

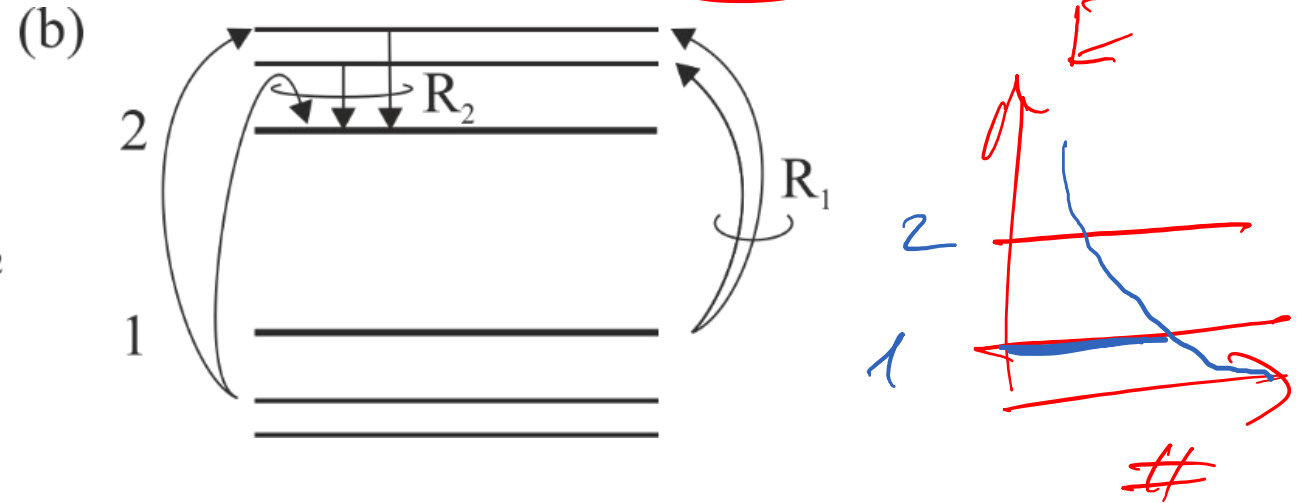
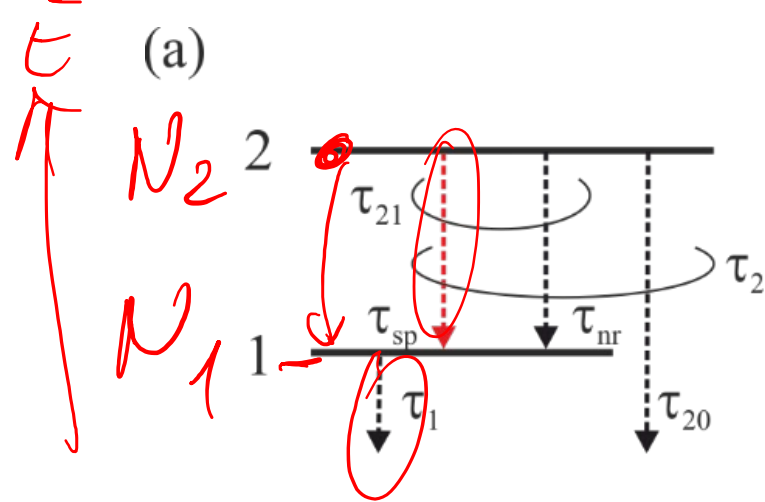
Ingénierie optique

Semaine 13 – partie 1

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

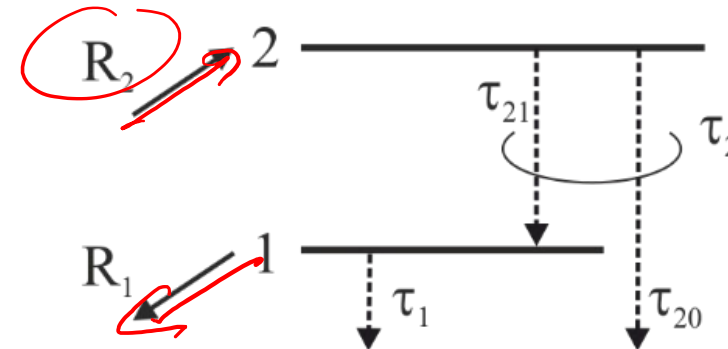


Rate equations



- 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: $N = N_2 - N_1$

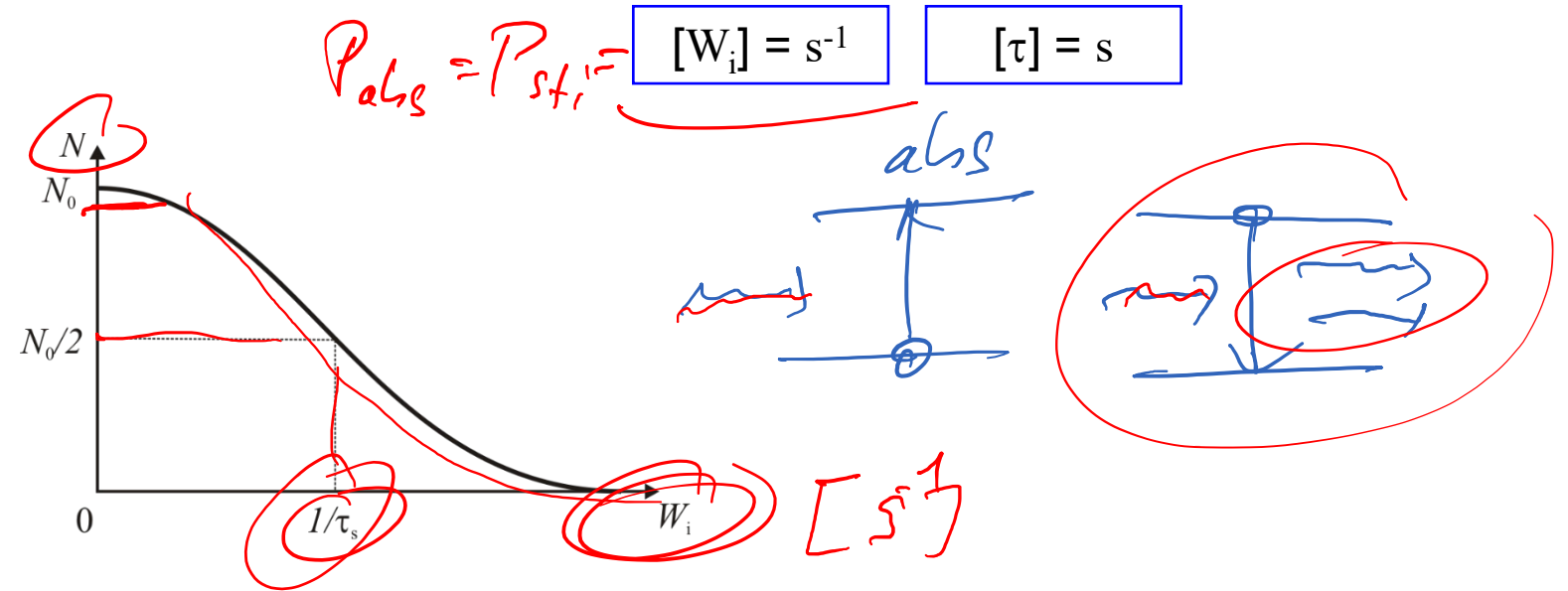
$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= R_2 - \frac{N_2}{\tau_2} \\ \frac{dN_1}{dt} &= -R_1 - \frac{N_1}{\tau_1} + \frac{N_2}{\tau_{21}} \end{aligned}$$



$$[P] = s^{-1}$$

Rate equations

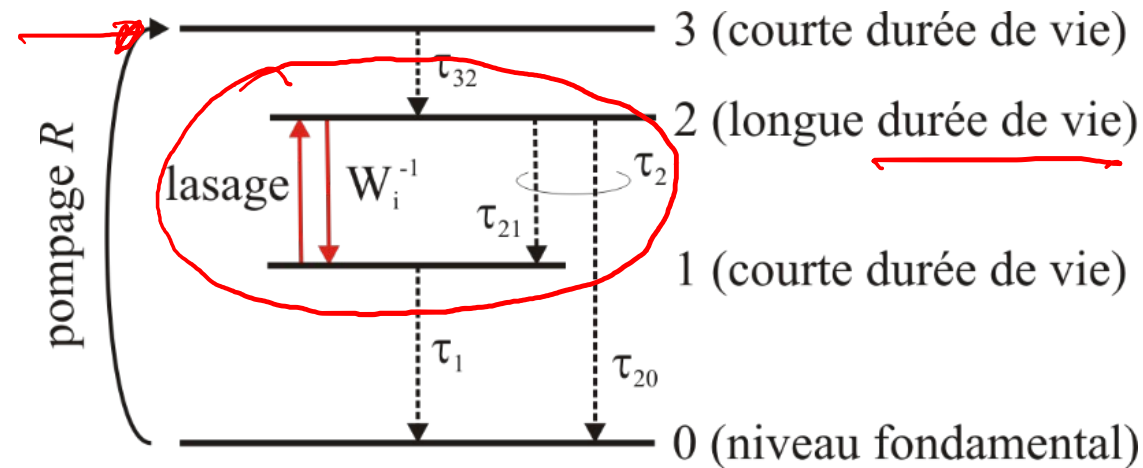
$$N = N_2 - N_1$$



- Absorption et émission stimulée ont la même probabilité $P_{ab} \equiv P_{st} \equiv W_i = \phi\sigma(\nu)$
- 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

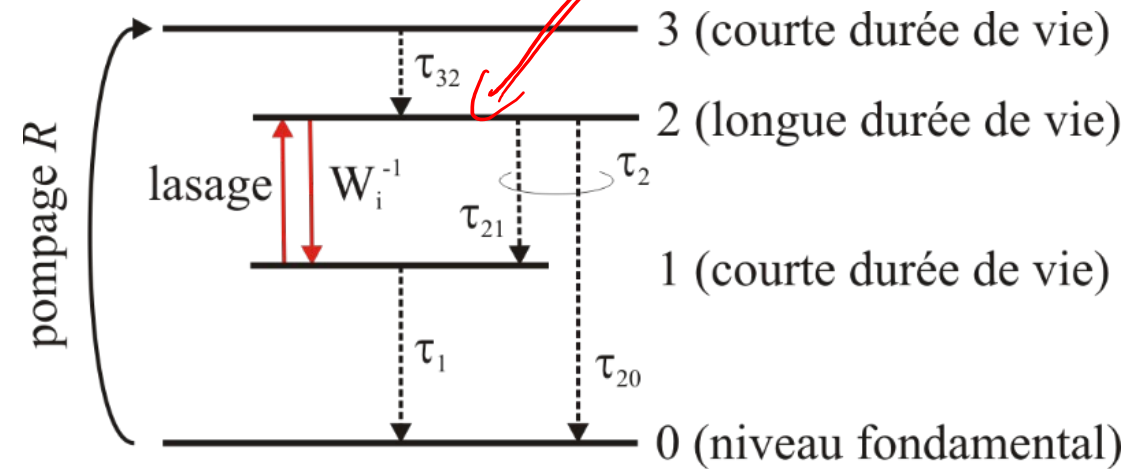
- Bien que le milieu actif puisse avoir de nombreux niveaux électroniques, un laser est bien décrit avec un modèle à 4 niveaux:



- 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)

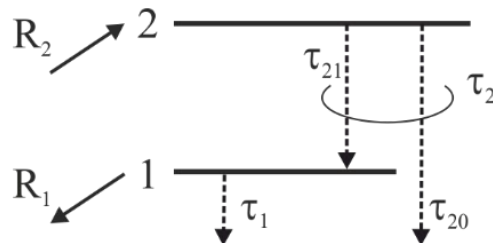
$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 - \frac{N_2}{\tau_2}$$

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

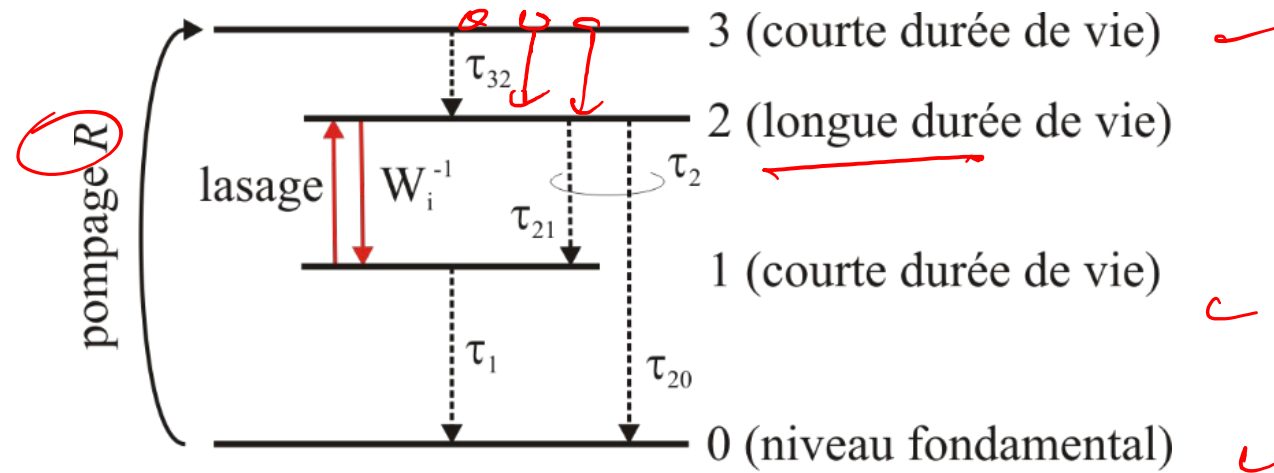
$$N_0 = N_{\text{equilibre}} = N_2 - N_1$$

