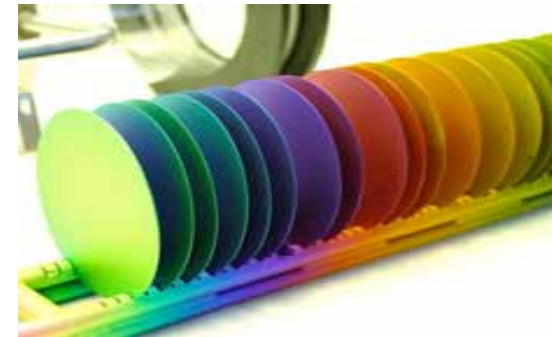
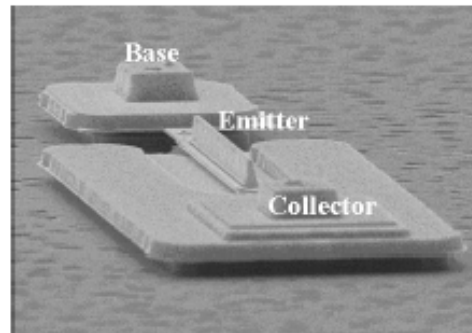
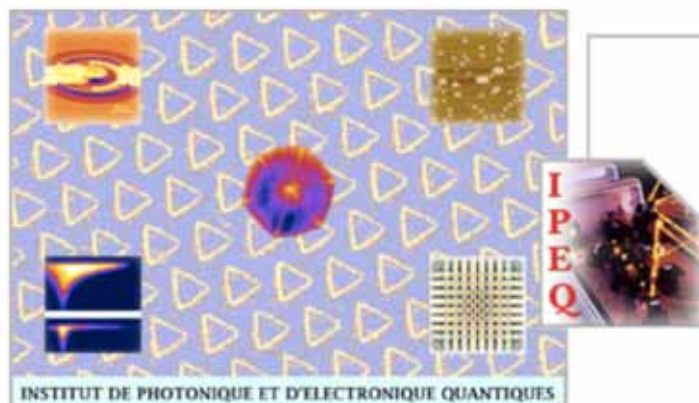


Dispositifs Electroniques et Optiques à Semiconducteurs

Section science et génie des matériaux



Romuald Houdré - 2006 /2007



UNITES ET GROUPES DE RECHERCHE

Laboratory of Quantum Electronics

Prof. Benoît Deveaud-Piédra - LOEQ

Laboratory of Physics on Nanostructures

Prof. Eli Kapon - LPN

Laboratory of Advanced Semiconductors for Photonics and Electronics

Prof. Nicolas Grandjean - LASPE

Quantum Devices Group

Prof. Andrea Fiore - QDG

WELCOME

The Institute of Quantum Electronics and Photonics is the new name of the Institute of Micro and Optoelectronics (originally established in 1987 at EPFL) as of January first 2002. The Institute now comprises four research laboratories:

- **The Laboratory of Quantum Optoelectronics** (Professor B. Deveaud-Piédra): dynamical properties of novel optoelectronic structures or devices.
- **The Laboratory of Nanostructures** (Professor E. Kapon): studies of formation mechanisms and optical and electronic processes in low-dimensional nanostructures.
- **The Group of Quantum Devices** (SNF Professor Andrea Fiore): physics of photonic devices at the single carrier - single photon level.
- **The Laboratory of Advanced Semiconductors for Photonics and Electronics** (Tenure Track Assistant Professor Nicolas Grandjean): physics of nitride based micro and nanostructures.

The Institute has recently been selected as the leading house for the National Competence Center in Research Quantum Photonics, launched in July 2001 under the direction of Marc Illegems. The main interests of the NCCR cover a wide range of activities, going from the quantum description of light and light-matter interactions to the very direct applications of such concepts in the information and communication technologies. We will specifically study:

- Quantum communications,
- Interaction of light with matter with high spatial and temporal resolutions,
- The development of new photon sources, from far infrared to extreme UV,
- The conception and the realization of photonic devices and systems for optical communications.

News

Toute la lumière sur le nanomonde | Dr. Jean-Daniel Ganière | 2005-11-25

Sinphonia project launched at EPFL | Benoît Deveaud-Piédra | 2006-03-01

TELECHARGEMENT

Travaux Pratiques 4ème année

SAFETY WITHIN IPEQ

Safety

WHO'S WHO

- ☞ une personne
- ☞ un lieu
- ☞ epfl.ch avec Google
- ☞ epfl.ch avec Inktomi

OK

CONTACT

Secrétariat IPEQ:

Claire-Lyse Rouiller

Local **PH D3 434**

Tél: +41 21 693 33 55

Fax: +41 21 693 45 25

E-mail:

claire-lyse.rouiller@epfl.ch

Sujet du cours

Physique des semiconducteurs **inorganiques** et des **composants**

Inorganiques: semiconducteurs cristallins tels que Si, Ge, GaAs, GaN

Composants: par exemple la diode laser dans un lecteur DVD

Le cours de dispositifs électroniques et optiques à semiconducteurs dans la section science et génie des matériaux

Fait suite à :

Physique générale I, II, III et IV
Solid state physics

Egalement ce semestre :

Mécanique quantique pour l'ingénieur I
Optoélectronique
Technologie de fabrication des circuits intégrés
Technologie des microstructures
Technologie des capteurs

Prépare à :

Microélectronique
Mécanique quantique pour l'ingénieur II

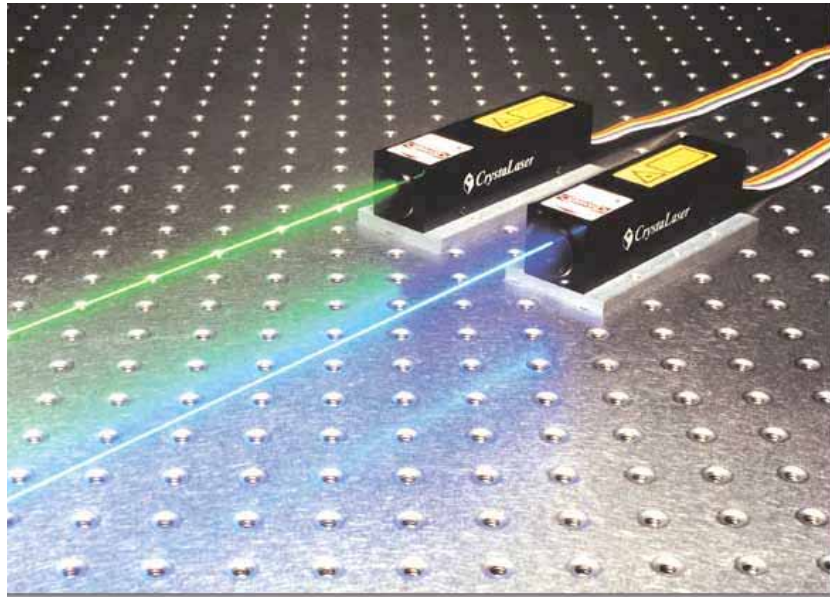
Semiconducteurs à l'EPFL

- **IPEQ**
 - Semiconducteurs inorganiques (III-V)
- **LOMM** (**L**aboratoire d'**o**ptoélectronique des matériaux moléculaires)
 - Semiconducteurs organiques, polymères
- **IPN** (**I**nstitut de physique des nanostructures)
 - Agrégats, nanostructures semiconducteurs
- **ITP** (**I**nstitut de théorie des phénomènes physiques)
 - Physique théorique
- **IMM** (**I**nstitut de Microélectronique et Microsystèmes)
 - Microtechnique
- **CMI** (**C**entre de Micro-Nano technologie)
 - Technologie du Silicium

Objectifs du cours

- *Comprendre*
 - ce qu'est un semiconducteur
 - ce que sont ses propriétés physiques
 - ce qui les gouverne
- *Décrire et interpréter* un phénomène
- *Connaître* les différents domaines d'applications
- *Choisir* le bon dispositif pour une application donnée
- *Former* pour la recherche académique et la R&D

Un exemple: le laser



Emission lumineuse et cohérente ?

Longueur d'onde ?

Température de fonctionnement ?

Durée de vie ?

Coût ?

Plan du cours

	1. Introduction - Caractéristiques physiques des semiconducteurs - Quels Matériaux pour quel type d'applications
1/3 bases	2. Propriétés électroniques des semiconducteurs - Structure de bandes - Statistiques d'occupation des bandes - Propriétés de transport - Processus de recombinaison
1/3 transport	3. Jonctions et interfaces - Jonctions métal/semi-conducteurs - Jonction p-n à l'équilibre, Jonction p-n hors-équilibre 4. Composants électroniques - Transistors bipolaires - Transistors à effet de champ - Dispositifs quantiques - Nouveaux matériaux
1/3 optique	5. Composants optoélectroniques - Détecteurs - Diodes électroluminescentes - Diodes lasers - Lasers à émission par la surface - Lasers à cascade quantique

Organisation / modalités

Cours: copie des transparents

- distribués au début du cours
- téléchargeables, http://ipeq.epfl.ch/goeq/Cours_RH

Examen: oral

Bibliographie: livres + web

<http://nobelprize.org/physics/educational/semiconductors/index.html>

Bibliographie

Physique du solide

- Kittel "Physique de l'état solide" (Dunod), 1998
- Ashcroft NW and Mermin ND, «Solid State Physics », Saunders, 1976
- G. Bastard, « Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures », Ed. de Physique, 1992
- J. Pankove, « Optical processes in semiconductors », Dover, 1975

Semiconducteurs: propriétés et technologie

- F. Levy "Physique et technologie des semiconducteurs » (TM volume 18) PPUR, 1995
- M.J. Kelly, « Low dimensional semiconductors, materials, physics, technology, devices», Clarendon Press, Oxford, 1995

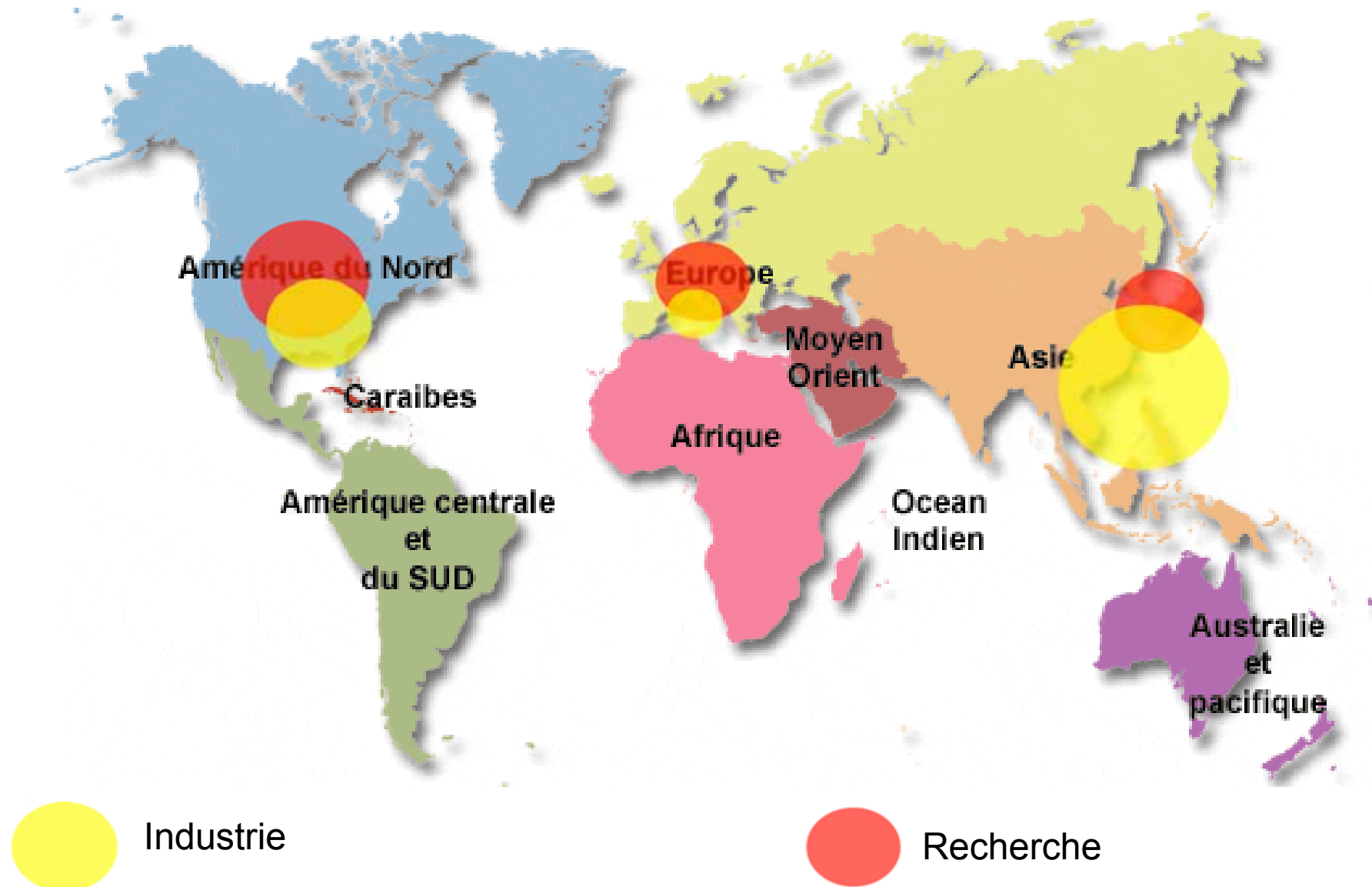
Semiconducteurs dispositifs électroniques

- H. Mathieu « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques », Dunod, 2001
- S.M. Sze « Physics of semiconductor devices » John Wiley & sons, 1981
- E. Rosencher et B. Vinter, « Optoelectronique », Masson, Paris, 1997
- C. Weisbuch et B. Vinter, « Quantum semiconductor devices» Academic Press 1991

Cours 1

Survol des sujets abordés dans le cours

Recherche et Industrie



Recherche et Industrie

Recherche en Europe:

- Allemagne
- UK
- France
- Suisse (ETHZ, EPFL, UNINE, CSEM)

Industrie:

- STMicroelectronics, *microélectronique*
- ATMEL, *microélectronique*
- Infineon Technologies, *microélectronique*
- Thales, *microélectronique*
- OSRAM, *éclairage, DEL, lasers SC*
- MITEL, *télécommunications*

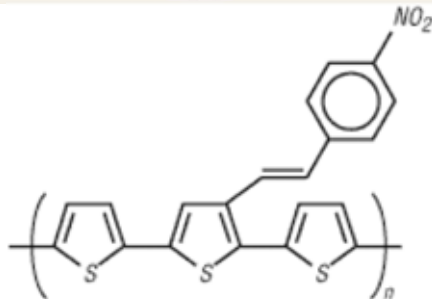
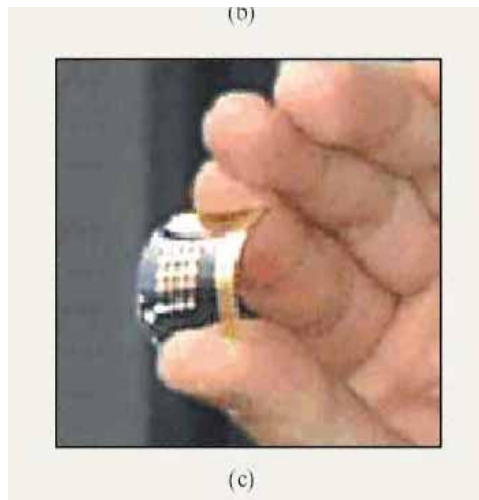
- Soitec, *substrat SOI*
- Bookham, *optoélectronique*
- Alpes lasers, *laser cascade quantique*
- Innovative Silicon, *mémoires*

European Electronic Component Manufacturers Association (EECA)

The semiconductor industry provides the key enabling technologies at the forefront of the development of the digital economy. The sector supports over 86 000 jobs in a market valued at around EUR31.7bn in 2004.

