

Ingénierie optique

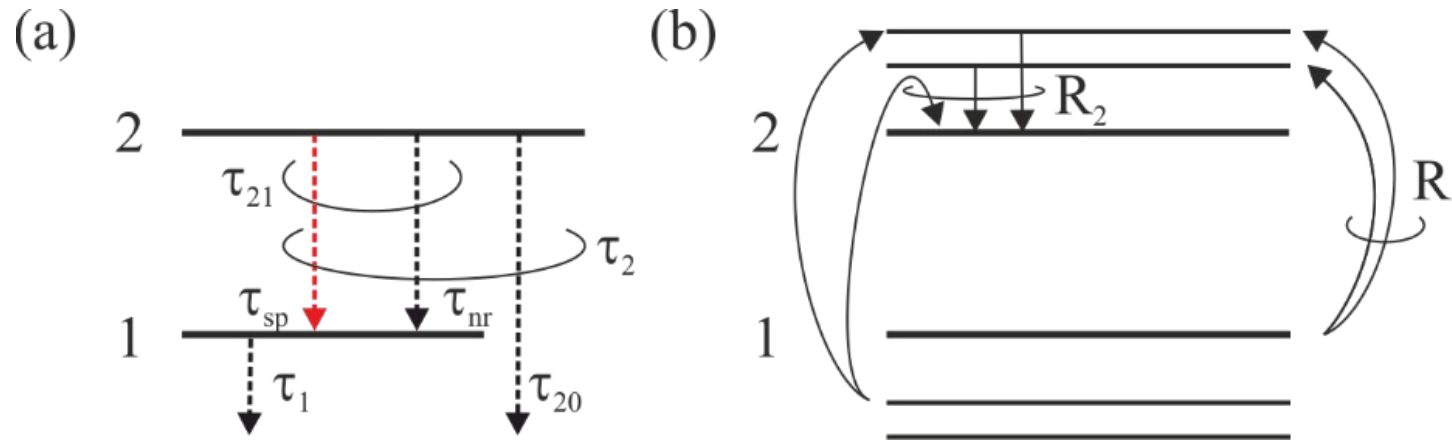
Semaine 13 – partie 1

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



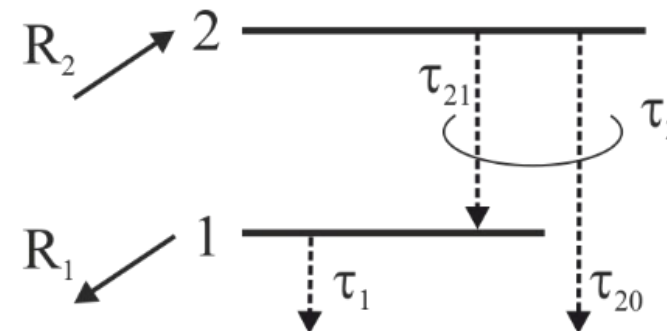
Rate equations

$$[\tau] = \text{s}$$



- On peut atteindre un état d'équilibre pour les populations des niveaux 1 et 2 en amenant des électrons vers le niveau 2 et en enlevant des électrons du niveau 1
- Différence de population: $N = N_2 - N_1$

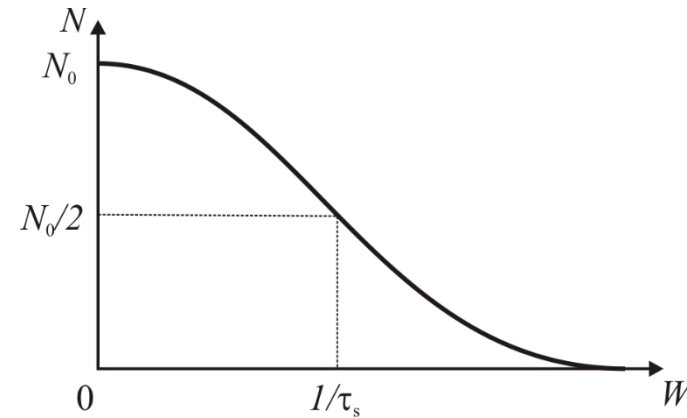
$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= R_2 - \frac{N_2}{\tau_2} \\ \frac{dN_1}{dt} &= -R_1 - \frac{N_1}{\tau_1} + \frac{N_2}{\tau_{21}} \end{aligned}$$



Rate equations

$$[W_i] = \text{s}^{-1}$$

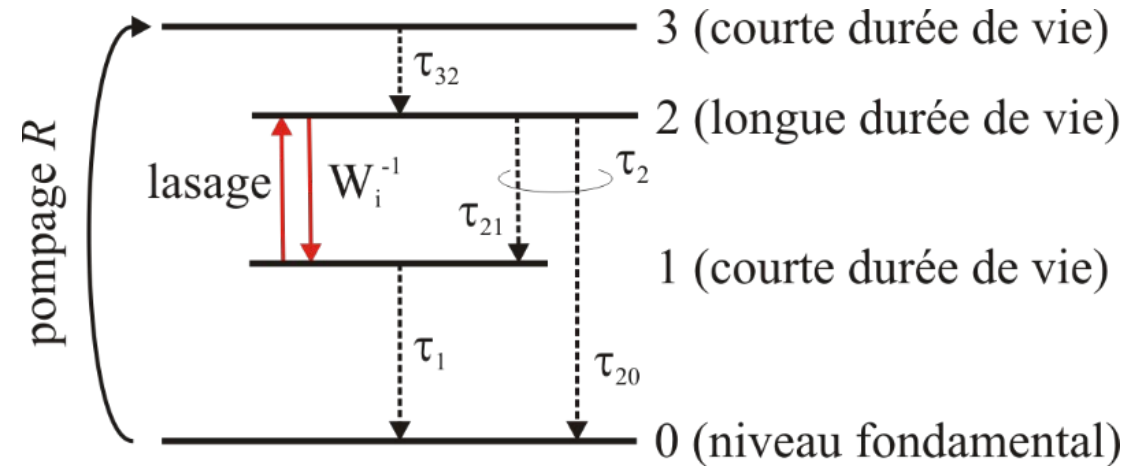
$$[\tau] = \text{s}$$



- Absorption et émission stimulée ont la même probabilité $P_{\text{ab}} \equiv P_{\text{st}} \equiv W_i = \phi\sigma(\nu)$
- La différence de population diminue en présence de radiation (avec émission stimulée et absorption)
- Lorsque l'interaction entre les deux niveaux augmente (W_i grand), alors $N \rightarrow 0$ et il ne peut plus y avoir de lasage
- τ_s représente la constante de temps de saturation et joue un rôle important dans la dynamique du laser

Modèle à 4 niveaux – Pompage

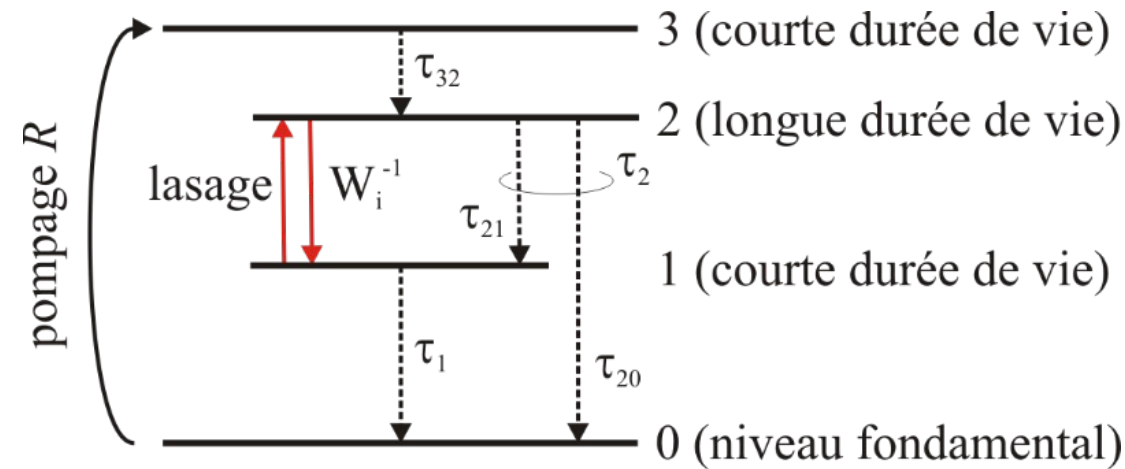
- Bien que le milieu actif puisse avoir de nombreux niveaux électroniques, un laser est bien décrit avec un modèle à 4 niveaux:



- A température ambiante le niveau 2 n'est pas peuplé, il faut réaliser une inversion de population: apporter de l'énergie soit avec une lumière extérieure, soit avec un courant extérieur
- On ne peut pas pomper directement dans le niveau 2, on doit passer par un niveau supplémentaire 3; cependant, le niveau 3 a une durée de vie très courte (c'est comme si on pompait directement dans le niveau 2)

Modèle à 4 niveaux – Pompage

$$[\tau] = \text{s}$$



- La décroissance non-radiative $2 \rightarrow 1$ est négligeable et $R_1=0$
- Différence de population à l'équilibre (équations de taux avec dérivées nulles)

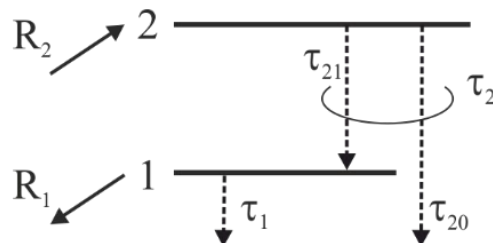
$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 - \frac{N_2}{\tau_2}$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_1 - \frac{N_1}{\tau_1} + \frac{N_2}{\tau_{21}}$$

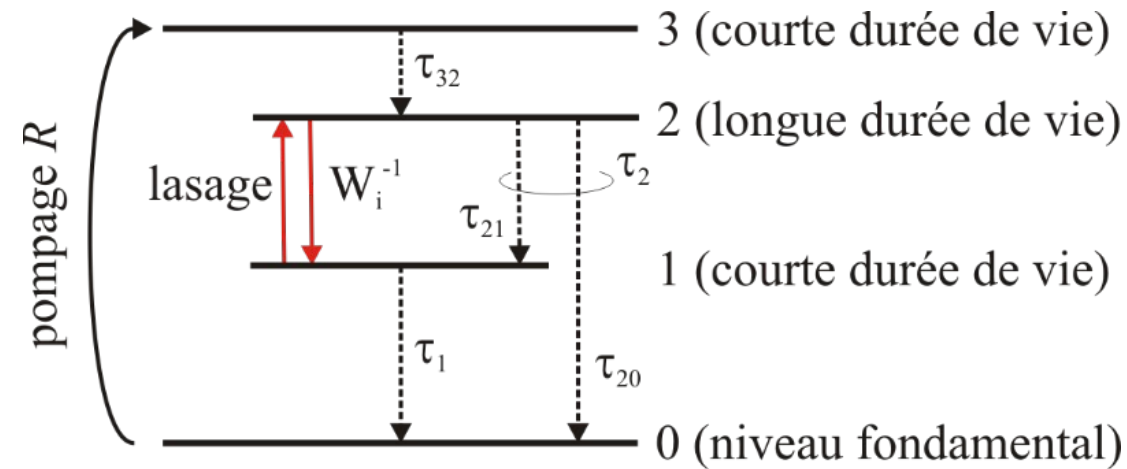
$$N_0 = N_{\text{equilibre}} = N_2 - N_1$$

$$N_0 = R_2 \tau_2 \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_{21}} \right) + R_1 \tau_1$$

$$N_0 = R_2 \tau_2 \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_{21}} \right)$$



Modèle à 4 niveaux – Pompage



- On a des approximations pour la différence de population à l'équilibre en absence de lasage N_0 et la constante de temps de saturation τ_s :

$$N_0 \approx \frac{t_{sp} N_a W}{1 + t_{sp} W}$$

$$\tau_s \approx \frac{t_{sp}}{1 + t_{sp} W}$$

- Ces deux paramètres dépendent essentiellement du pompage W

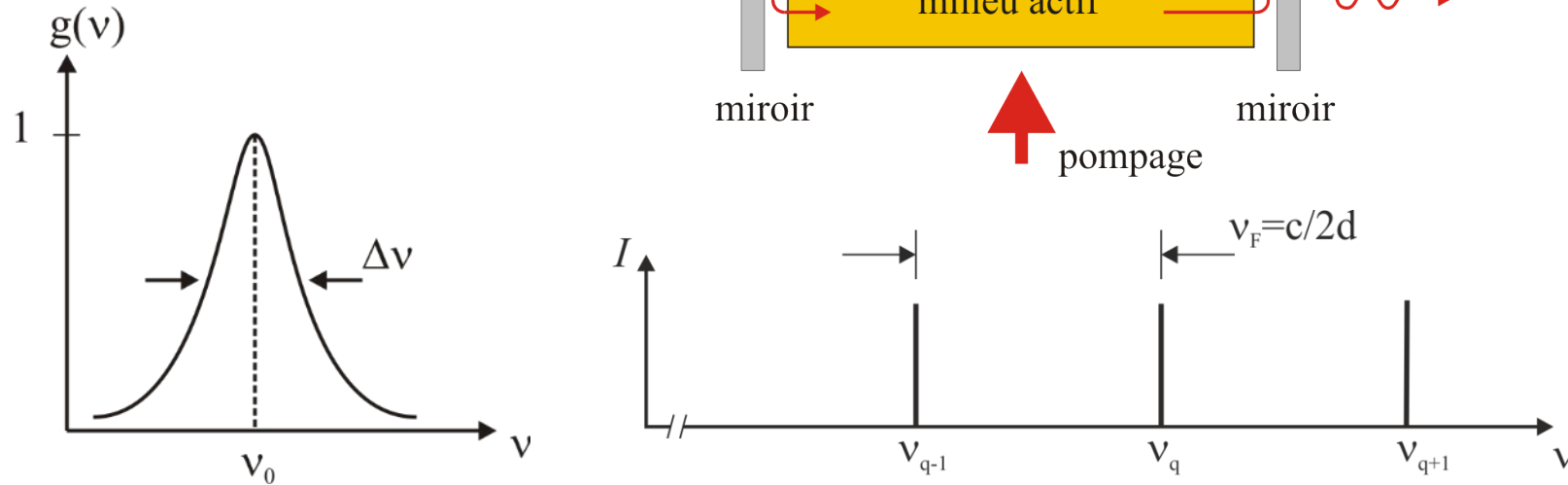
Ingénierie optique

Semaine 13 – partie 2

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

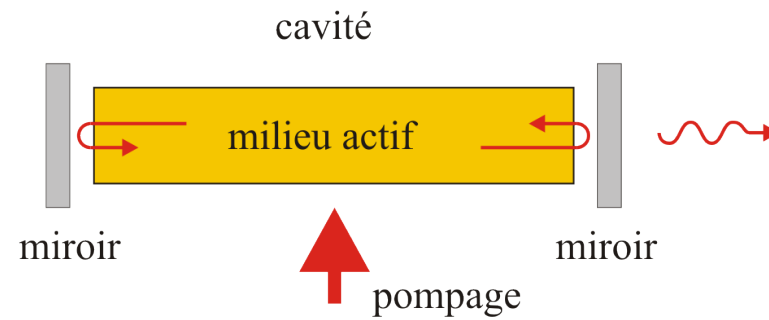


Système laser



- Nous combinons maintenant la courbe de gain des atomes et les modes supportés par la cavité
- Gain par unité de longueur: $\gamma(\nu) = N_0\sigma(\nu) = \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}}g(\nu)$ (N_0 différence de population)
- Au fur et à mesure que la densité de flux de photons augmente, le laser entre dans un régime non-linéaire dans lequel il sature et le gain diminue
- Le processus d'amplification fait décroître la différence de population

Système laser – gain

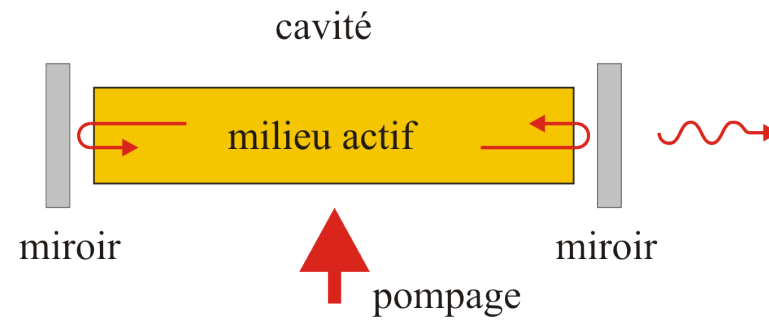


- Le coefficient de gain diminue avec l'augmentation de la densité de flux de photons

$$\gamma(\nu) = N\sigma(\nu) = \frac{\gamma_0(\nu)}{1 + \phi/\phi_s(\nu)}$$

- Une phase s'ajoute aussi à l'onde se propageant dans le système $\varphi(\nu) = \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu} \gamma(\nu)$
(cette phase provient de la dispersion des matériaux et du gain qui dépendent de la fréquence)
- Saturation de la densité de flux de photons $\phi_s(\nu) = [\tau_s \sigma(\nu)]^{-1}$