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

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



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

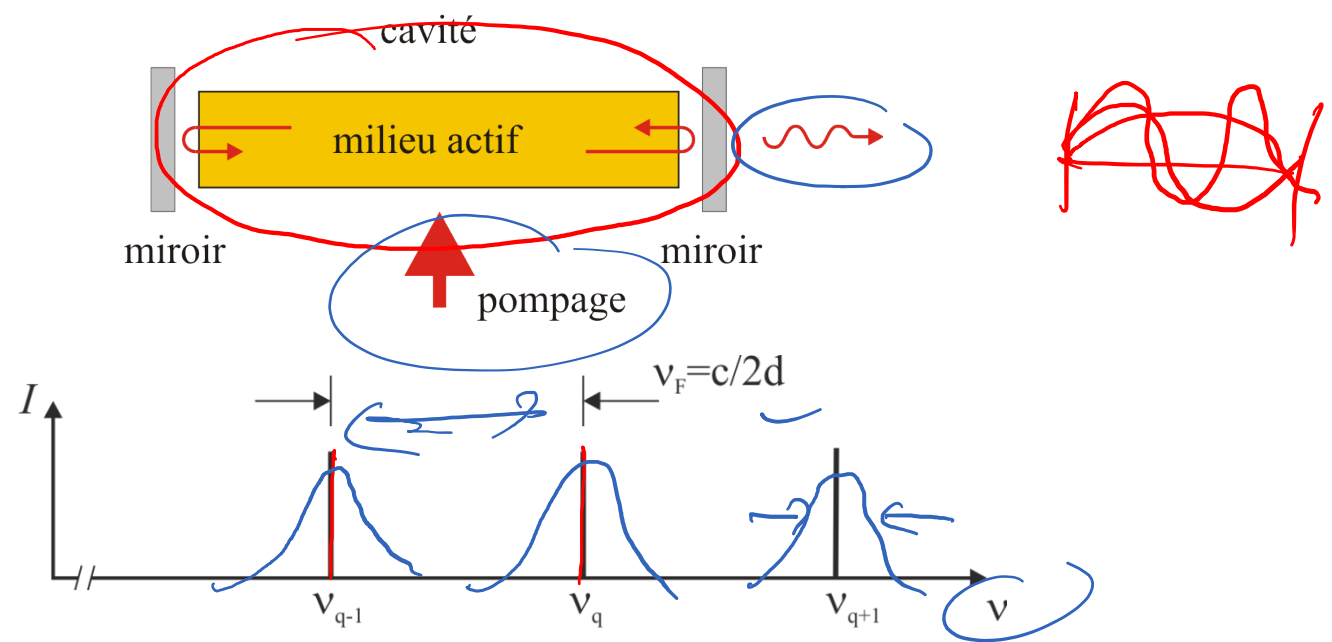
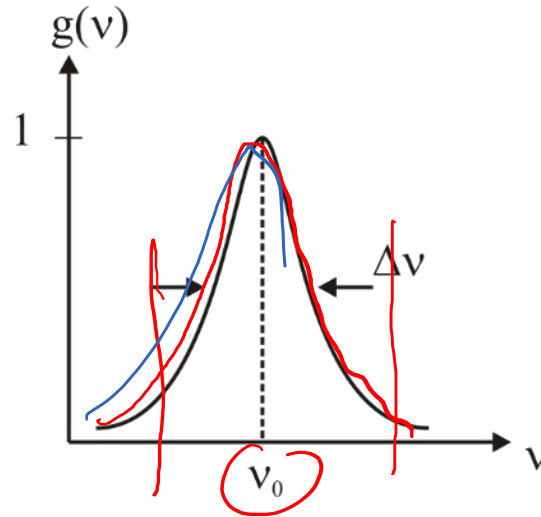
Semaine 13 – partie 2

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



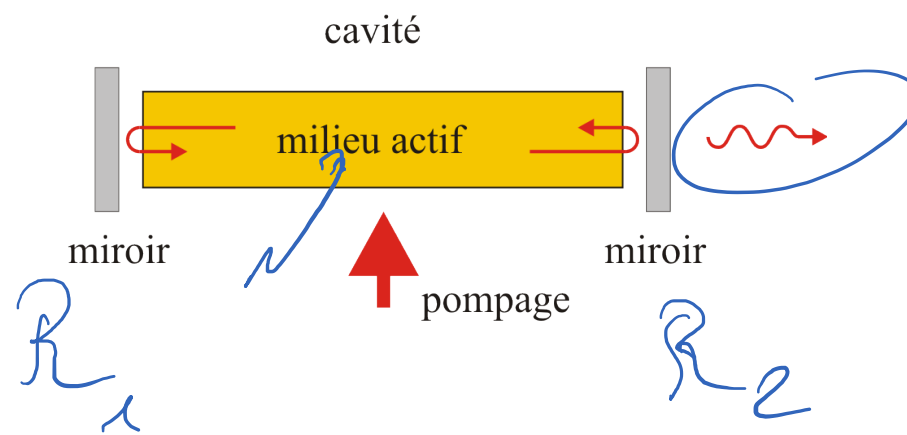
Système laser

2 $\hbar \omega_0$
1



- 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

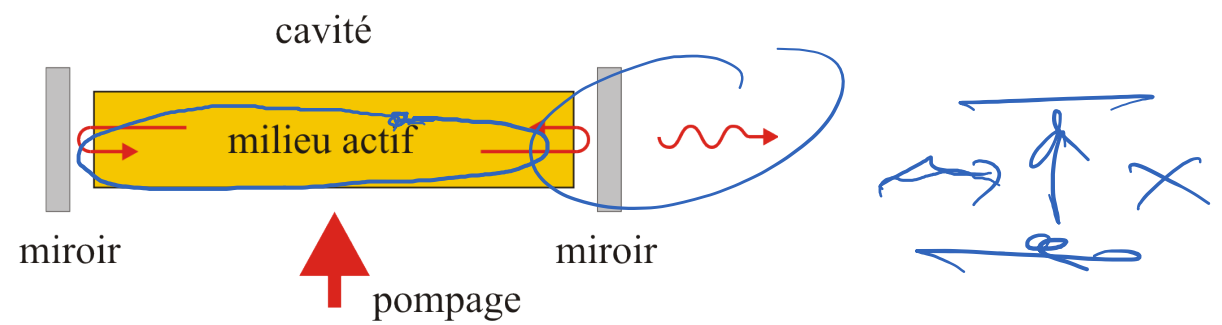


- Le coefficient de gain diminue avec l'augmentation de la densité de flux de photons

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

- 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

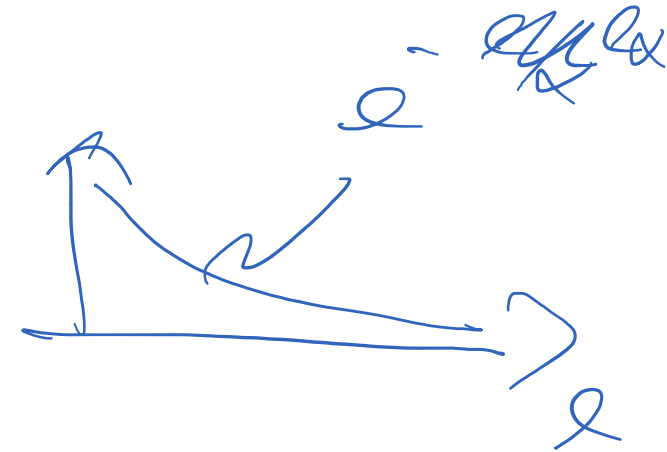


- Pertes pendant un aller-retour en tenant compte de l'absorption et de la réflectivité des miroirs:

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

- 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 $\tau_p = 1/(\alpha_r c)$

$$\alpha c = \frac{m}{s} \frac{1}{m} = \frac{1}{s} = s^{-1}$$



Système laser – gain + pertes + cavité

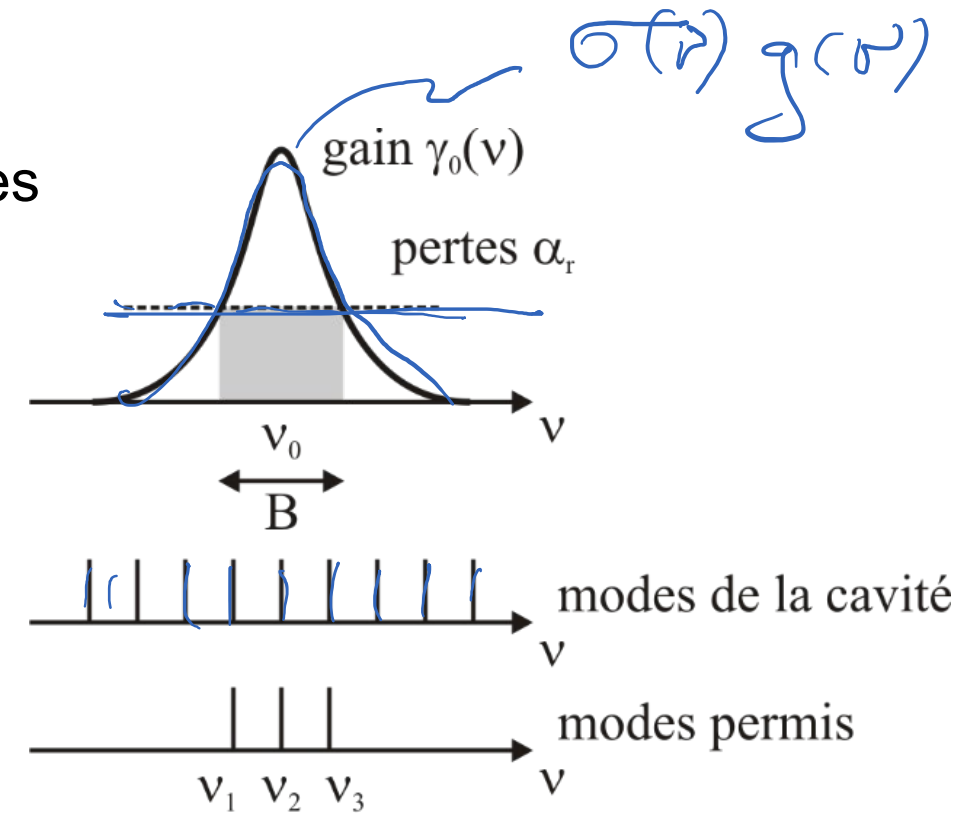
- Au seuil (*threshold*) le gain doit compenser les pertes
- Pour avoir lasage, il faut $\gamma_0(\nu) > \alpha_r$