Introduction

Molécule organique



Diamant

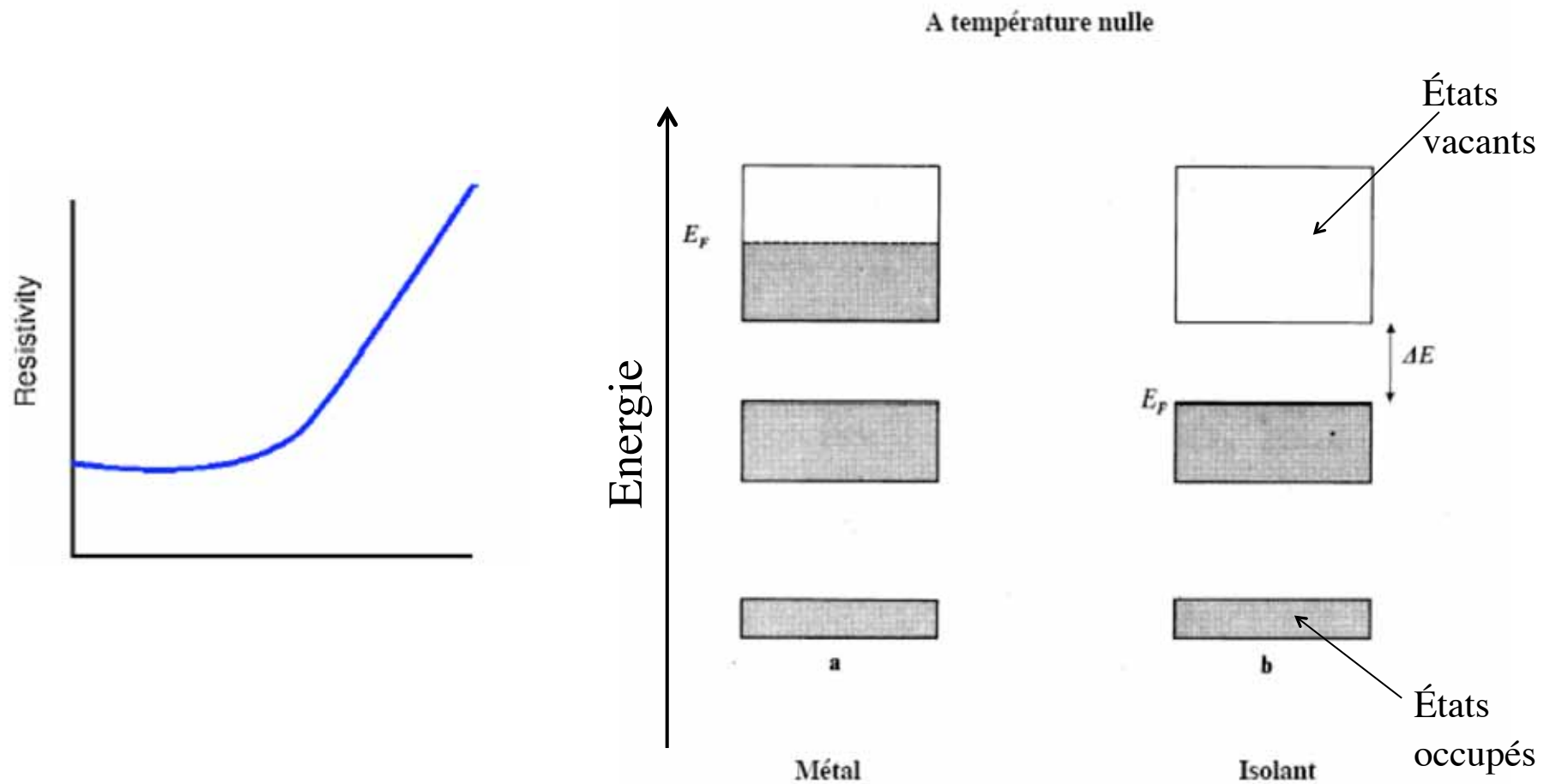


Silicium



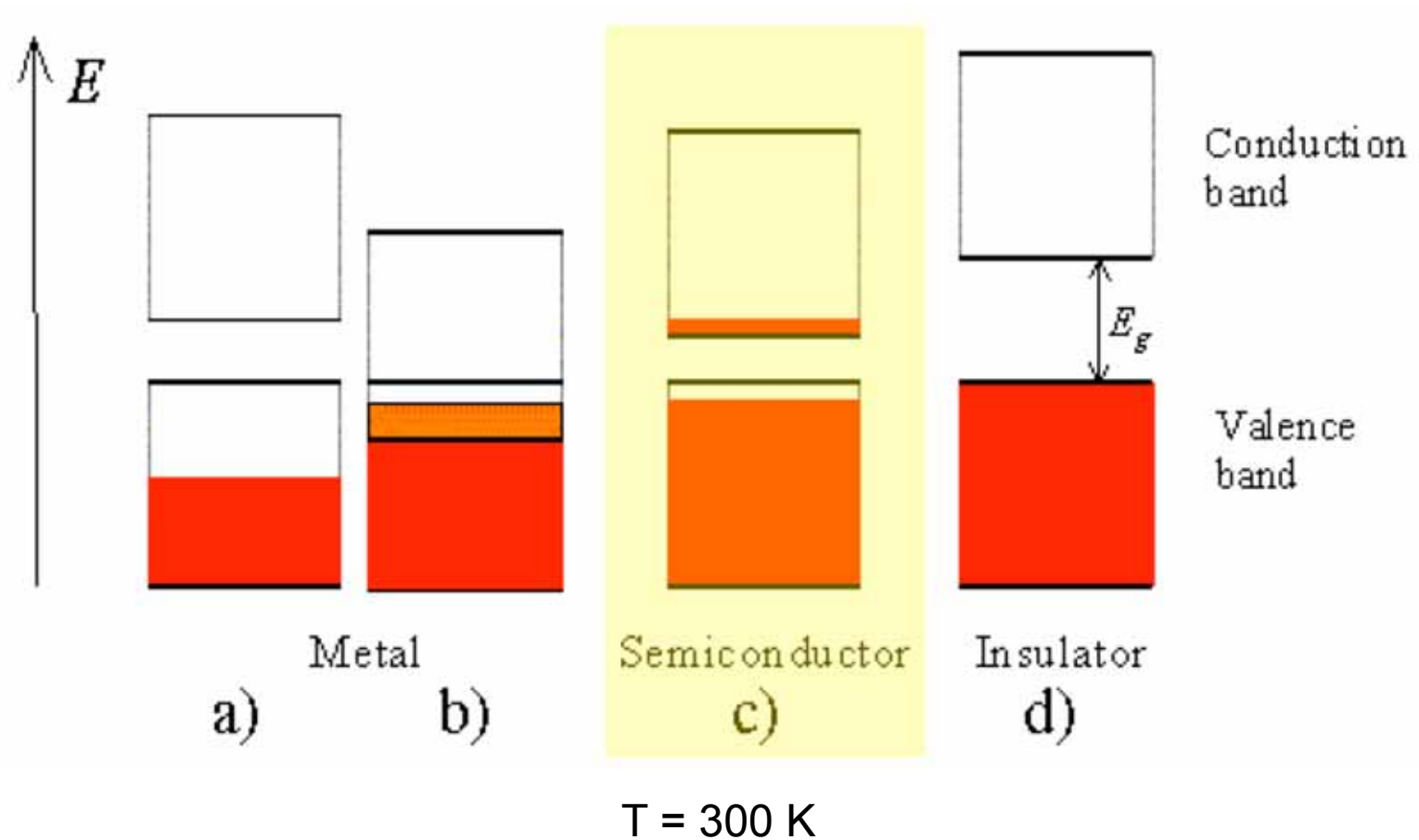
Qu'est-ce qu'un Semiconducteur ?

Métal / isolant



Métal: la conductivité diminue avec la température

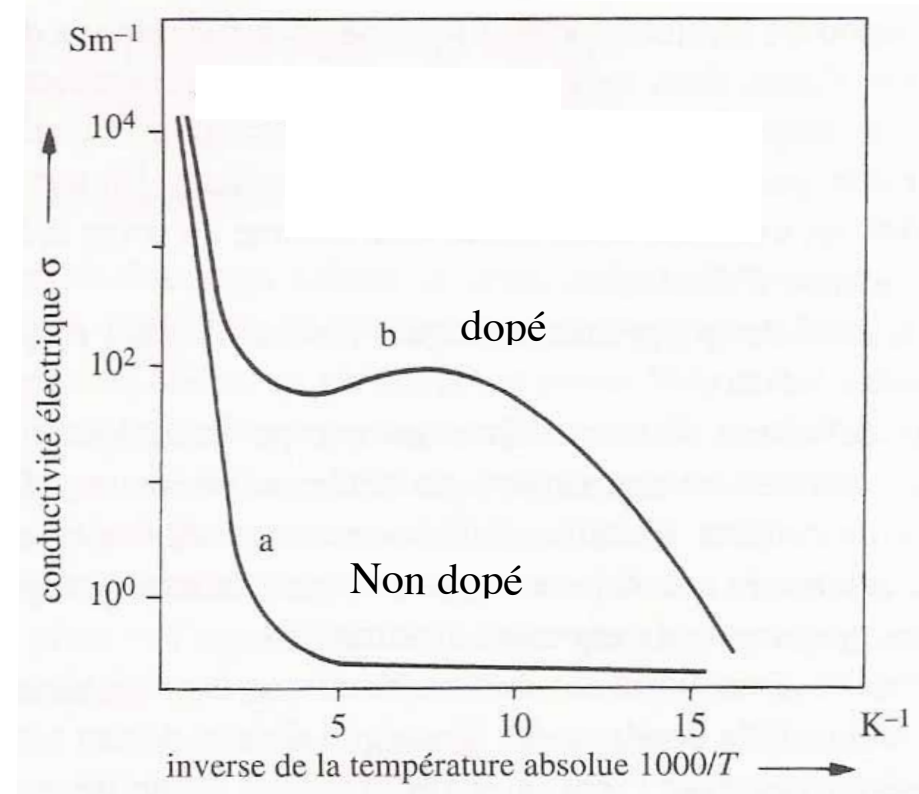
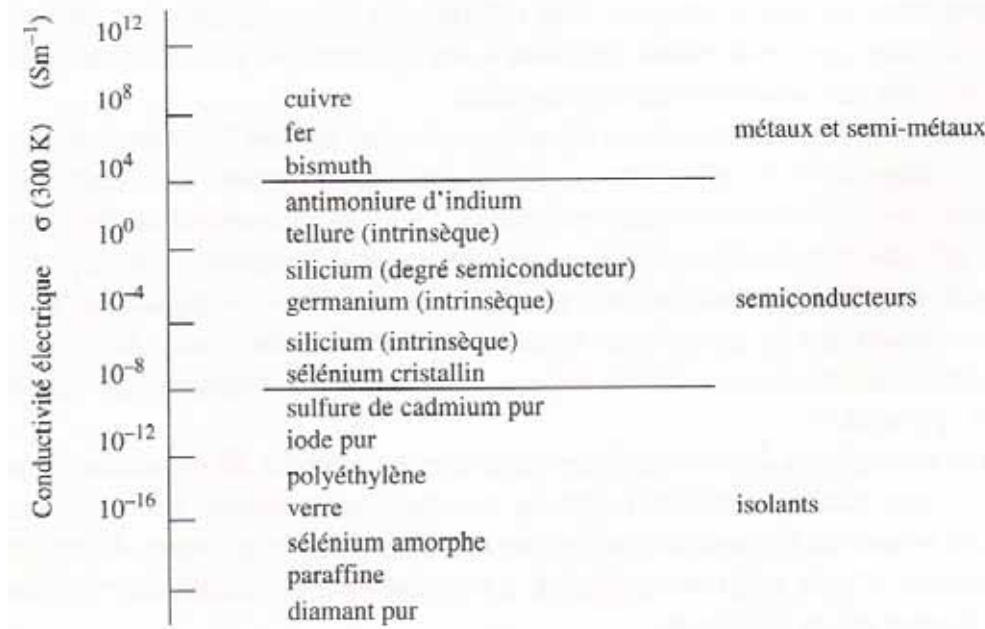
Notion de bande interdite



Pour des applications: $E_g \gg k_B T$ à 300 K

Exercice: valeur de $k_B T$ à température ambiante ?

Semiconducteur



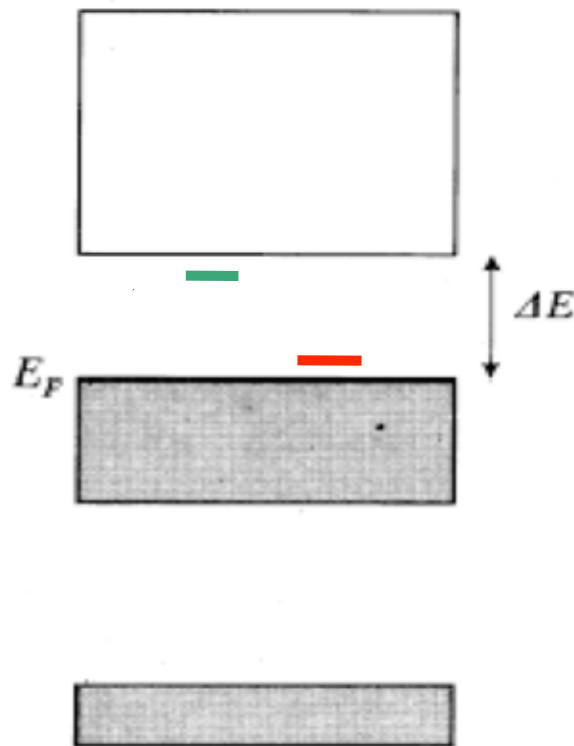
$$\sigma \sim \exp(-E_g/k_B T)$$

La conductivité augmente avec la température et est très sensible aux impuretés

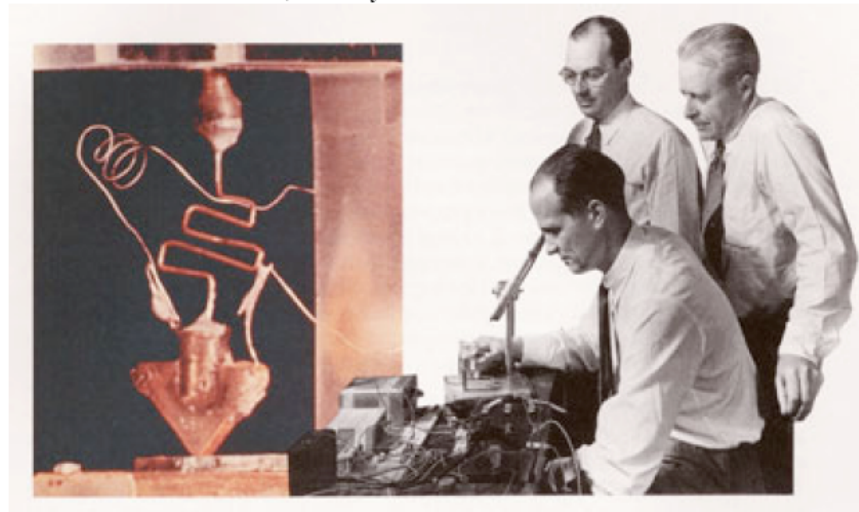
« Über Halbleiter sollte man nicht arbeiten, das ist eine Schweinerei; wer weiß ob es überhaupt Halbleiter gibt » W. Pauli, 1931

Impuretés dans les semiconducteurs

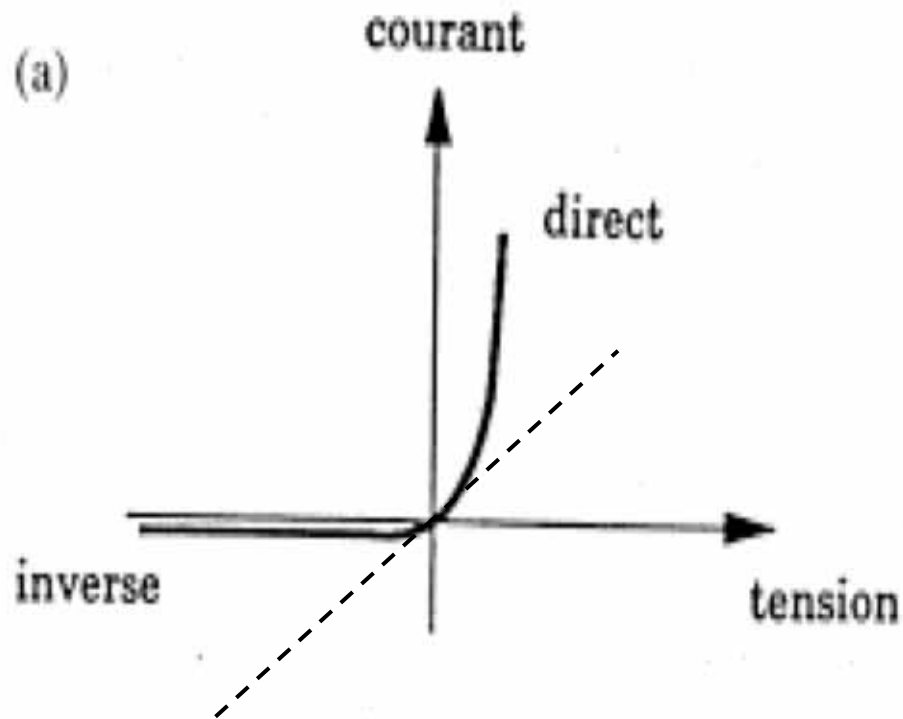
La présence d'impuretés (**donneur** ou **accepteur**) modifie profondément la conductivité du matériau. C'est cette caractéristique qui est à l'origine de la jonction p-n et du premier transistor (1947, Prix Nobel 1956)



