

LE MONDE QUANTIQUE AU QUOTIDIEN: L'OPTO-ELECTRONIQUE

Emmanuel ROSENER

Office National d'Études et de Recherches Aéronautiques (ONERA)

Département de Physique (École Polytechnique)

« Laissez dire les sots ; le savoir a son prix »
Jean de La Fontaine. Livre VIII
L'Avantage de la science



1/40

De quoi va-t-on parler?

- Là où tout commence : l'effet photoélectrique
- Les briques de base
- La détection quantique
- Les émetteurs de lumière
- Les nouvelles frontières



2/40

LA OU TOUT COMMENCE: L'EFFET PHOTOELECTRIQUE

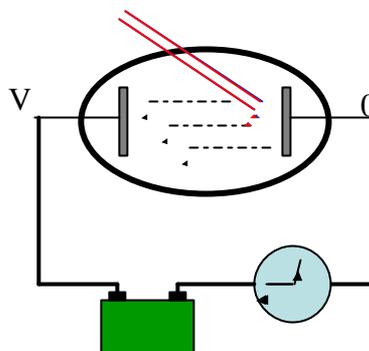
3/40



En 1887, Rudolf-Heinrich Hertz découvre l'effet photoélectrique



Rudolf-Heinrich Hertz, 1887



4/40 Philipp von Lenard, 1895

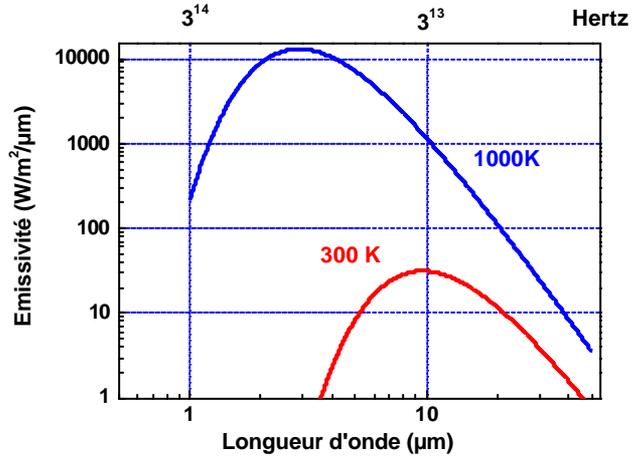
« Il semble y avoir un rapport entre
l'énergie des électrons émis
et la fréquence de la lumière excitatrice »



LE SPECTRE DU CORPS NOIR



Max Planck
14 Décembre 1900



La lumière arrive en paquets d'énergie quantifiée $E = h f$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

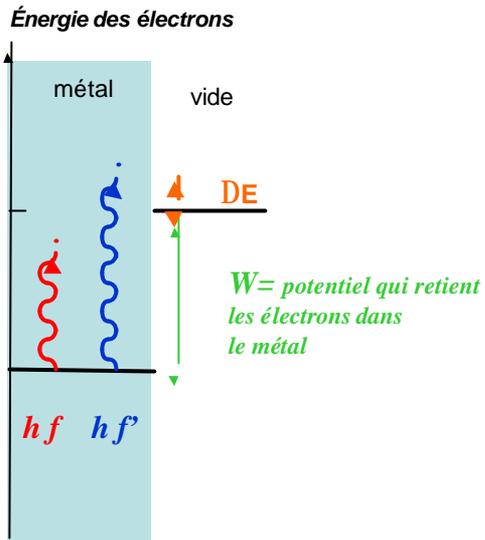
ONERA

5/40

Et Dieu créa Albert Einstein ...



Albert Einstein
en 1905



h = constante de Planck découverte dans le spectre du corps noir

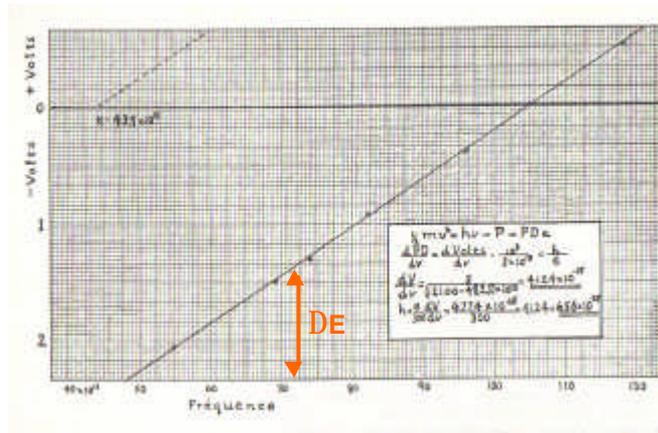
ONERA

6/40

Millikan passe 12 ans de sa vie à vouloir démontrer que Einstein à tort...



Millikan
1925

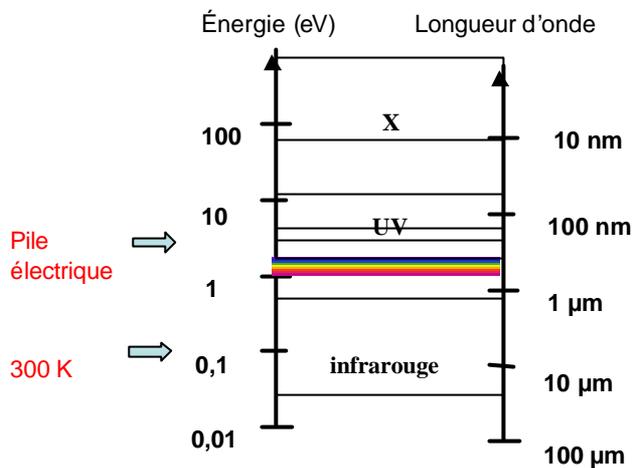


$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} \text{!!!!}$

C'est celui qui dit qui est !
La Physique Quantique vient de naître



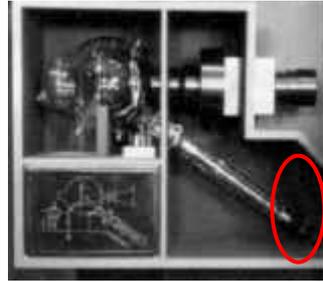
$$\text{longueur d'onde } (\mu\text{m}) = \frac{1,24 \text{ (eV)}}{\text{energie du photon (eV)}} \mu\text{m}$$