Système laser – pertes



- Pertes pendant un aller-retour en tenant compte de l'absorption et de la réflectivité des miroirs:

$$\mathcal{R}_1 \mathcal{R}_2 \exp(-2\alpha_s d) = \exp(-2\alpha_r d)$$

- Le coefficient α_r prend en compte toutes les pertes (par unité de longueur); il inclut aussi les pertes liées aux miroirs
- Durée de vie des photons dans la cavité $\tau_p = 1/(\alpha_r c)$

Système laser – gain + pertes + cavité

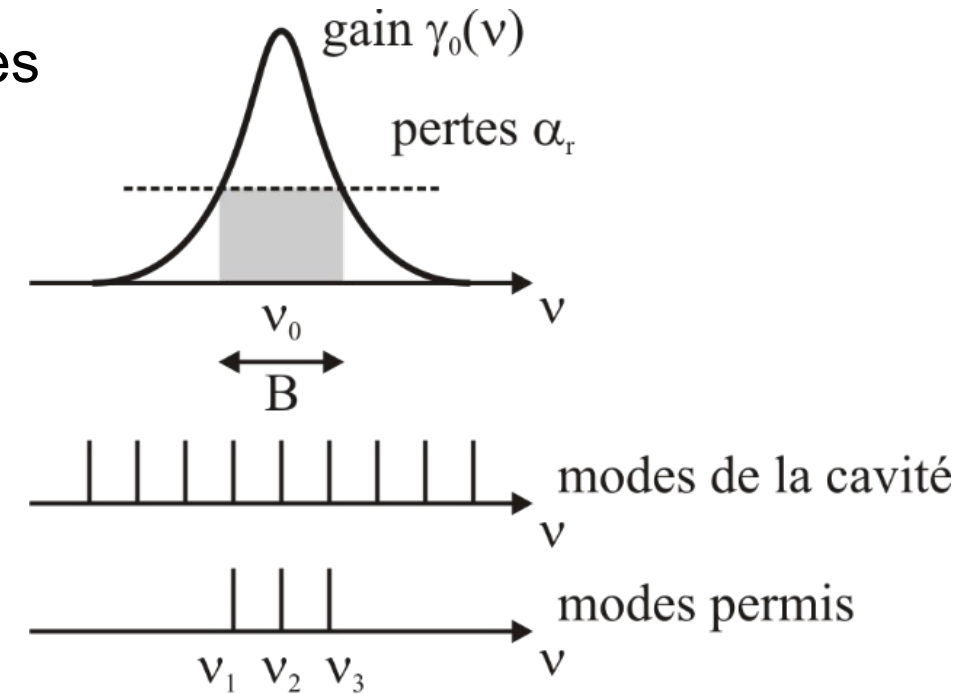
- Au seuil (*threshold*) le gain doit compenser les pertes
- Pour avoir lasage, il faut $\gamma_0(\nu) > \alpha_r$

- Seuls quelques modes remplissent cette condition

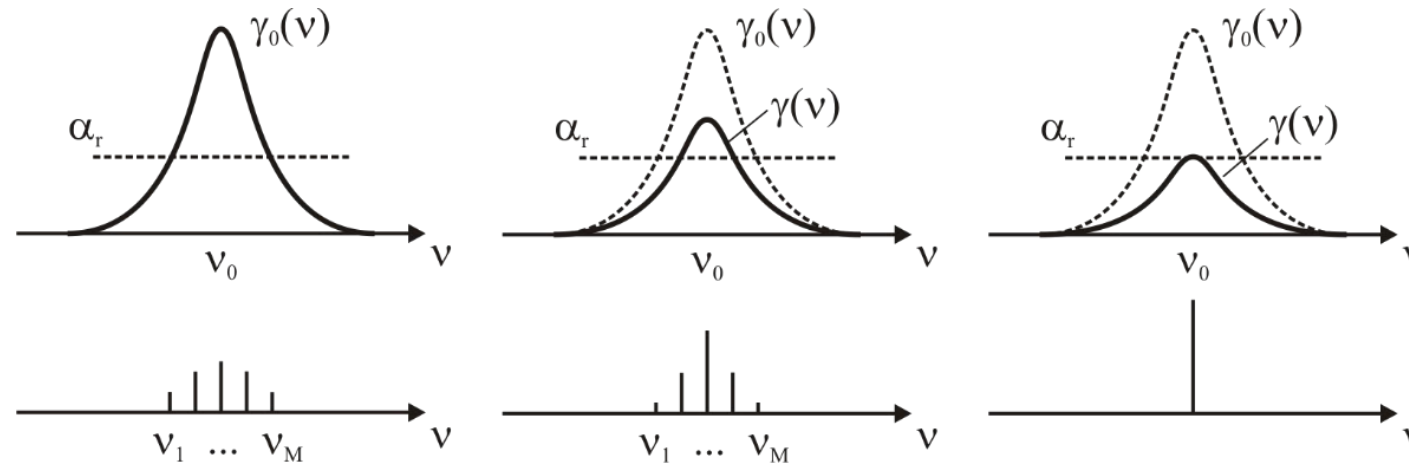
$$M \approx \frac{B}{\nu_F}$$

- Différence de population au seuil:

$$N_t = \frac{8\pi}{\lambda^2 c} \frac{t_{sp}}{\tau_p} \frac{1}{g(\nu)} \quad (\text{dépend de la fréquence et du gain})$$



Système laser – dynamique



- Dès que le laser est enclenché la densité de flux de photons augmente
- Les modes dont l'énergie est proche de ν_0 croissent plus rapidement car ils sont favorisés par le gain
- Les photons interagissent avec le milieu et réduisent le gain de façon homogène
- En général, le lasage finit par s'établir dans un seul mode

Ingénierie optique

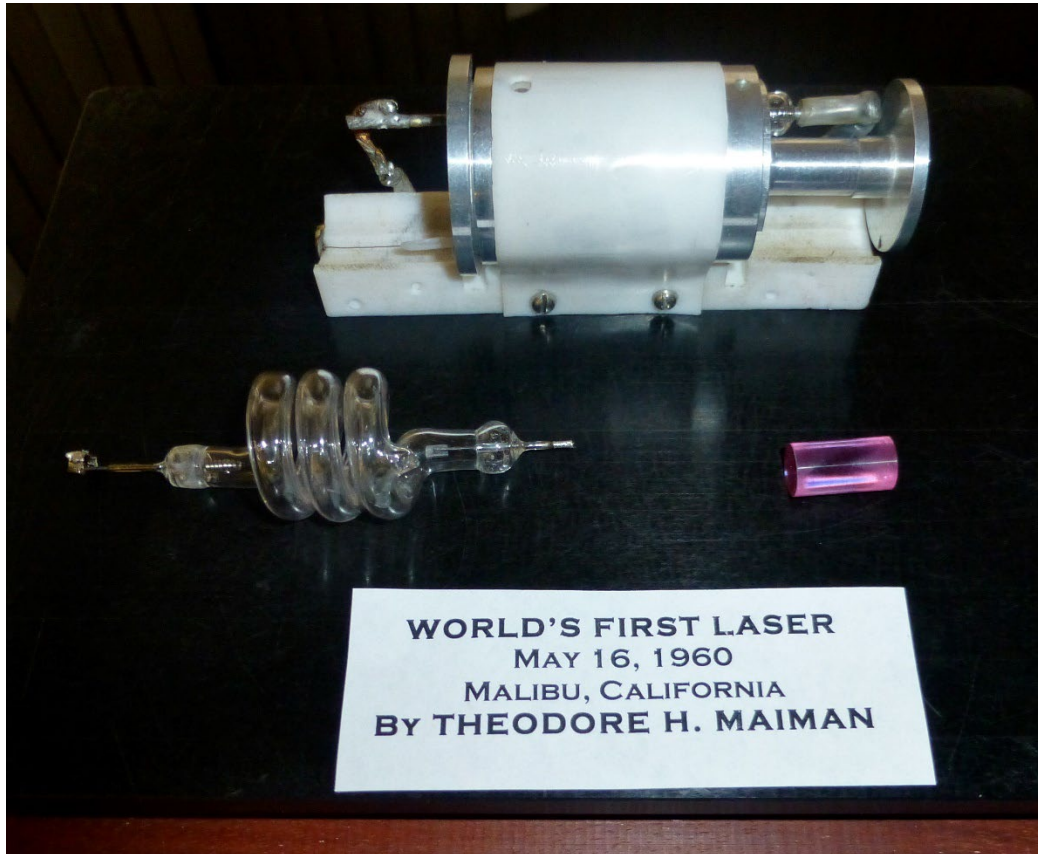
Semaine 13 – partie 3

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

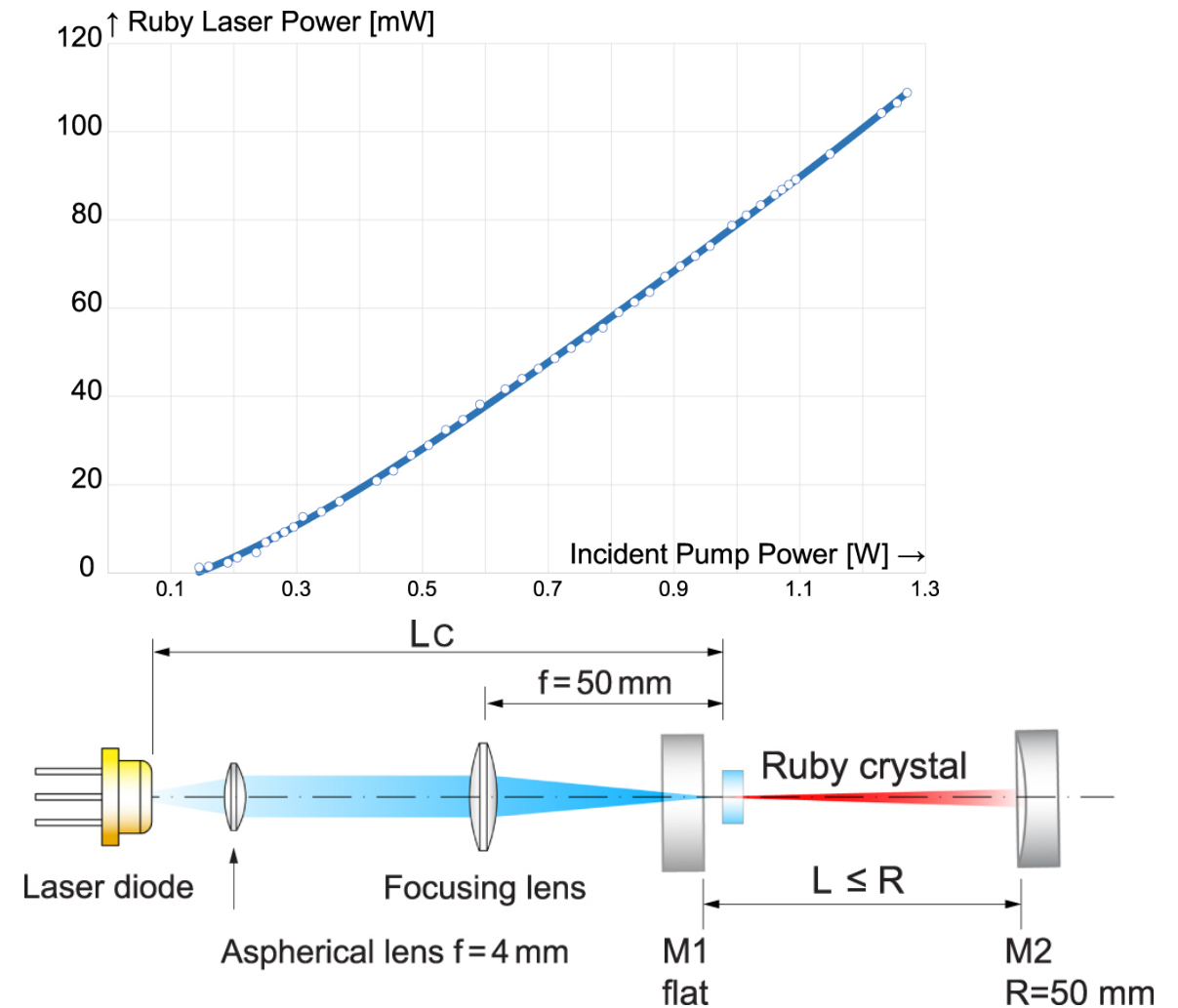


Le tout premier laser

- Laser au rubis fabriqué par Théodor Maiman, inversion de population réalisée avec une lampe flash

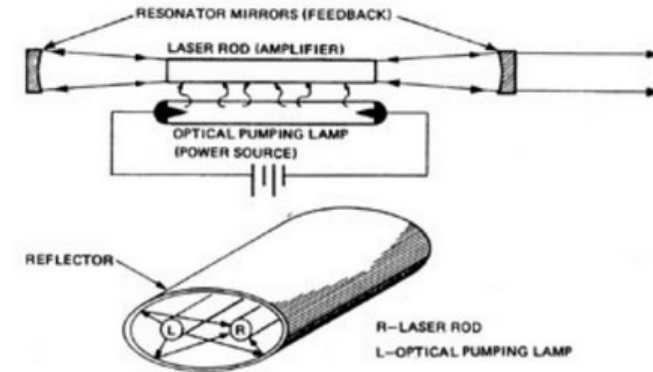
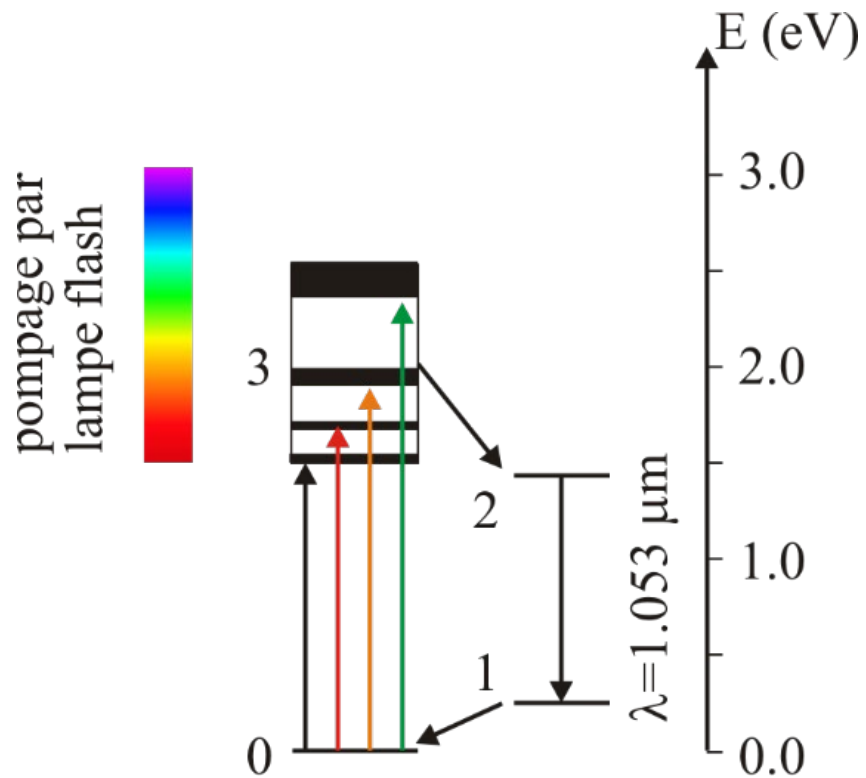


Wikimedia

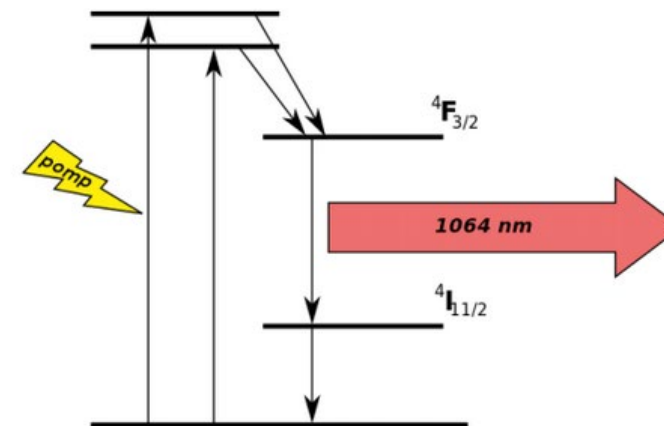


Laser Nd:YAG

- Grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$
- Pompage par lampe flash dans le niveau 3 qui comporte plusieurs bandes d'absorption:



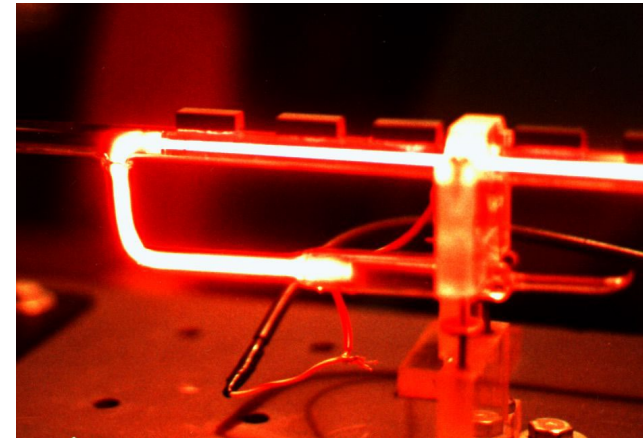
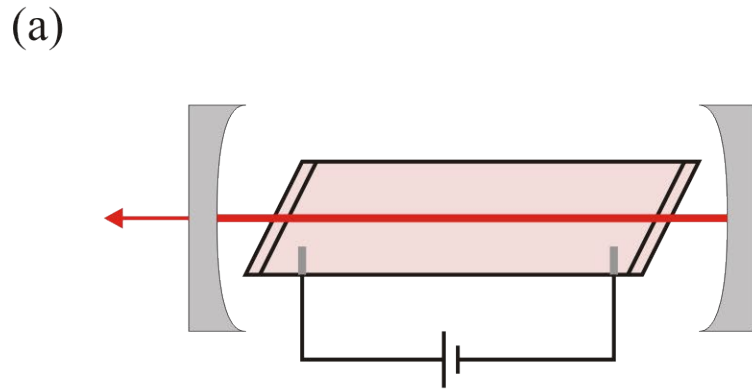
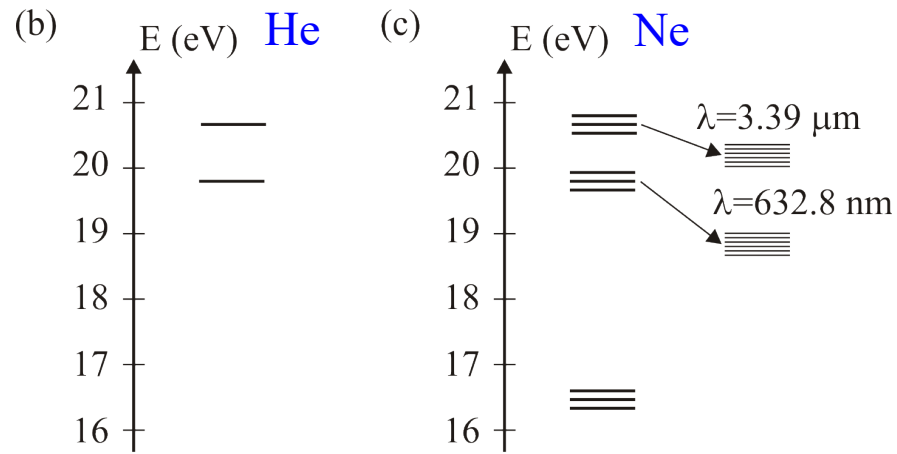
(a) Design of the cavity for the Nd:YAG laser



(b) Energy level scheme of Nd:YAG

Laser He-Ne

- Pompage by décharge électrique (comme dans un tube fluorescent)
- La cavité assure un spectre d'émission étroit, émission dans le rouge ou l'infrarouge
- Excitation des atomes He puis transfert d'énergie vers les atomes Ne

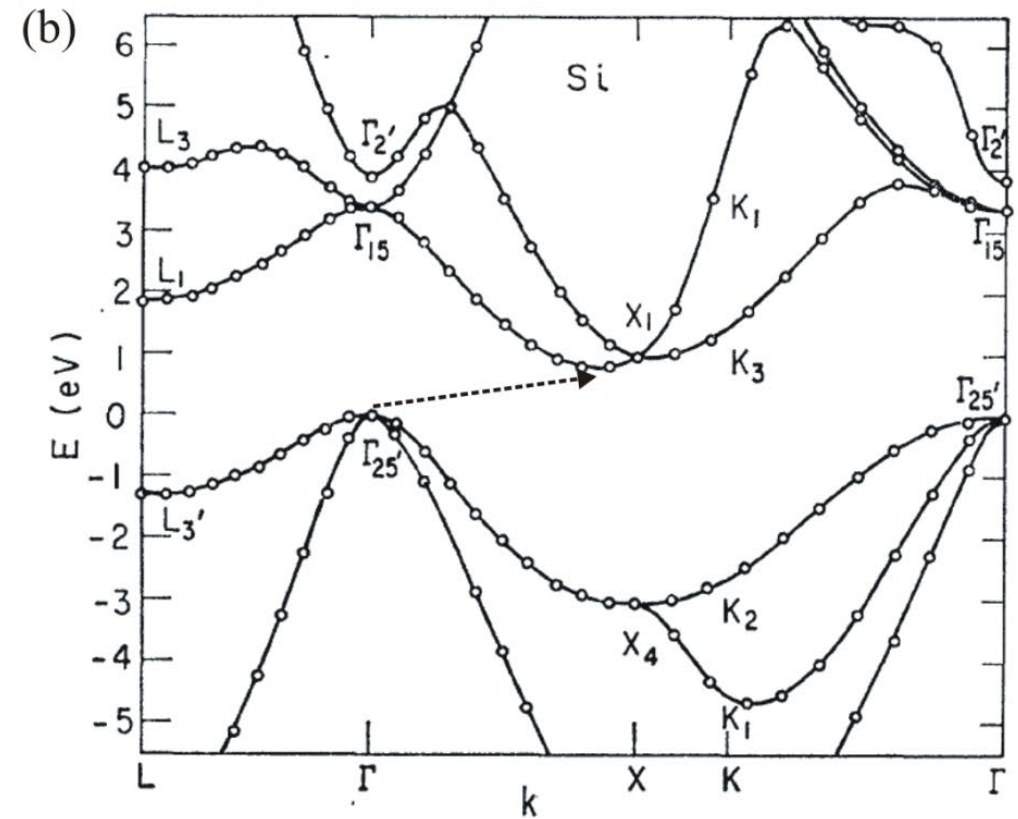
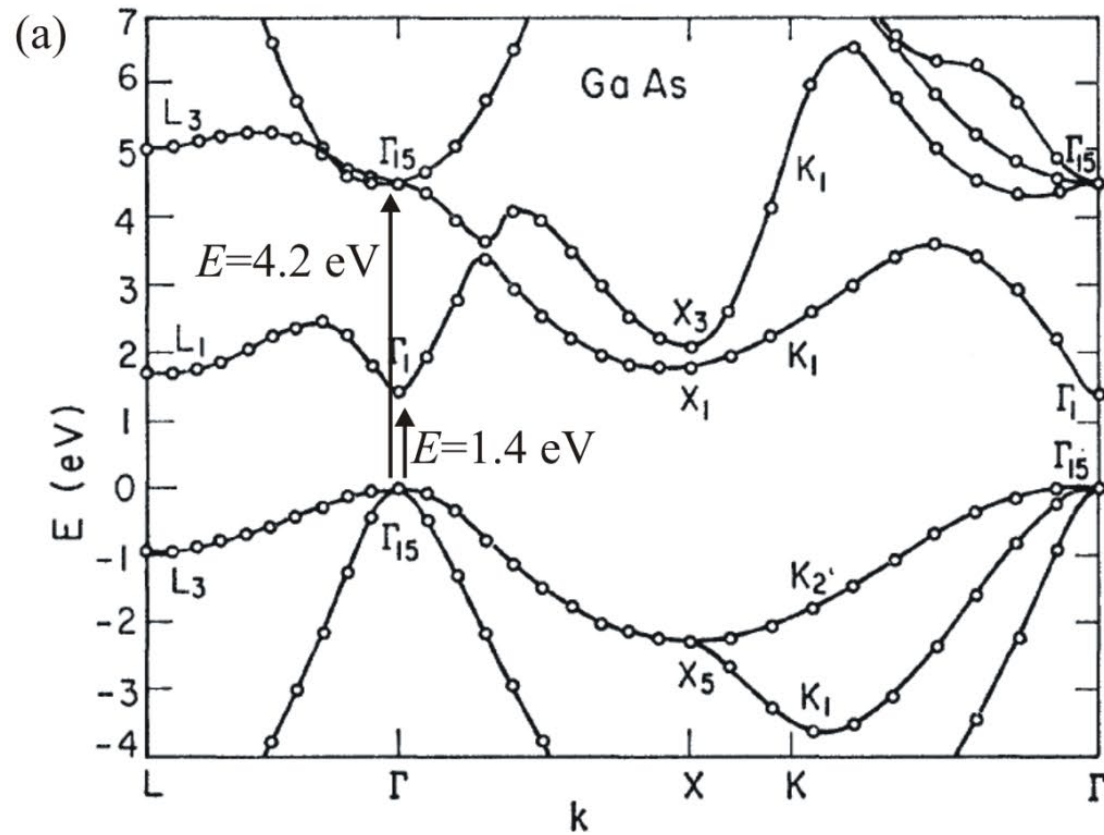


(b)



Laser à semiconducteur

- Pour avoir émission laser, il faut un semiconducteur à bandgap direct (c'est à dire où les électrons excités redescendent «directement» au niveau fondamental):



Laser à semiconducteur

- L'énergie du bandgap détermine la fréquence/longueur d'onde d'émission

Table 7.1 – Semiconducteurs avec bandgap direct (indirect), à $T = 300$ K

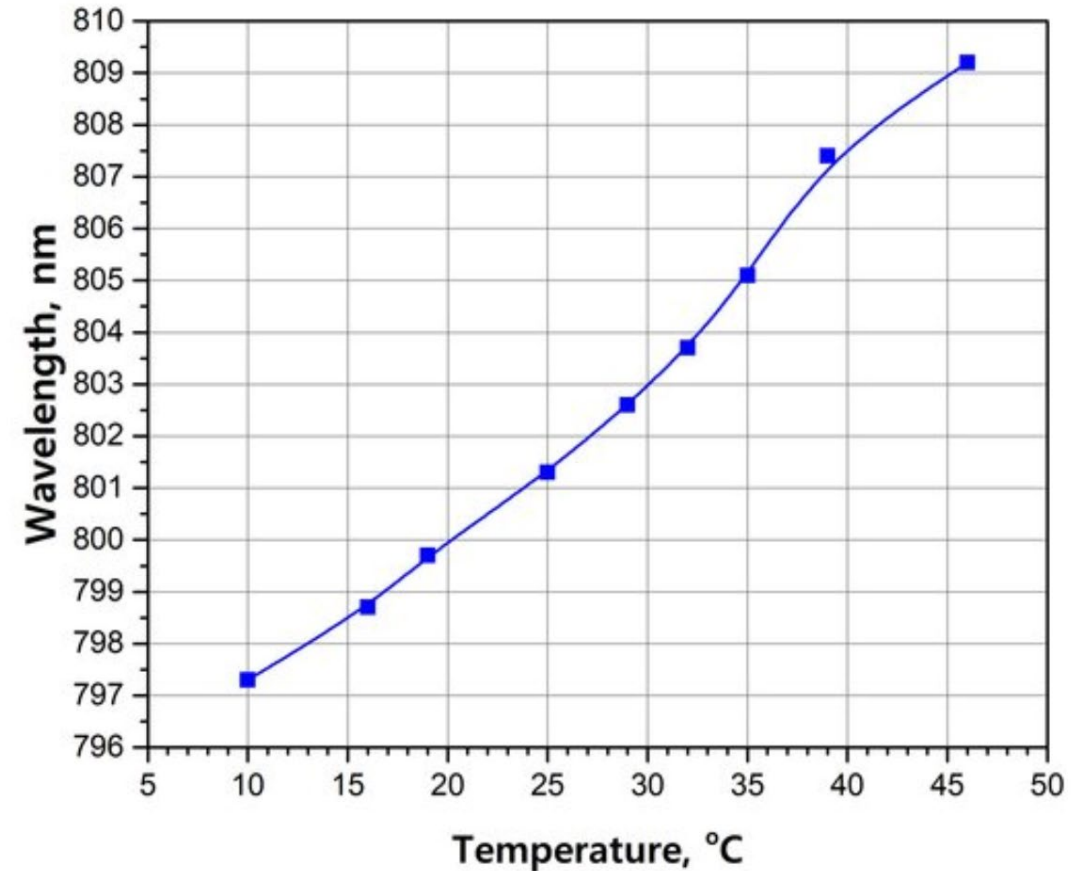
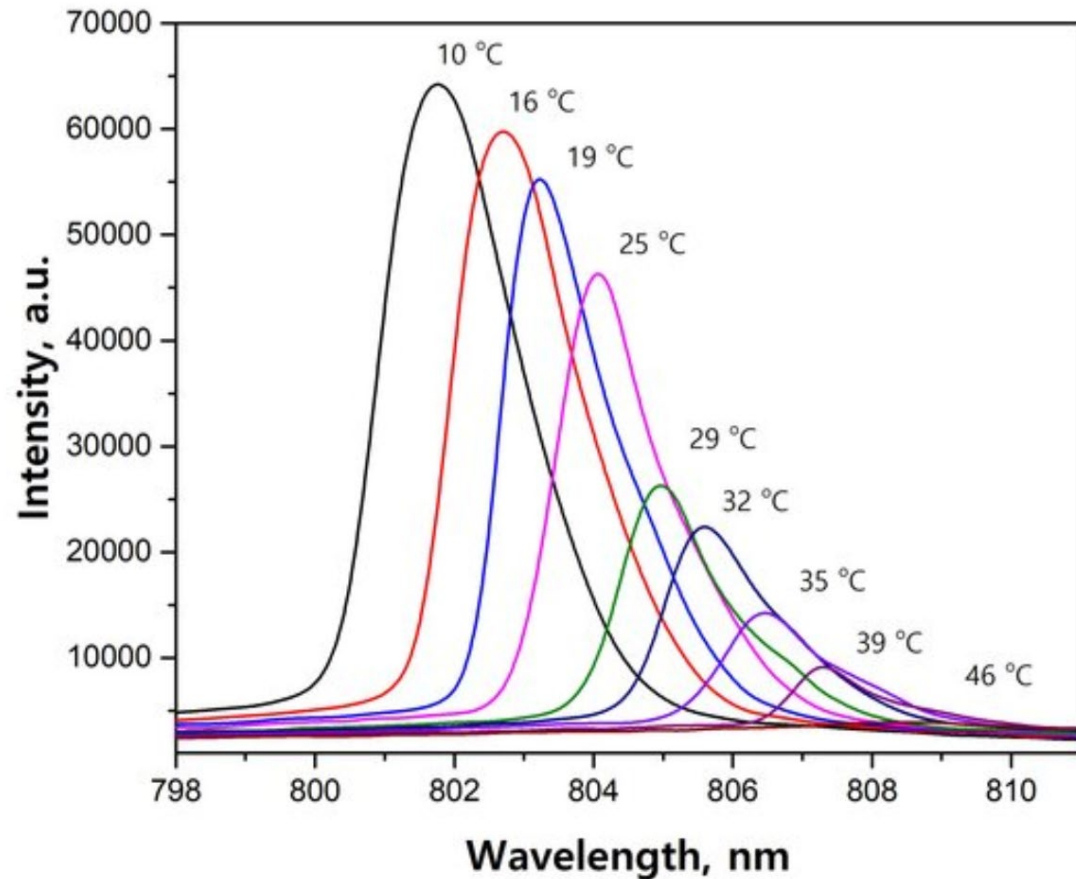
Semiconducteur	GaN	AlGaN	AlGaAs	GaInAsP	InP
$E_g(\text{eV})$	3.4	3.4 – (5.9)	1.4 – 2.2	0.7 – 2	1.28
$\lambda_0(\mu\text{m})$	0.36	(0.2) – 0.4	(0.6) – 0.9	0.6 – 1.7	1

Semiconducteur	InAs	InSb	PbSe	SnTe	PbSnTe
$E_g(\text{eV})$	0.36	0.24	0.26	0.18	0.04 – 0.2
$\lambda_0(\mu\text{m})$	3.4	5.2	4.8	6.9	6.5 – 3

- Le bandgap dépend de la température → la longueur d'onde d'émission aussi

Laser à semiconducteur

- La longueur d'onde et le courant de seuil varient avec la température

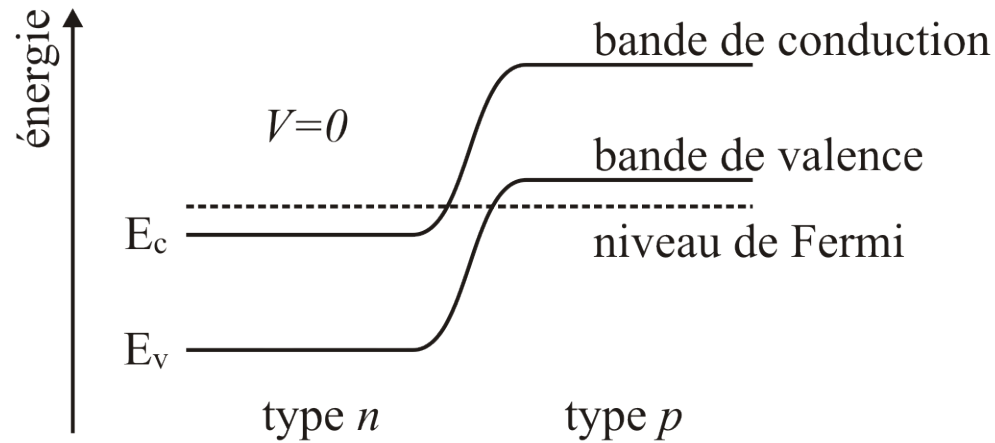


- On peut ajuster la longueur d'onde en chauffant le laser
- Il faut surtout contrôler sa température pour éviter que la longueur d'onde change!