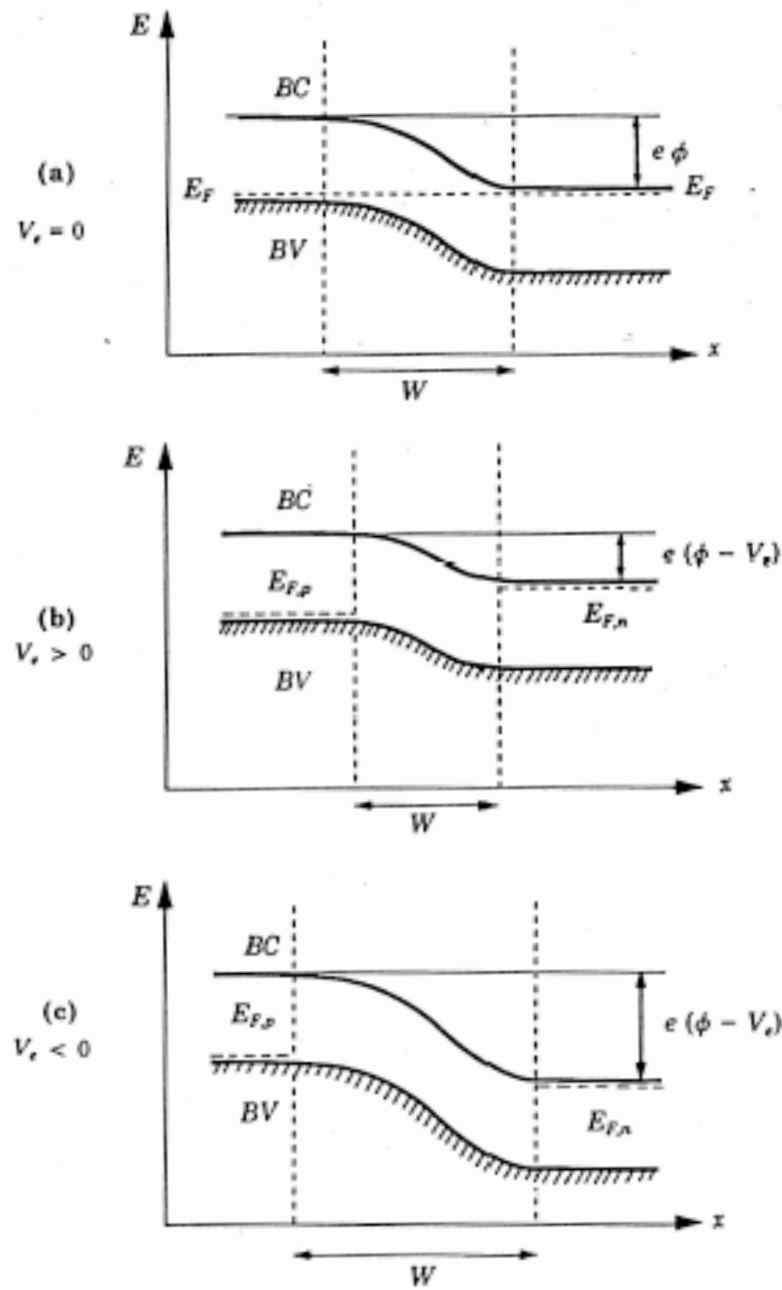
First transistor Bardeen, Shockley and Brattain 1947



La jonction p-n

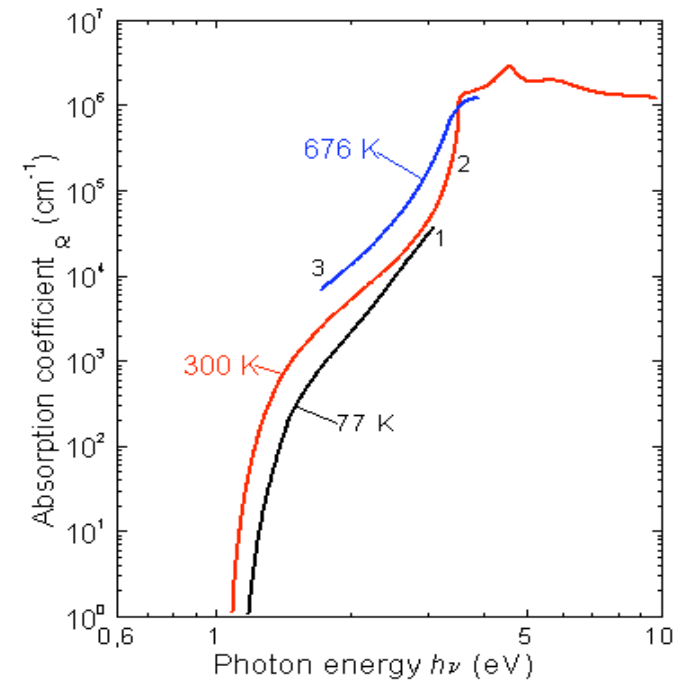
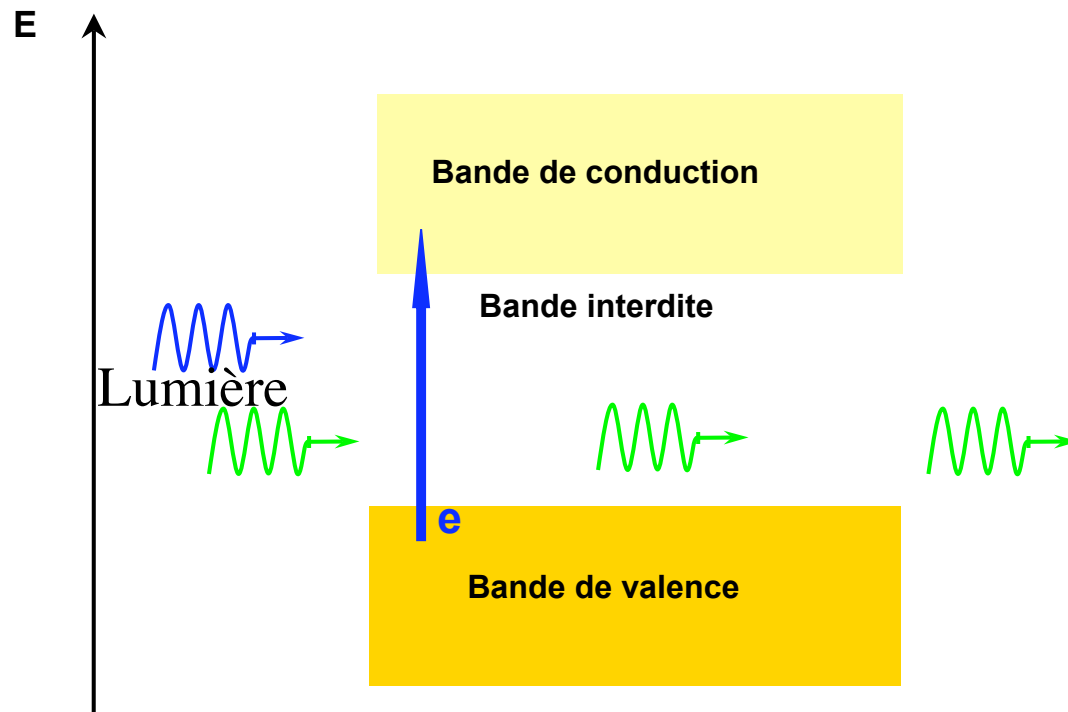


Le potentiel subi par les électrons présente une barrière. L'application d'une tension permet d'abaisser cette barrière et de laisser passer le courant



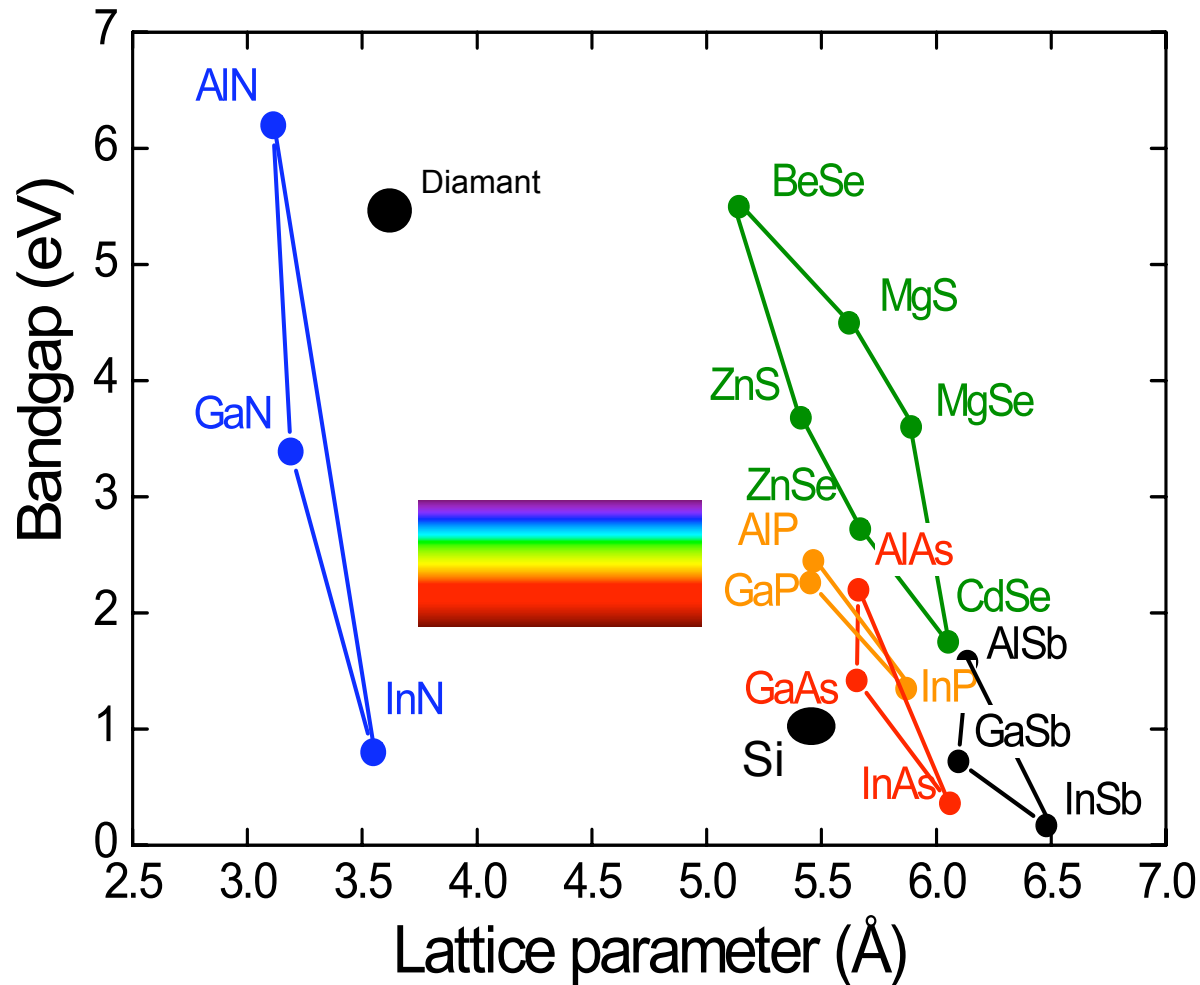
Comparaison de profils de bandes pour une jonction p - n : (a) non polarisée ;
 (b) polarisée en direct ; (c) polarisée en inverse.

Propriétés optiques



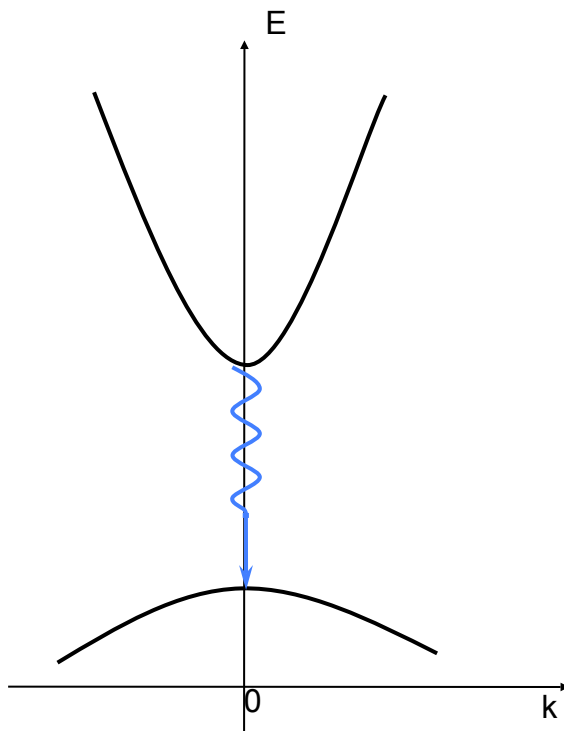
Un semiconducteur est (généralement) transparent pour une onde électromagnétique d'énergie inférieure à la bande interdite

Bande interdite et Matériaux



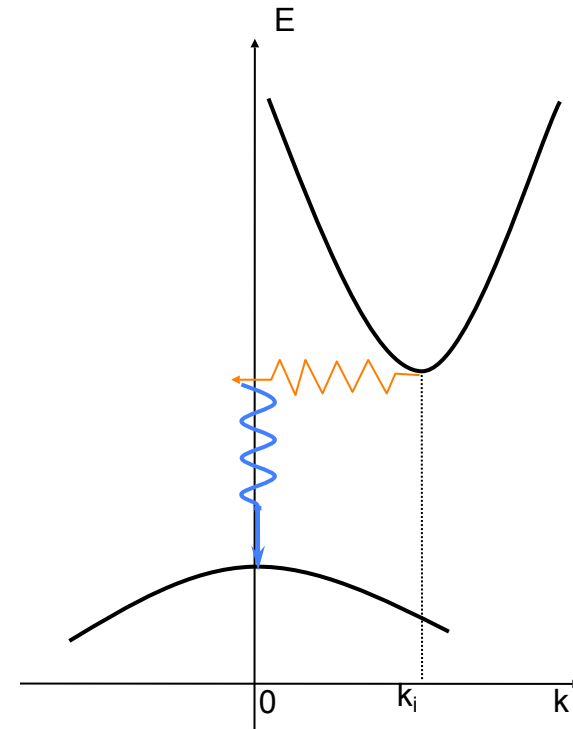
Bande interdite: directe et indirecte

Bande interdite directe



Optoélectronique

Bande interdite indirecte



Electronique

Caractéristiques principales

- Bandes d'énergie
- Contrôle de la conductivité (jonction p-n)
- Fabrication
 - Intégration (coût et performance)
 - Dispositifs quantiques et dimensions atomiques

Les semiconducteurs aujourd'hui

- Quelques dispositifs majeurs
- Applications marquantes
- Tendances en recherche fondamentale

Quels types de dispositifs ?