- Seuls quelques modes remplissent cette condition

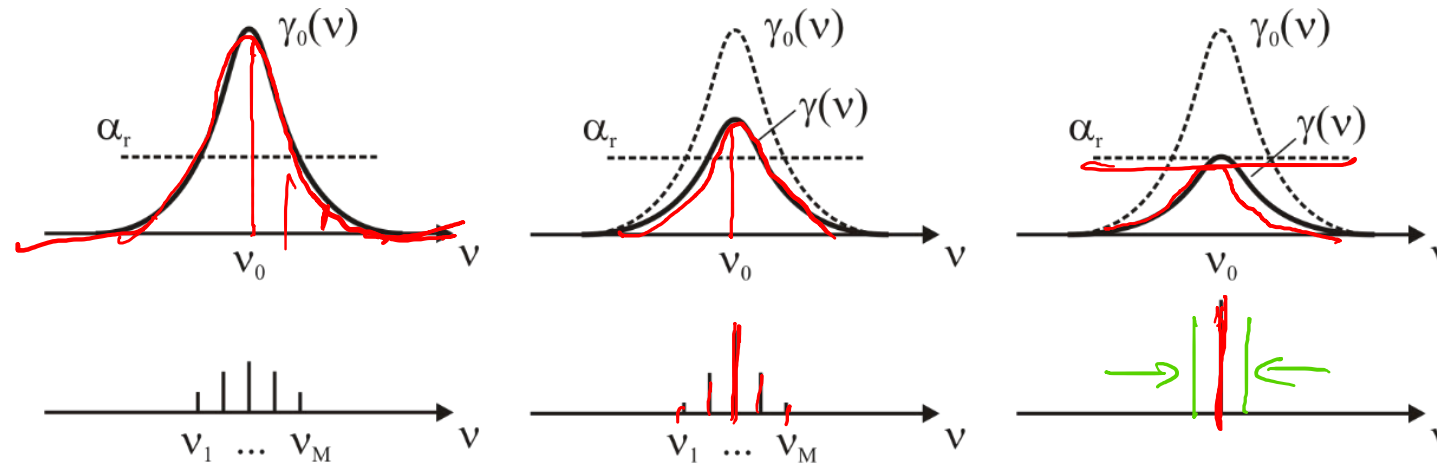
$$M \approx \frac{B}{\nu_F}$$

- 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

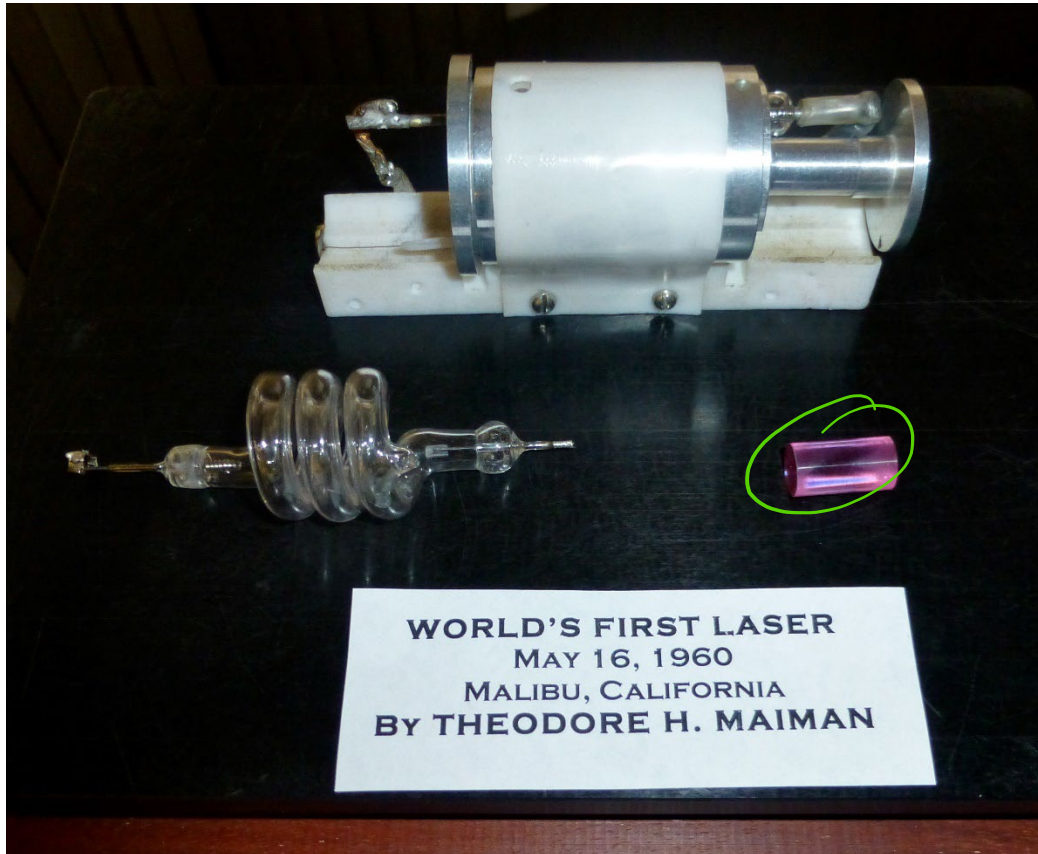
Semaine 13 – partie 3

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

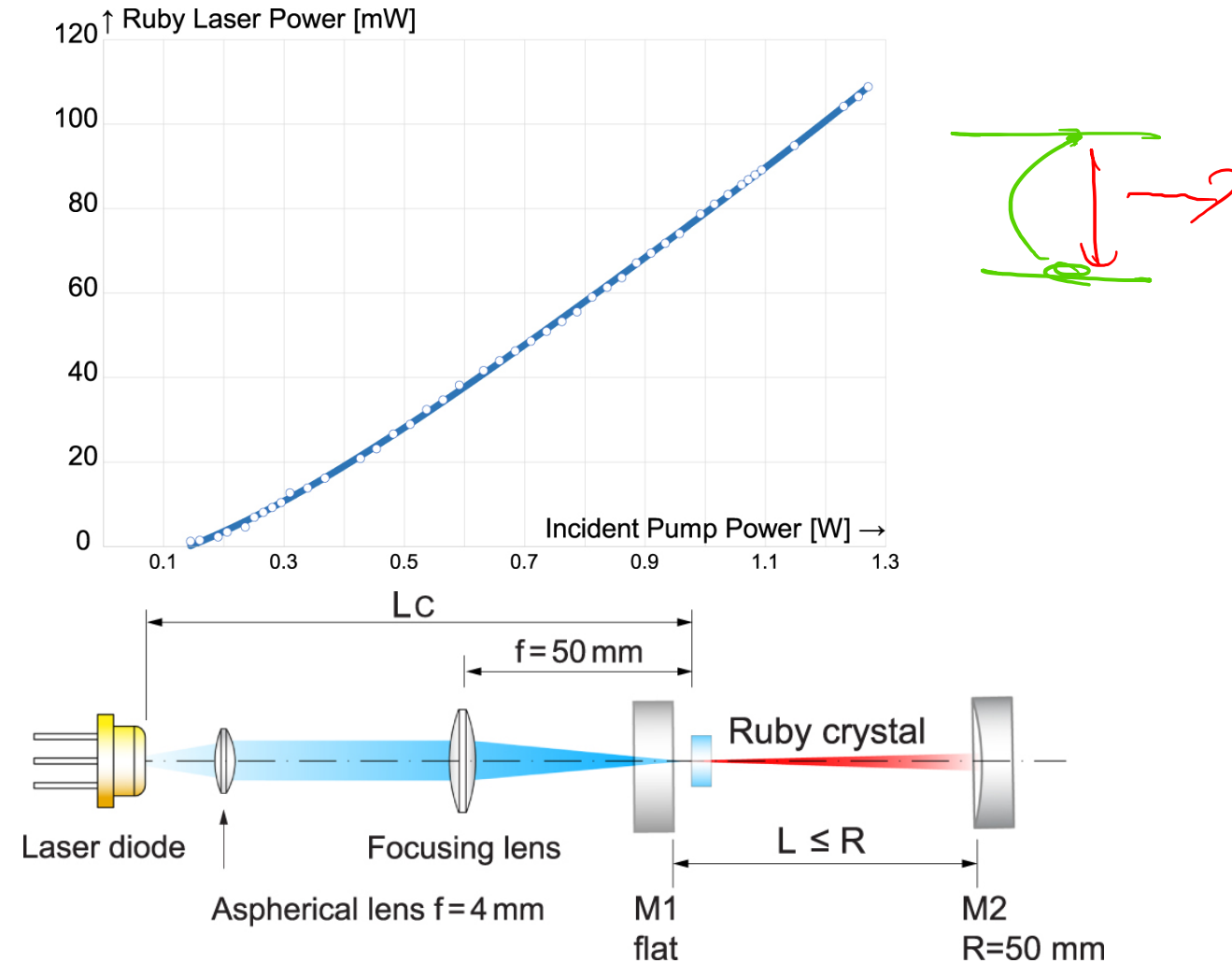


Le tout premier laser

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

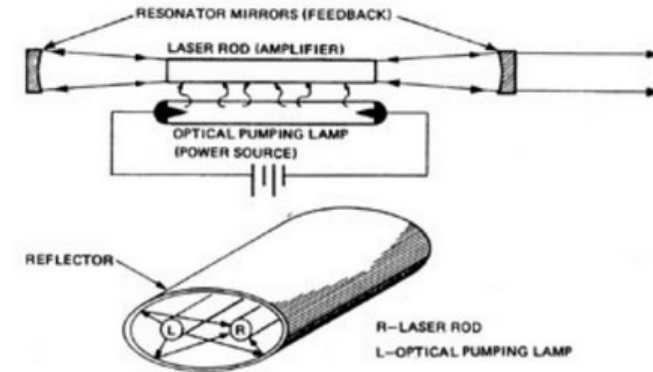
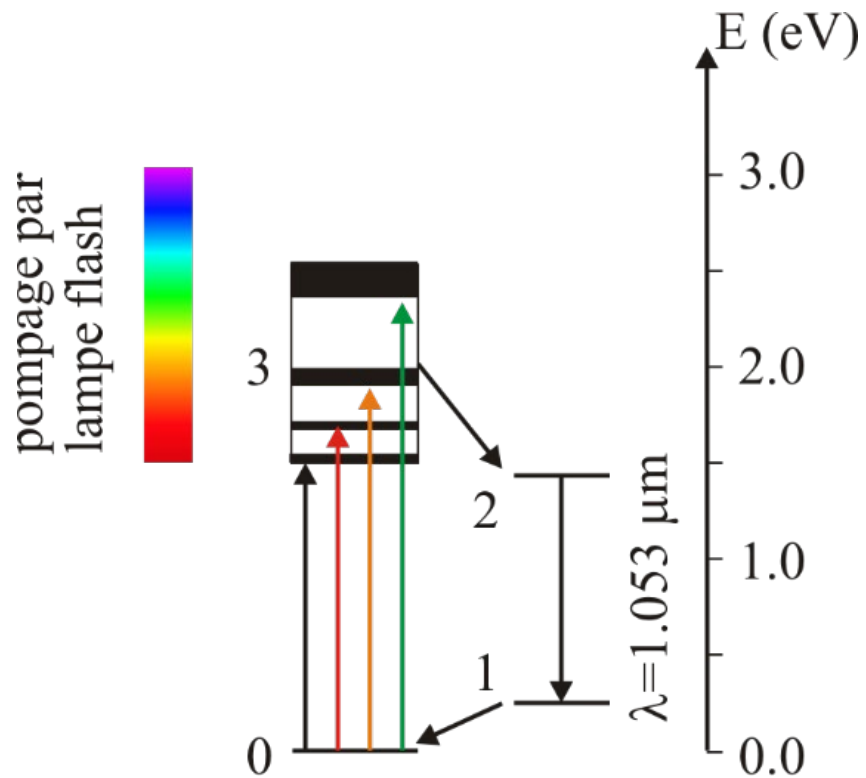


Wikimedia

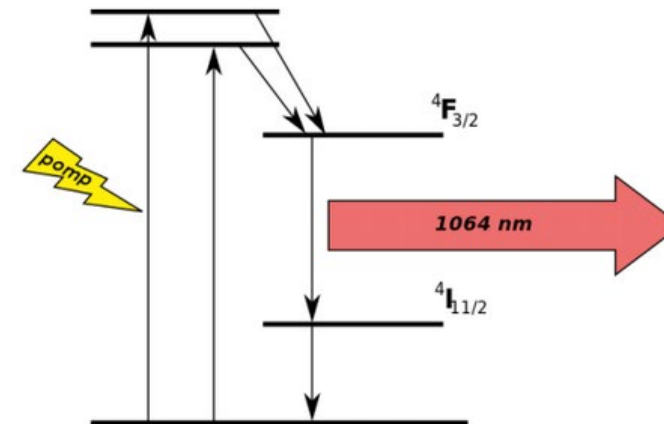


Laser Nd:YAG

- 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:



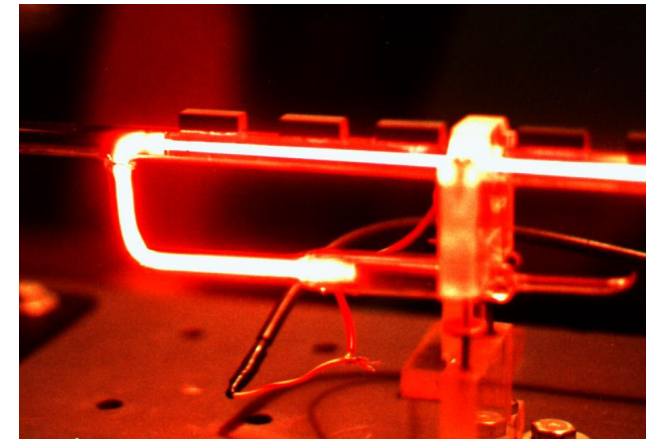
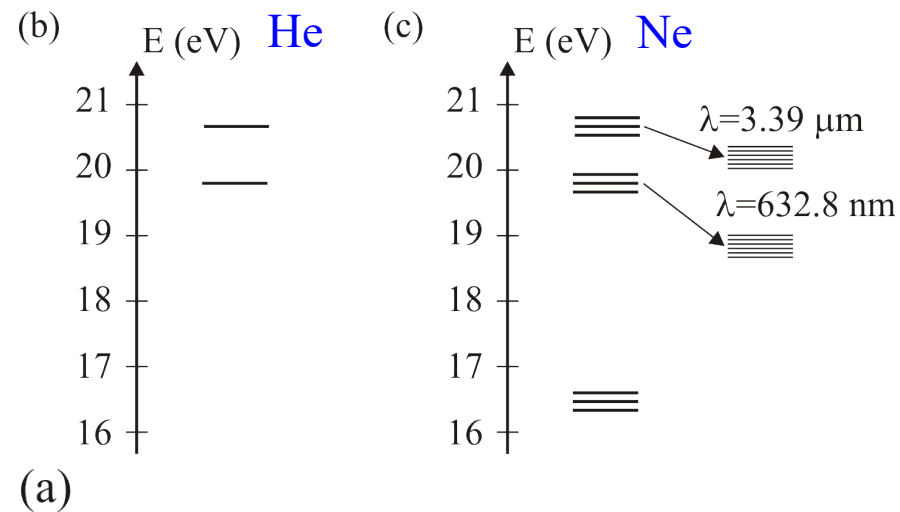
(a) Design of the cavity for the Nd:YAG laser



