, sur deux thématiques « phare » :

ISIS : Low cost optical solutions for broadband access and the merging of wireless and photonic technologies



IPHOBAC : Integrated Photonic mm-Wave Functions For Broadband Connectivity



Optique et Temps-fréquence

Oscillateurs opto-électriques à très faible bruit de phase

Horloges micro-ondes à interrogation optique

Horloges optiques

-> divers projets focalisés au niveau européen (STREP, EDA, ESA)

Applications des résonateurs optiques à très fort Q

$Q_{\text{optique}} > 10^9$ démontré sur diverses structures :
anneau fibré, mini-disque de quartz...

Résonances de type « peigne de fréquence »

Couplage possible en optique à des références de
fréquence absolues (horloge)

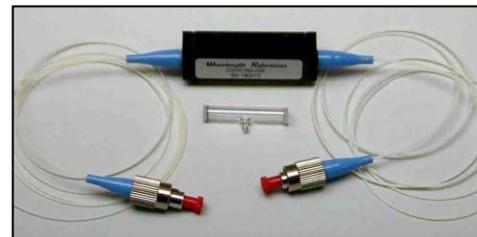
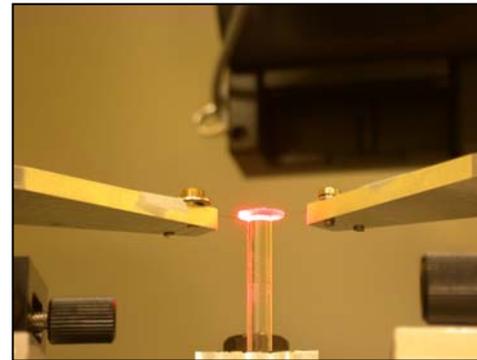
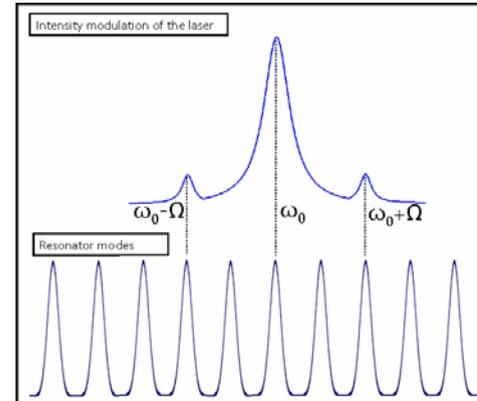
Problème de l'intégration : technologique et système

Ex. d'application :

Sources hyperfréquences à haute pureté spectrale

-> Radars haute sensibilité, métrologie temps-fréquence
horloges atomiques...

Capteurs chimiques ou biologiques



Génération mm et sub-mm / THz par l'optique

Intérêt de l'approche optique :
contrôle de fréquence sur de larges plages

Difficultés :
Mélange et photodétection ultra-rapide
Couplage antenne THz
Peu de matériel expérimental disponible
au-delà de 200 GHz...

Applications :
Imagerie THz -> médical, sécurité...
Capteurs
Radio-astronomie
Communications courte distance haut débit ??



« T-Rays vs. Terrorists »
IEEE Spectrum, July 2007



-> le LAAS est quasiment absent sur ce terrain important

Biophotonique, développements récents (source : OMNT Jérôme Wenger)

- besoins :