- Electroniques: agissent sur le courant
 - Diodes, transistors, varistances
- Optoélectroniques: mettent en jeu électrons et lumière
 - Émetteurs: DELs, LDs
 - Détecteurs: Photodiodes, cellules solaires

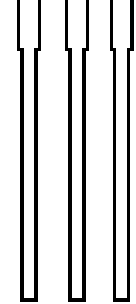
Electronique

Applications

- Electronique, circuits intégrés
- Transistors hyperfréquence
- Transistors de puissance
- Mémoires
- Capteurs

Le transistor bipolaire

BC
547 C
M 224



CBE

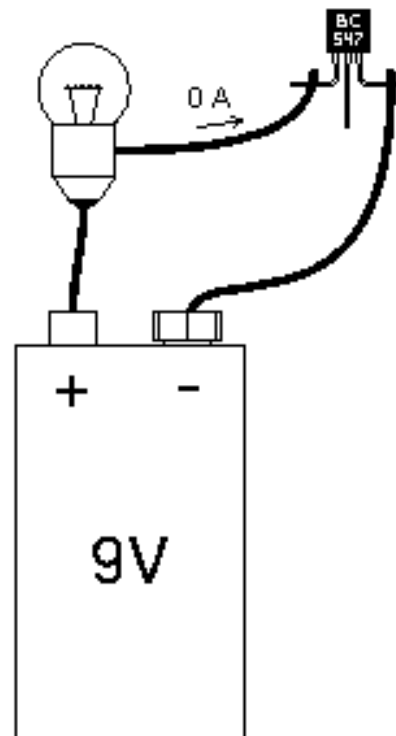
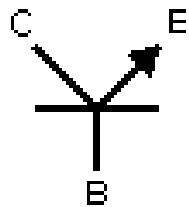


Fig. 1

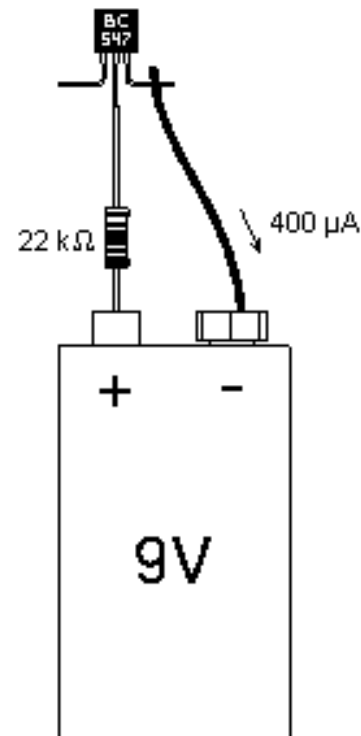


Fig. 2

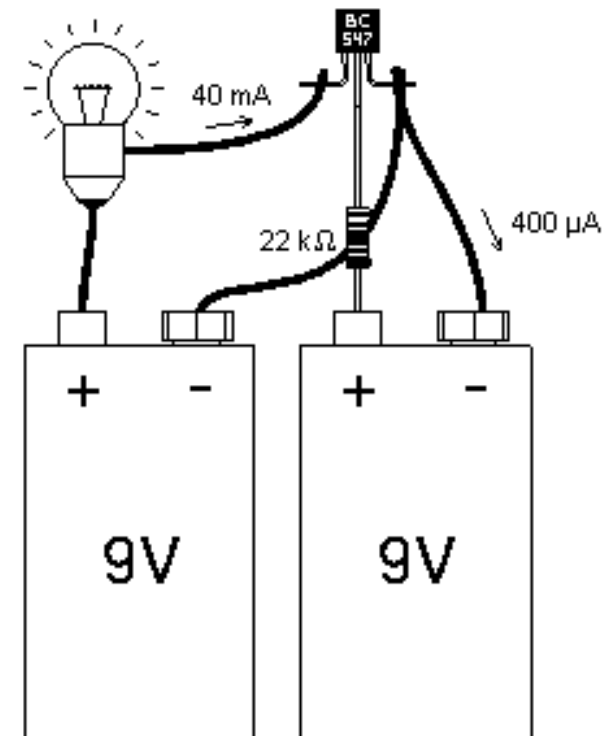
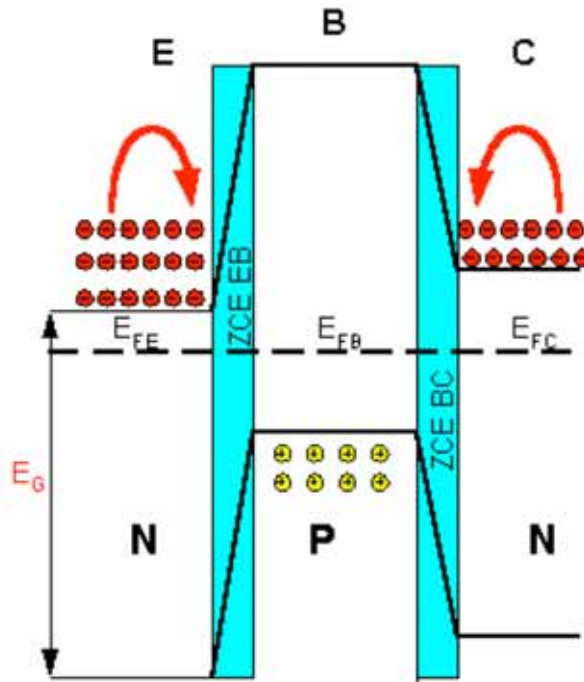


Fig. 3

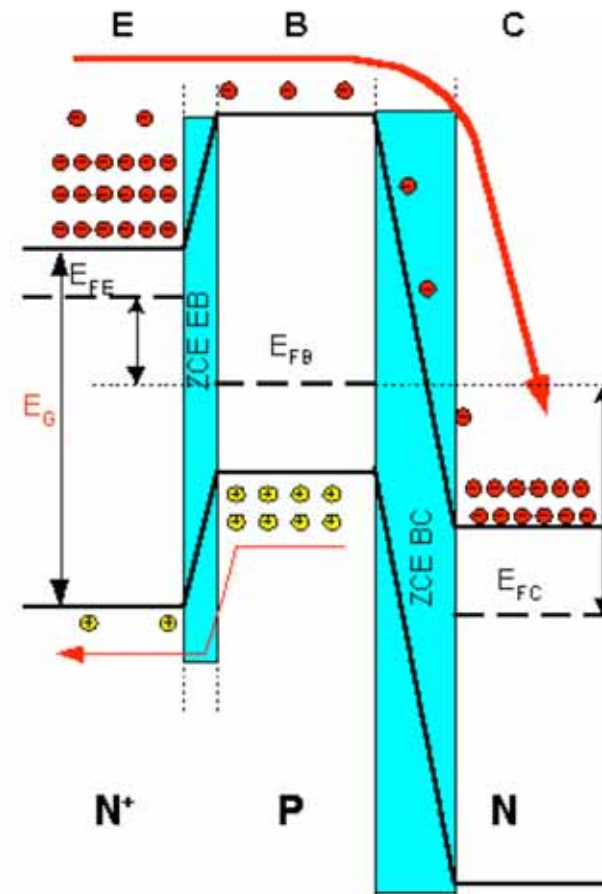
Le courant collecteur I_c est relié au courant base I_b par la relation $I_c = \beta \cdot I_b$
Le coefficient β est le gain en courant du transistor

Fonctionnement



Non polarisée

Jonction n-p-n

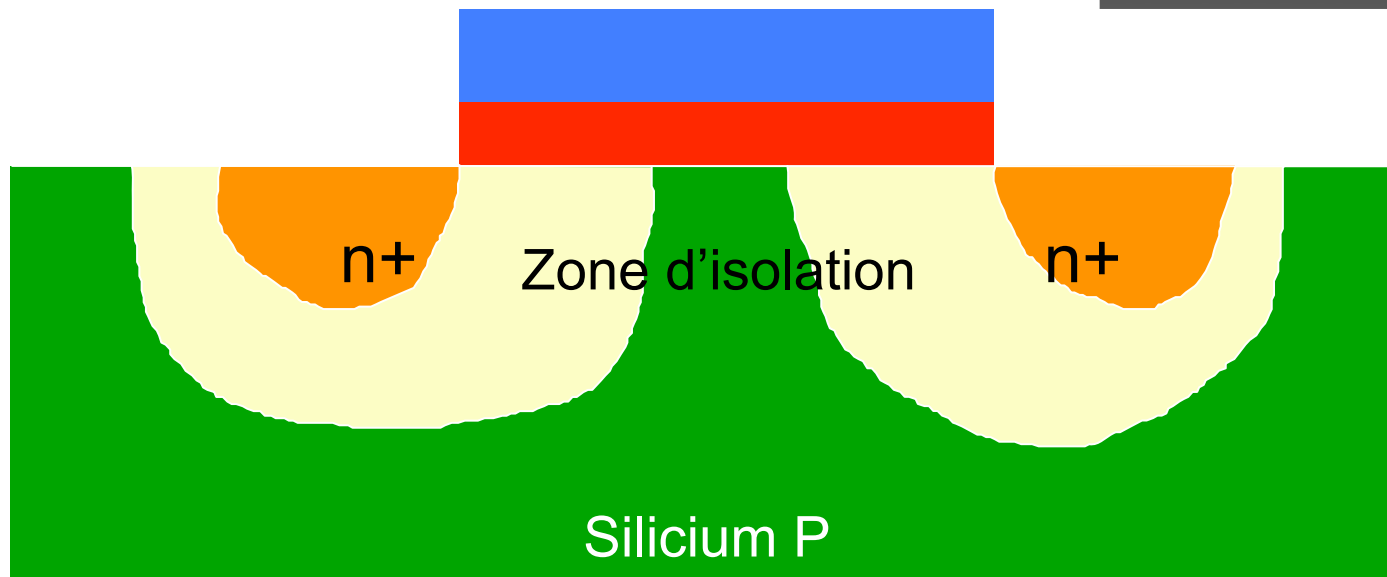
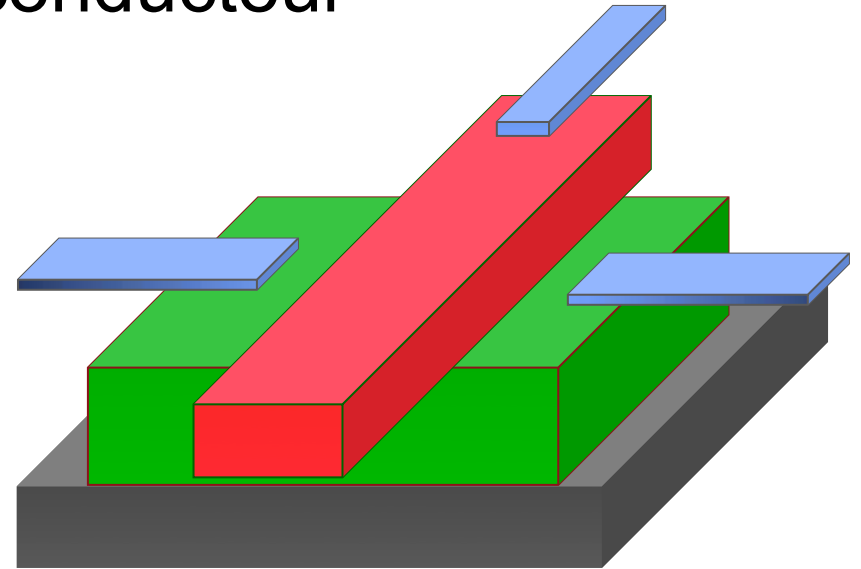


Polarisée

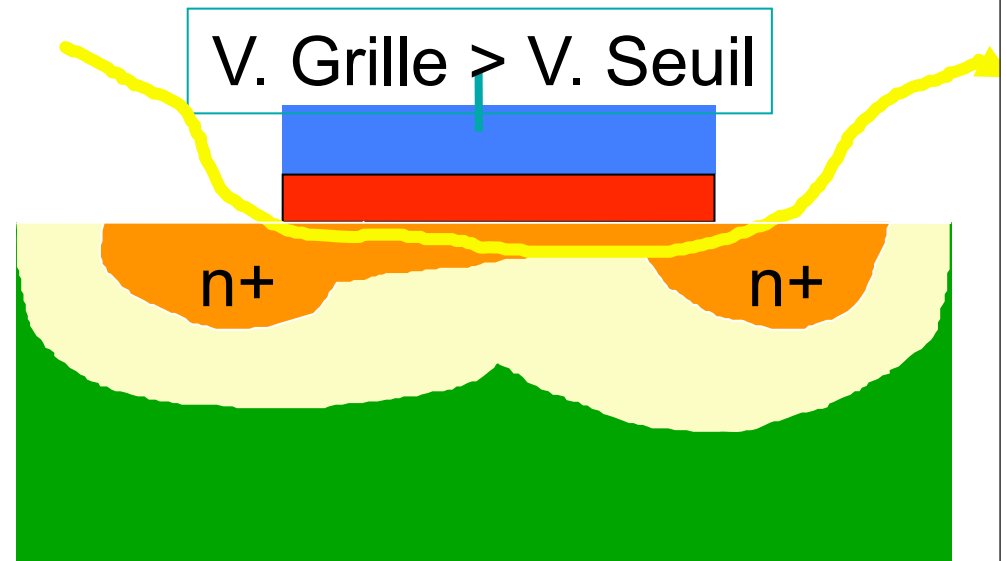
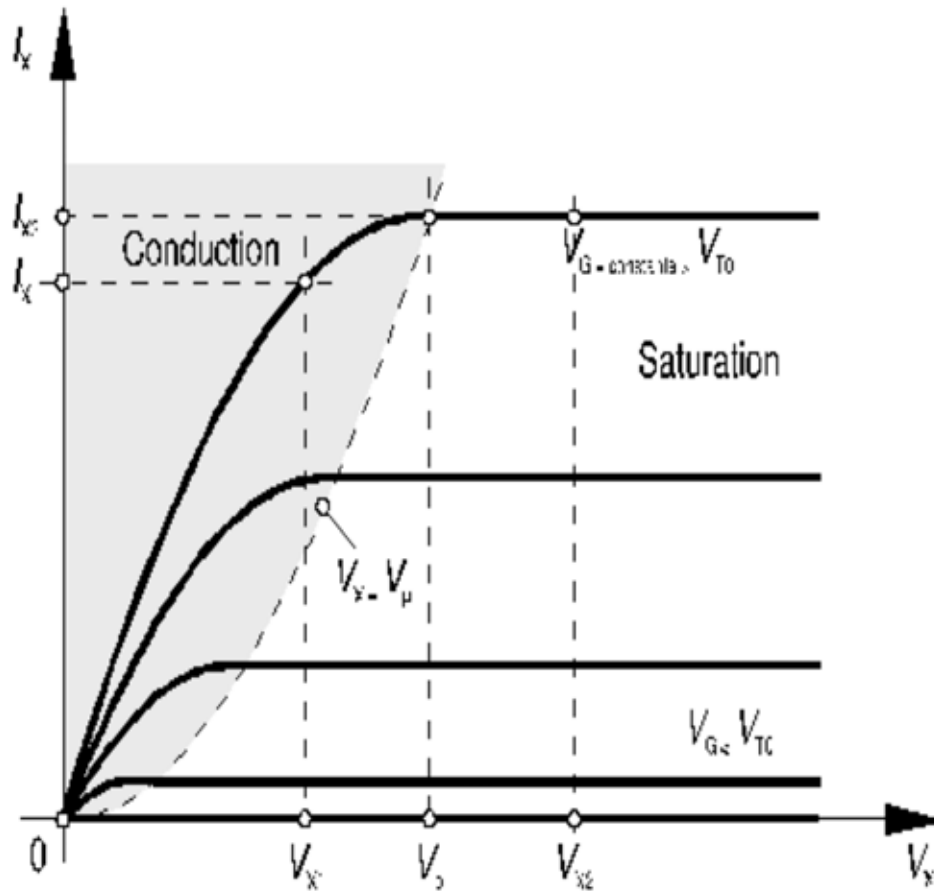
Le transistor MOS

Métal-Oxide-Semiconducteur

Métal : Bleu
Oxyde : Rouge
Semiconducteur : Vert



Caractéristiques électriques



La tension de la grille contrôle le courant entre source et drain

Vers la miniaturisation

La loi de Moore

Gordon Moore, cofondateur de la société Intel avait affirmé en 1965 lors d'une conférence de presse que **"le nombre de transistors par circuit de même taille va doubler tous les 18 mois"**.