(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

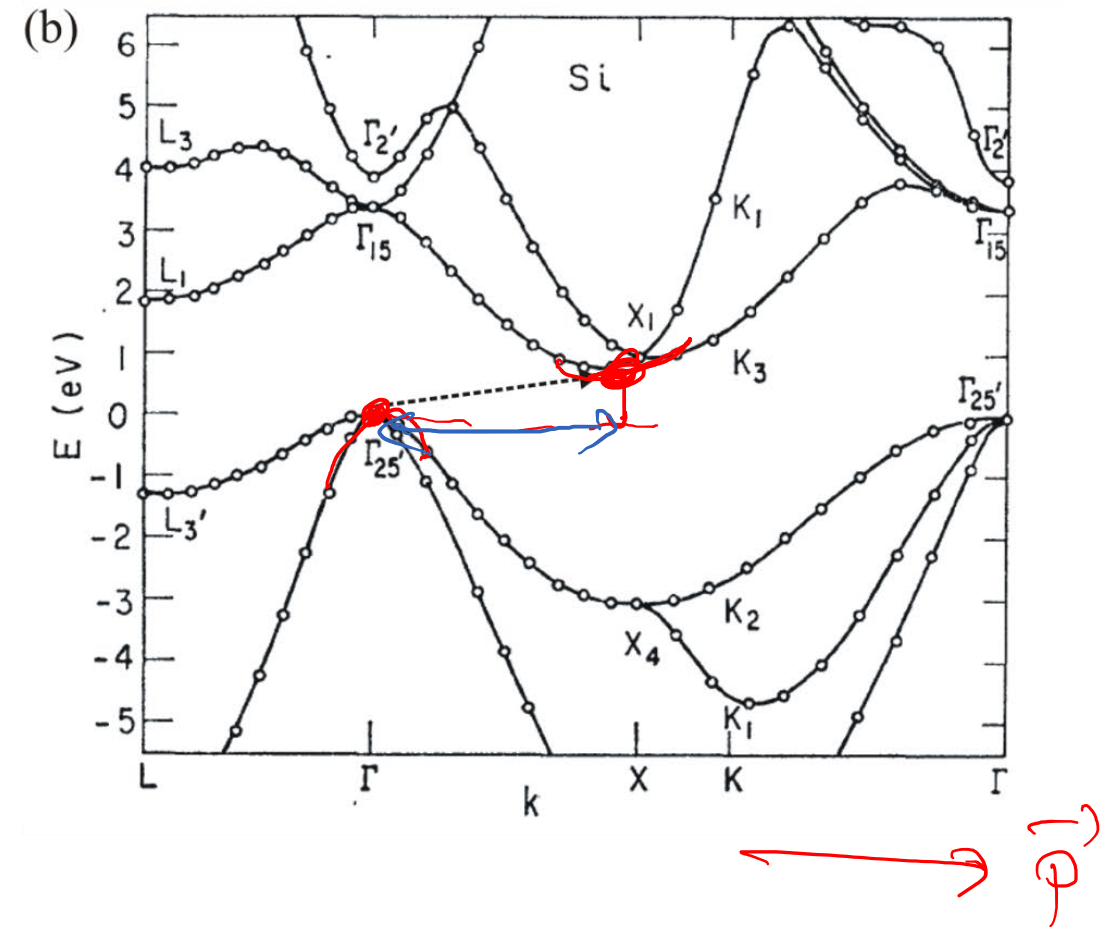
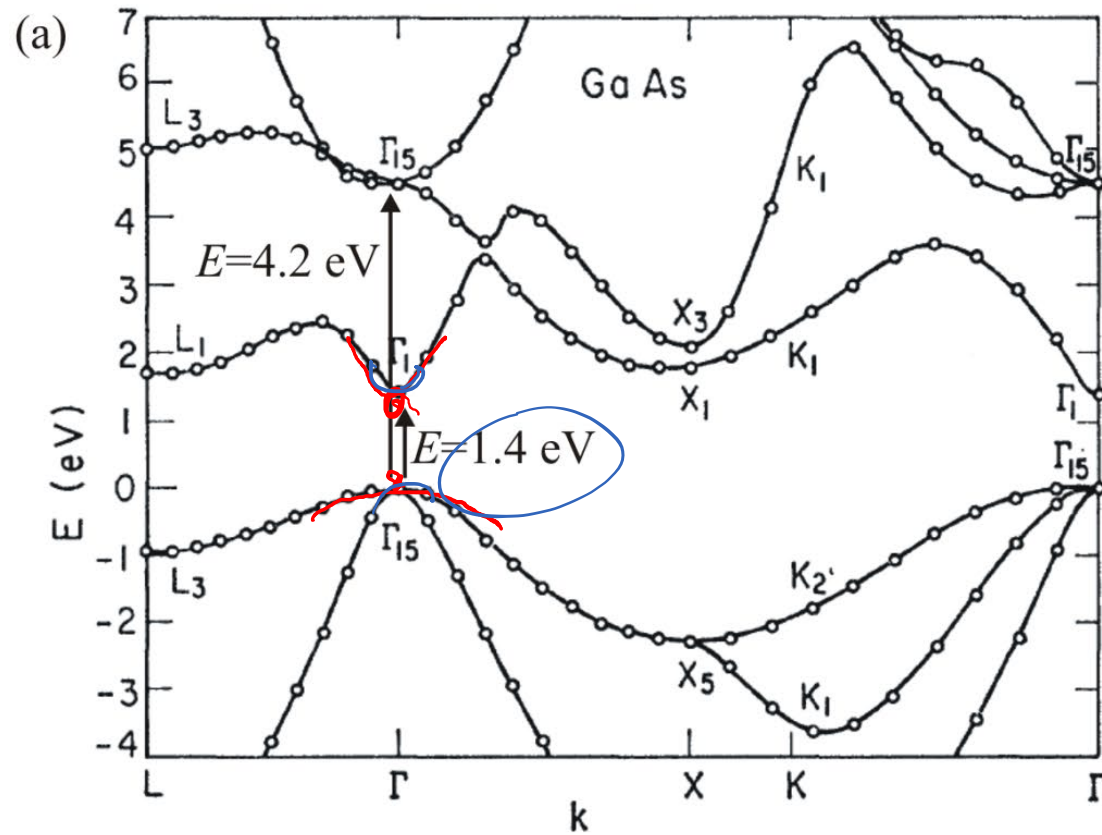


(b)



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

$$\lambda \cdot E = 1,24$$

- L'énergie du bandgap détermine la fréquence/longueur d'onde d'émission $\mu m \cdot eV$

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

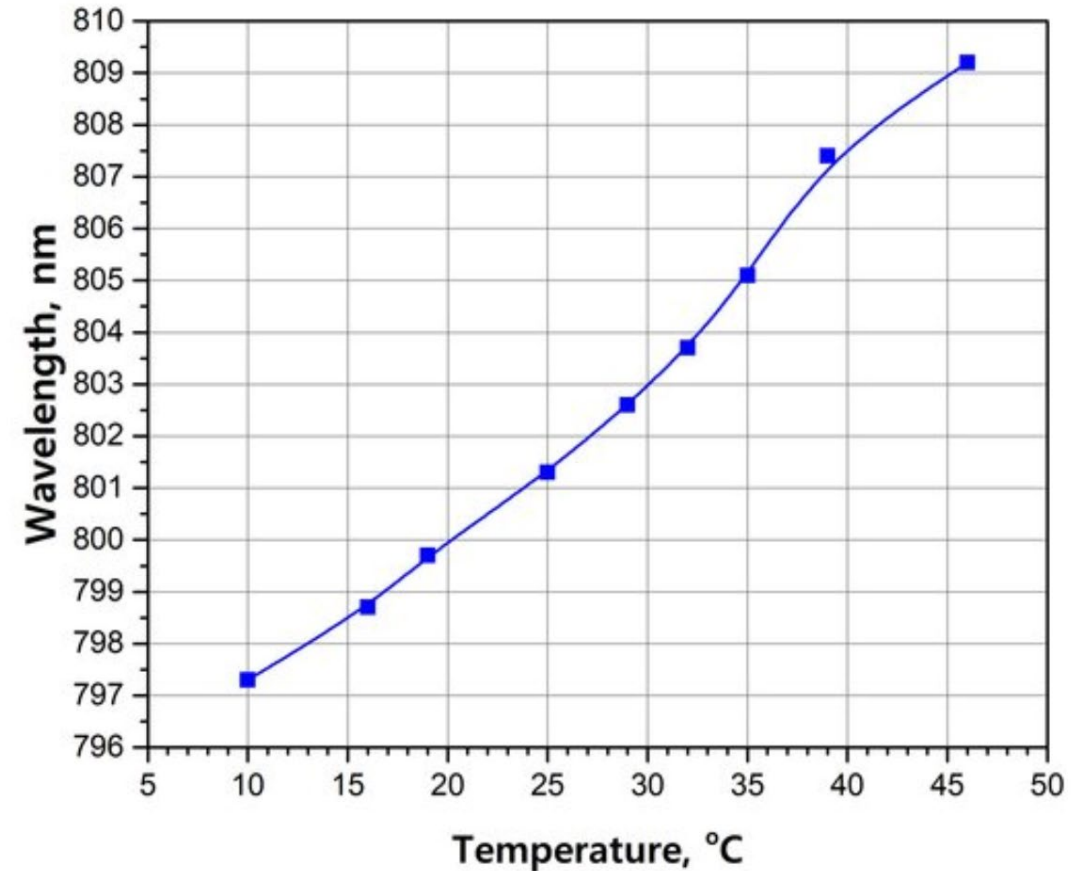
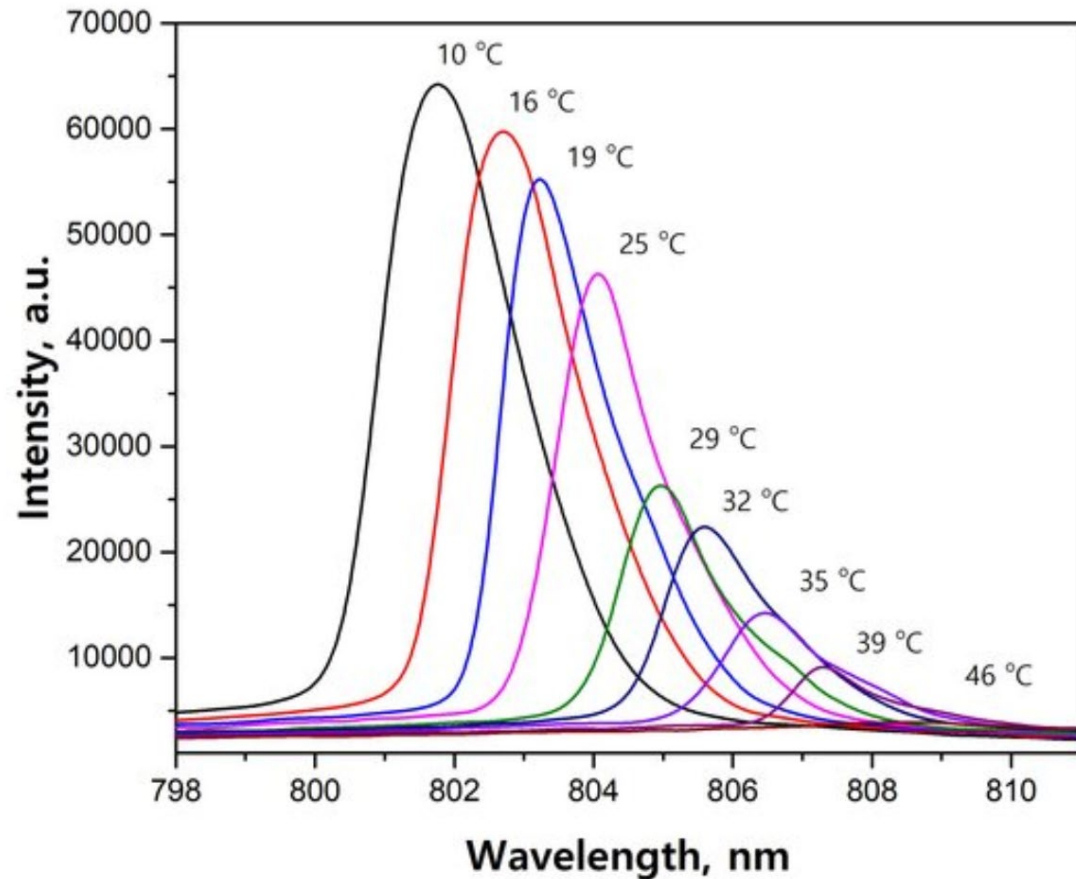
Semiconducteur	GaN	AlGaN	AlGaAs	GaInAsP	InP
E_g (eV)	3.4	3.4 – (5.9)	1.4 – 2.2	0.7 – 2	1.28
λ_0 (μm)	0.36	(0.2) – 0.4	(0.6) – 0.9	0.6 – 1.7	1

Semiconducteur	InAs	InSb	PbSe	SnTe	PbSnTe
E_g (eV)	0.36	0.24	0.26	0.18	0.04 – 0.2
λ_0 (μm)	3.4	5.2	4.8	6.9	6.5 – 3

- Le bandgap dépend de la température $\rightarrow$ la longueur d'onde d'émission aussi

Laser à semiconducteur

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

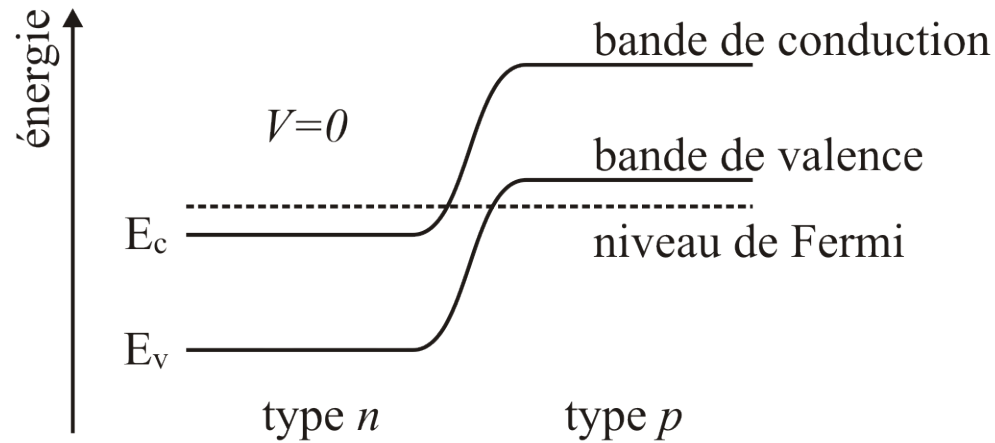


- On peut ajuster la longueur d'onde en chauffant le laser
- Il faut surtout contrôler sa température pour éviter que la longueur d'onde change!