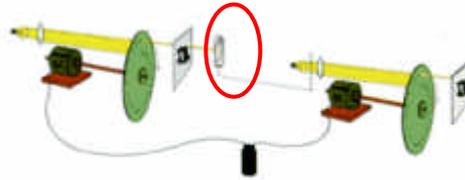
La cellule photoélectrique: le premier composant quantique ...



LEE De FOREST



La première caméra de télévision



Nipkow's System

ONERA

QUELQUES BRIQUES DE BASE:

Les semiconducteurs

La diode

Le puits quantique

ONERA

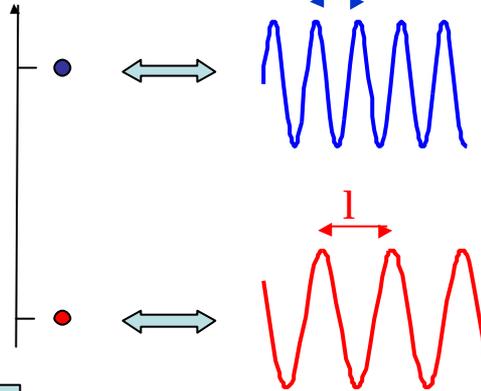
Louis de Broglie découvre que les électrons se comportent comme des ondes



1925

$$E = \frac{h^2}{2m} \frac{1}{\lambda^2}$$

Énergie des électrons

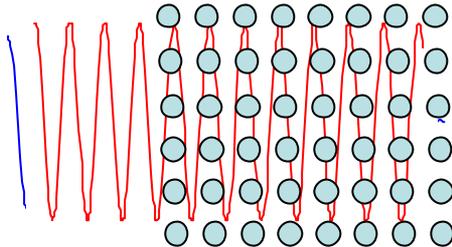


Relation entre la longueur d'onde et l'énergie d'un électron

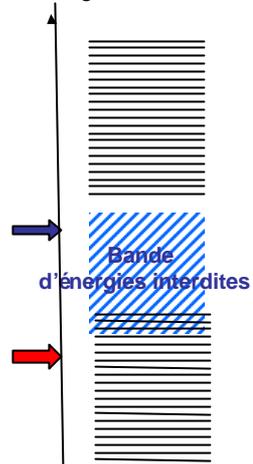
ONERA

11/40

Wigner, Seitz, Bloch décrivent la structure de bandes des solides



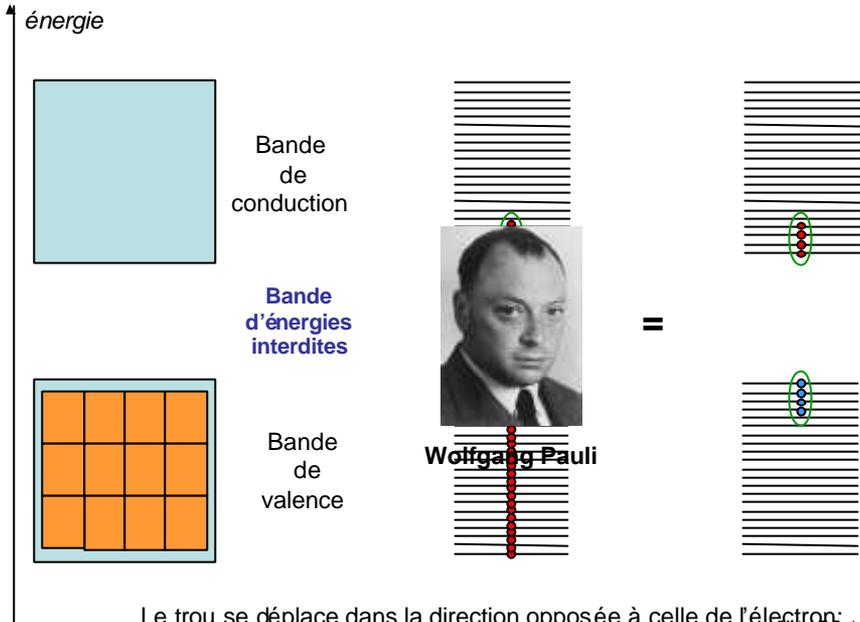
énergie



ONERA

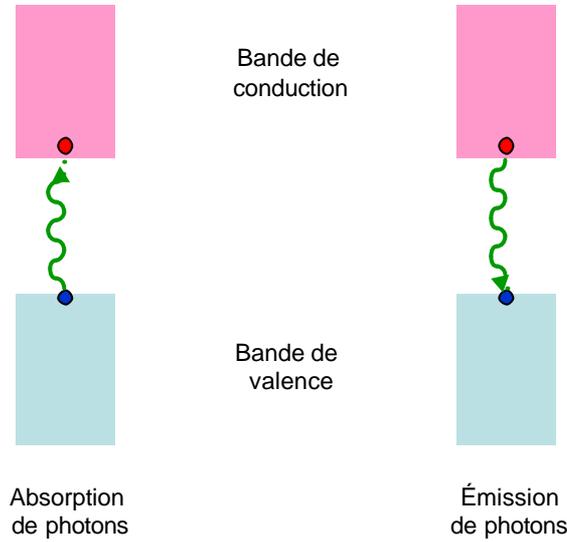
1930
12/40

Un état vide dans la bande de valence est un trou



Le trou se déplace dans la direction opposée à celle de l'électron.
C'est une quasi-particule de charge positive