Année	Nb transistors	fréquence réelle	Loi de Moore	fréquence prévue
1972	2 300	0,108	2 300	0,108
1974	6 000	2	7 302	0,342
1974	6 000	2	7 302	0,342
1982	134 000	6	294 400	13,82
1990	1 200 000	25	7 477 293	351,1
1996	5 500 000	150	150 732 800	7 077
1999	29 000 000	450	759 645 711	35 670
2001	42 000 000	1 400	1 519 291 421	71 340

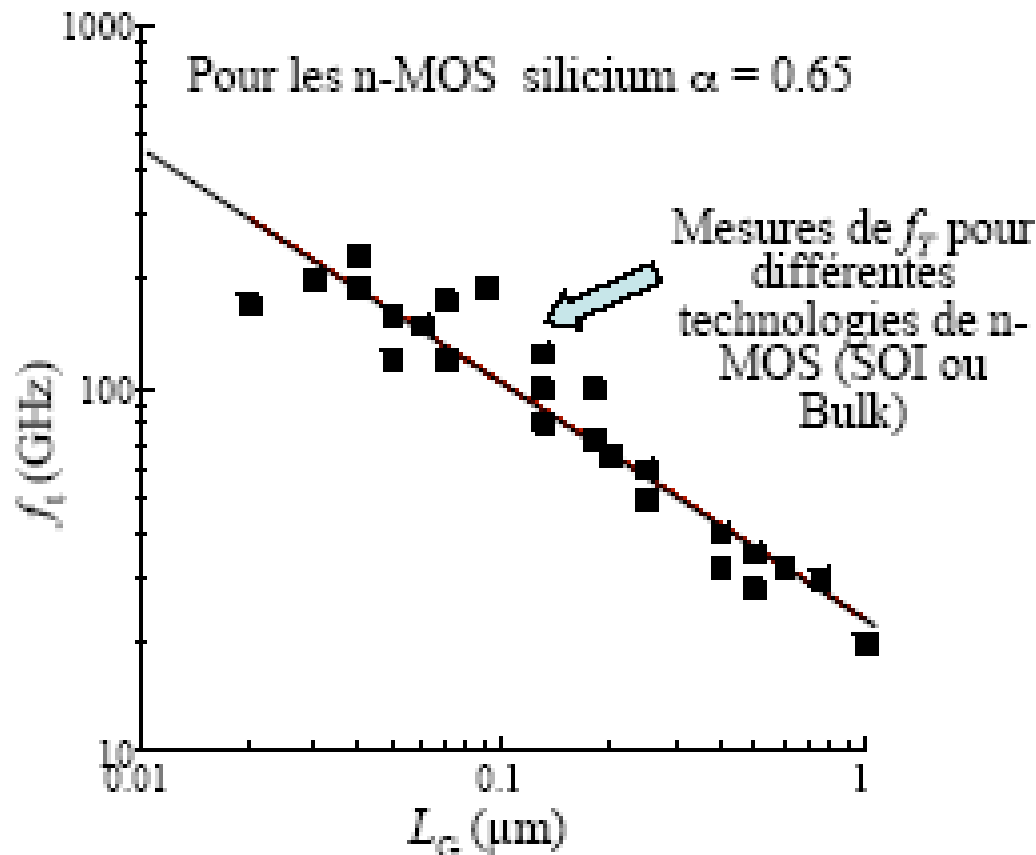
En fait, plutôt tous les deux ans

Taille de grille et fréquence

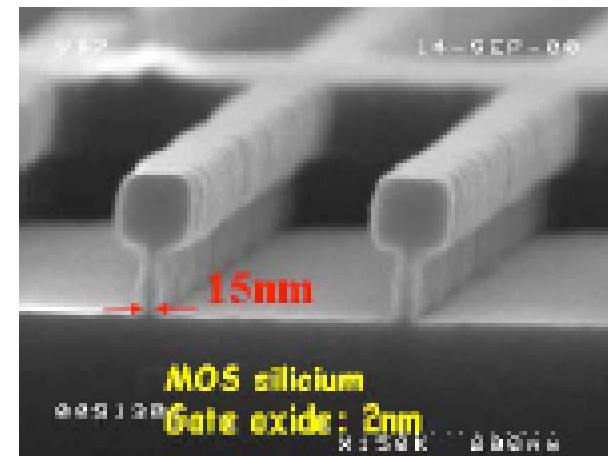
importance de la miniaturisation

Etat de l'art des Transistors HF :
Pour une technologie donnée [1 μm – 20 nm]

$$f_T = f_{T0} \left(\frac{1}{l_G} \right)^\alpha$$



<i>Records</i>	f_T	f_{MAX}
n-MOSFET Si(40 nm)	250 GHz	200 GHz
HEMT InP (25 nm)	562 GHz	600 GHz
n-MODFET Si/SiGe (100 nm)	74 GHz	186 GHz



Limite à la miniaturisation?

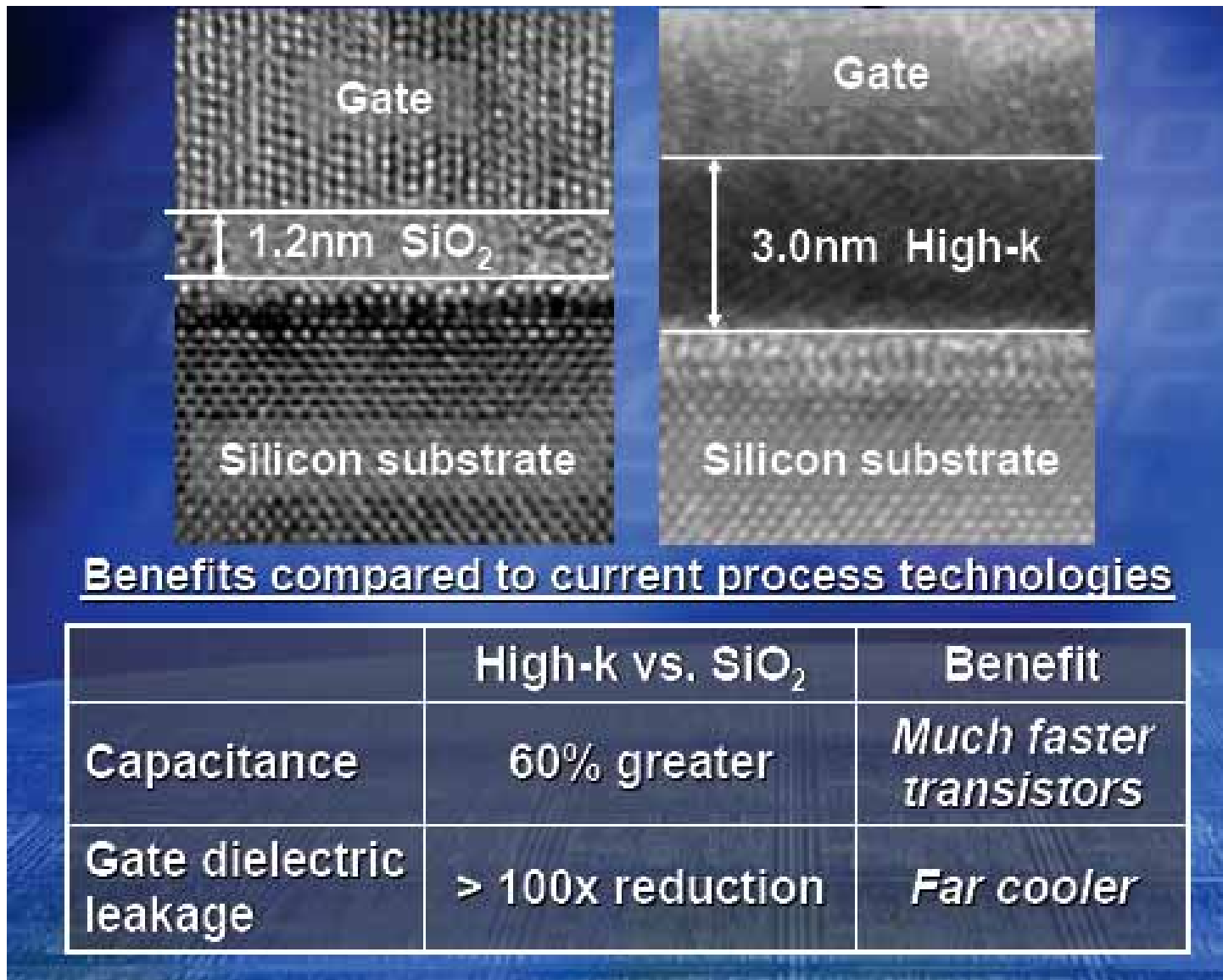
Continuation of Moore's Law

Process Name	P856	P858	Px60	P1262	P1264	P1266	P1268	P1270
1st Production	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011
Process Generation	0.25 μ m	0.18 μ m	0.13 μ m	90 nm	65 nm	45 nm	32 nm	22 nm
Wafer Size (mm)	200	200	200/300	300	300	300	300	300
Inter-connect	Al	Al	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	?
Channel	Si	Si	Si	Strained Si	Strained Si	Strained Si	Strained Si	Strained Si
Gate dielectric	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	High-k	High-k	High-k
Gate electrode	Poly-silicon	Poly-silicon	Poly-silicon	Poly-silicon	Poly-silicon	Metal	Metal	Metal

Introduction targeted at this time

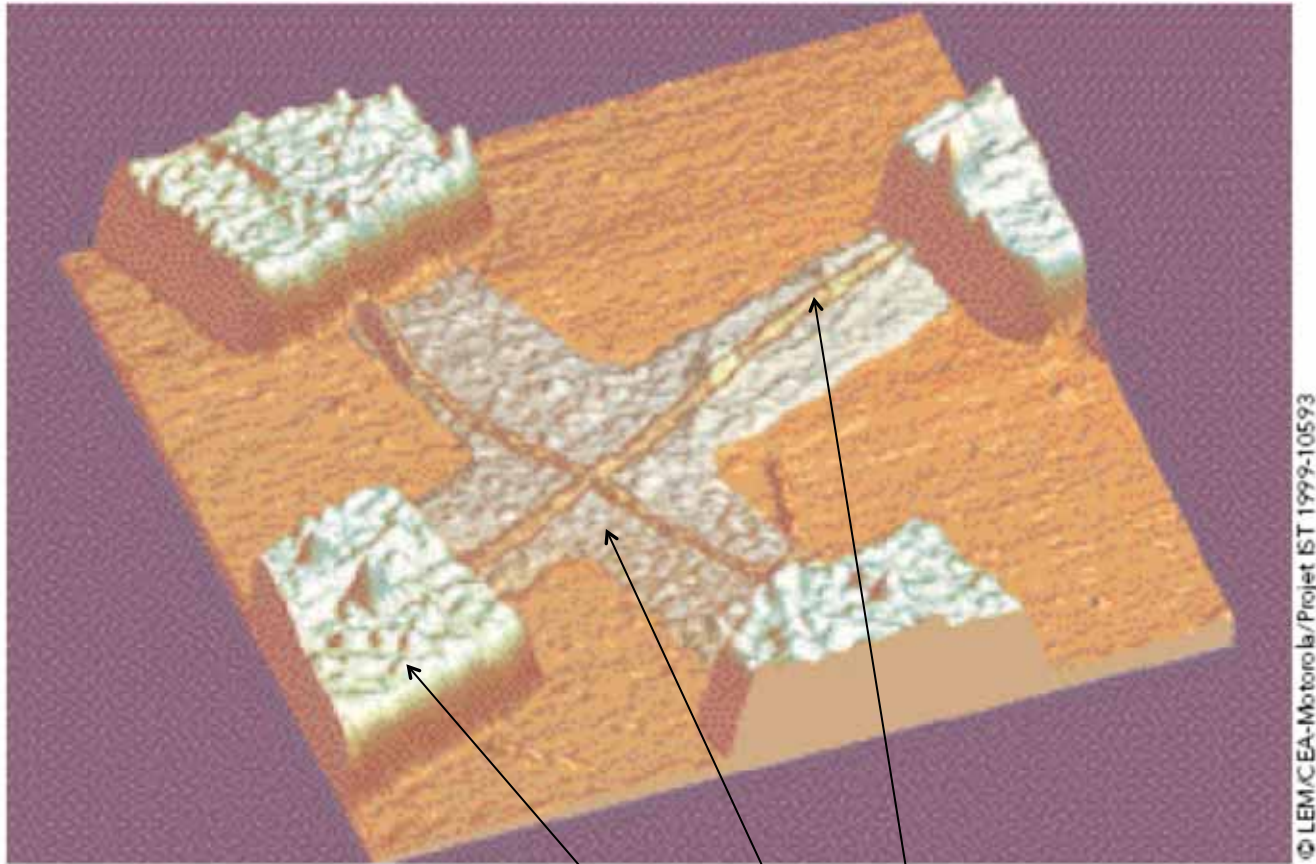
Subject to change

Matériaux à haute permittivité



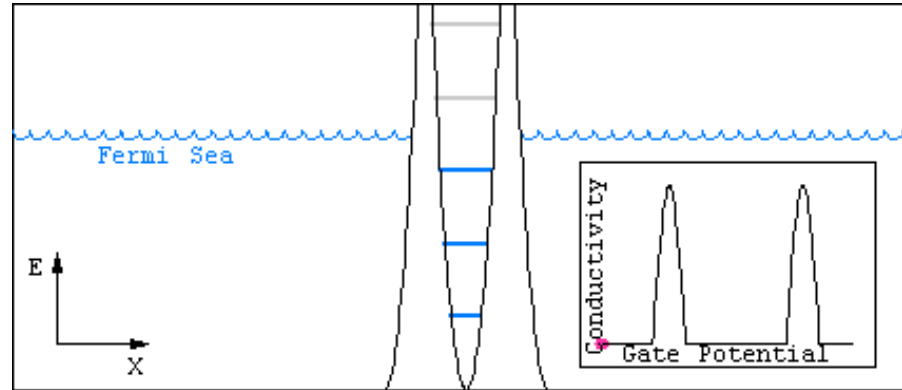
Nouvelles approches

Nanotubes de carbone



Nanotubes de carbone
autoassemblés sur
une surface de silice
fonctionnalisée.
Les nanotubes sont
contactés électriquement
par des fils d'or visibles
en surépaisseur.

Transistor à 1 électron



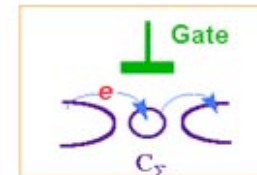
Single Electron Tunneling

- Single charge tunneling

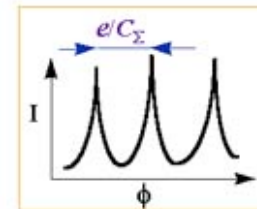
$$E_C + E_Q \gg kT$$

where $E_C = \frac{e^2}{C_\Sigma} \propto \frac{1}{d}$

$$E_Q \sim \frac{\hbar^2}{m^* d^2}$$



- Requirements:
 - Small quantum dot for high temperature operation
 - Hole QDT for complementary logic circuitry



Optoélectronique

Applications

Diodes électroluminescentes (DEL, LED):

- Affichage
- Eclairage
- Purification de l'eau (UV)