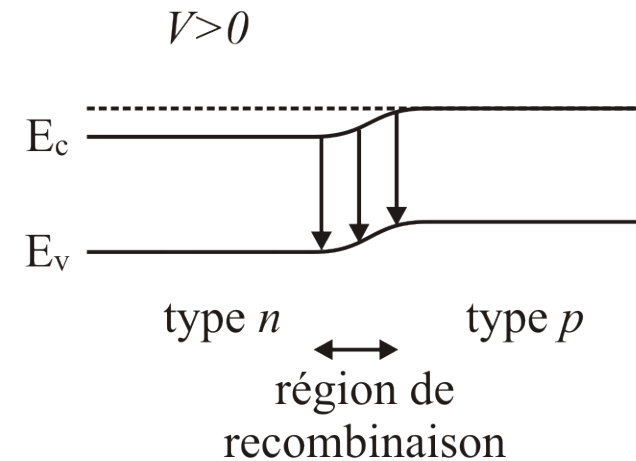
Laser à semiconducteur - Pompage

- 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)

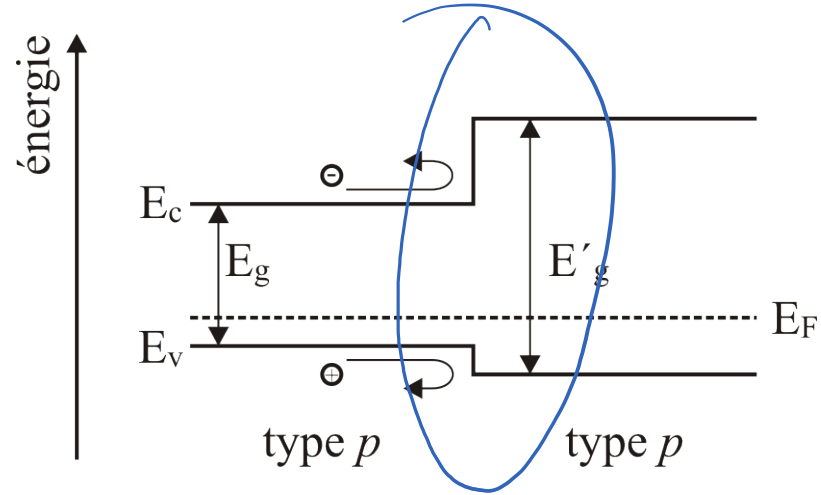


(b)

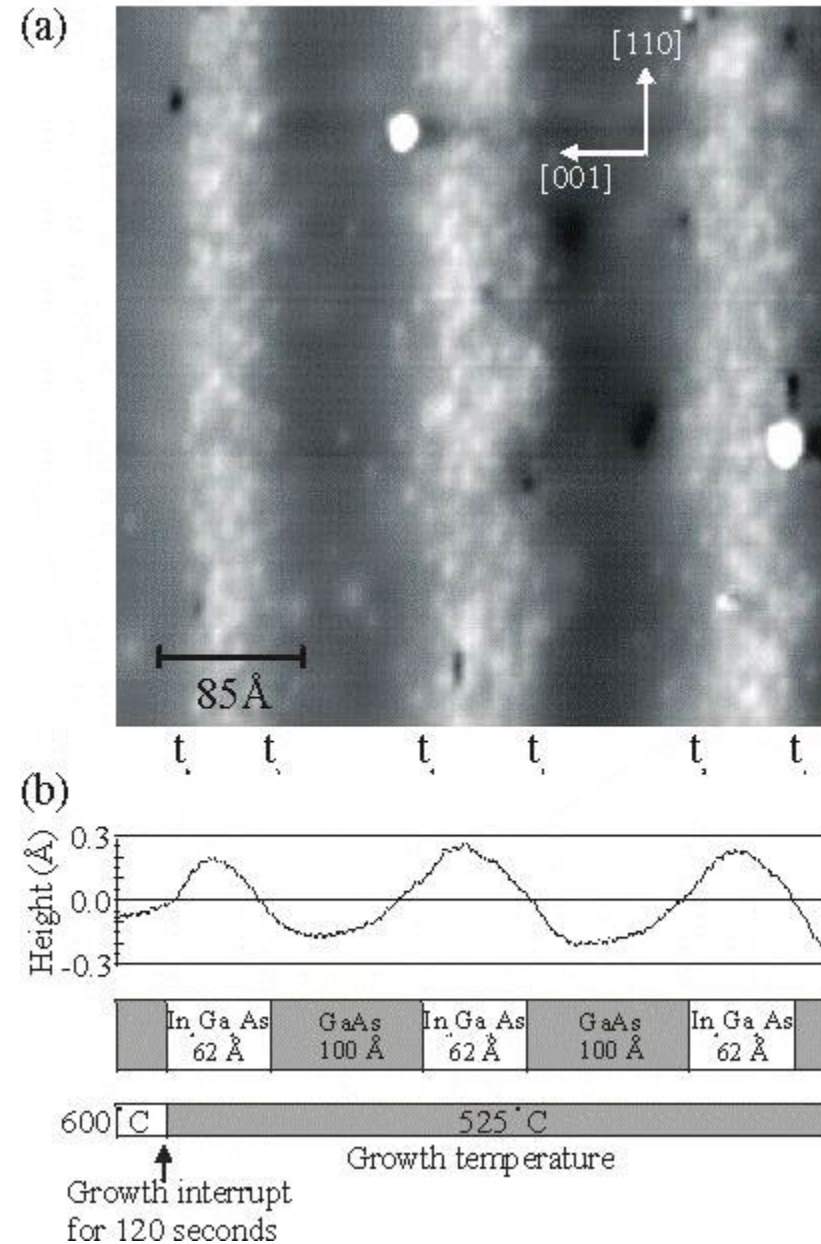


- Inconvénient: les porteurs de charge peuvent s'échapper de la région de recombinaison et ne produisent donc pas de lumière

Diode laser - Hétérostructure

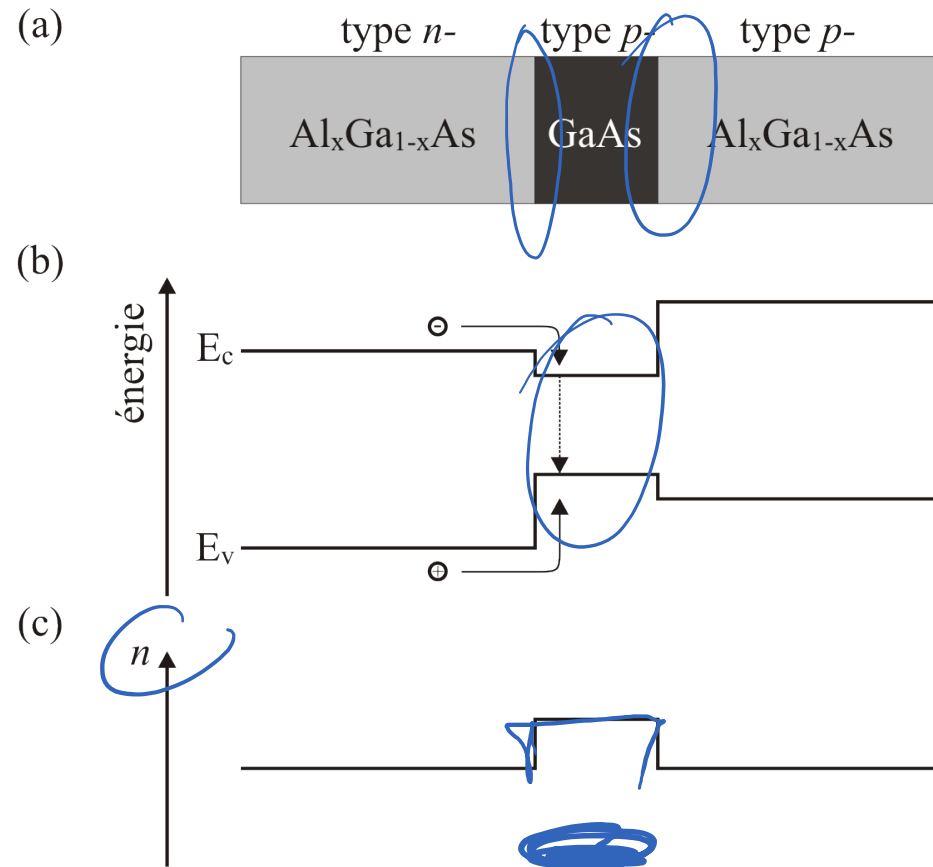


- Deux semiconducteurs avec des bandgaps différents
- Localisation des porteurs de charge à l'interface
- Réalisation par croissance épitaxiale