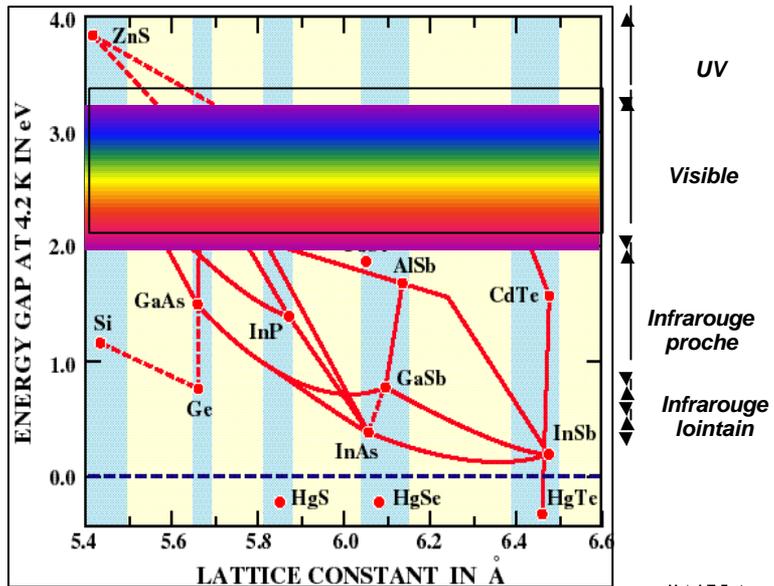
La transition optique interbande



15/40

ONERA

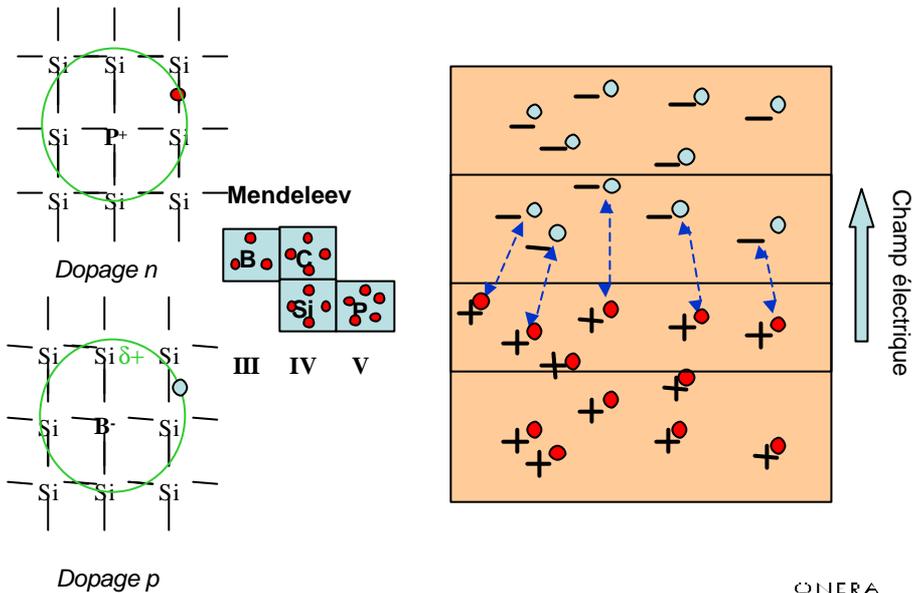
Gaps et couleurs



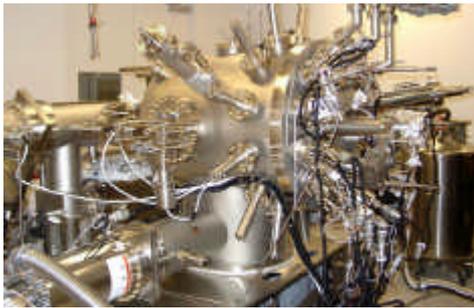
16/40

ONERA

Le dopage, la zone de charge d'espace et la jonction p/n

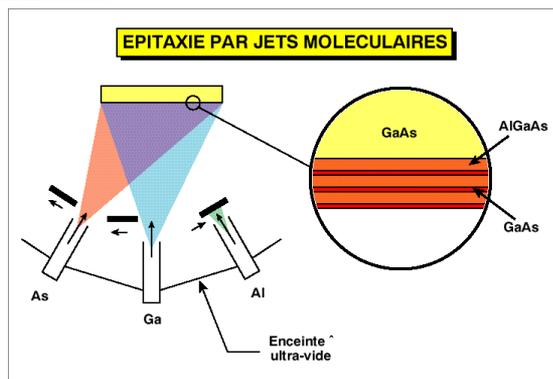


17/40



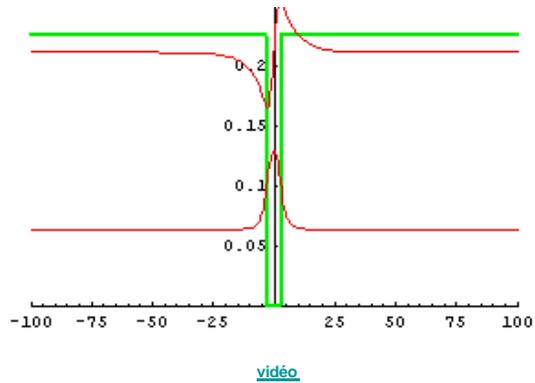
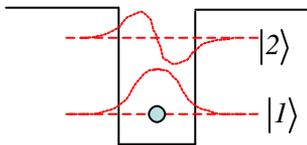
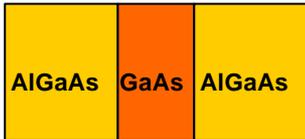
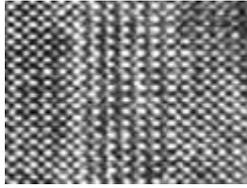
Le puits quantique (1)