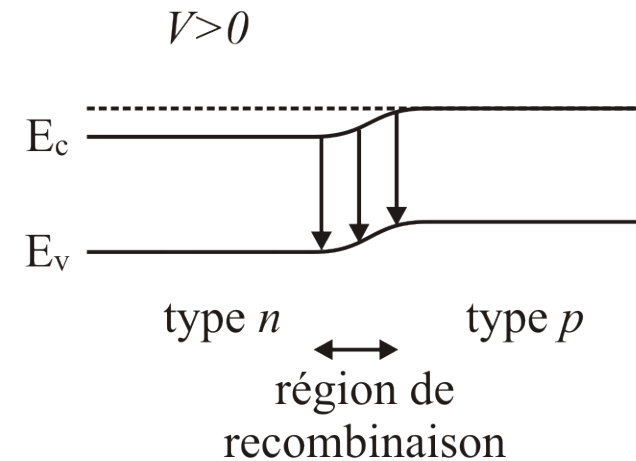
Laser à semiconducteur - Pompage

- Pompage optique ou par faisceau d'électrons (cathodoluminescence): utilisés lors du développement de lasers
- Injection directe de porteurs de charge dans une jonction $p-n$ "diode laser":

(a)

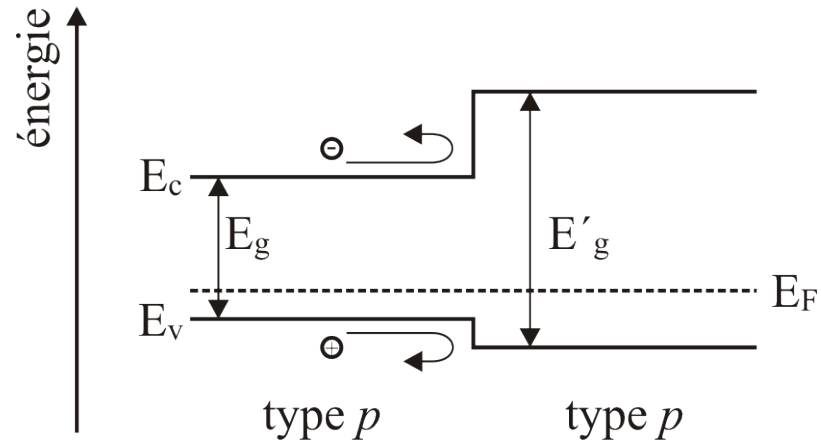


(b)

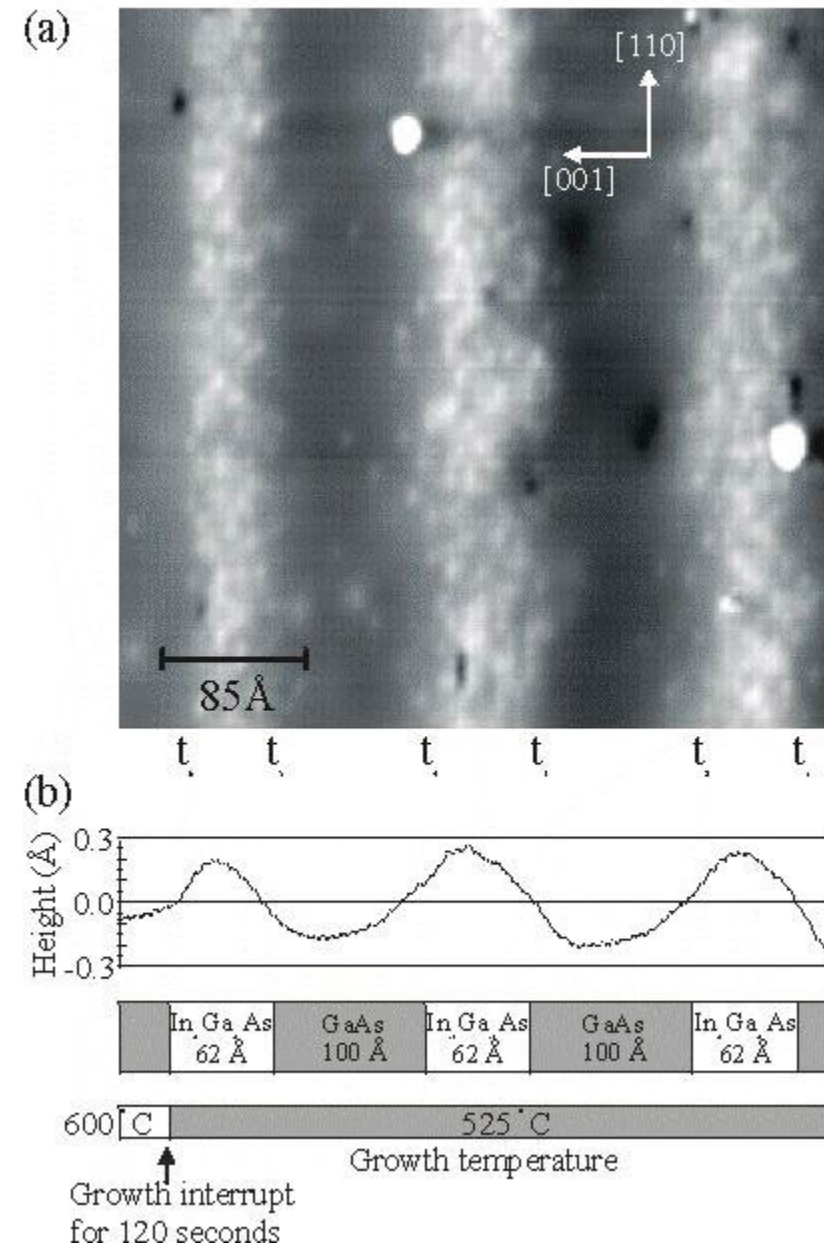


- Inconvénient: les porteurs de charge peuvent s'échapper de la région de recombinaison et ne produisent donc pas de lumière

Diode laser - Hétérostructure

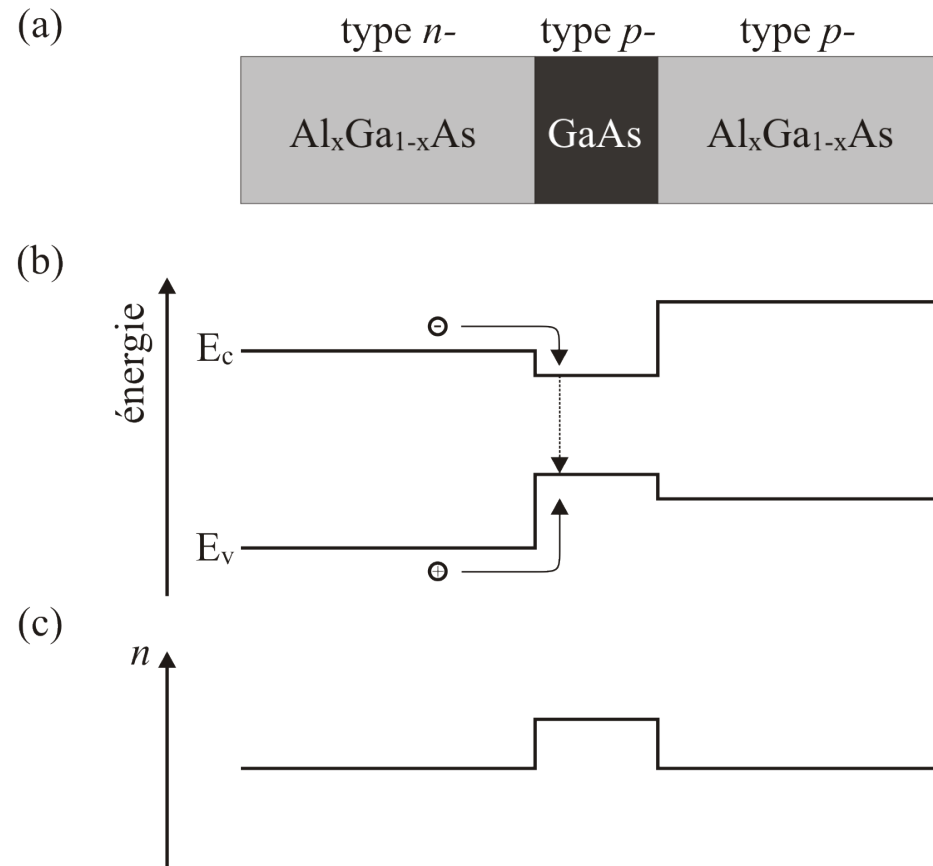


- Deux semiconducteurs avec des bandgaps différents
- Localisation des porteurs de charge à l'interface
- Réalisation par croissance épitaxiale



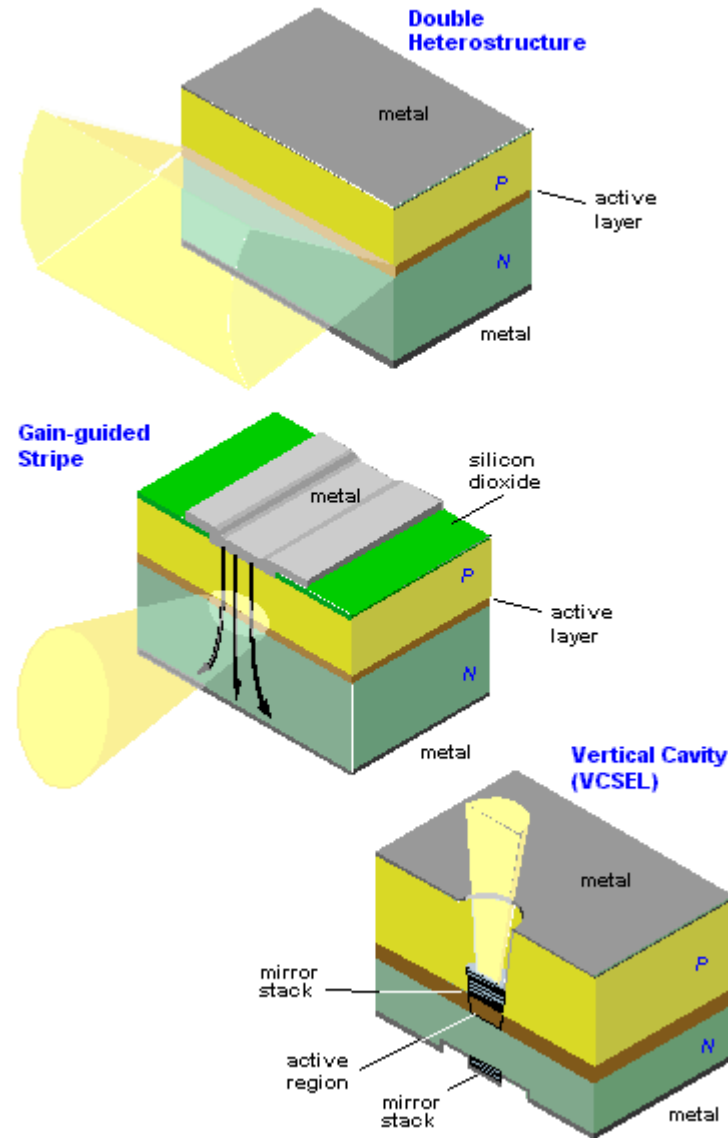
Diode laser – Double hétérostructure

- La recombinaison a lieu dans une région bien définie où le bandgap est le plus petit
- L'injection est efficace, les charges diffusent vers la région de recombinaison
- La région active sert aussi de guide d'onde (indice de refraction plus élevé)



Diode laser

From Computer Desktop Encyclopedia
© 2000 The Computer Language Co. Inc.



VCSEL

- Vertical Cavity Surface Emitting Laser
- Les miroirs de la cavité sont formés par des multicouches qui alternent des indices de réfraction hauts et bas

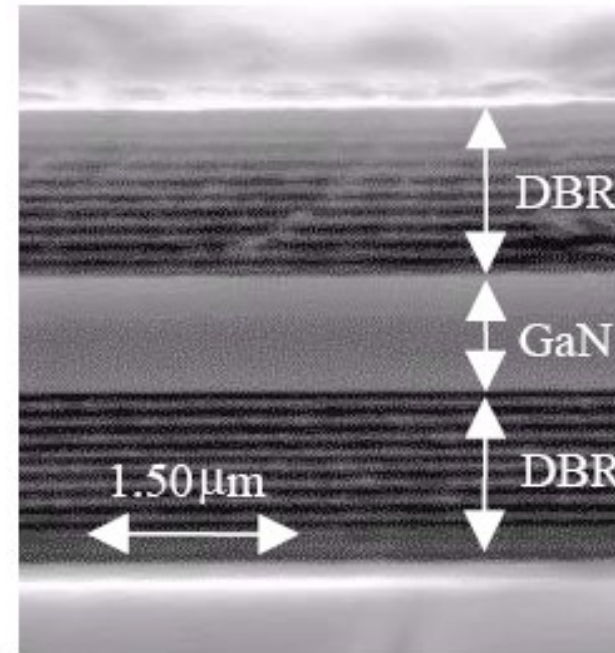
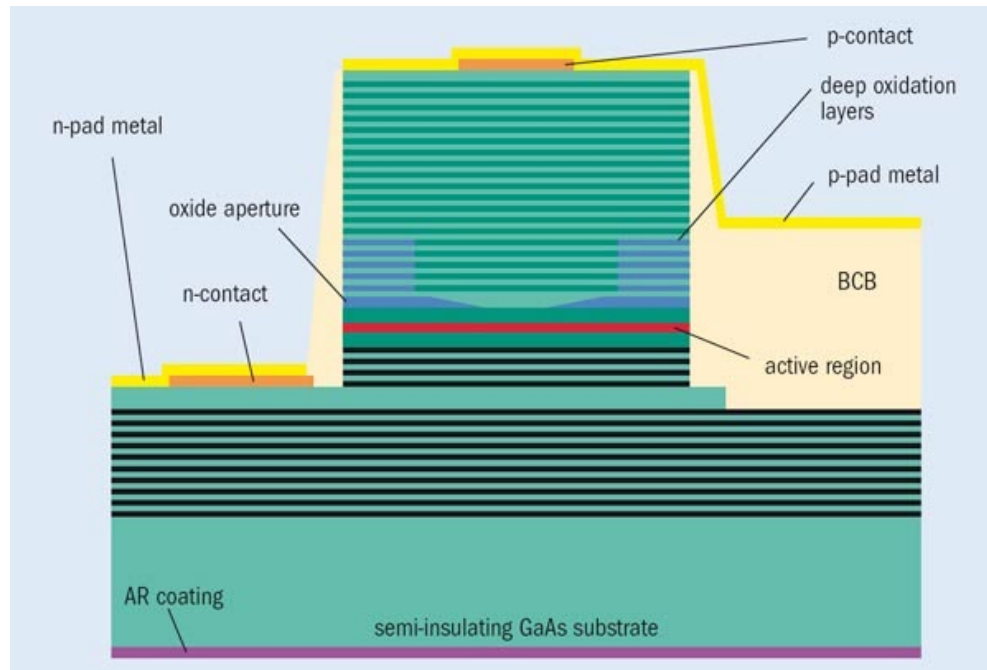


Fig. 5. GaN microcavity, $\sim 800\text{ nm}$ thick, formed by laser-lift off and ICP etching

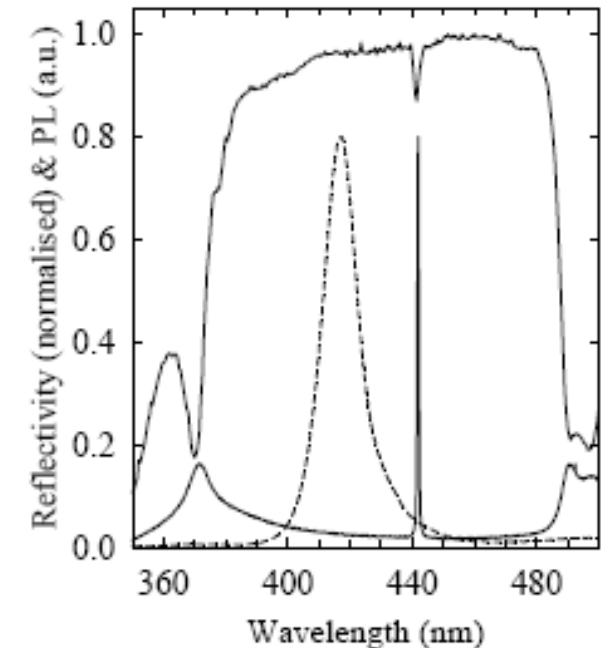
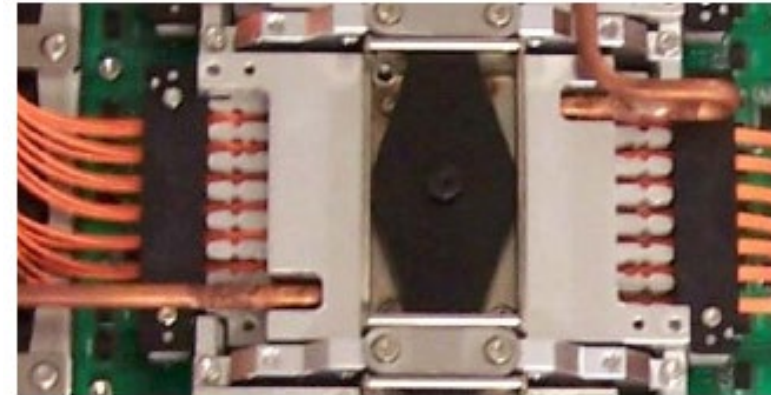
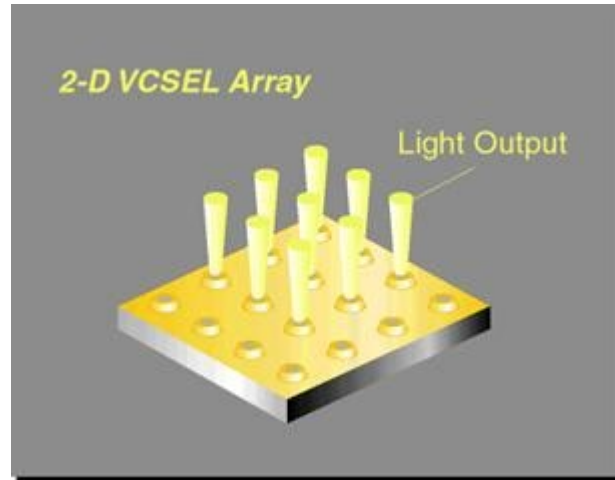


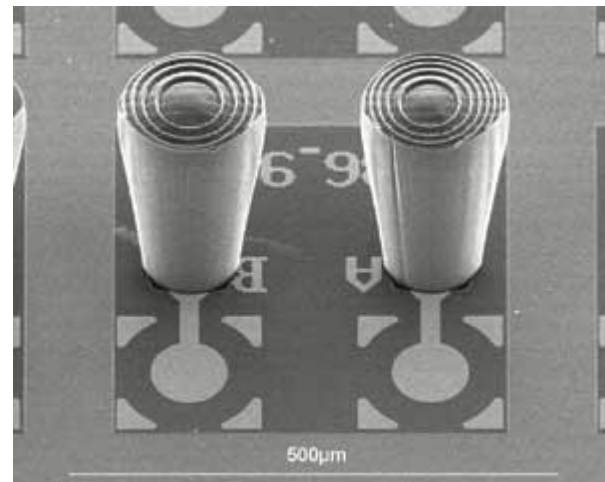
Fig. 6. RT reflectivity and PL data (solid lines) from a microcavity containing a single InGaN quantum well. The dashed line shows RT PL from the as grown wafer.