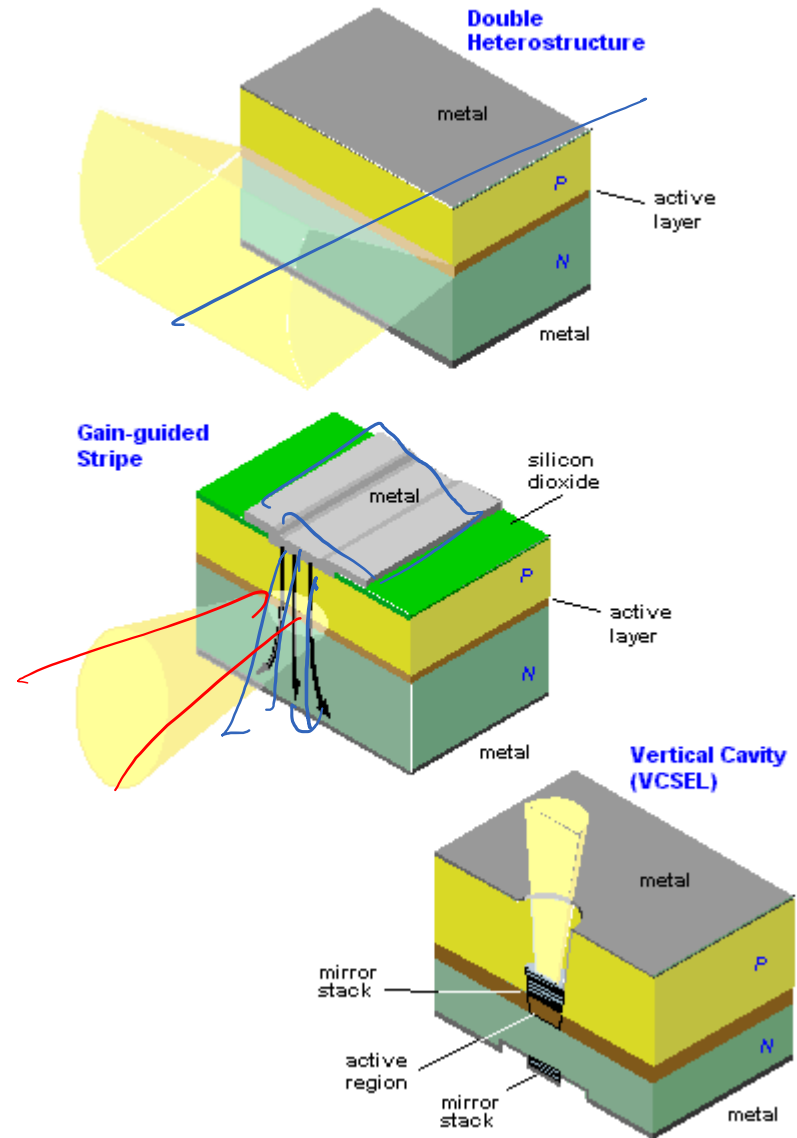
Diode laser – Double hétérostructure

- 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

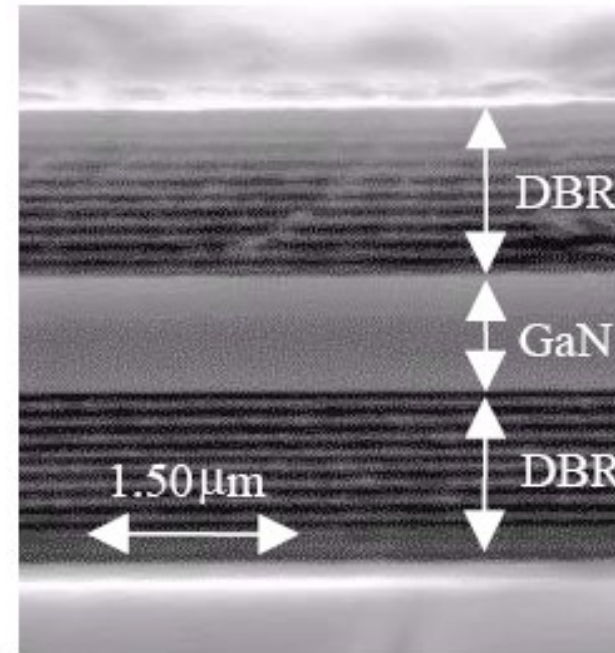
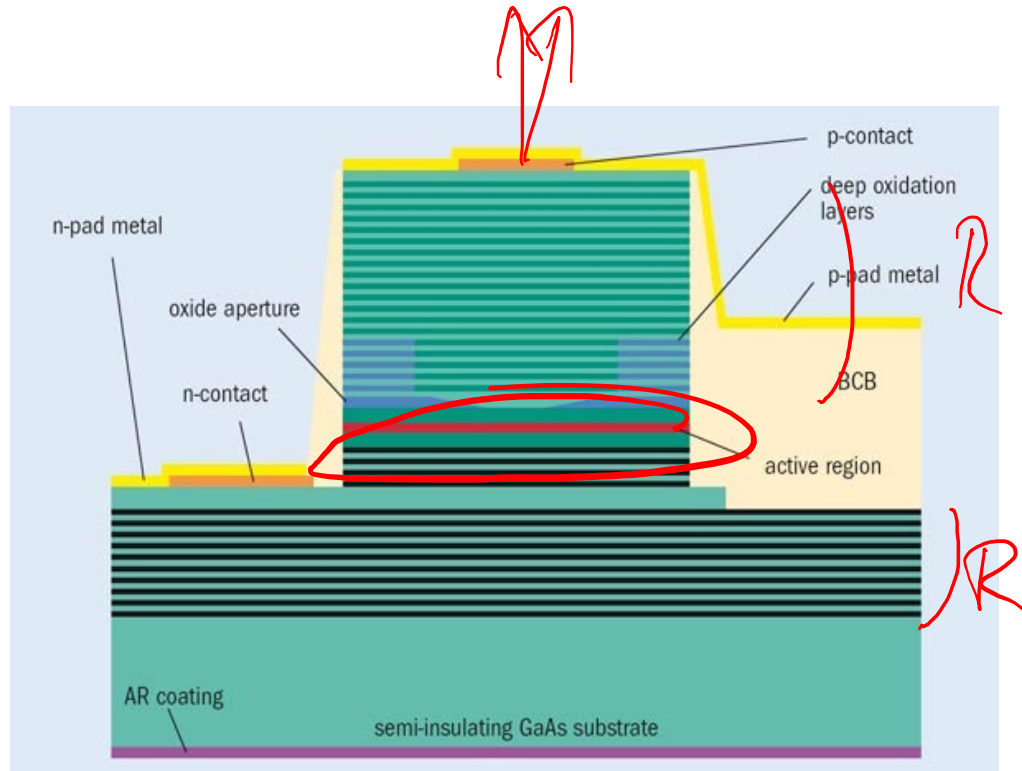


Fig. 5. GaN microcavity, ~800 nm thick, formed by laser-lift off and ICP etching

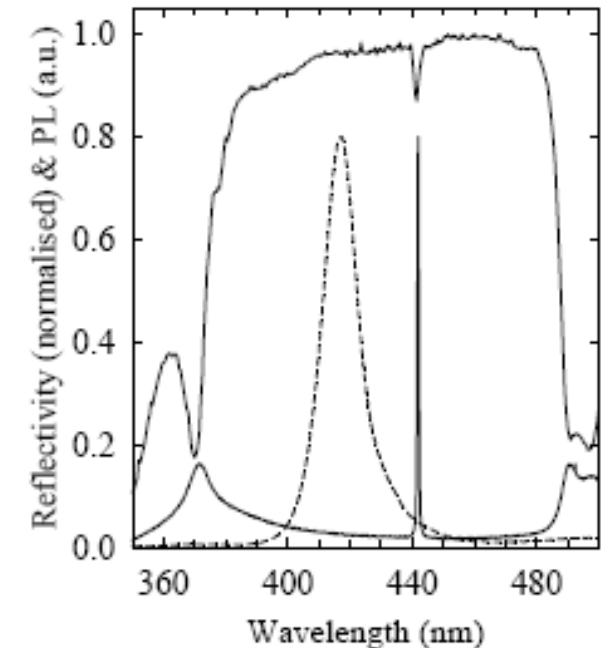
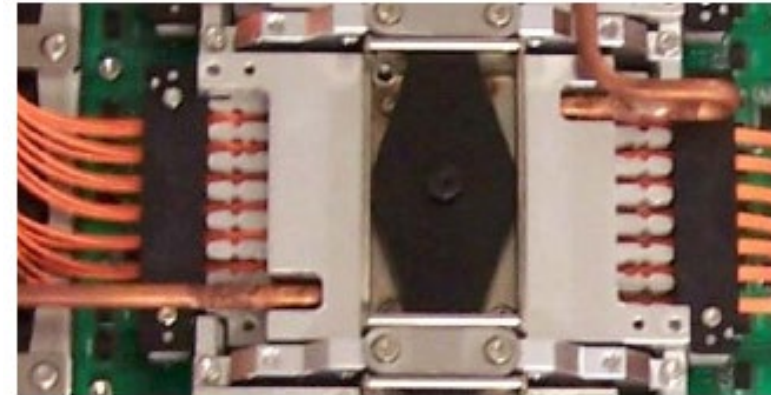
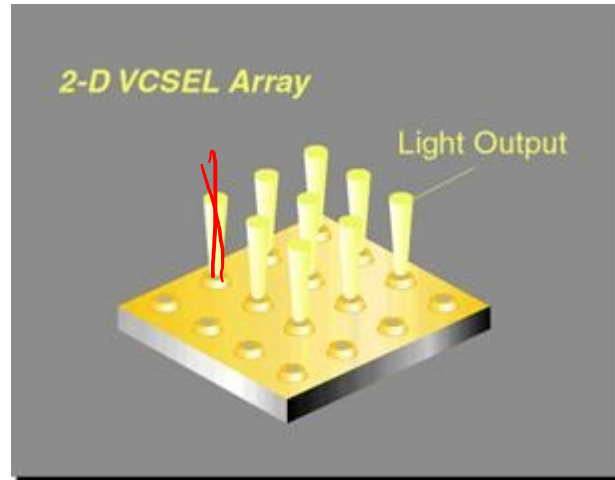


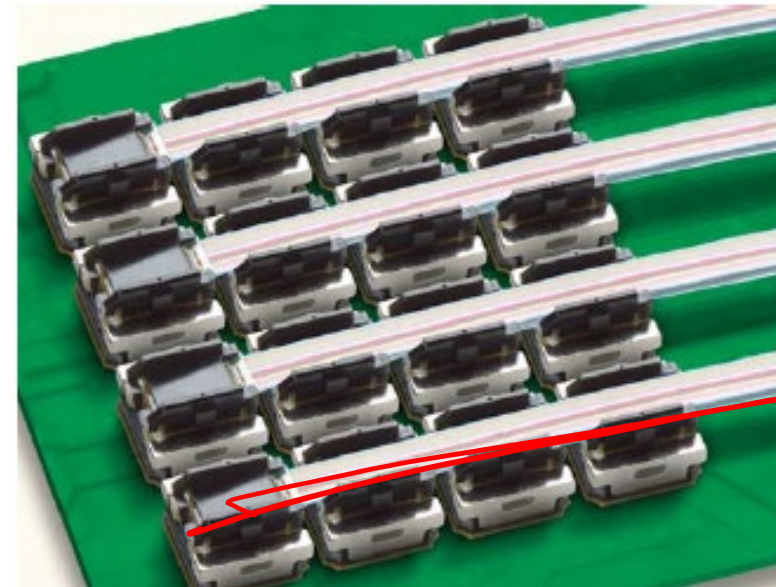
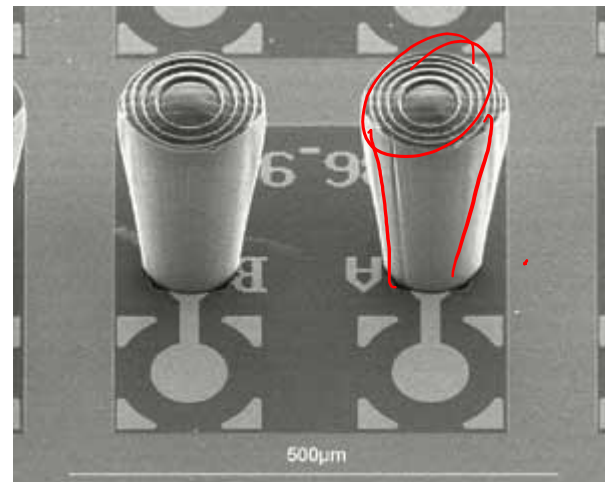
Fig. 6. RT reflectivity and PL data (solid lines) from a microcavity containing a single InGaN quantum well. The dashed line shows RT PL from the as grown wafer.

VCSEL

- Très bonnes possibilités d'intégration avec des fibres optiques

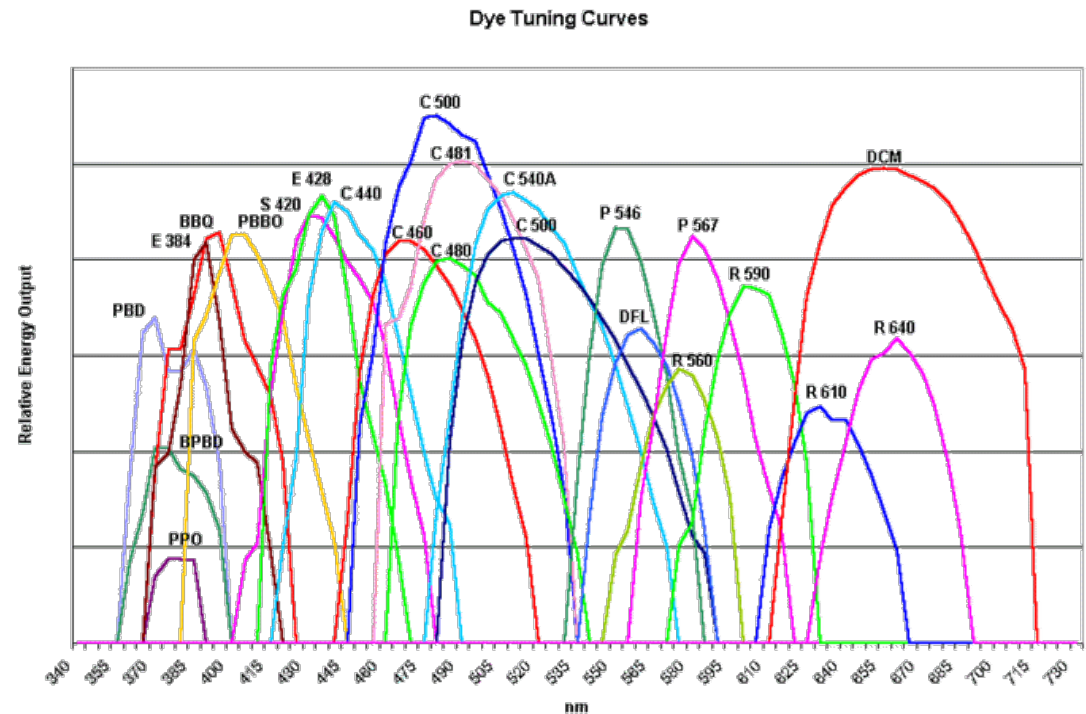
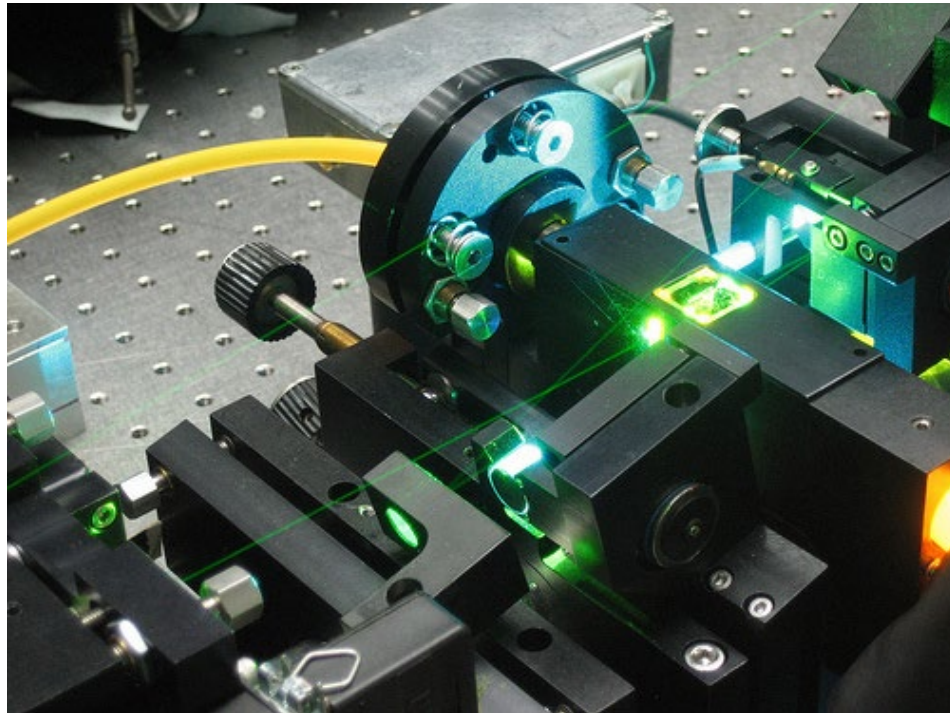