TECHNOLOGIES DE
L'ULTRA-VIDE
1970-1980



18/40

Le puits quantique (2)



19/40



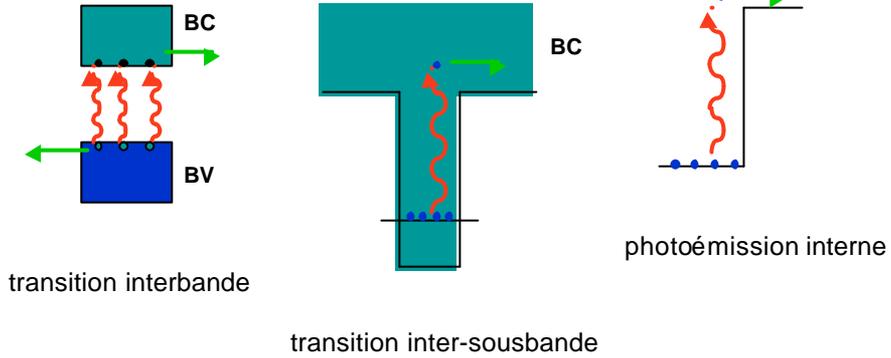
LA DETECTION QUANTIQUE:

- L'effet photovoltaïque
- Les détecteurs infrarouge
- Les caméras CCD
- Les cellules solaires

20/40



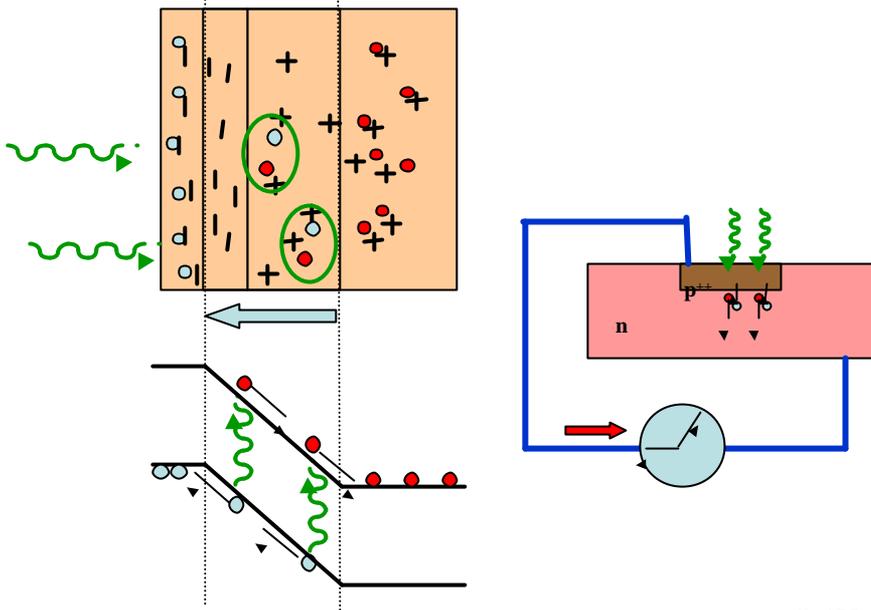
PHOTO-DETECTION QUANTIQUE



21/40

ONERA

EFFET PHOTOVOLTAÏQUE



22/40

ONERA

Exemple 1: MATRICE CCD

The diagram illustrates the structure and operation of a CCD matrix. On the left, a cross-section shows a metal layer, an oxide layer, and a silicon layer. Incident light (green wavy arrow) creates a 'Paquet d'électrons photocréés' (photo-generated electron packet) in the silicon. On the right, a top-down view shows a gate voltage V_g applied to a gate electrode, which traps the electrons. A photograph below shows a physical CCD chip with a grid of pixels.

Métal Oxyde Silicium

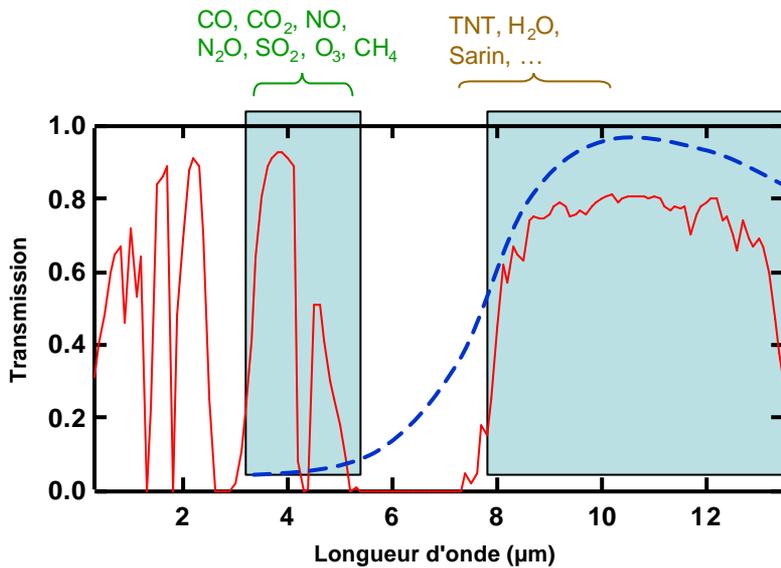
Taille typique actuelle: $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$
 Nombre typique de pixel: 10 000 000
 Taille de matrice: $1\ \text{cm}^2$