VCSEL

- Très bonnes possibilités d'intégration avec des fibres optiques

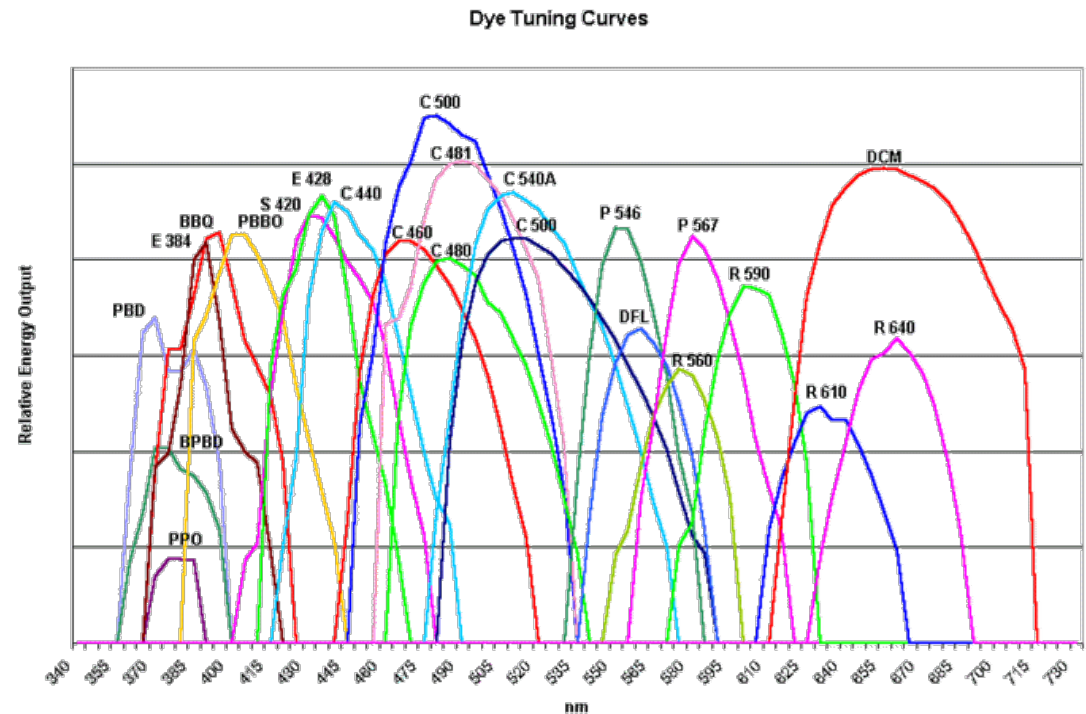
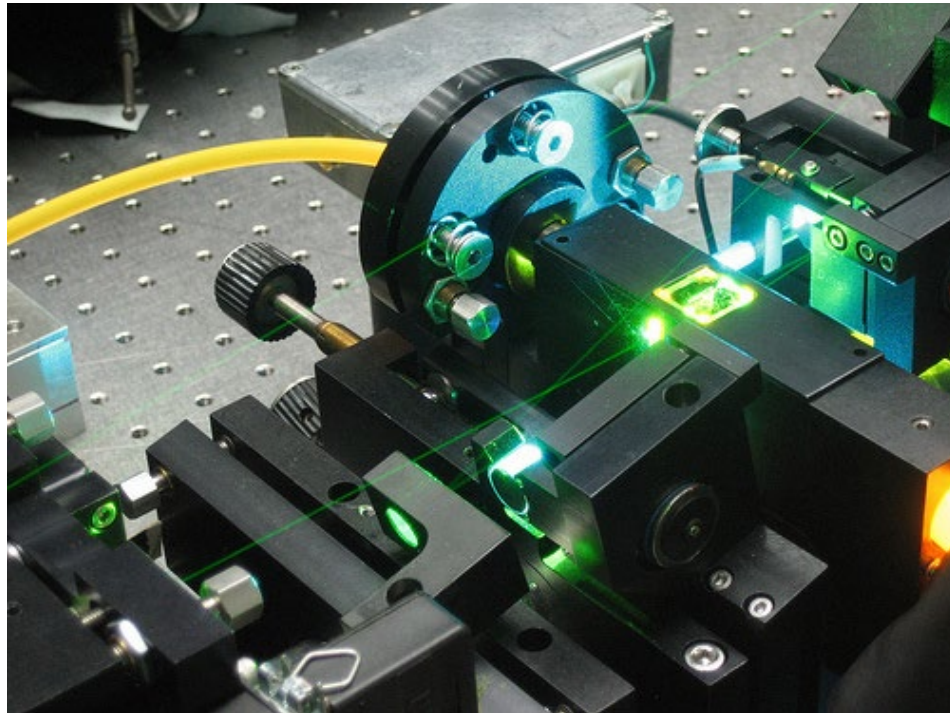


A. Benner et al., paper OTuH1, OFC 2010

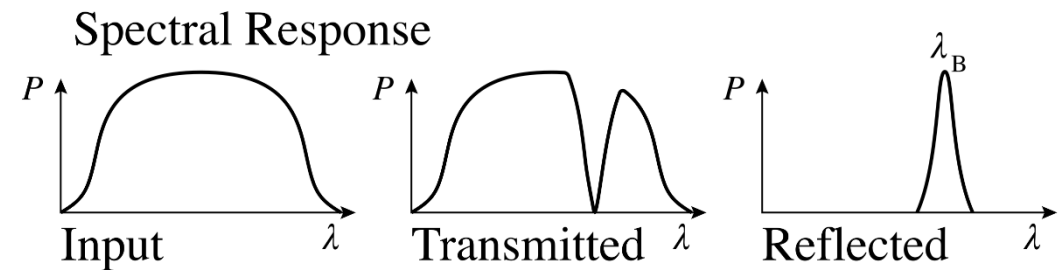
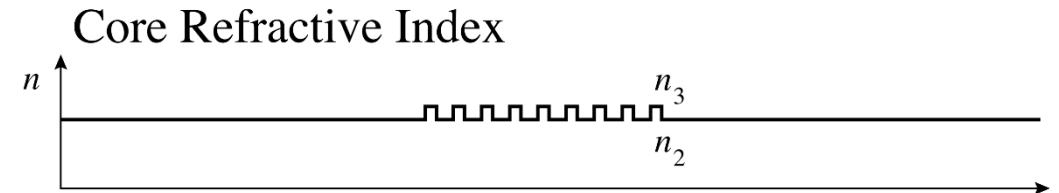
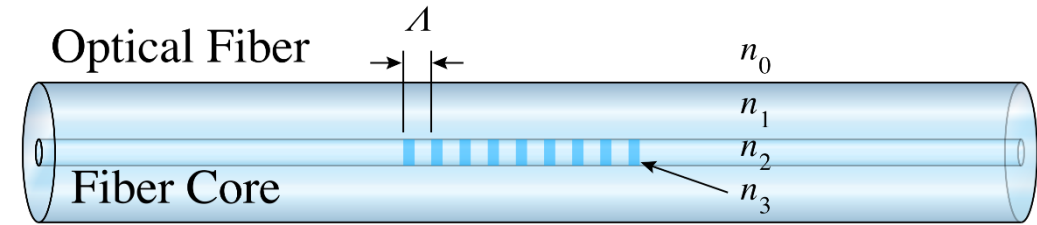
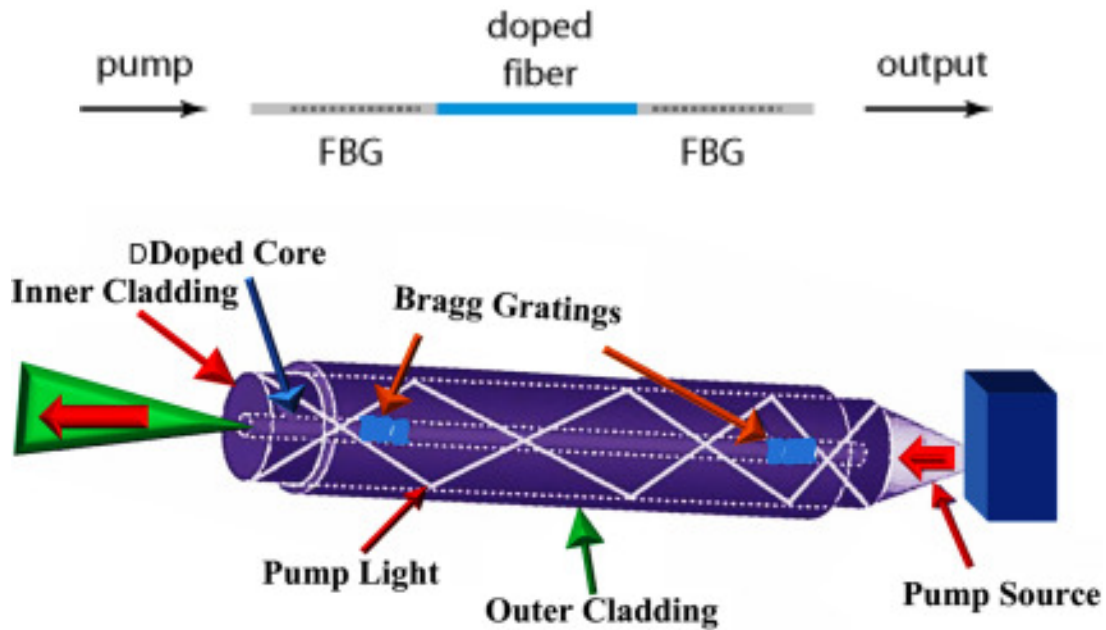


Laser à colorant

- Un colorant organique est utilisé comme milieu actif
- Pompage optique
- Permet d'obtenir une grande variété de longueurs d'onde
- « very messy » à utiliser (fuites, alignement de la cavité)
- A été supplanté par les lasers à semiconducteurs



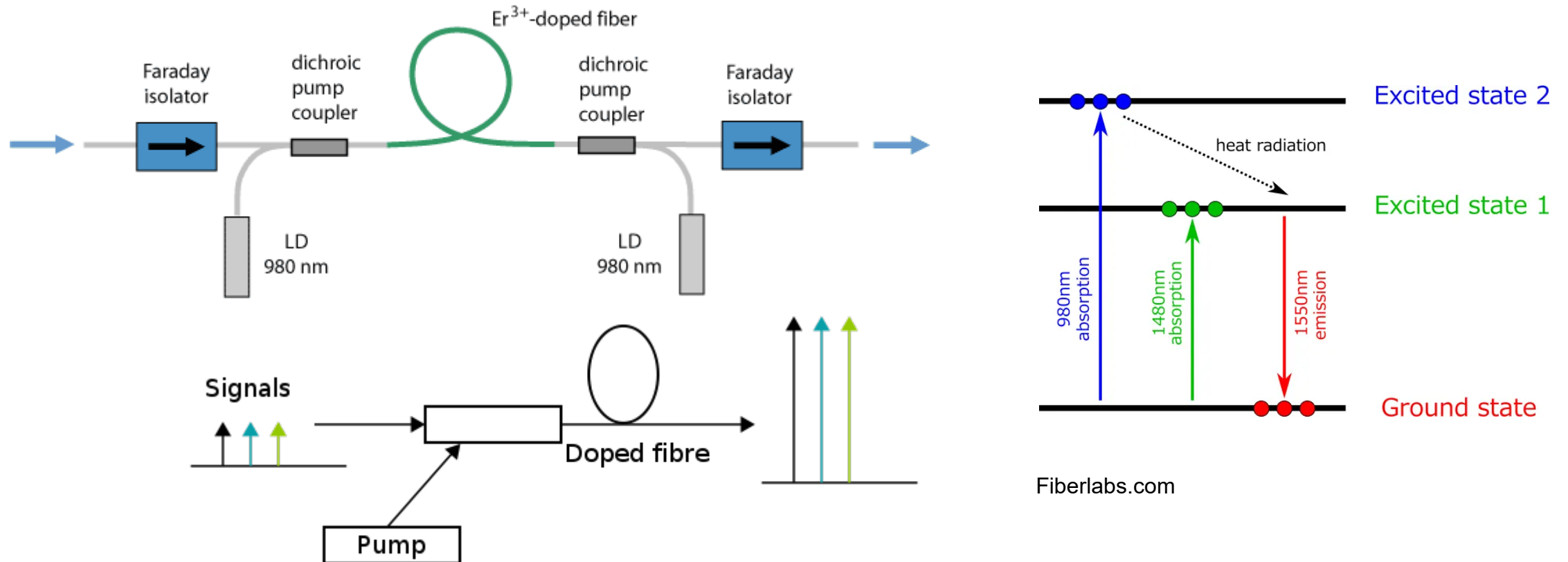
Laser à fibre



- Une section de fibre optique dopée avec des composants actifs produisant du gain peut être utilisée comme laser
- Parfois double cladding pour la lumière de pompe
- Des miroirs de Bragg sont gravés dans la fibre et permettent de créer une cavité

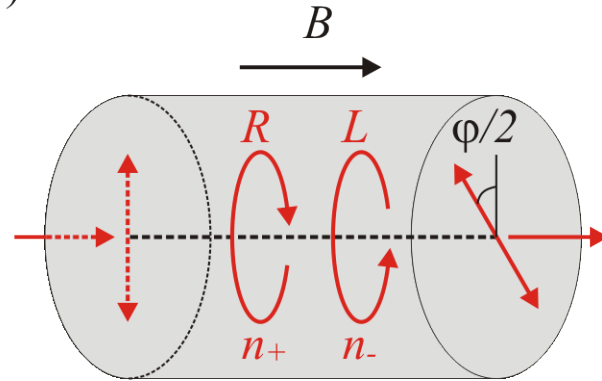
Amplificateur optique

- Système sans cavité permettant de régénérer les signaux optiques
- En général on utilise comme milieu actif des fibres dopées avec des ions Er^{3+} pompés avec un laser à $\lambda=980\text{ nm}$ pour amplifier le signal à $\lambda=1'550\text{ nm}$

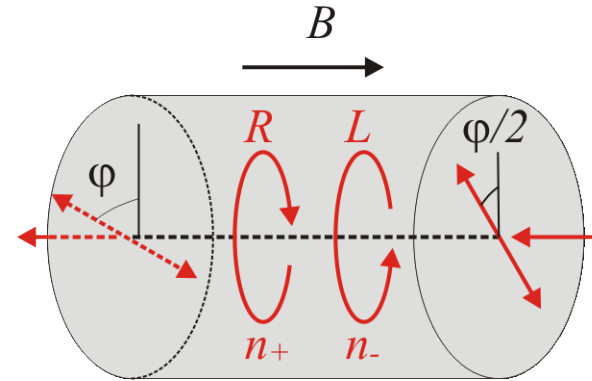


Rotateur de Faraday

(a)