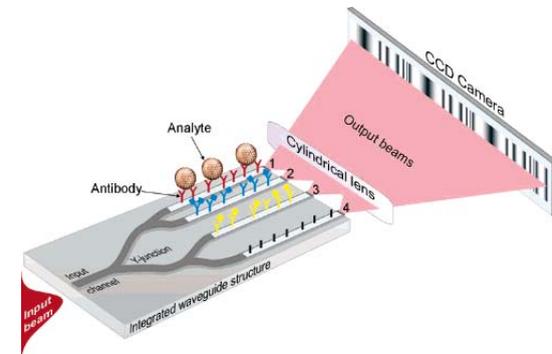
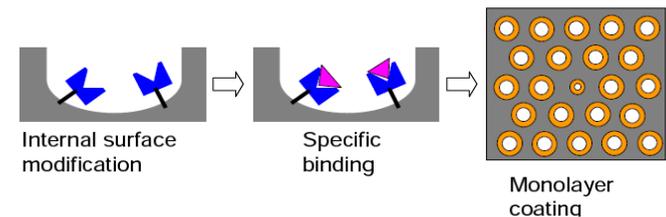
- détection rapide spécifique et in-situ de molécules :
 - μ scopie de fluorescence (pb : greffe molécules fluo)
 - détection optique sans marquage (interaction de la fraction évanescente du champ lumineux avec la solution analysée) >> intérêt des systèmes optiques μ et nano (forte sensibilité + confinement).

2 types d'effets optiques pour la détection sans marquage : **décalage de la résonance** μ -résonateur, **exaltation du champ** via effets plasmoniques

- imager des composants cellulaires et des protéines sous la limite de diffraction

Micro-résonateurs

- Sensibilité accrue dans un dispo biosenseur : μ sphère de Silice recouverte d'une couche sub- λ de matériau haut indice \gg interaction entre mode de galerie et molécules adsorbées
APL **89** 223901 (2006)
- Biocapteur en cavité CP : fort confinement sur les pores du cristal
OE **15** 4530 (2007)
- μ cavité toriques à très fort Q (détection par adsorption)
Science **317** 783 (2007)
- Interféromètre d'Young : détection de franges d'interférences formant un code barre analysé en temps réel
NanoLett **7** 394 (2007)



Plasmons de surface

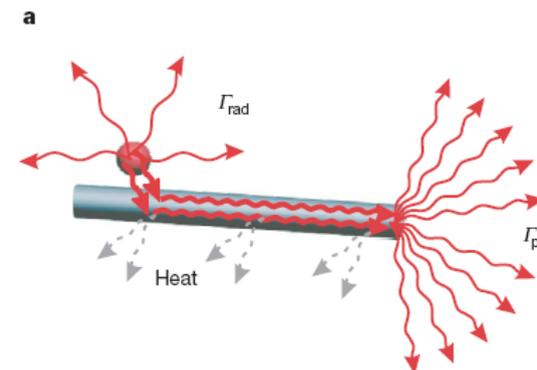
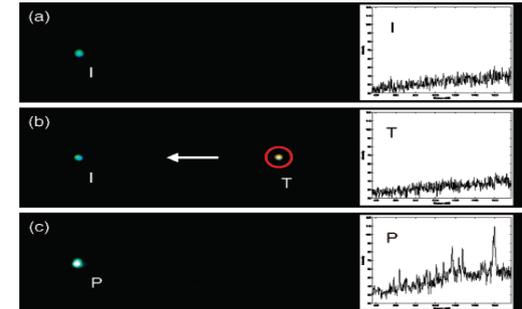
Articles de revue : *Journal of Physics D* **41** 013001 (2008) & *Nature Photonics* **1**, 641 (2007)

- Réalisation de nanostructures pour la spectroscopie moléculaire par diffusion Raman exaltée en surface (SERS)
>> exaltation du signal Raman, bonne répétabilité des mesures

Rapprochement en paires de nanoparticules d'Ag avec pinces optiques >> exaltation Signal SERS
NanoLett **6** 2639 (2006)

Nanopointes d'Au par électromigration
(substrat compatible avec production de masse)
réorganisation atomiques >> pointes nano >> fort champ induit
NanoLett **7** 1396 (2007)

- Couplage contrôlé boîte quantique / nanofil dans un mode plasmonique
>> renforcement fluorescence BQ
>> génération photons uniques
>> efficacité de couplage de 30%
Nature **450** 402 (2007)