ONERA

23/40

Exemple 2: les détecteurs *infrarouge* $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$

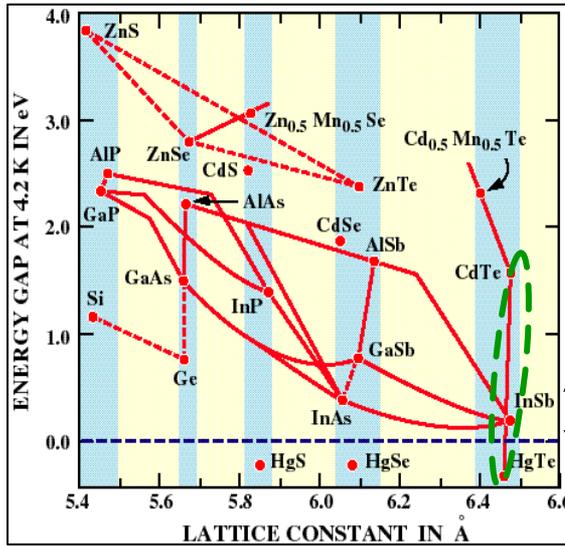
Pourquoi les bandes $3\text{-}5\ \mu\text{m}$ et $8\text{-}12\ \mu\text{m}$ sont elles si importantes ?



24/40

ONERA

Exemple 2: les détecteurs *infrarouge* $Hg_x Cd_{1-x} Te$



3 – 5 μm
soit
0.25 - 0.40 eV

8 – 12 μm
soit
0.10 - 0.15 eV

ONERA

25/40

Imagerie thermique infrarouge

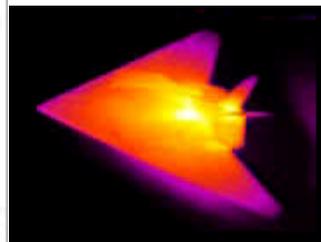
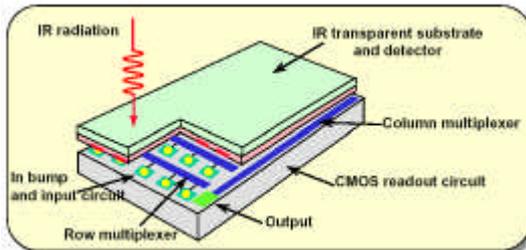
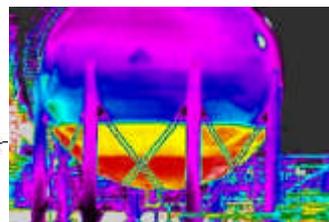
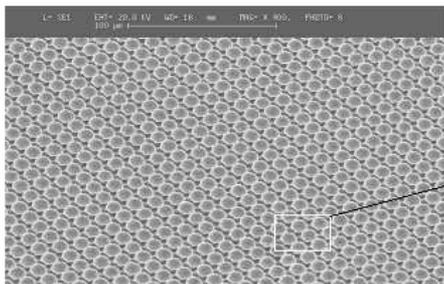


Image d'un avion furtif en infrarouge



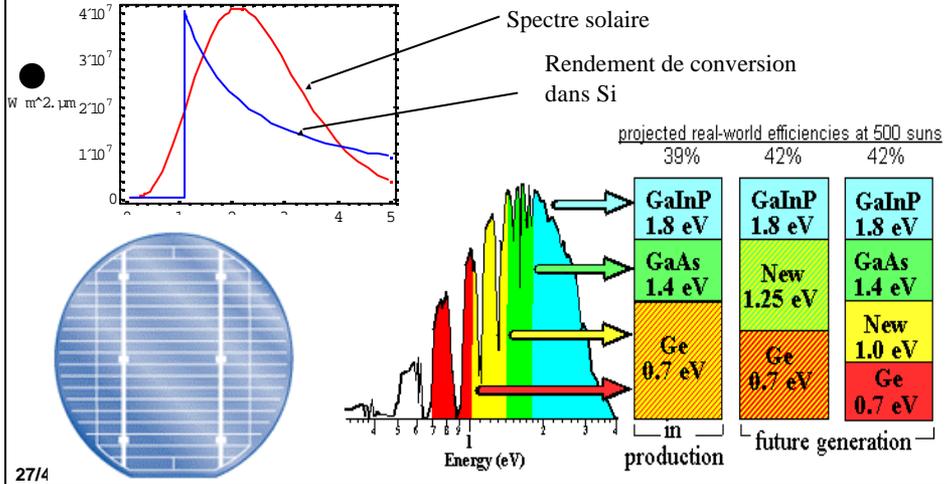
Niveau de carburant

ONERA

26/40

Exemple 3: Cellule solaire en silicium

Rendement quantique : 15 %
 Ensoleillement maximal : 1000 W/m² } ⇒ Courant maximal : 150 W/m²

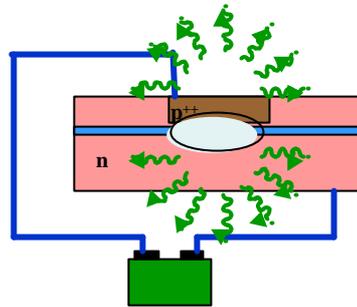
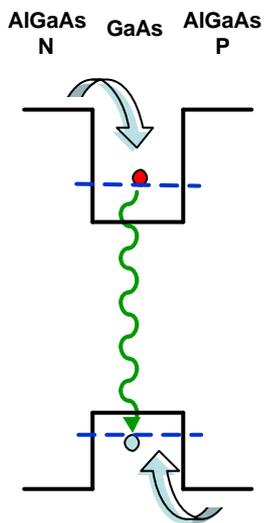