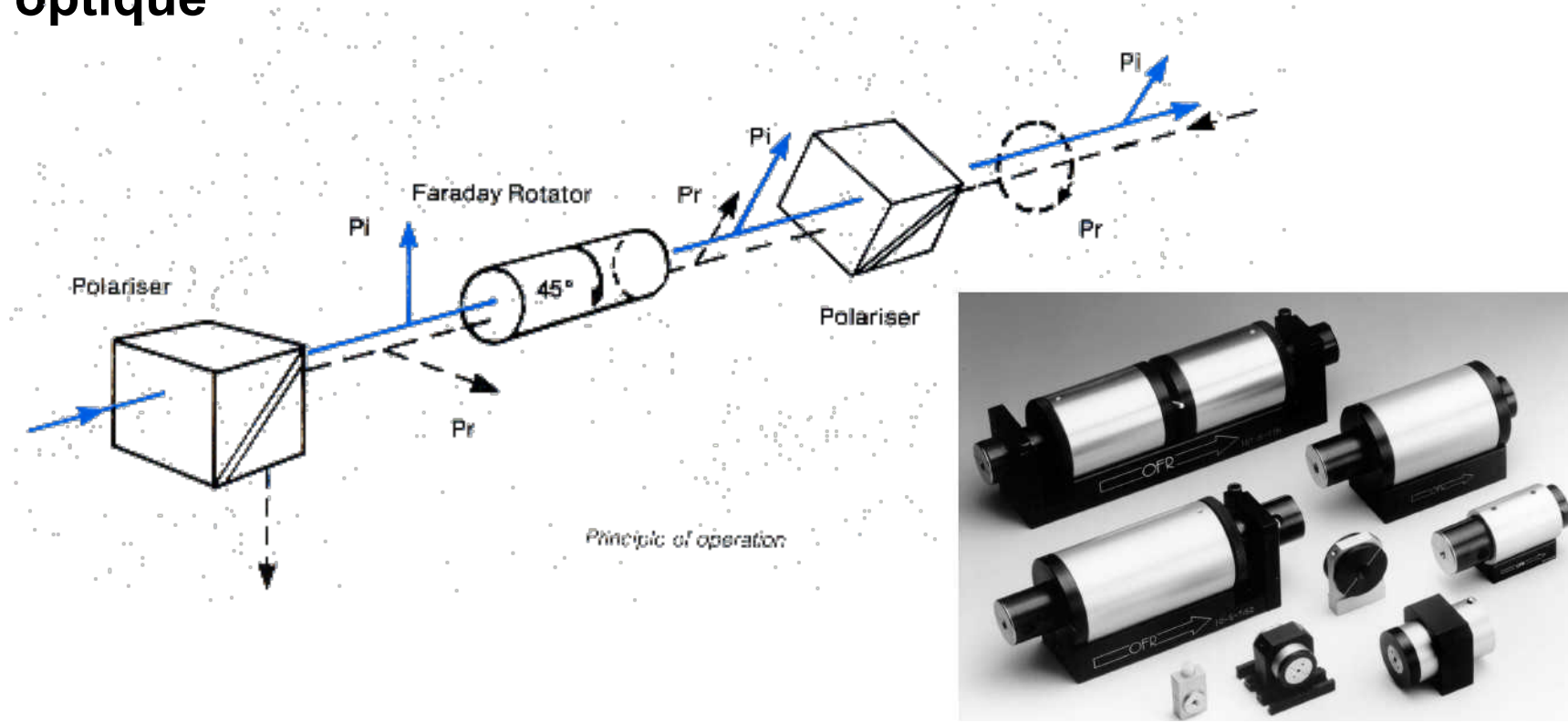


(b)



- En général, si la lumière prend le chemin $A \rightarrow B$, elle peut prendre aussi le chemin $B \rightarrow A$ (tout système optique est réciproque)
- Il existe cependant des systèmes qui ne sont pas réciproques et permettent de créer des isolateurs optiques en utilisant un champ magnétique externe
- Sens de rotation déterminé par la règle du tire-bouchon (ou vis) appliqué au champ d'induction magnétique
- La rotation de la polarisation dépend du champ appliqué (cte de Verdet): $\rho = \mathcal{V}B$
- Effet magnéto-optique

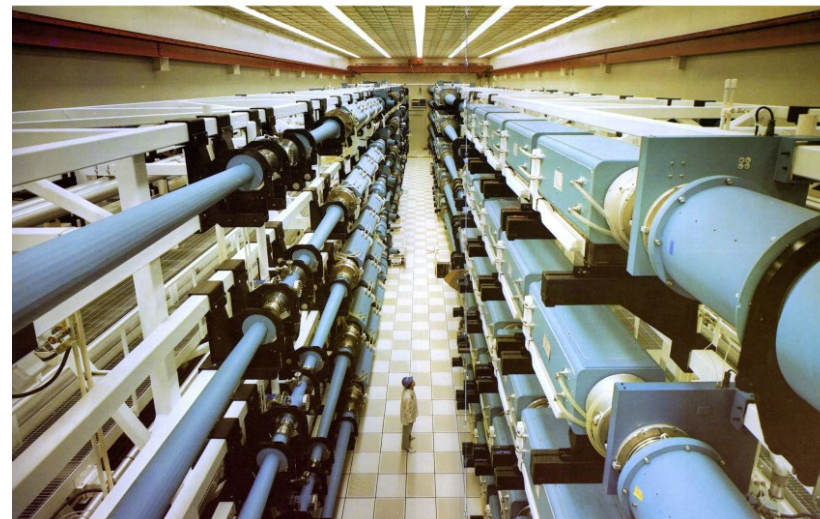
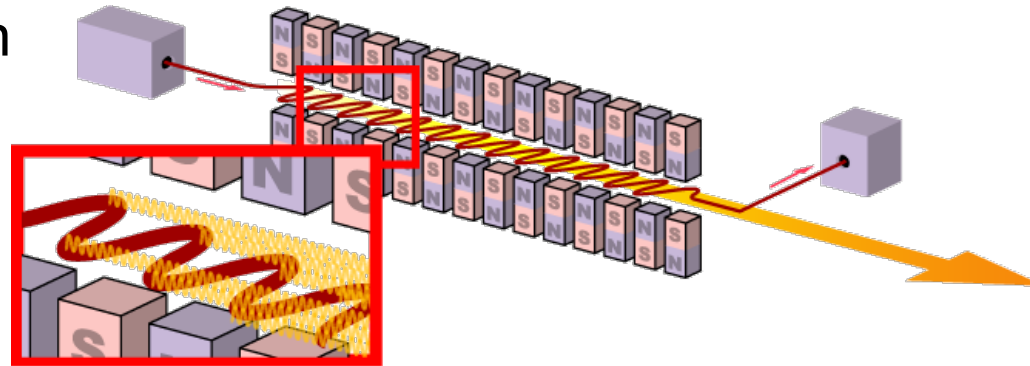
Isolateur optique



- En combinant un rotateur de Faraday avec des polariseurs, on peut créer un isolateur optique (la lumière passe de gauche à droite, mais elle ne passe pas de droite à gauche!)
- Un tel isolateur est presque toujours utilisé après un laser pour éviter que de la lumière réfléchie ne revienne dans le laser

Laser à électron libre

- Utilise un faisceau d'électrons relativistes comme milieu actif
- Longueur d'onde ajustable des micro-ondes aux rayons X
- Les électrons passent dans un onduleur et leur accélération donne lieu à une émission synchrotron

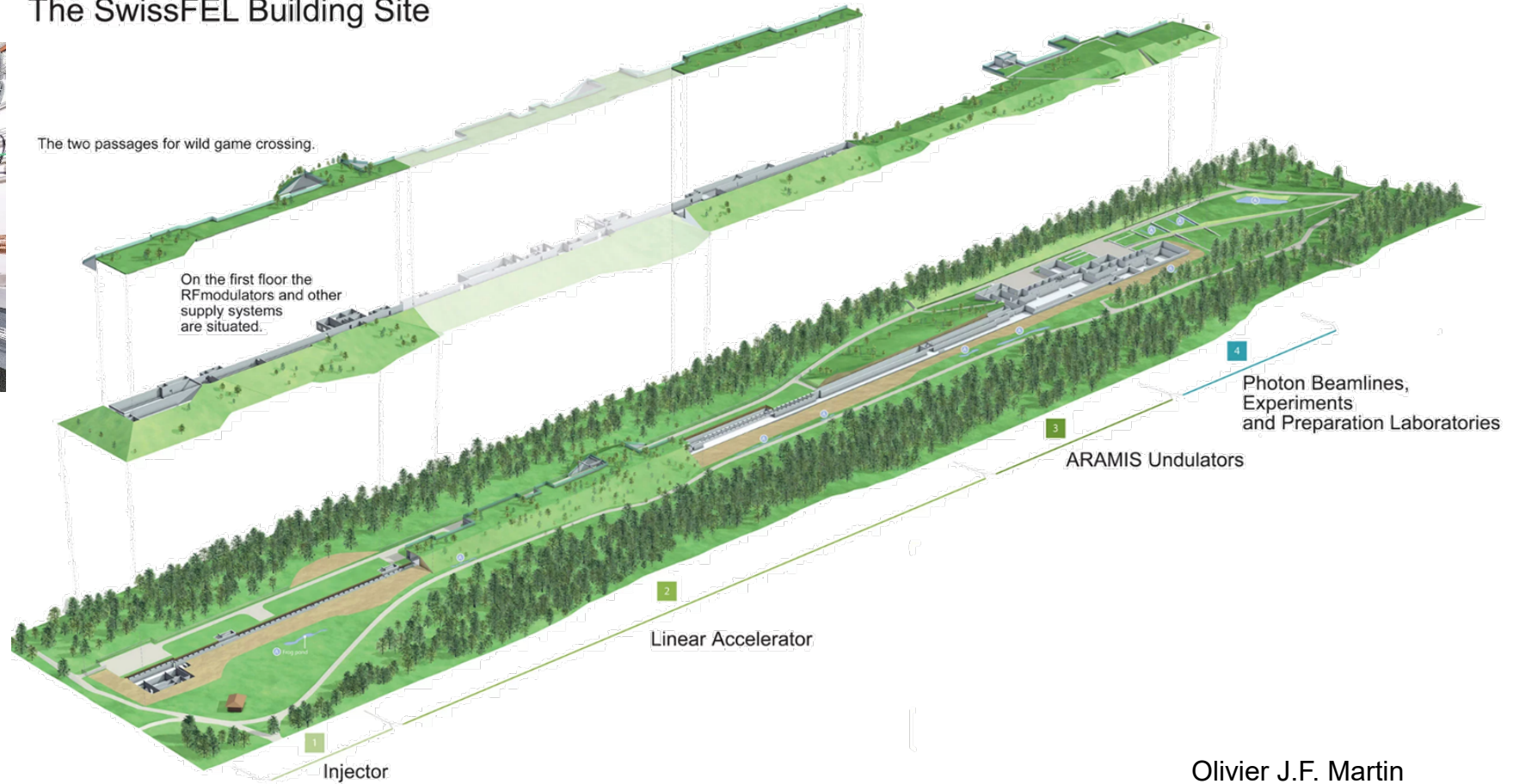


Laser à électron libre – Modèle suisse

- Entré en fonction en 2018 au PSI (canton d'Argovie)
- Produit des faisceaux de photons de longueur d'onde de 0.1nm
- Beaucoup d'applications en biologie, pour déterminer la structure de protéines

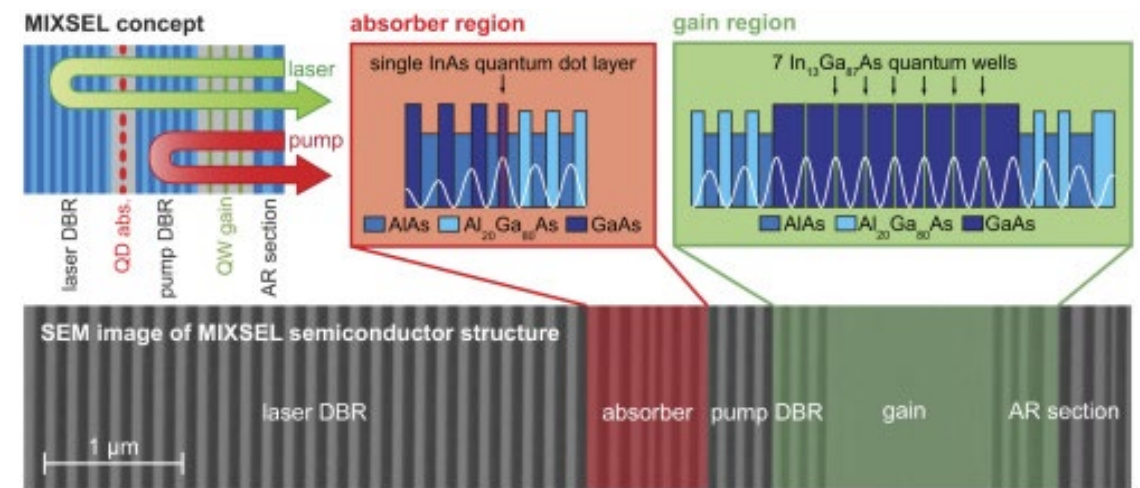
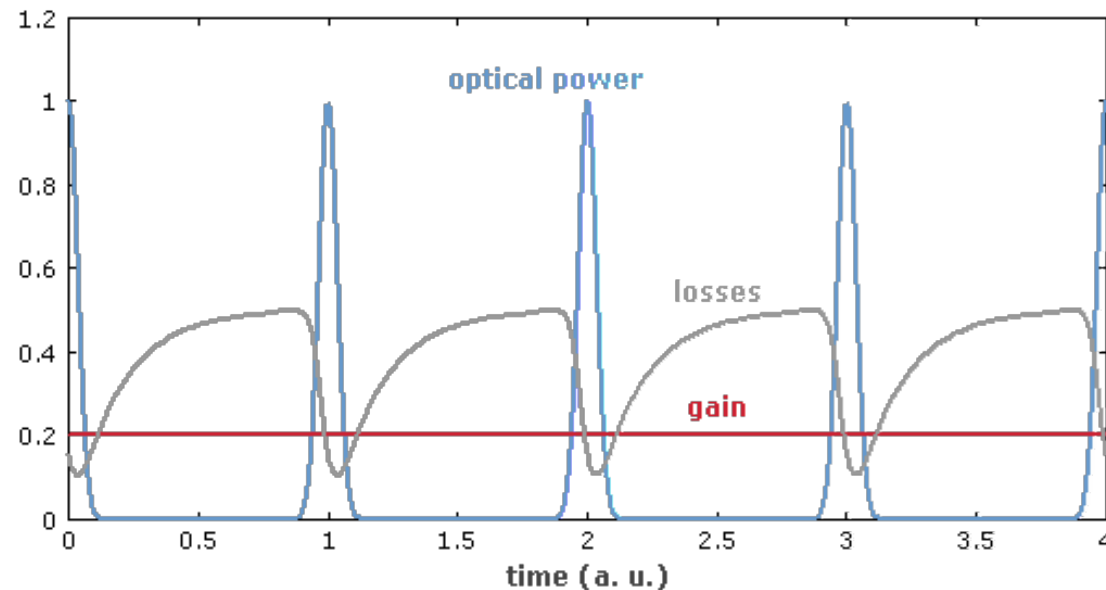


The SwissFEL Building Site



Lasers pulsés

- On réalise facilement des lasers émettant des pulses de quelques ps (10^{-12} s) à quelques fs (10^{-15} s), le record du monde (ETHZ) est de l'ordre de quelques dizaines as (10^{-18} s)
- Les lasers sont souvent auto-modulés en utilisant un absorbeur saturable



Laser encyclopedia

Efficacité d'un laser

- Un laser n'est pas très efficace...

Type de laser	Longueur d'onde [μm]	Efficacité [%]
CO2	10.6	15
He-Ne	0.633	0.1
He-Cd	0.442, 0.325	0.01 - 0.02
Nd-YAG	1.06	0.1 – 2.0
Diode laser	0.7 – 1.5	20
Electron libre	Large spectre	30

- Ses propriétés spectrales (cohérence, largeur de spectre) le rendent cependant irremplaçable!