A. Benner et al., paper OTuH1, OFC 2010

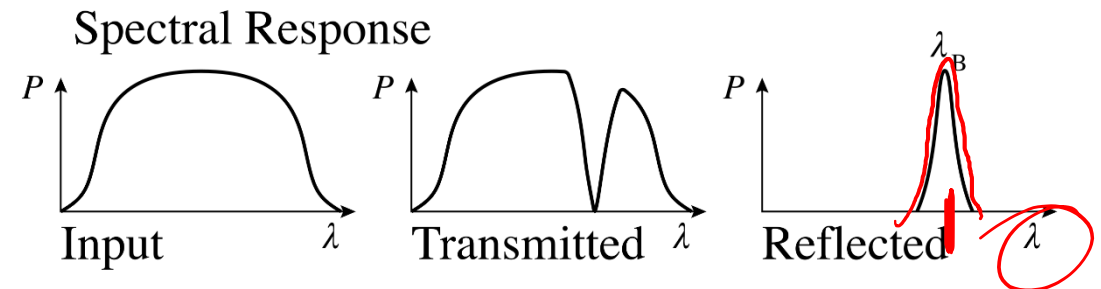
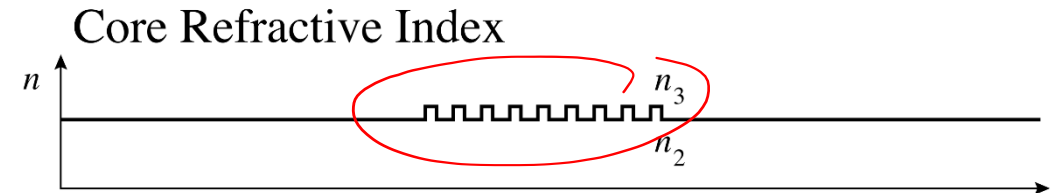
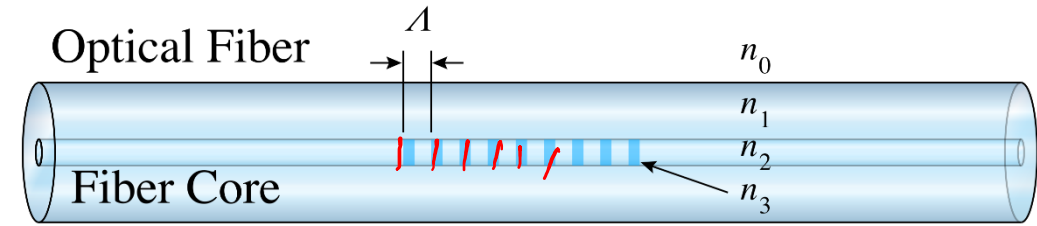
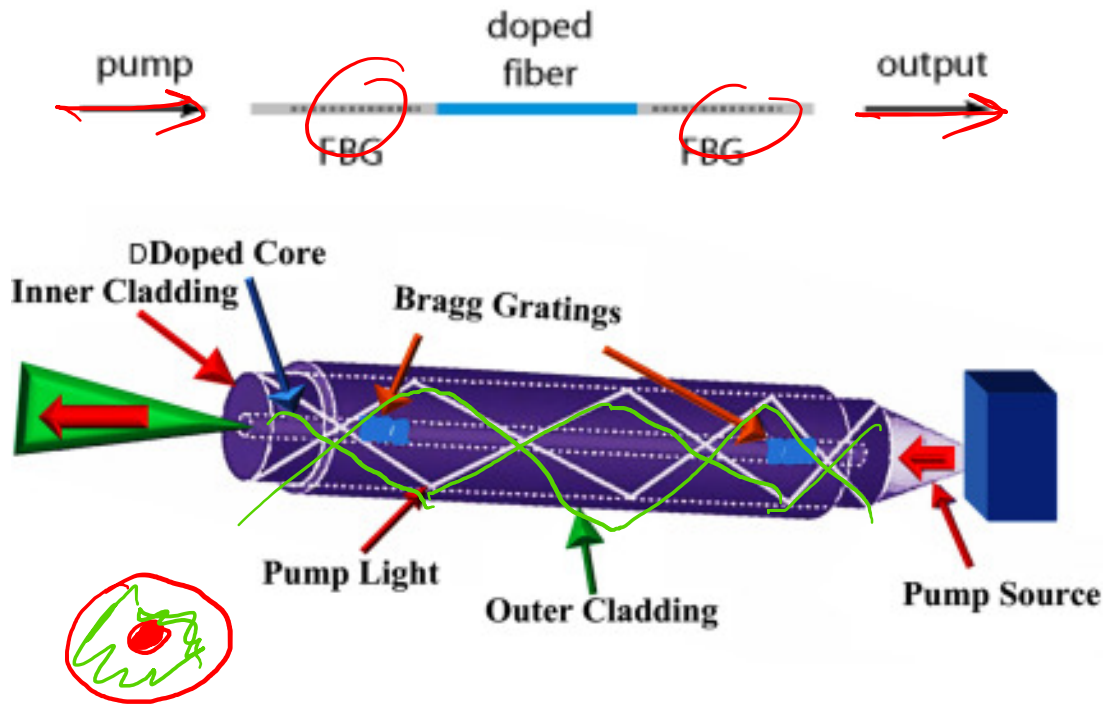


Laser à colorant

- 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



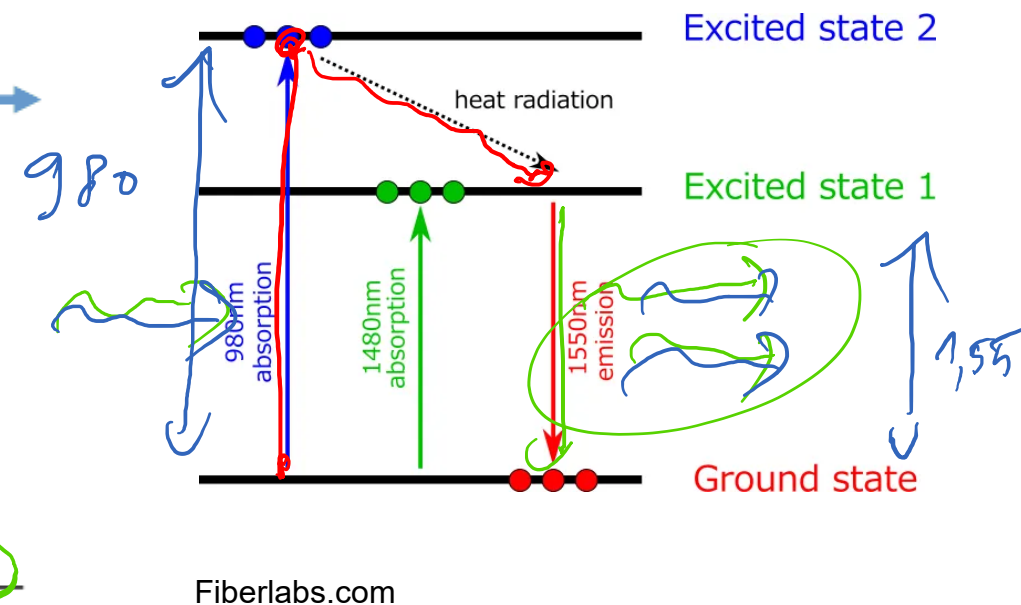
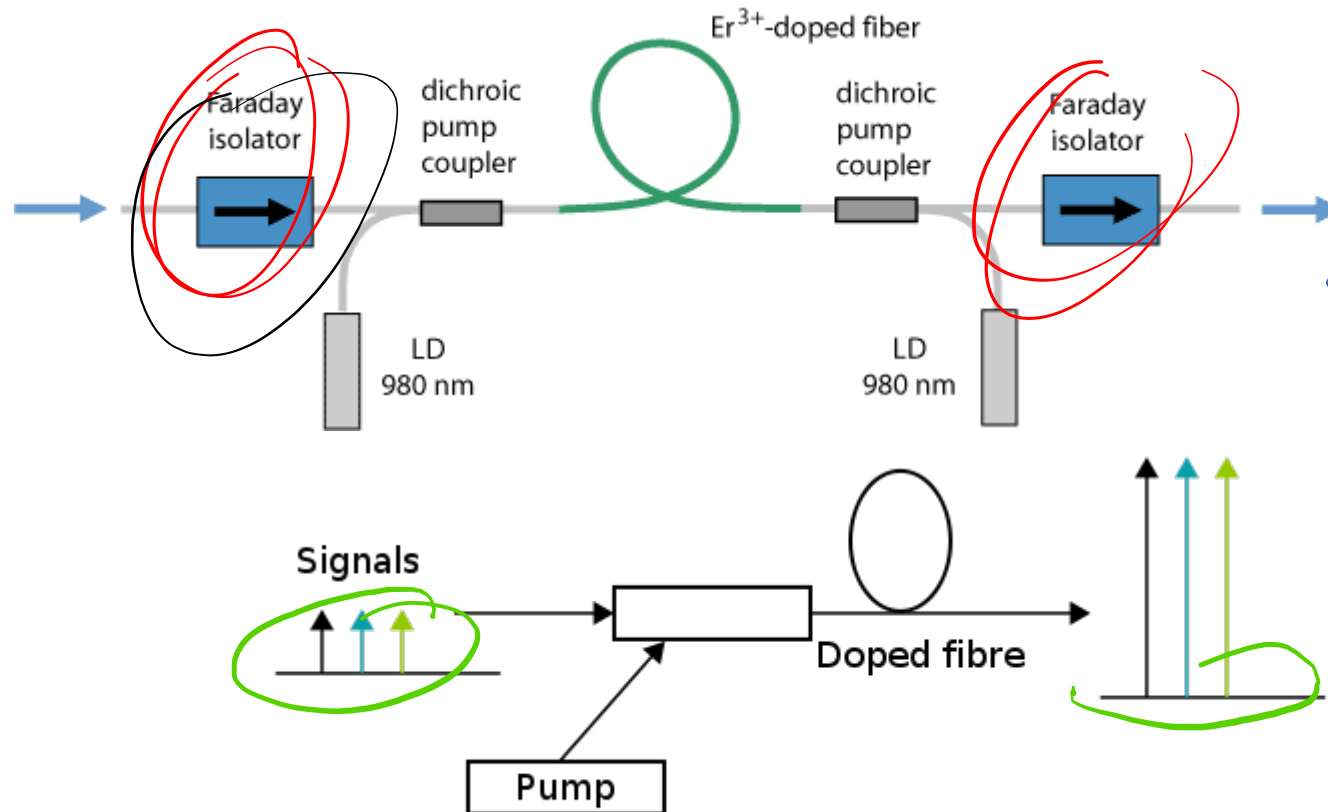
Laser à fibre



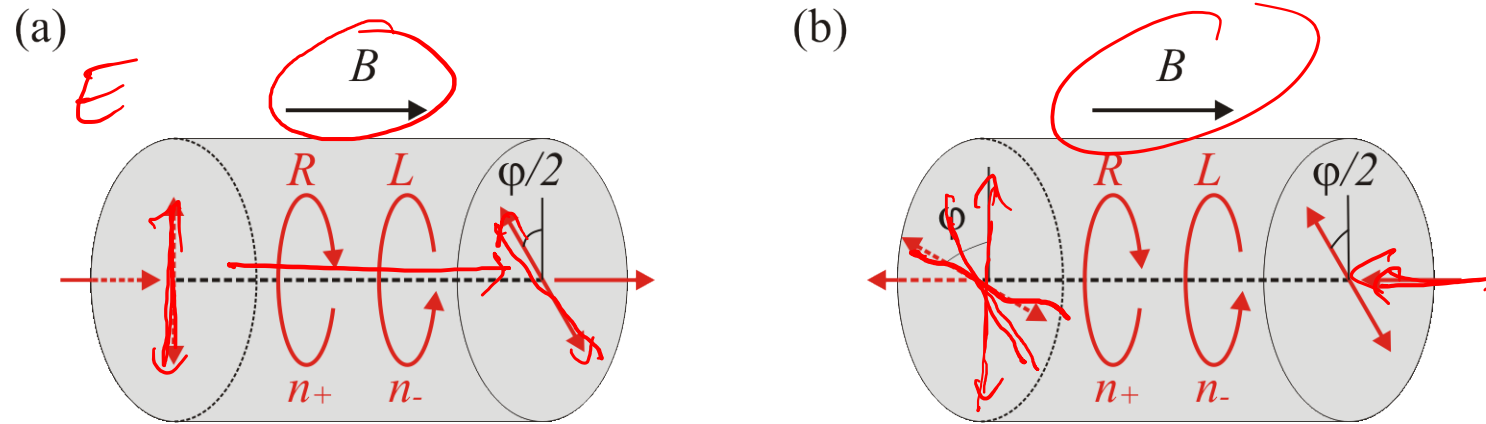
- Une section de fibre optique dopée avec des composants actifs produisant du gain peut être utilisée comme laser
- Parfois double cladding pour la lumière de pompe
- Des miroirs de Bragg sont gravés dans la fibre et permettent de créer une cavité