27/4

LES EMETTEURS DE LUMIERE:

Diodes électroluminescentes
 Diodes lasers

LA DIODE ELECTROLUMINESCENTE (LED)



LED : 1 électron \rightarrow 1 photon
soit 1 Amp \rightarrow 1 Watt

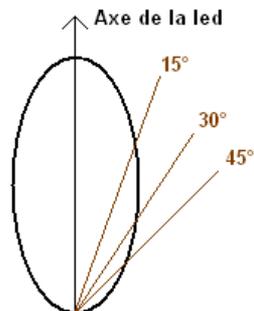
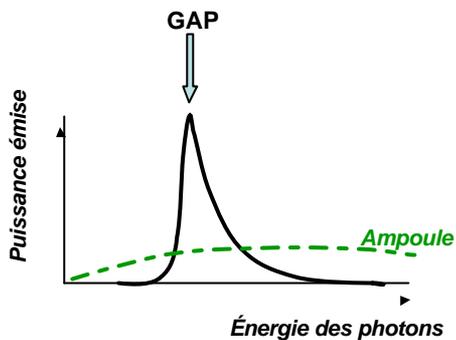
Ampoule : 1 Amp \rightarrow 0,1 Watt

Émission spontanée

ONERA

29/40

CARACTERISTIQUES DES DIODES ELECTROLUMINESCENTES



Caractéristiques

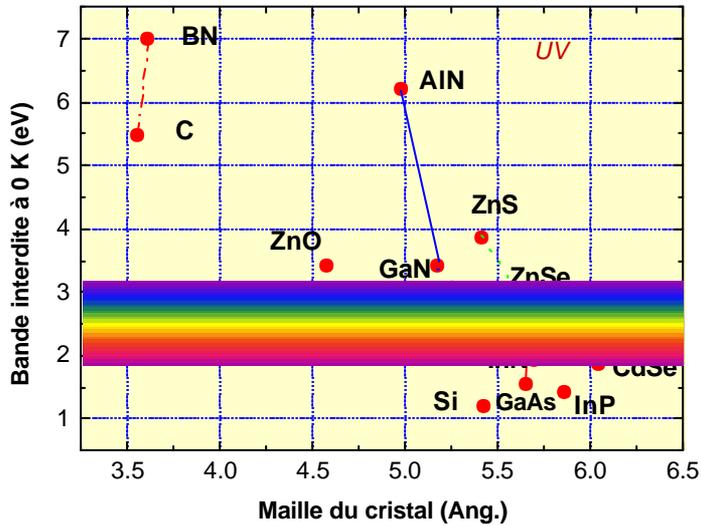
- Large spectre émis
- Faisceau assez divergent
- Fréquence de modulation faible (≈ 100 MHz)
- Technologie planaire \rightarrow faible coût

Applications

- Commandes à distance (zappette, automobile, ...)
- Panneau d'affichage, feux
- Réseaux locaux de télécom
- Révolution de l'éclairage

30/40

COULEURS DES DIODES ELECTROLUMINESCENTES



31/40

ONERA

LES AVENTURES DE LA DIODE BLEUE

- 1974 : Découverte de l'électroluminescence de GaN dans le bleu
- 1974- 1984 : Recherche de dopants *p* de GaN
- 1980 : Article théorique « *on the impossibility to p-dope wide bandgap materials* »
- 1984-1993 : Fin des recherches sur GaN
- 1984-1993 : Recherche de Nakamura à la société Nichia du dopage *p* de GaN
- 1993 : Découverte du dopage de GaN par Mg !!!
- 2005 : Marché mondial de plusieurs milliards d'Euros



Nakamura



Avant la découverte de Nakamura



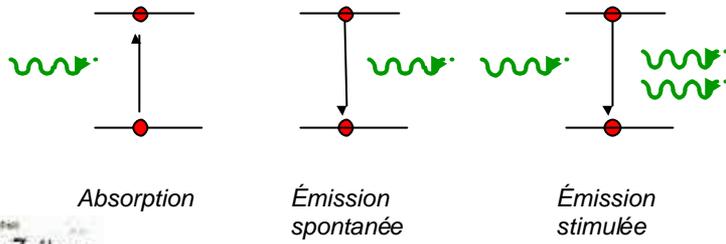
Après la découverte de Nakamura

MORALE DE CETTE HISTOIRE ????