Ingénierie optique

Semaine 13 – partie 4

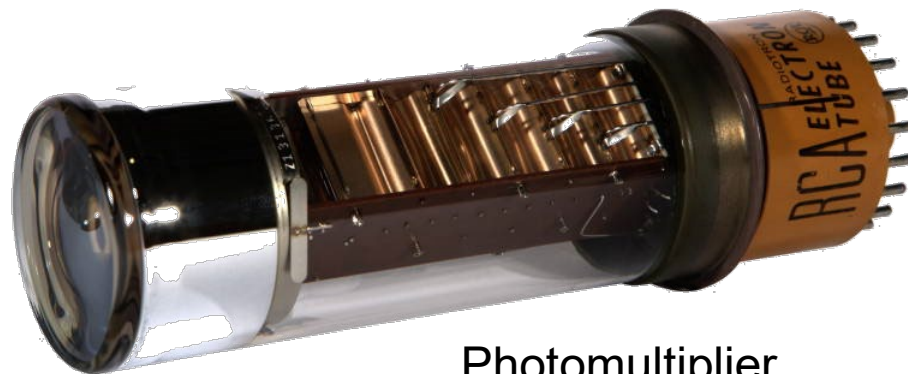
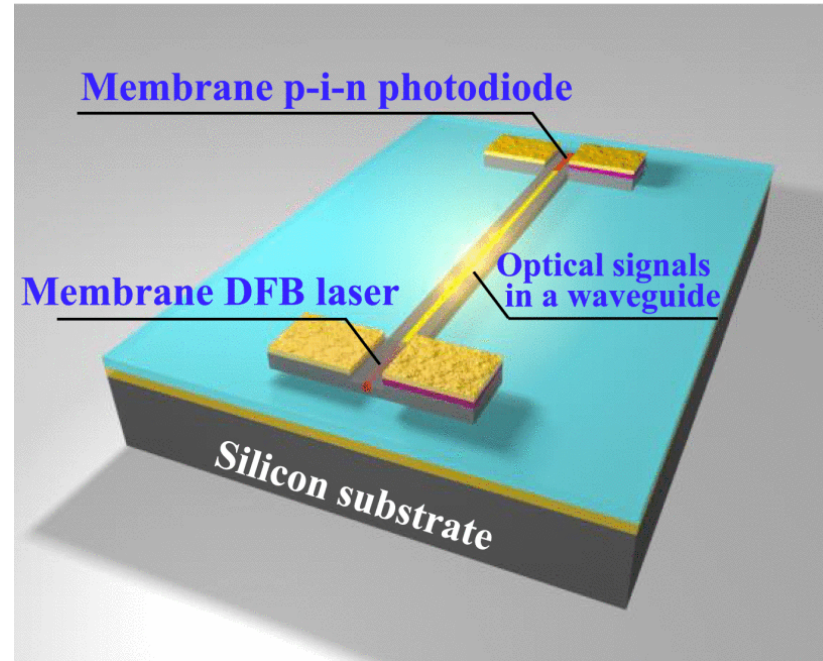
Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



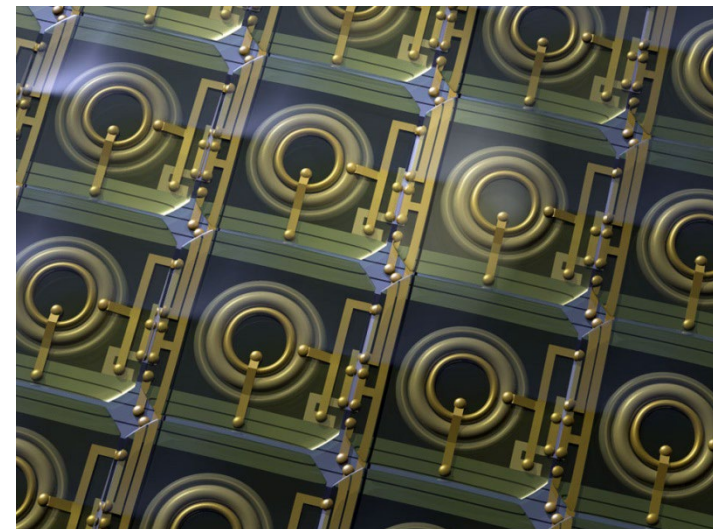
Photodétecteurs



Photodetector tube



Photomultiplier

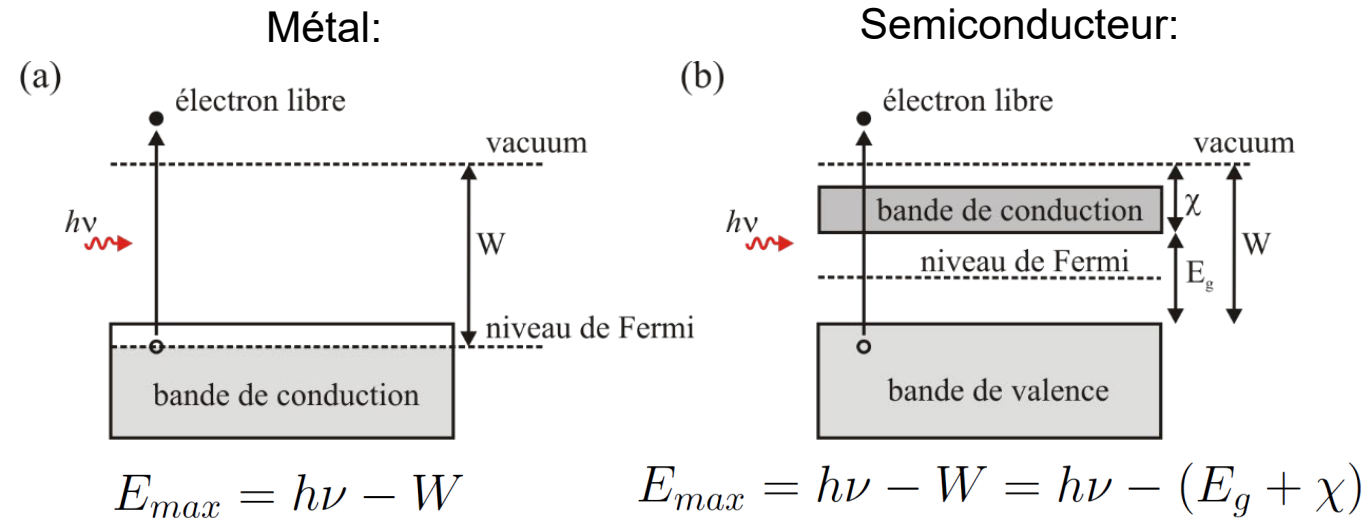


Array of SPADs

Photodétecteurs

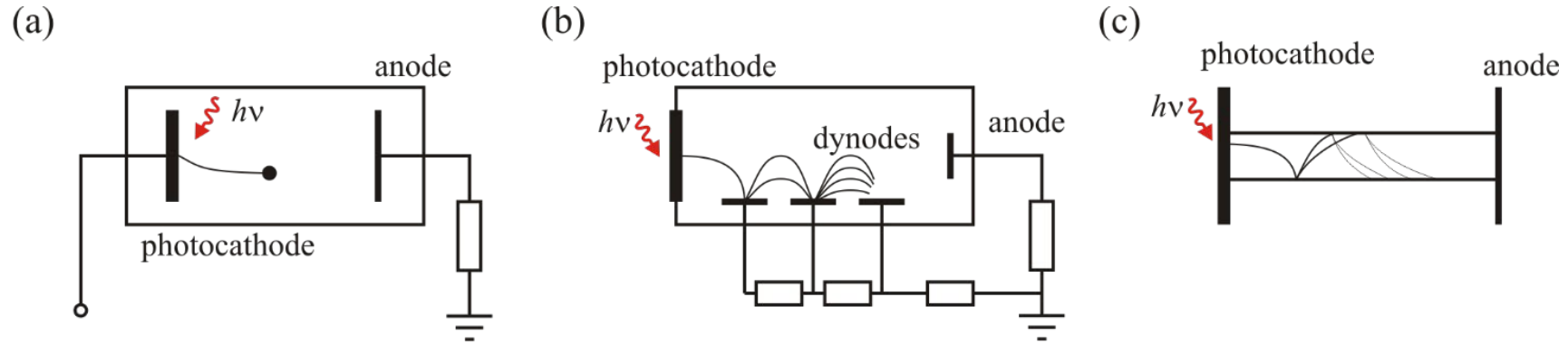
- Effet photoélectrique externe
- Effet photoélectrique interne
- Photodiodes et leurs deux modes de fonctionnement

Effet photoélectrique

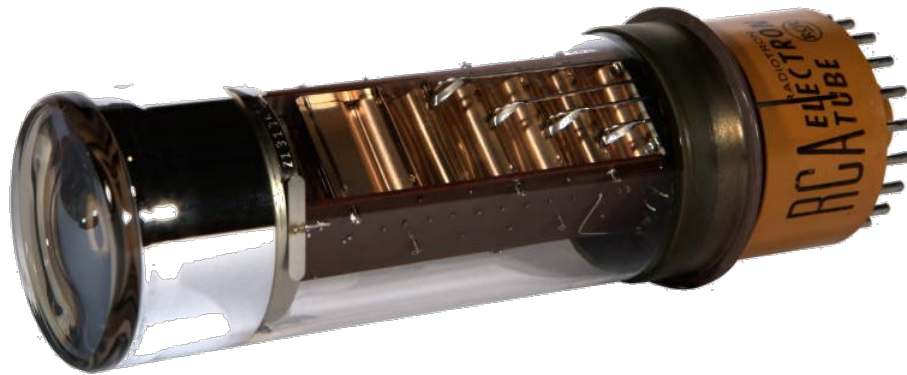


- E_{max} énergie cinétique de l'électron
- χ affinité
- L'absorption d'un photon libère un électron vers le *vacuum*
- Il existe des semiconducteurs avec $\chi < 0$ (bande de conduction au dessus du vacuum) il suffit que $h\nu > E_g$ pour générer un électron

Photodétecteurs

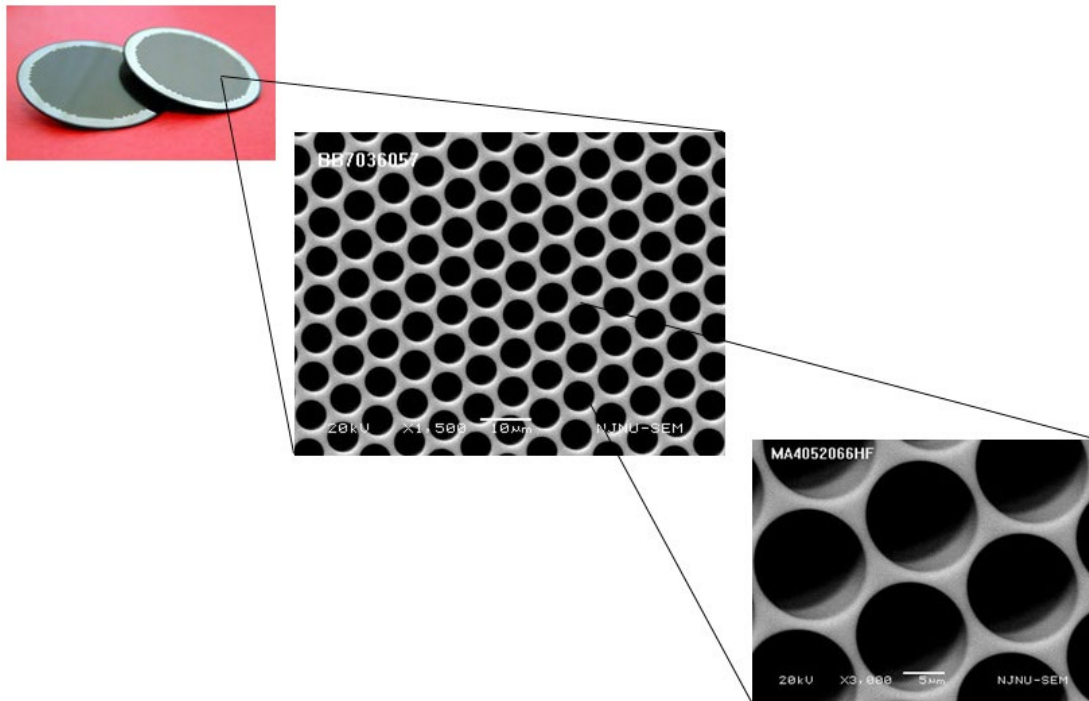
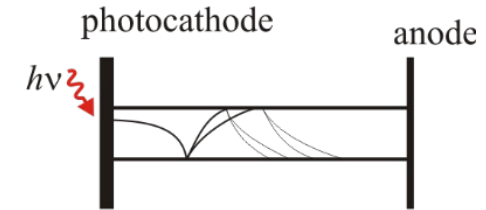


- Différentes réalisations possibles
- Effet photomultiplicateur (jusque $10^8 \times$)



Microchannel plate

- Forte amplification
- Fonctionne du visible aux rayons X
- Beaucoup de canaux parallèles → amplificateur d'image



TECTRA

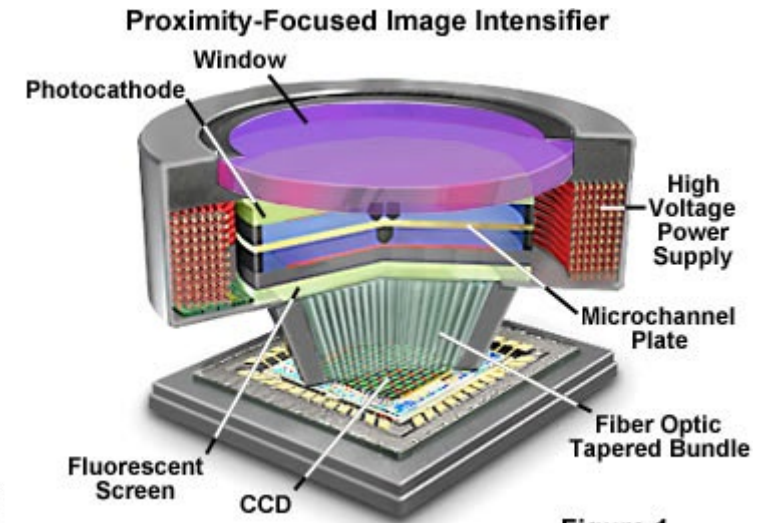
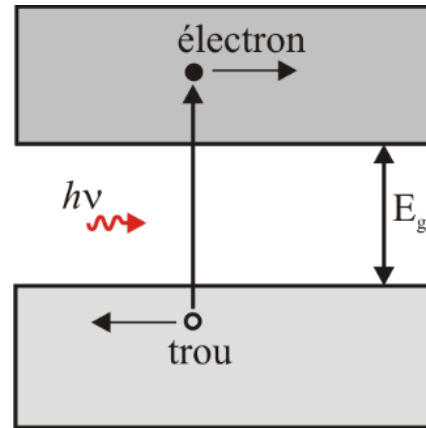


Figure 1

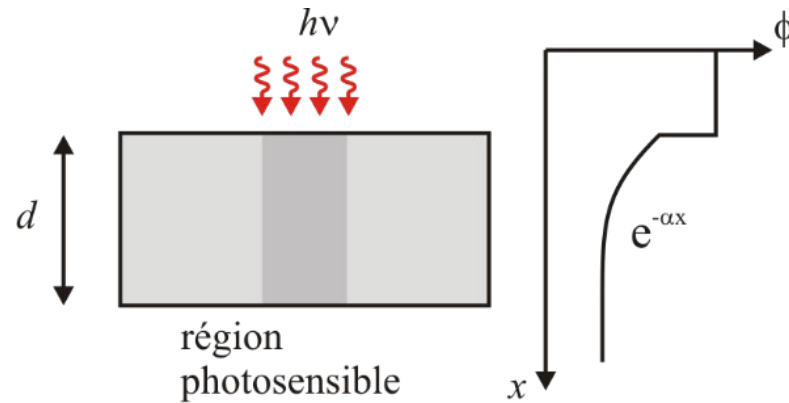
Hamamatsu

Photodétecteurs



- Dispositifs précédents: électron éjecté vers le vacuum → effet photoélectrique externe
- Dans un semiconducteur, génération d'une paire électron-trou qui reste dans le semiconducteur → effet photoélectrique interne
- En appliquant un champ électrique, les porteurs de charge sont transportés → courant mesurable

Efficacité quantique



- Probabilité qu'un photon incident génère une paire électron-trou qui contribuera au courant mesuré: $0 \leq \eta \leq 1$
- Réflectivité $\mathcal{R}$
- Absorption α
- ς fraction de paires électron-trou qui contribuent au photocourant
- L'efficacité quantique dépend de λ_0 (si $\lambda_0 > \lambda_g = hc_0/E_g$ il est peu probable que le photon soit absorbé)
- Si $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$ la plupart des photons sont absorbés sur une épaisseur de $1 \mu\text{m}$

$$\eta = (1 - \mathcal{R})\varsigma[1 - \exp(-\alpha d)]$$

Réponsivité

- Rapport entre le photocourant généré et la puissance optique illuminant le photodétecteur

$$\mathbf{R} = \frac{\eta e}{h\nu} = \eta \frac{\lambda_0}{1.24}$$

- Si chaque photon génère une paire électron-trou qui participe au photocourant, alors la puissance optique $P = h\nu\phi$ produit un photocourant $i_p = eP/h\nu$; malheureusement, seul un taux de photons participe au photocourant: η

$$i_p = \eta e\phi = \frac{\eta e P}{h\nu} = \mathbf{R}P$$

- Ordre de grandeur: $\mathbf{R} \sim 1\text{A/W}$

Gain

- Chaque paire electron-trou peut générer une charge q qui peut être plus grande ou plus petite que e^-
- Gain du photodétecteur: $G = q/e$