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 $\lambda=1'550\text{ nm}$

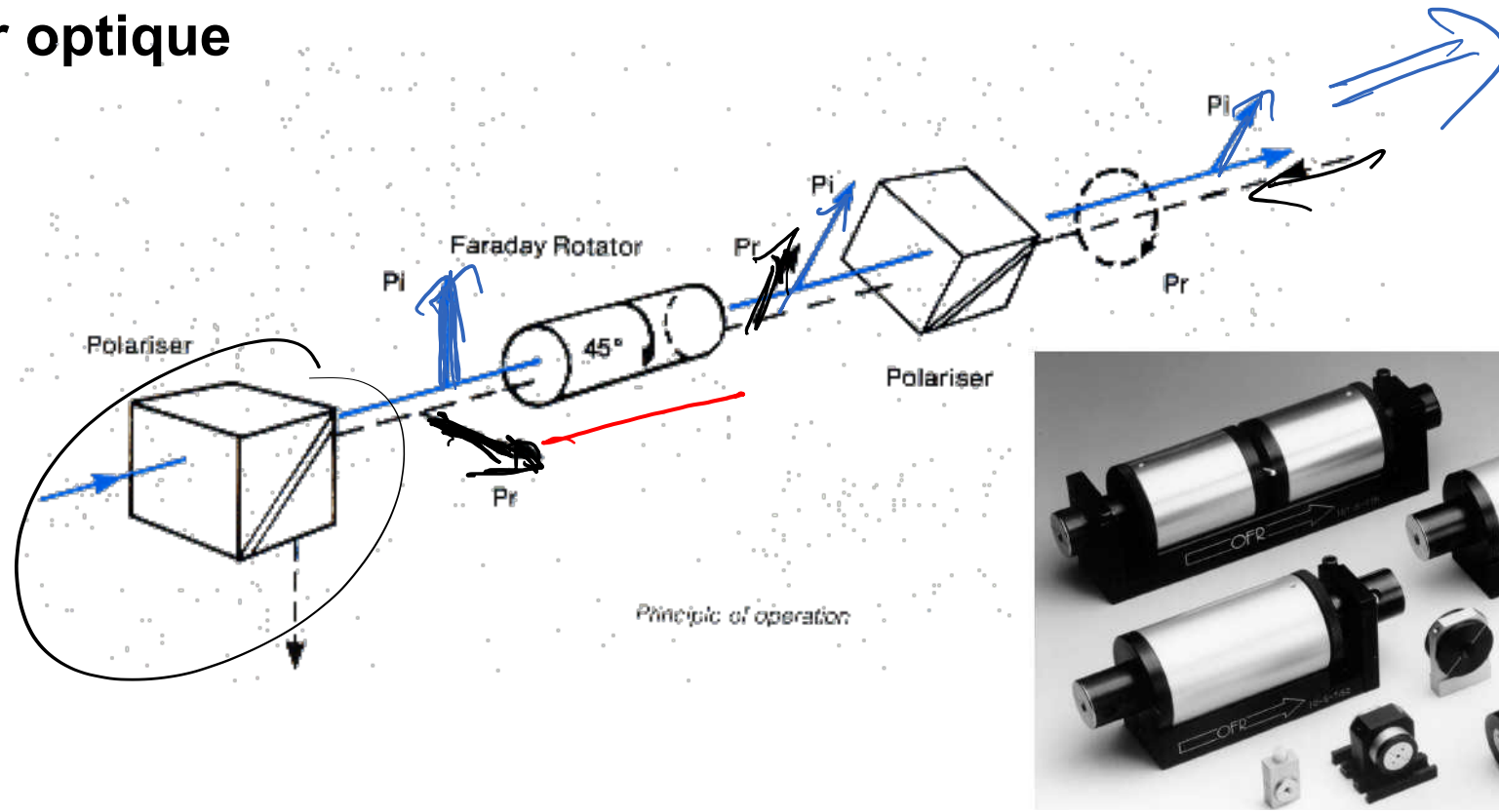


Rotateur de Faraday



- 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

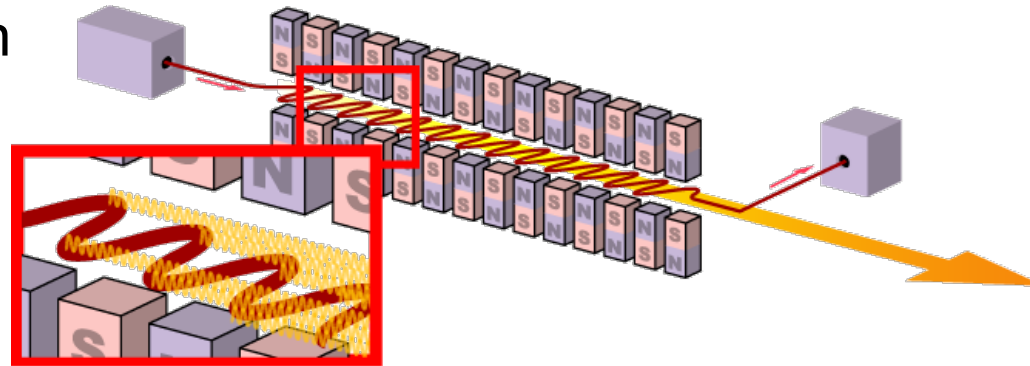
Isolateur optique



- 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

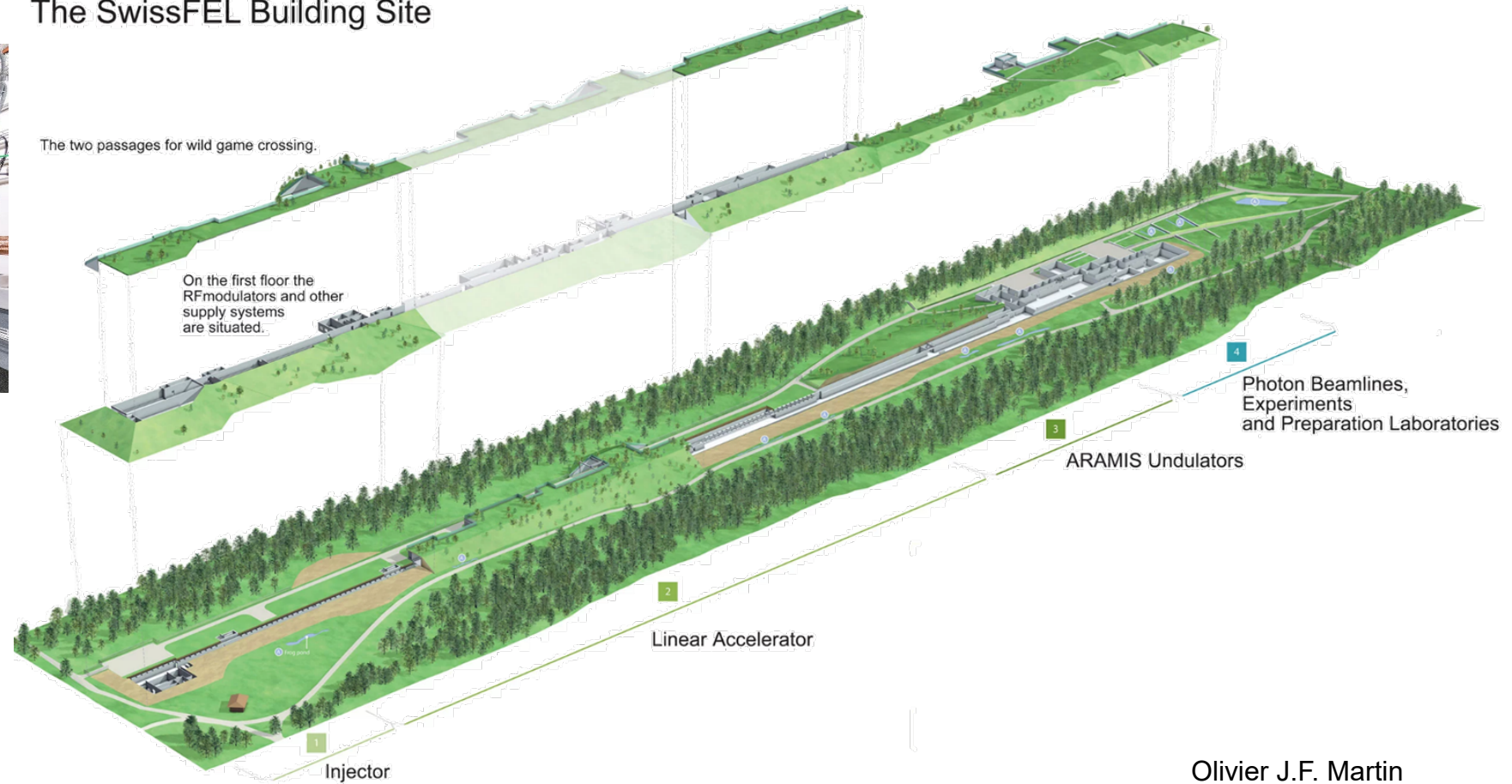


Laser à électron libre – Modèle suisse

- 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

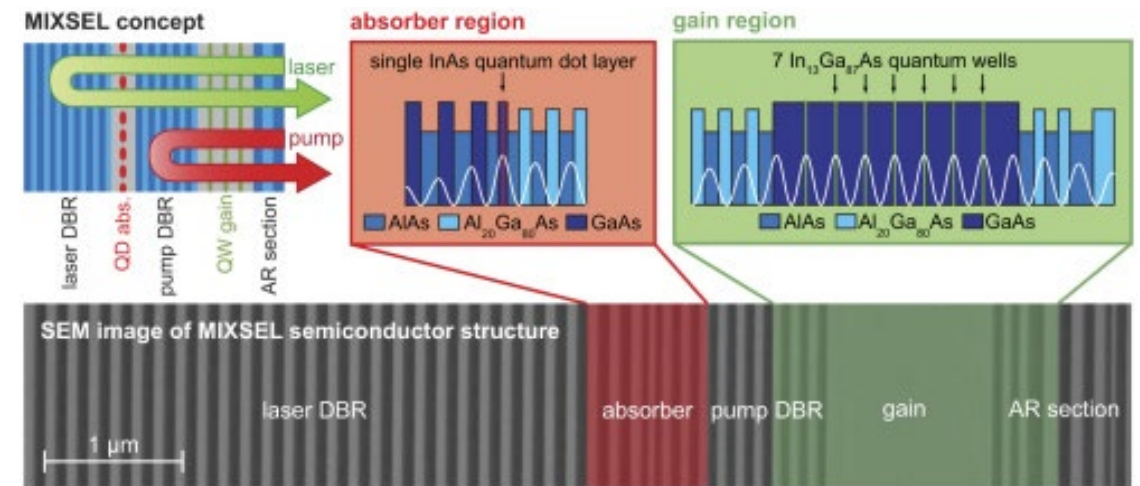
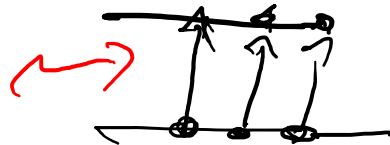
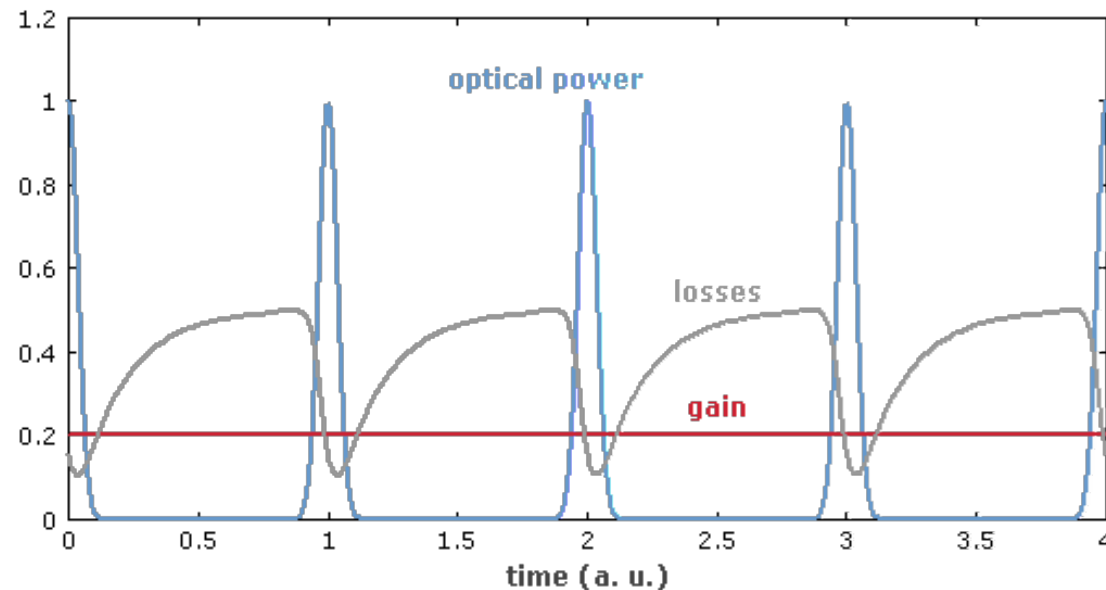


The SwissFEL Building Site



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!