32/40

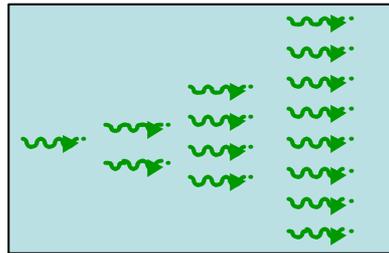
ONERA

L'ÉMISSION STIMULÉE



Albert Einstein
1917

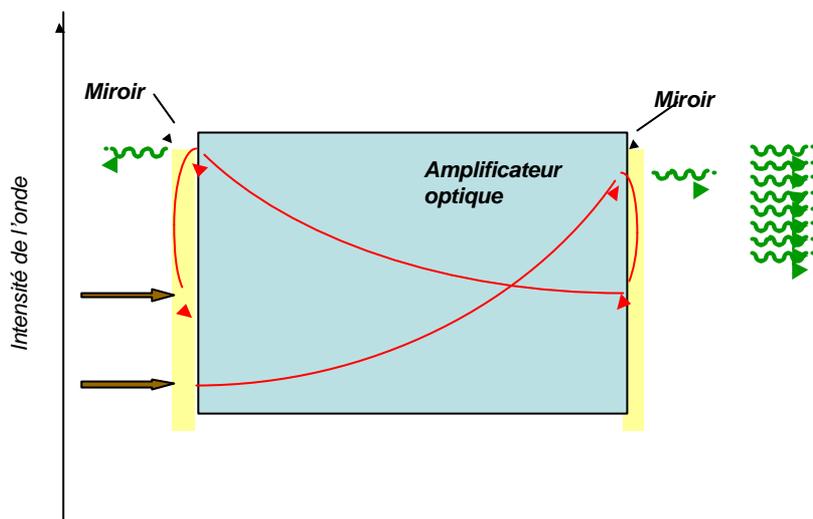
33/40



Amplification
optique

ONERA

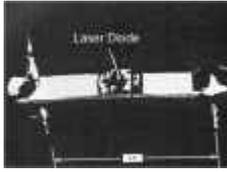
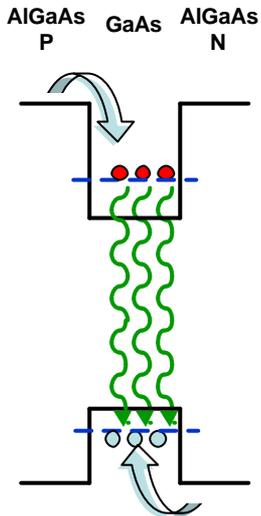
L'OSCILLATION LASER



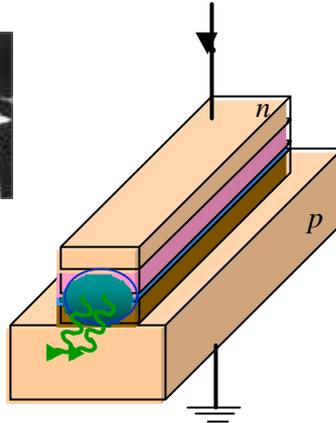
34/40

ONERA

LE LASER A SEMICONDUCTEUR



General electric
1968

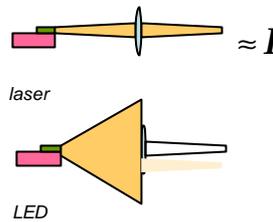
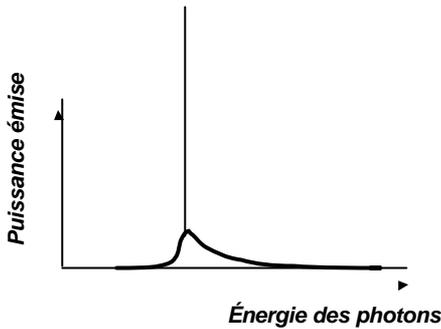


John von Neuman
1952



35/40

LES CARACTERISTIQUES DU LASER A SEMICONDUCTEUR



Caractéristiques

- Spectre émis très pur
- Faisceau très fin
- Fréquence de modulation élevée (> 30 GHz)
- Technologie non planaire → coût élevé

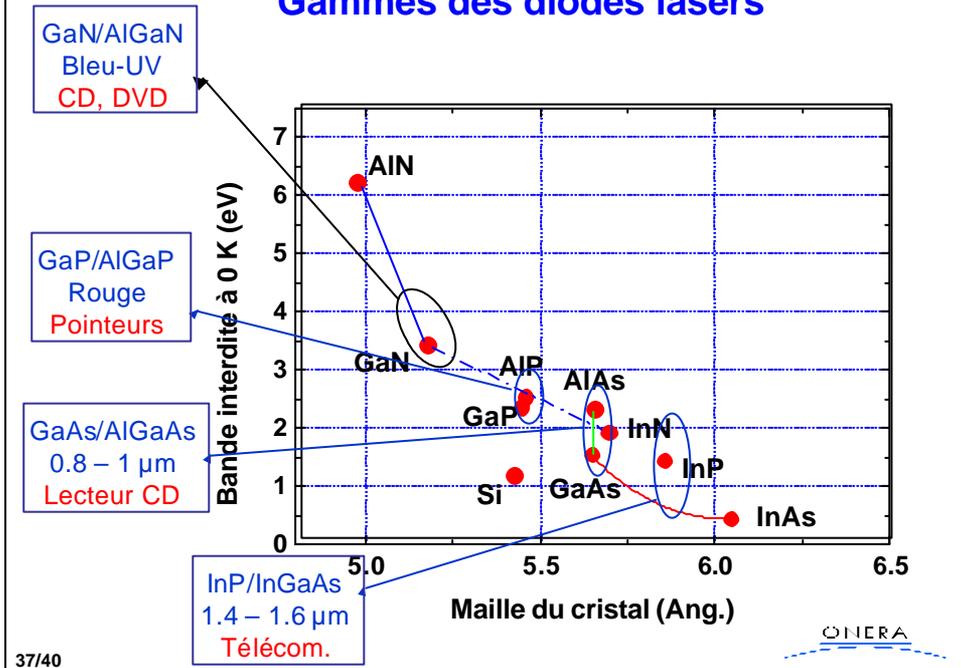
Applications

- Télécommunications
- Lecteurs de disques CD
- Pointeurs laser
-



36/40

Gammes des diodes lasers



37/40

Exemple d'applications: le lecteur de disque compact CD et DVD

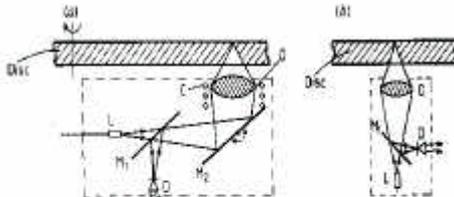
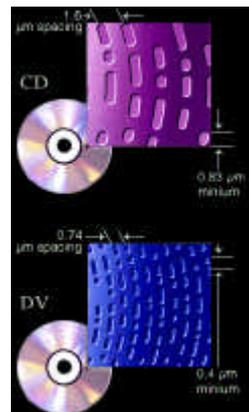
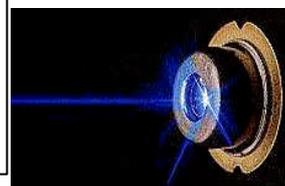