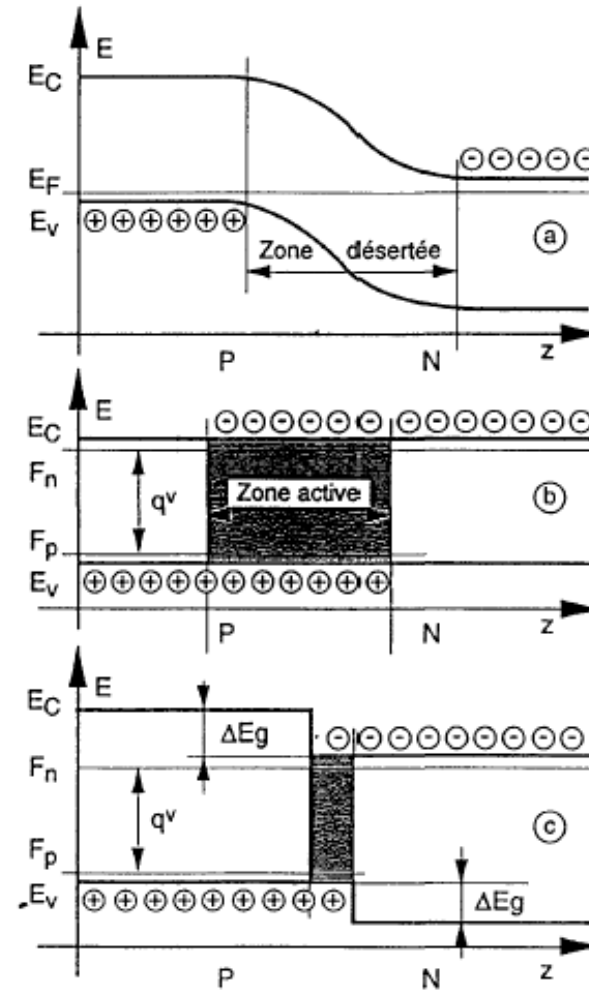
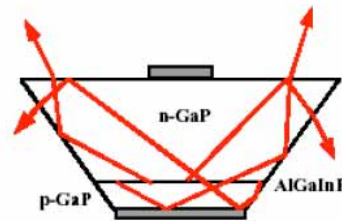
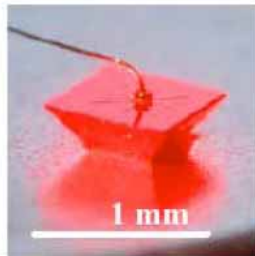
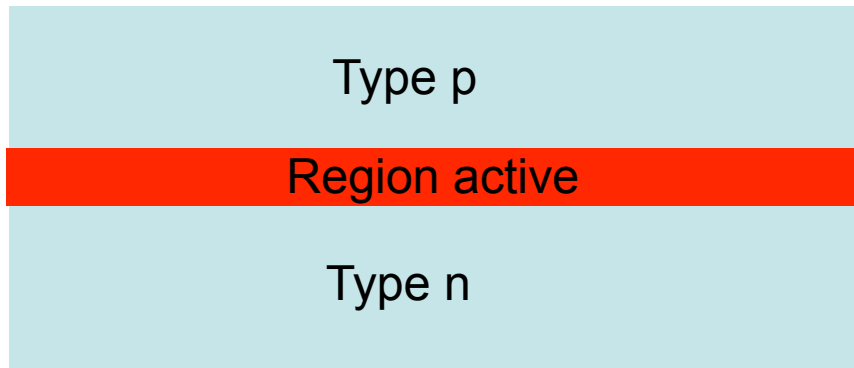
Diodes Lasers:

- CD-ROM, DVD
- Télécommunication
- Imprimante
- Projection

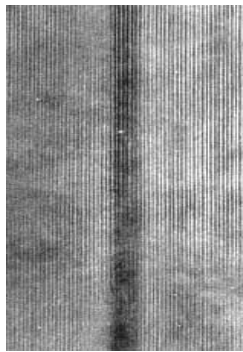
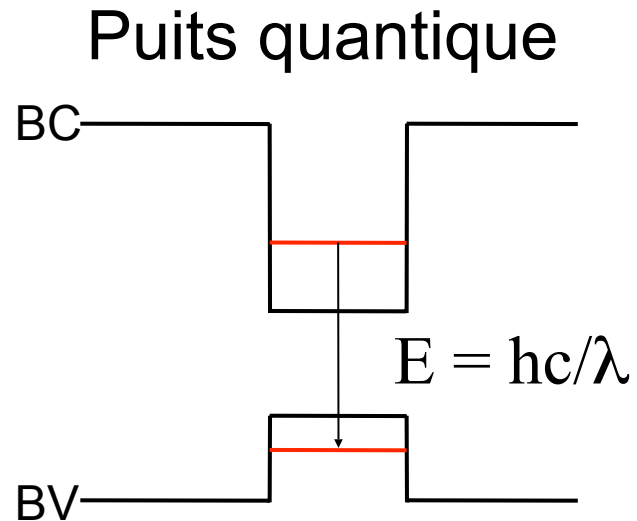
Cellules solaires

Détecteurs (IR, UV)

Diodes émettrices de lumière (DEL)



Région active (DEL et lasers)



3 nm

Augmentation de la probabilité de recombinaison

+

Contrôle de la longueur d'onde d'émission par

- *la largeur du puits (1-10 nm)*
- *la hauteur des barrières*
- *la bande interdite du matériau puits*

Application DEL

Applications for LED Modules

Signal Lights

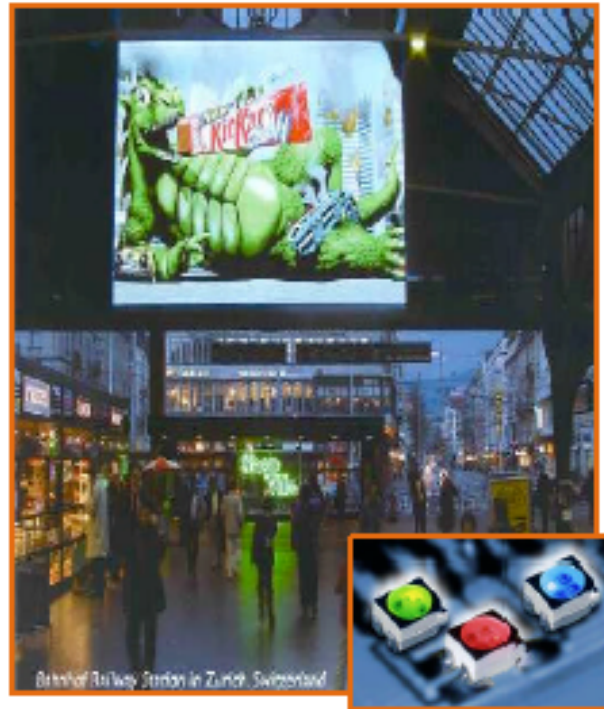


Illuminated Signs



Dominik Elser
21.10.02 Seite 7

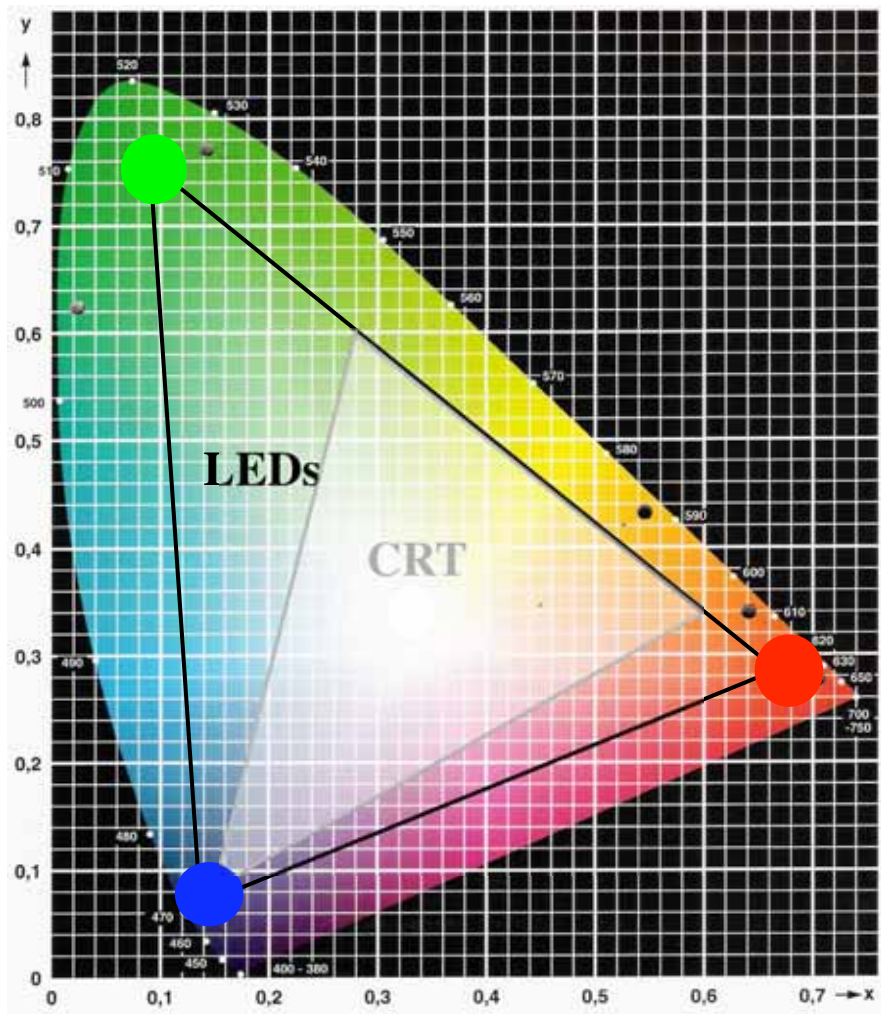
Full Color Displays



Opto Semiconductors

OSRAM

Application DEL: écran



Blue and green LEDs allow to increase the color gamut of EL displays compared to RGB color CRT based on phosphors

Blue LEDs are essential for white light emission

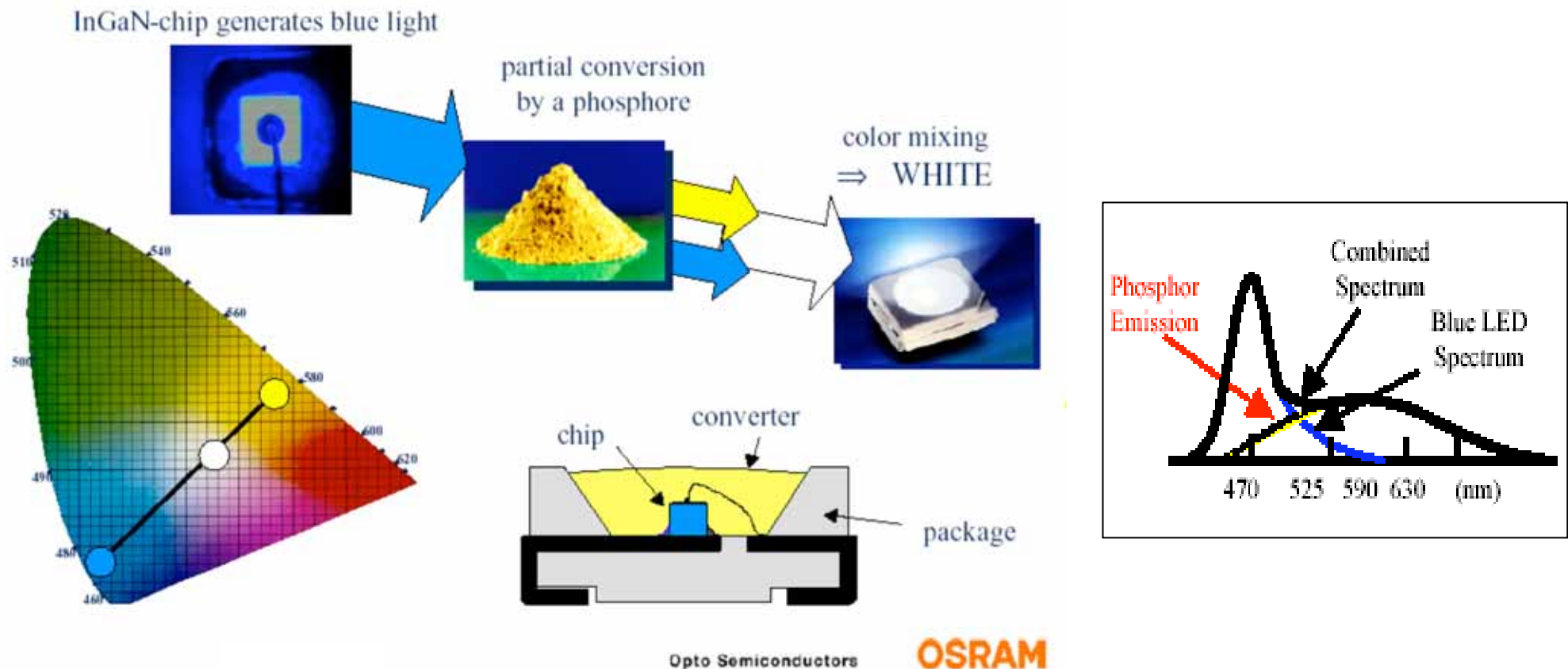
2 colors: Blue+Yellow

3 colors: Blue+Green+Red

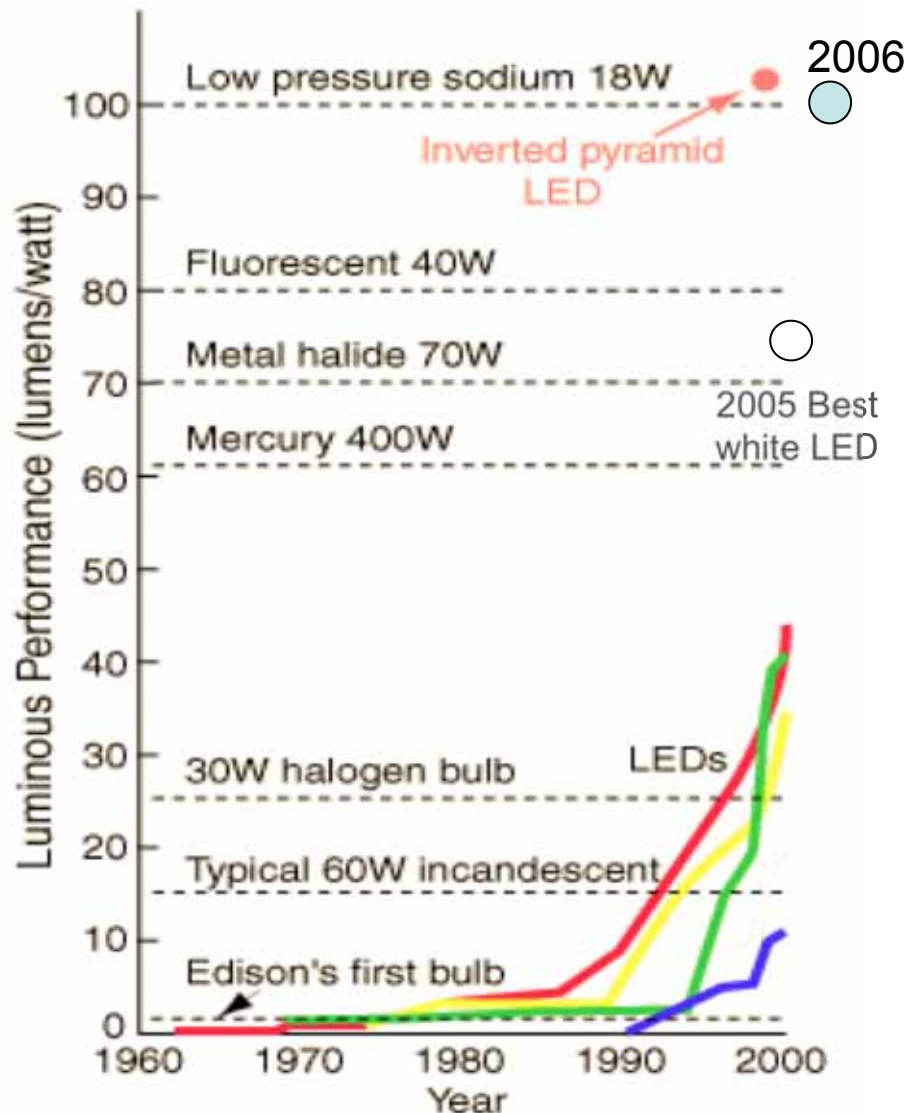
Application LEDs: éclairage

At the end of the 90's, the emergence of high brightness blue LEDs opens the way for solid state lighting:

Partial conversion of LED blue light by a yellow phosphor



Application LEDs: éclairage



2006: the luminous efficiency of white LEDs is 100 lm/W (R&D)

2010: LED efficiency should compete with fluorescent tubes.

Energy consumption

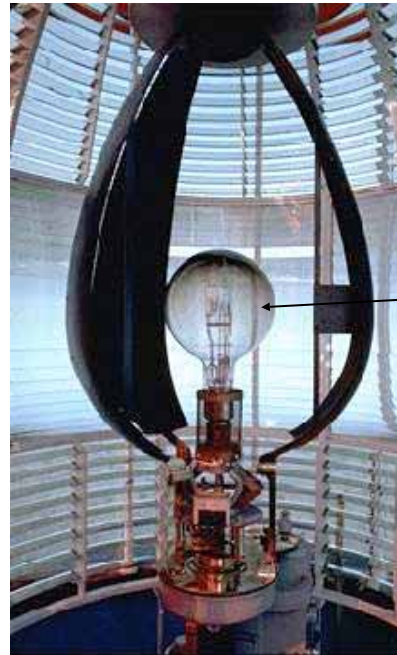
Long lifetime (50 000 h)

Safety

Compacity

Lumen: flux rayonné par unité d'angle solide, normalisé à la sensibilité de l'œil.

Remarque: La « puissance » d'une lampe c'est l'énergie électrique dissipée, pas l'énergie lumineuse émise.