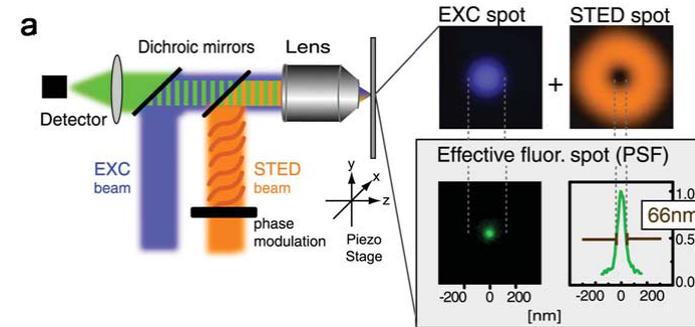
Ultramicroscopie optique en champ lointain

Technique de déplétion par émission stimulée (STED) :

- imagerie de capsules de 40nm impliquées dans les transmission neuronales

Nature **440** 935 (2006)

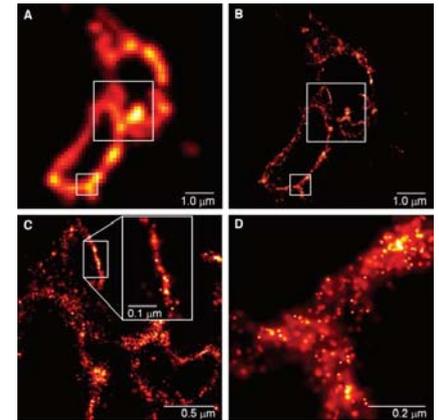
Science **312** 1051 (2006)



Détection successive de molécules fluorescentes photactivées puis photodétruites

- Distribution des molécules avec une précision nanométrique

Science **313** 1642 (2006)

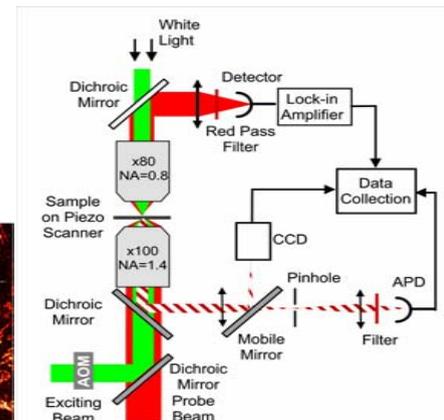
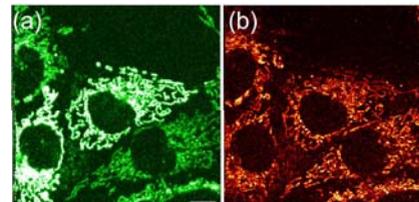


Microscopie photothermique sans marquage

>> changement thermique local de l'indice de réfraction

>> résolution de 300nm (= confocal) mais pas de bruit de fond (autofluorescence, diffusion)

OE **15** 144184 (2007)



Recherches en photonique

Domaine d'applications très vaste, problématique du partenariat industriel pour le développement technologique en Europe

Apports réciproques fructueux avec la recherche fondamentale

Aspect pluridisciplinaire de la photonique: physique, chimie, biologie, mécanique, ...

Défi de l'intégration : comprendre et maîtriser le matériau à l'échelle nanométrique, concevoir et former des matériaux artificiels pour des systèmes multifonctionnels, « intelligents », compacts, architecture et fiabilité des systèmes

Nécessité d'un environnement performant:

matériaux Si, III-V, II-VI, organiques ...avec maîtrise de la filière complète technologique associée

nanotechnologies: lithographie e, nanoimprint, structuration,...

packaging, « nano inside »

Caractérisation, modélisation

Photonique au LAAS

- **Une filière technologique sur GaAs pour de nouveaux concepts de sources et systèmes laser**
- **Vers des micro-nano systèmes intégrant l'optique pour les systèmes embarqués, l'intelligence ambiante, la métrologie, l'environnement...**
- **Plusieurs défis:**
 - **Association avec la biologie, la chimie, la fluidique**
 - **Intégration photonique**
 - **Nouvelles fonctionnalités pour de l'optique « active »**
 - **Couplage optique-microonde, vers le THz?**
 - **Un laser Si?**