Figure 1.2 Basic player optics. (a) The beam from the laser, L, is focused by the objective, O, via the tilting mirror (M). The objective has been mounted in a loudspeaker coil, C, such that the spot is maintained in focus at the information layer. The returning light is reflected by the semitransparent mirror, M₁, to the detector, D. The whole arrangement slides radially under the disc. (b) Compact set-up (finger) without tilting mirror. The whole finger follows the small high frequency track displacements.



		
Longueur d'onde	785 nm	405 nm
Capacité de stockage	0.15 GB/cm ²	0.6 GB/cm ²
Encyclopédia Univ.	0.6 m ²	0.15 m ²

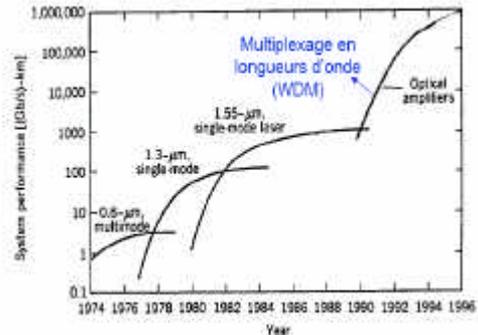
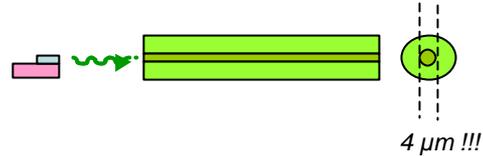
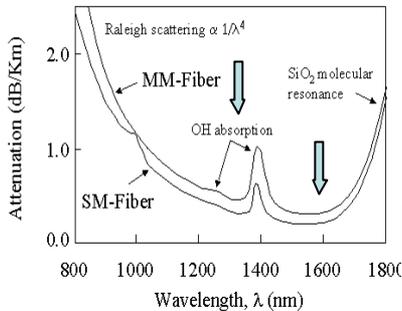


38/40

Exemple d'applications: les télécommunications optiques

Wavelength Dependence of Attenuation

Seule le laser permet de faire entrer la lumière dans un guide d'onde



Encyclopedia Universalis

»
1 000 GigaBit en 1/10 s sur 3000 km

39/40

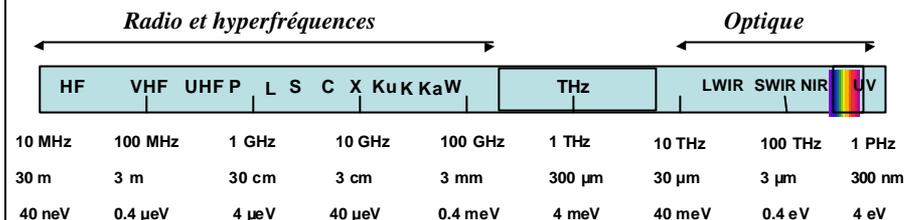
LES FRONTIERES:

Les nouvelles longueurs d'onde
Les atto-secondes
Les oscillateurs paramétriques optiques
Les cristaux photoniques
La nano-optique

....

40/40

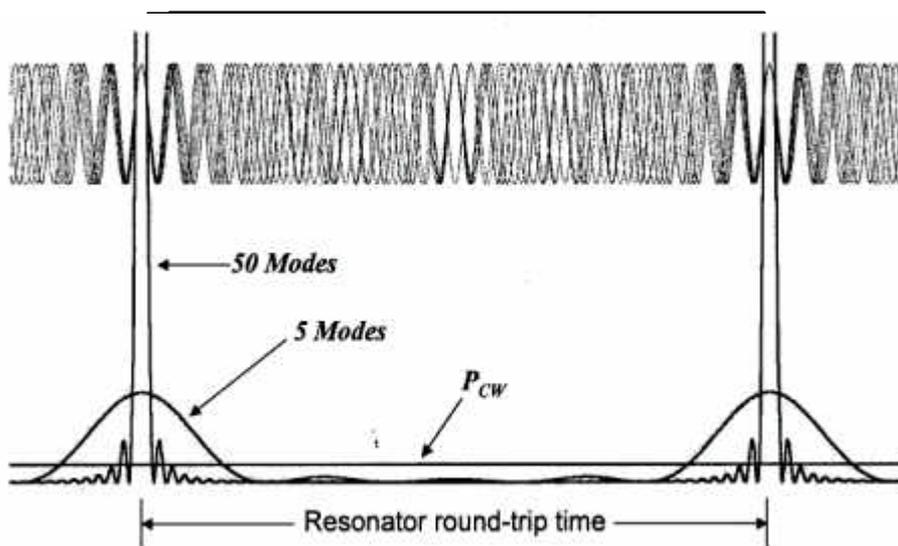
Une terra incognita: les térahertz



OTERA
Vue téraHertz d'un porteur de couteau (Jephterson Lab)

41

Les atto-secondes (0,000000000000000001 s)



M. Didomenico, J. Appl. Phys. Lett. 35, 2870 (1964); L. Hargrove et al., Appl. Phys. Lett 5, 4 (1964)

42/40

ONERA