Exemple: le phare de Cordouan
- années 70: 6000 W
- 2006: 150 W
et on voit le phare tout aussi bien

Application LEDs: éclairage

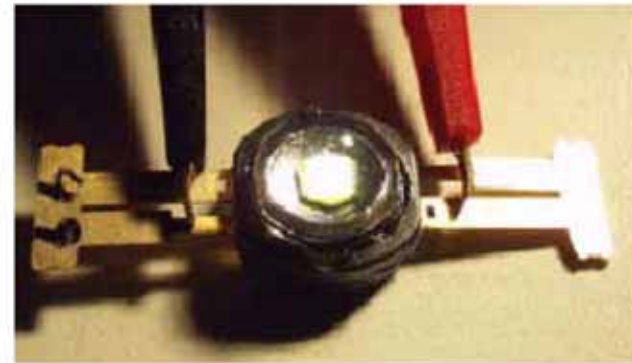
Luminous efficiency *versus* device size



15 W
110 lm/bulb
7 lm/W
Incandescent



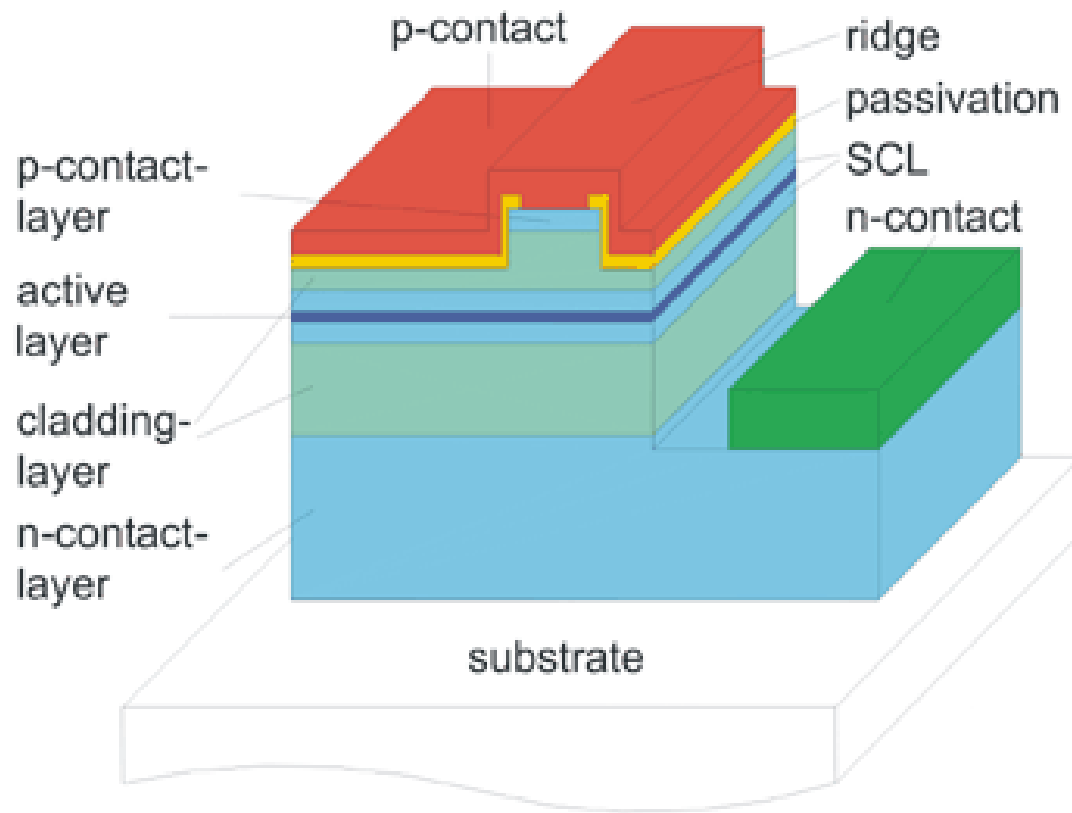
4 W
145 lm/bulb
36 lm/W
Fluorescent



Luxeon™ 5W
150 lm/bulb
30 lm/W
2x2 mm² chip

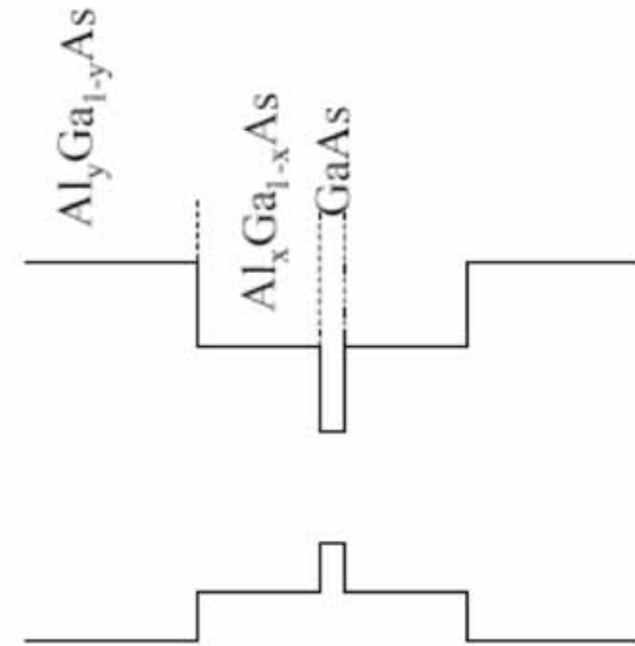
Roadmap: LEDs will replace most of the light sources in 2020

Diode laser à semiconducteur



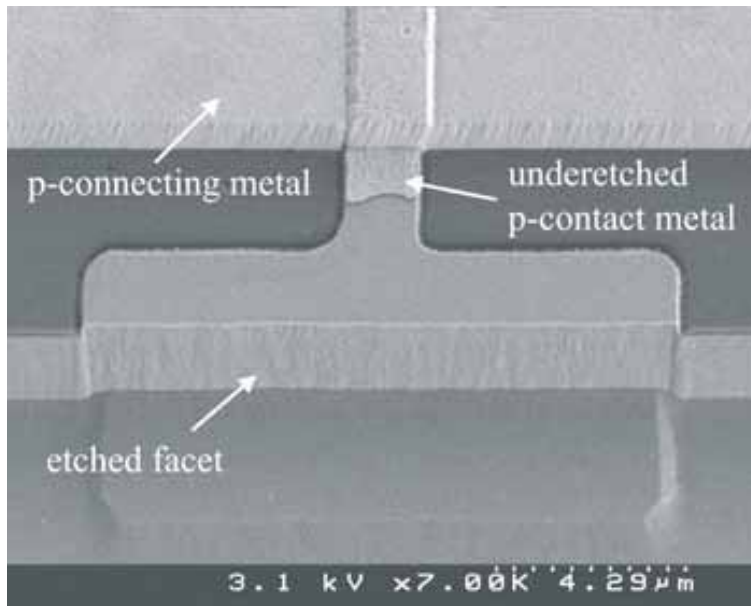
1 μm x 3 μm x 200 μm

Milieu amplificateur de
lumière + cavité (miroir)

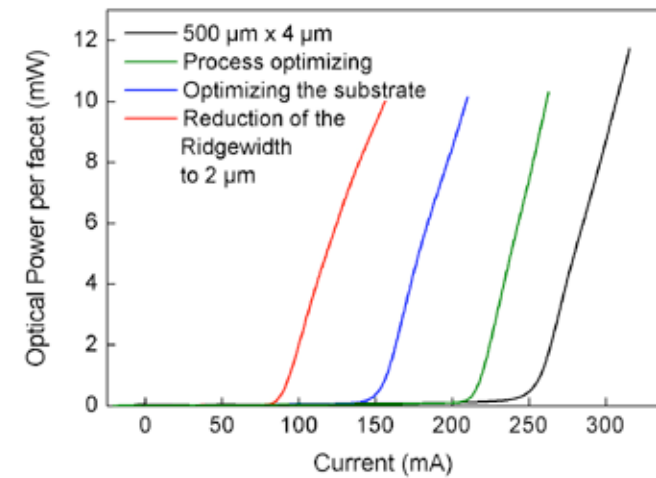


SCH laser

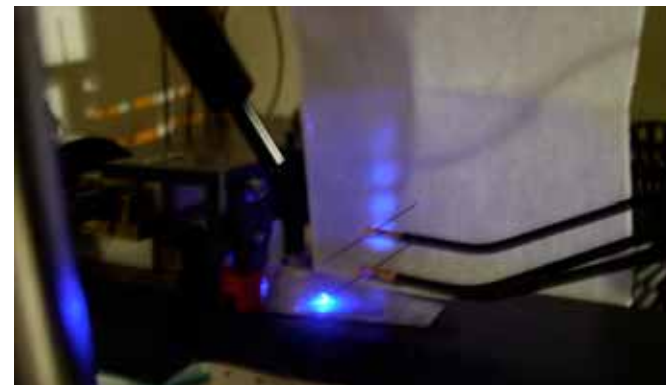
Diode laser



Les facettes sont généralement obtenues par clivage de la plaque



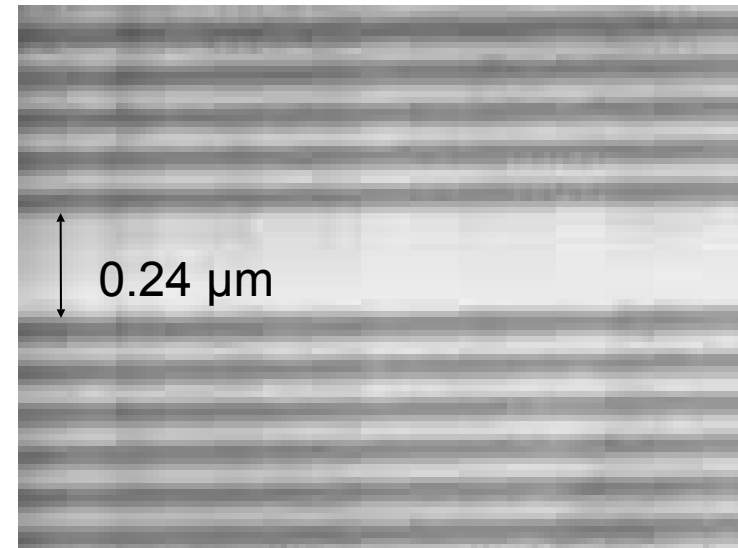
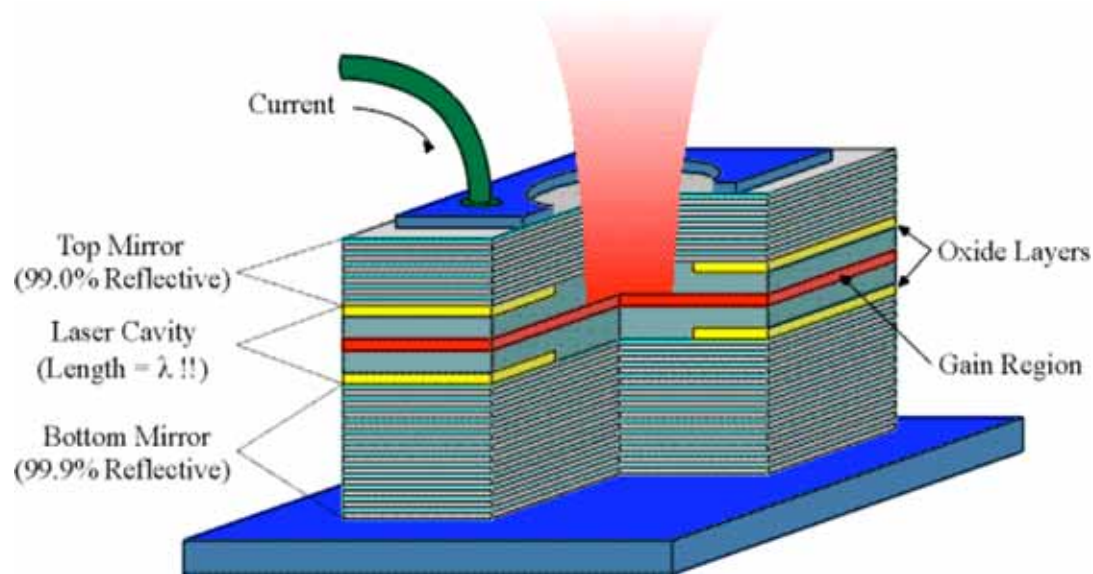
Existence d'un seuil pour l'émission stimulée



Capacité de stockage

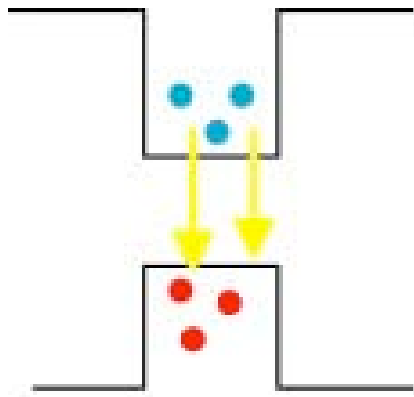
Technologie	Laser, longueur d'onde	Capacité de stockage (min/max)	Débit nominal	Diamètre du disque	Épaisseur
CD	750 nm	650 Mo/800 Mo	150 ko/s	12 cm	1,2 mm
DVD	650 nm	4,7 Go/17 Go	1,35 Mo/s ou 1385 ko/s	12 cm	1,2 mm
Blu-Ray	405 nm	23,5 Go/100 Go	4,5 Mo/s ou 4608 ko/s	12 cm	1,2 mm
Nec-Toshiba	405 nm	15 Go/80 Go	env. 5 Mo/s	12 cm	1,2 mm

Laser à émission par la surface

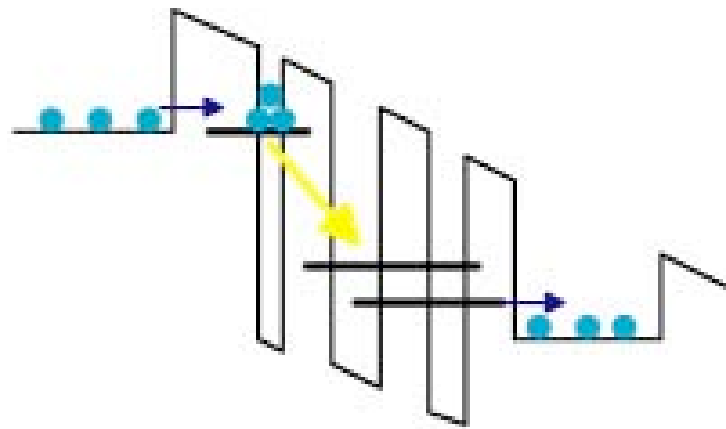


La cavité Fabry-Perot est constituée de deux miroirs de Bragg (empilements de couches quart d'onde)

Lasers à cascade quantique



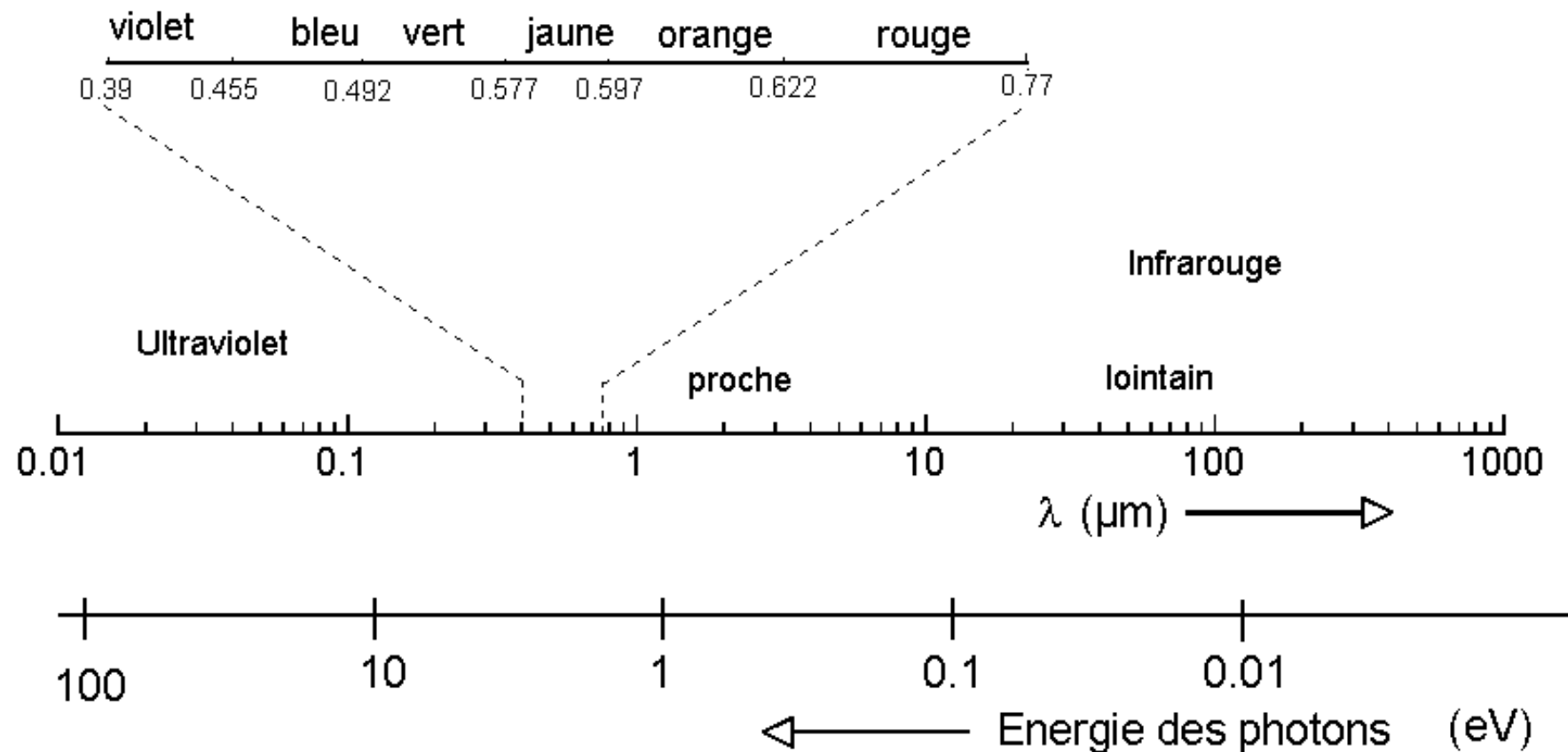
Laser
Interbande



Laser
Intersousbande

Dans un laser inter-sousbande (transitions entre niveaux d'une seule des bandes), il n'y a pas de recombinaison électron-trou.