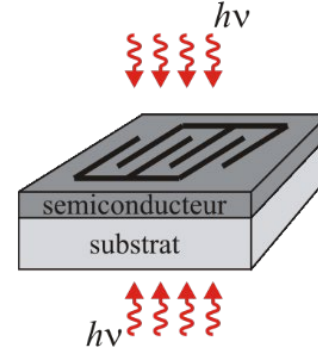
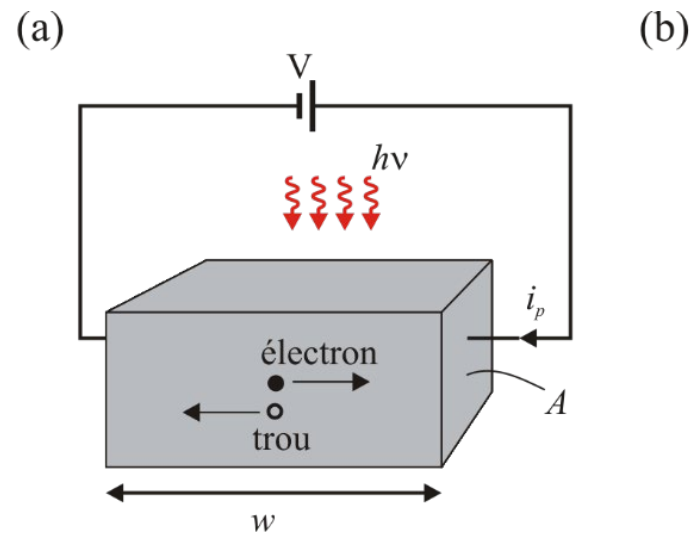
$$i_p = \eta q \phi = \eta G e \phi = \frac{\eta G e P}{h\nu}$$

$$\mathbf{R} = \frac{\eta G e}{h\nu} = \eta G \frac{\lambda_0}{1.24}$$

$$E(\text{eV}) = \frac{1.24}{\lambda_0(\mu\text{m})}$$

- Ne pas confondre le gain avec l'efficacité quantique η qui est la probabilité qu'un photon incident génère une paire électron-trou qui contribue au courant mesuré

Photodétecteurs

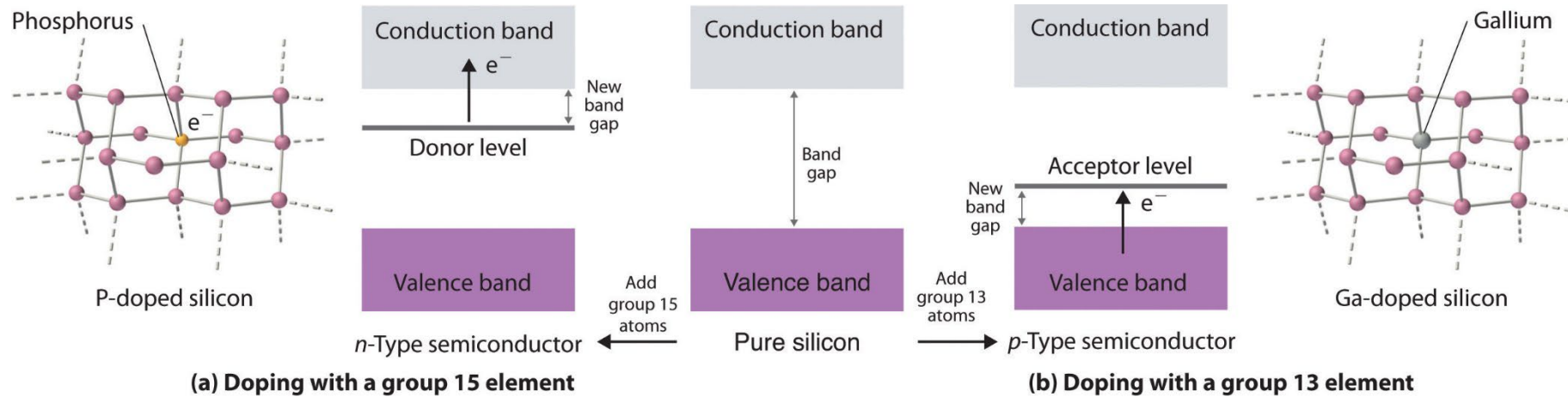


- Le flux de photon génère des paires électron-trou qui modifient la conductivité σ du semiconducteur

$$\Delta\sigma = \frac{\eta e \tau (\mu_e + \mu_h)}{wA} \phi$$

- Mobilités: μ_e , μ_h
- Durée de vie des charges créées: τ

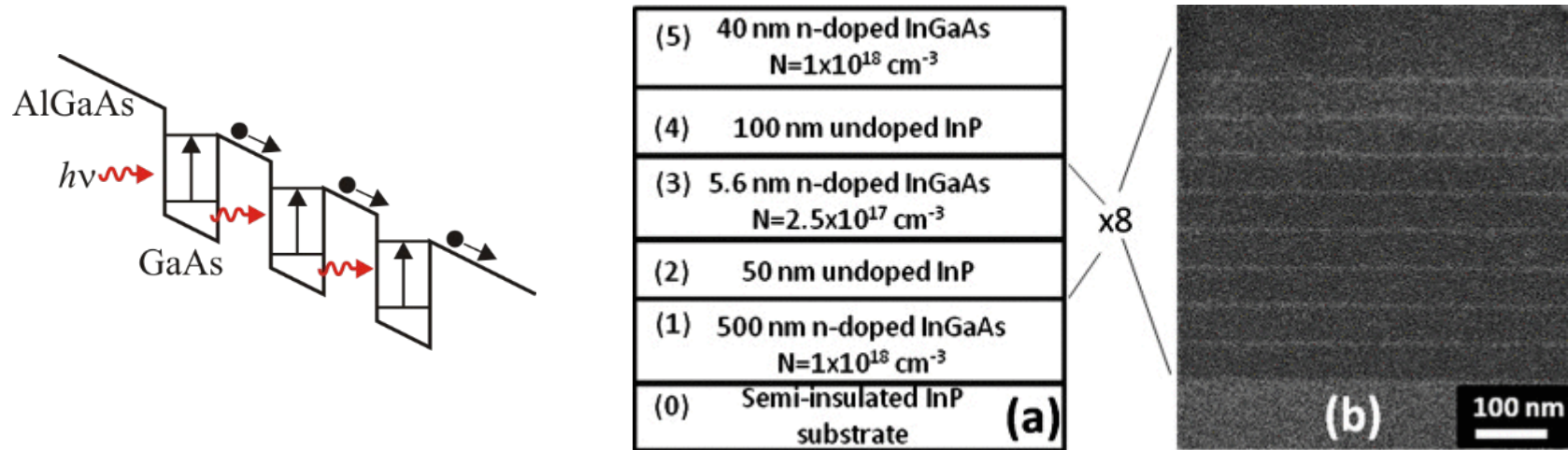
Semiconducteurs dopés



- Un semiconducteur intrinsèque ne peut absorber que des photons qui ont une énergie égale ou supérieur à l'énergie du bandgap
- Dans un semiconducteur dopé, d'autres niveaux d'énergie existent → absorption dans l'infrarouge

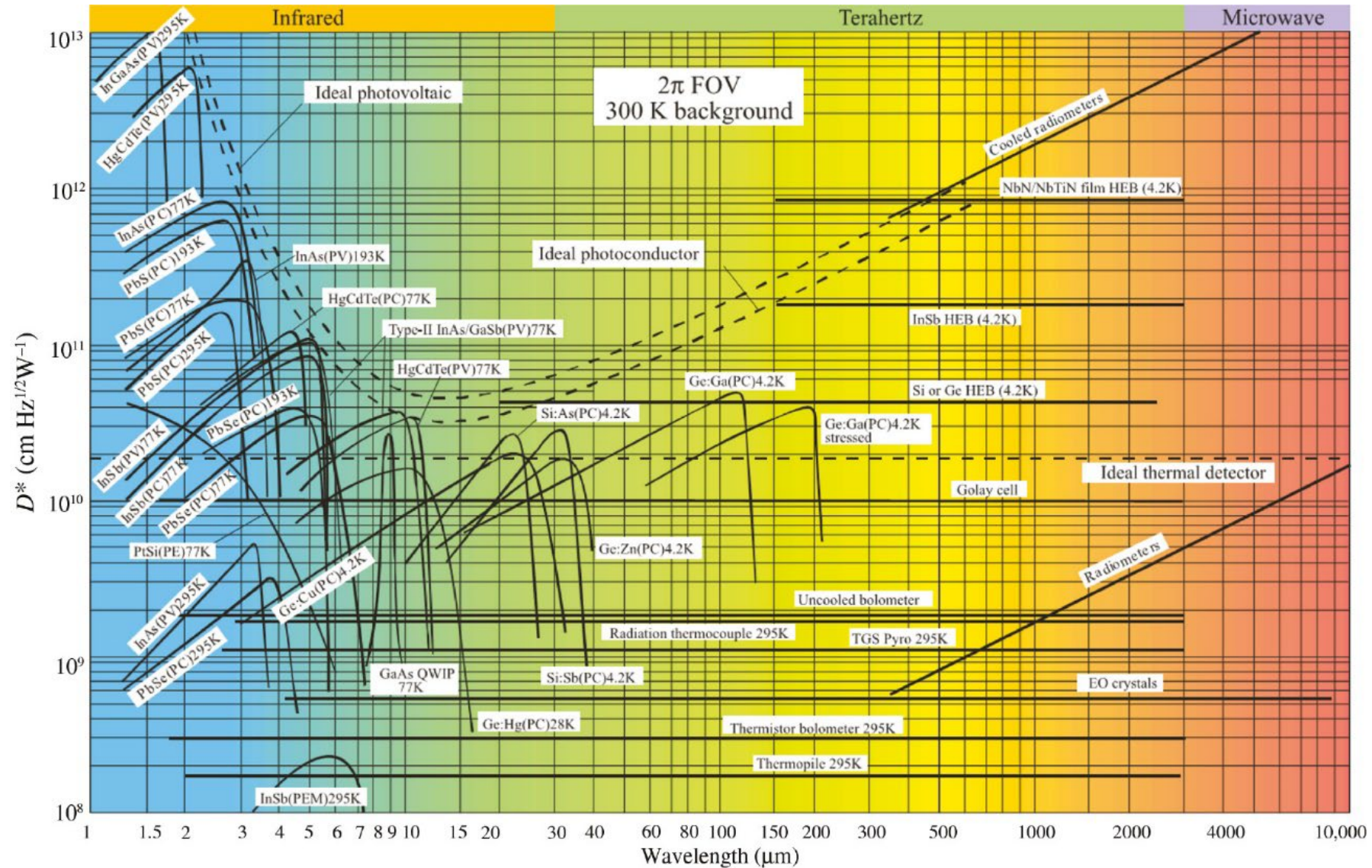
Semiconducteur :Dopant	E_A (eV)	λ_A (μm)
Ge :Hg	0.088	14
Si :B	0.044	23
Ge :Cu	0.041	30
Ge :Zn	0.033	38
Ge :Ga	0.010	115

Photodétecteur à puits quantiques



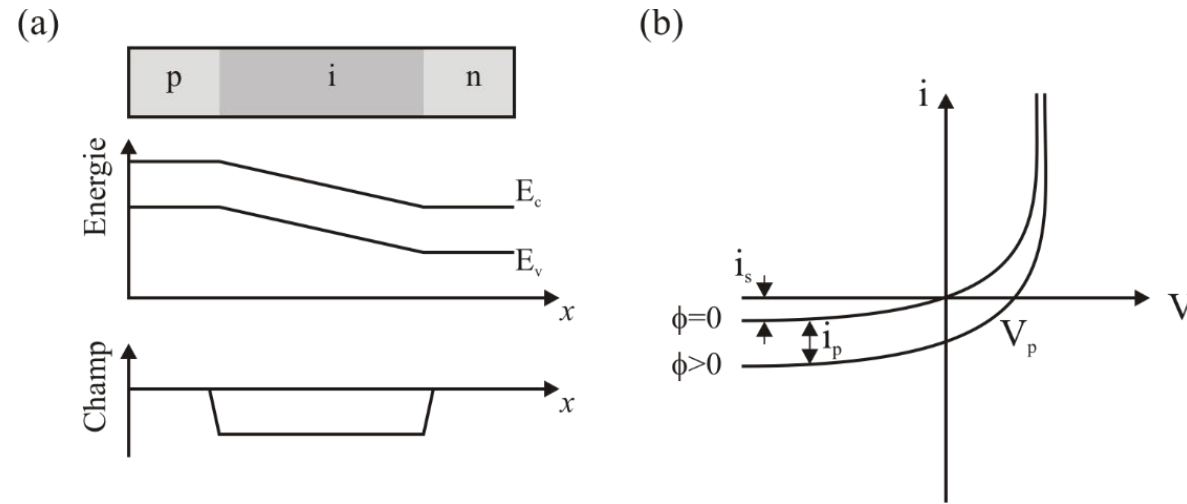
- Le photon incident libère vers la bande de conduction l'électron se trouvant dans le puit quantique (de très petite profondeur énergétique), augmentant par la même la conductivité du semiconducteur
- Sensibilité dans l'infrarouge ($\lambda_0 = 4 \dots 20 \mu\text{m}$)

Matériaux pour les photodétecteurs



doi:10.1515/nanoph-2017-0061

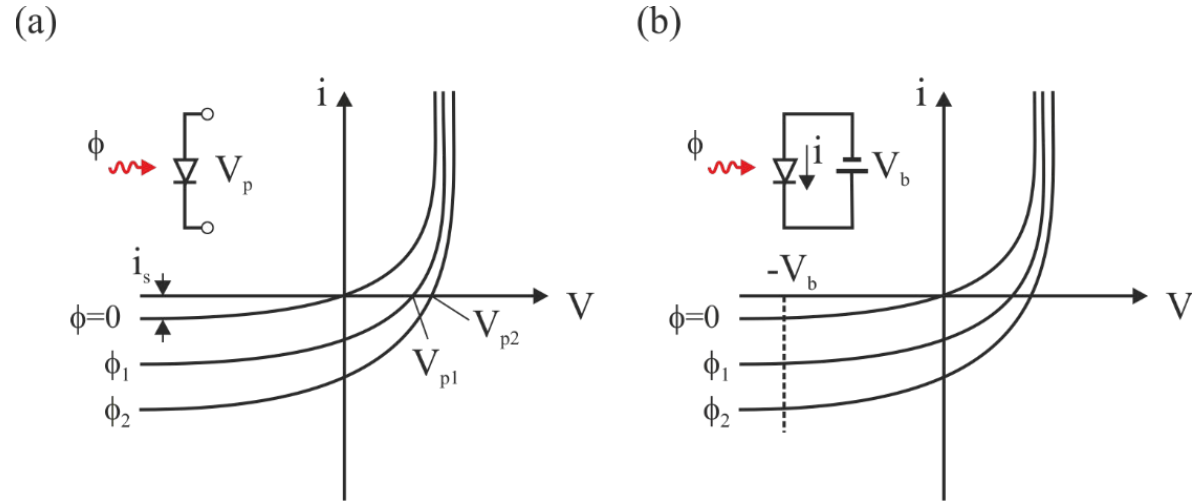
Photodiodes



- En général structure p-i-n
- La région intrinsèque permet de diminuer la capacité de la diode et d'augmenter le champ électrique pour favoriser l'extraction des porteurs de charge
- Fonctionne comme une diode, avec un terme supplémentaire i_p correspondant au photocourant:

$$i = i_s \left[\exp \left(\frac{eV}{KT} \right) - 1 \right] - i_p$$

Photodiodes



- Deux modes de fonctionnement:
 - En absence de polarisation (circuit ouvert ou mode photovoltaïque) la photodiode crée une tension.
 - En polarisation inverse par une alimentation externe (mode photoampérique) la photodiode crée un courant

Ingénierie optique

Semaine 13 – partie 5

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



Information pour l'examen

- L'examen du cours Ingénierie optique aura lieu sous forme écrite et durera 2 heures.
- L'examen portera sur la matière suivante :
 - L'ensemble de la matière présentée pendant le cours ;
 - L'entier du polycopié;
 - Tous les exercices.
- L'examen comporte un nombre important de questions, les étudiants sont encouragés à parcourir rapidement la donnée et débiter par les questions qui leur semblent les plus accessibles.

Information pour l'examen

- Pour l'examen, les étudiants ont droit aux documents suivants :
 - Un résumé personnel du cours (pas des exercices !) écrit à la main sur deux feuilles A4 recto-verso maximum (quatre pages A4 maximum). Il est possible de réaliser ce résumé de façon individuelle sur une tablette/ordinateur et de l'imprimer
 - Un formulaire mathématique sous forme de livre de formules (mathématiques, trigonométries, etc...), par exemple "Formulaires et tables" édité par les Commissions romandes de mathématique, de physique et de chimie ; ou "Formeln und Tafeln, Mathematik, Physik" édité par Orell Füssli.
 - Une calculatrice de poche (modèle de votre choix) sans aucune connexion Internet.

Information pour l'examen

- Les étudiants rendront leur copie sur papier libre de format A4 (ne pas utiliser de feuillet A3 plié en deux), en mettant leur nom sur chaque page en haut à droite. Les copies seront remplies au stylo, à la plume ou au feutre de couleur bleue ou noire. Pour les dessins et diagrammes, des couleurs supplémentaires peuvent être utilisées, sauf la couleur rouge.
- Les étudiants apporteront le papier nécessaire pour l'examen (papier de brouillon et papier pour la copie).
- Les places sont assignées dans les différentes salles et seront communiquées avant l'examen par email.