Domaine spectral



Nanostructures

Nanostructures

Les techniques actuelles de croissance permettent de contrôler le dépôt des couches à l'échelle atomique. Exemple: le puits quantique

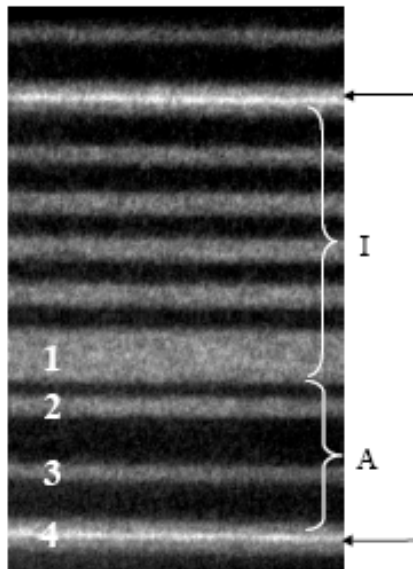


Fig. 5. TEM micrograph showing one period (A-active zone + I-injector) of the cascade. The insertion of 1.5 monolayer AlAs in the (Al,Ga)As barrier can be seen by the bright contrast (arrow).

Le trait clair correspond à une épaisseur de 4 Å

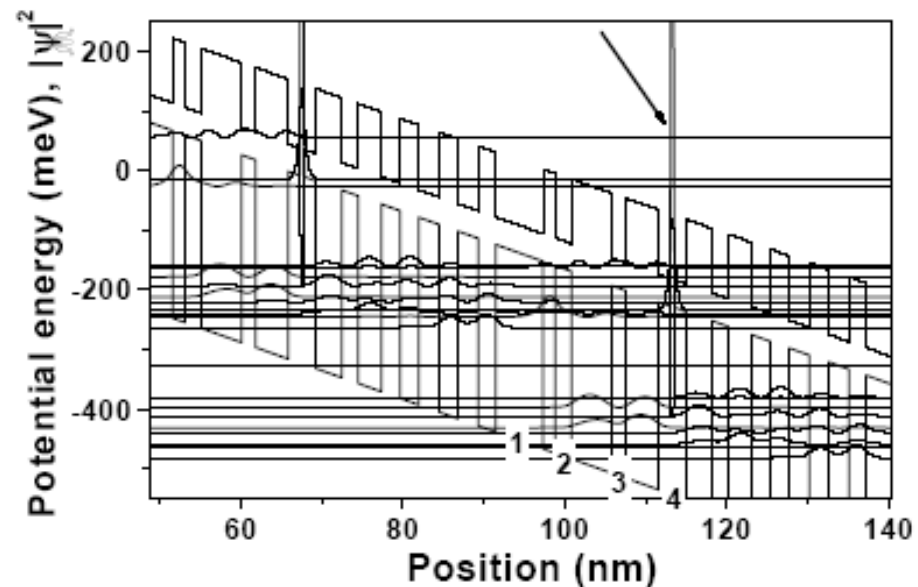
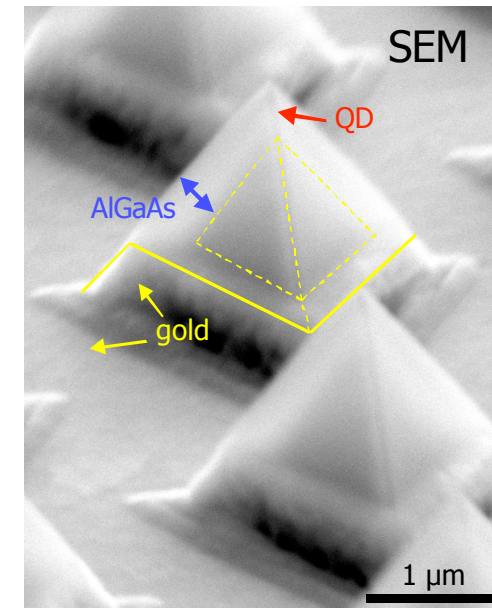
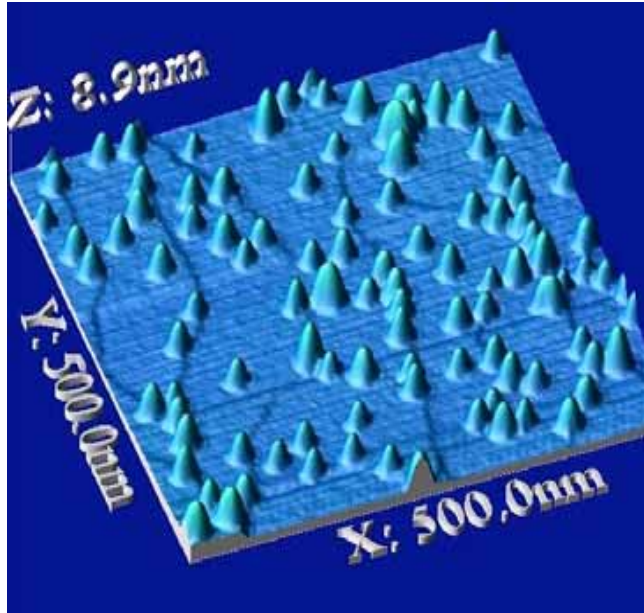
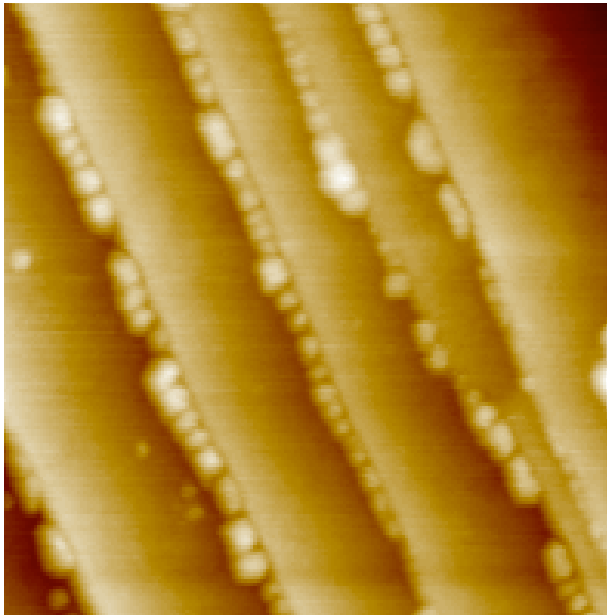


Fig. 6. The potential energy for Γ - and X-like states in the conduction band together with squares of the wave function moduli for two periods at a field strength of -48 kV/cm. The full height of the AlAs barrier (arrow) is not shown.

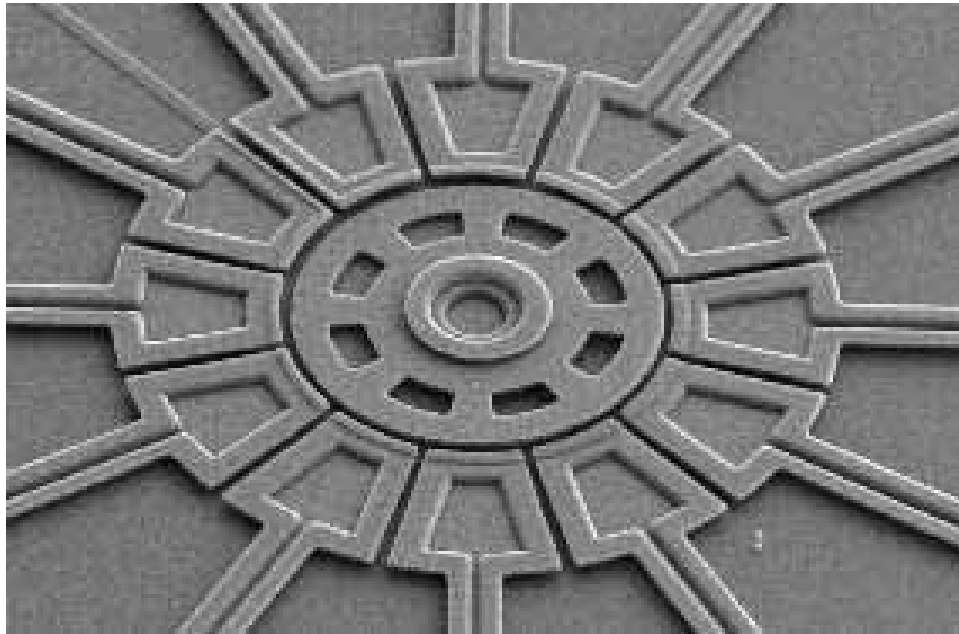
Boîtes quantiques



Croissance d'îlots de dimensions nanométriques
Structures quantiques 0D: « atomes » artificiels

Microsystemes

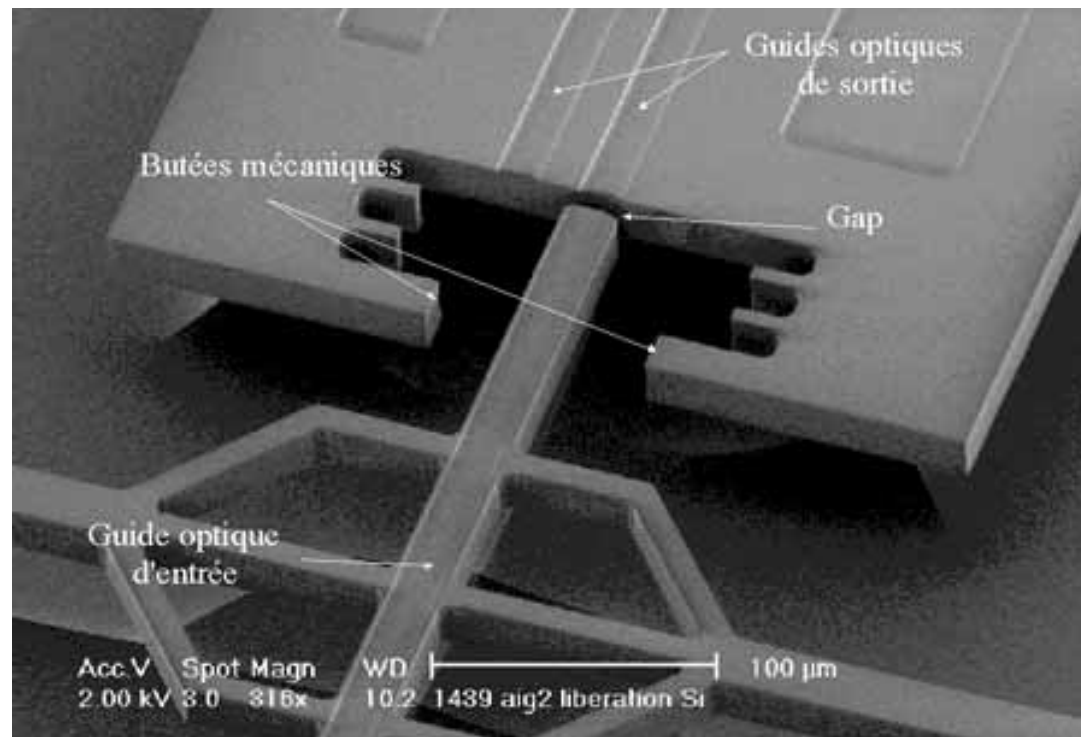
MEMS



Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) is the integration of mechanical elements, sensors, actuators, and electronics on a common silicon substrate through microfabrication technology.

MOEMS

Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems



« routeur » optique

Un domaine à la frontière entre:
La technologie des micros et nanostructures
Des applications industrielles
et aussi de la physique

Prix Nobel:



The Nobel Prize in Physics 2000

"for basic work on information and communication technology"

"for his part in the invention of the integrated circuit"

"for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and opto-electronics"



**Zhores I.
Alferov**

🏆 1/4 of the prize
Russia

A.F. Ioffe Physico-
Technical Institute
St. Petersburg,
Russia

b. 1930



**Herbert
Kroemer**

🏆 1/4 of the prize
Federal Republic of
Germany

University of
California
Santa Barbara, CA,
USA

b. 1928



Jack S. Kilby

🏆 1/2 of the prize
USA

Texas Instruments
Dallas, TX, USA

b. 1923
d. 2005



The Nobel Prize in Physics 1956

"for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"



**William
Bradford
Shockley**

 1/3 of the prize
USA

Semiconductor
Laboratory of
Beckman
Instruments, Inc.
Mountain View, CA,
USA

b. 1910
(in London, United
Kingdom)
d. 1989



John Bardeen

 1/3 of the prize
USA

University of Illinois
Urbana, IL, USA

b. 1908
d. 1991



**Walter Houser
Brattain**

 1/3 of the prize
USA

Bell Telephone
Laboratories
Murray Hill, NJ, USA

b. 1902
d. 1987



The Nobel Prize in Physics 1973

"for their experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductors and superconductors, respectively"

"for his theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier, in particular those phenomena which are generally known as the Josephson effects"



Leo Esaki

🏆 1/4 of the prize
Japan

IBM Thomas J.
Watson Research
Center
Yorktown Heights,
NY, USA

b. 1925



Ivar Giaever

🏆 1/4 of the prize
USA

General Electric
Company
Schenectady, NY,
USA

b. 1929
(in Bergen, Norway)



**Brian David
Josephson**

🏆 1/2 of the prize
United Kingdom

University of
Cambridge
Cambridge, United
Kingdom

b. 1940



The Nobel Prize in Physics 1985

"for the discovery of the quantized Hall effect"



Klaus von Klitzing

Federal Republic of Germany

Max-Planck-Institut für Festkörperforschung
Stuttgart, Federal Republic of Germany

b. 1943



The Nobel Prize in Physics 1998

"for their discovery of a new form of quantum fluid with fractionally charged excitations"



**Robert B.
Laughlin**

 1/3 of the prize
USA

Stanford University
Stanford, CA, USA

b. 1950



**Horst L.
Störmer**

 1/3 of the prize
Federal Republic of
Germany

Columbia University
New York, NY, USA

b. 1949



Daniel C. Tsui

 1/3 of the prize
USA

Princeton University
Princeton, NJ, USA

b. 1939
(in Henan, China)