

Ingénierie optique

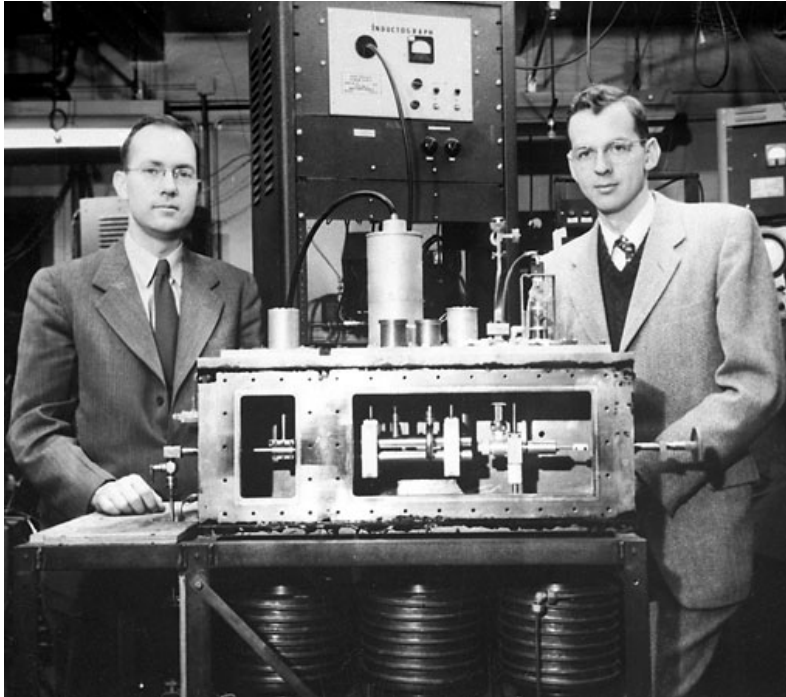
Semaine 13 – partie 1

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



Lasers

- Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation
- Microwave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation



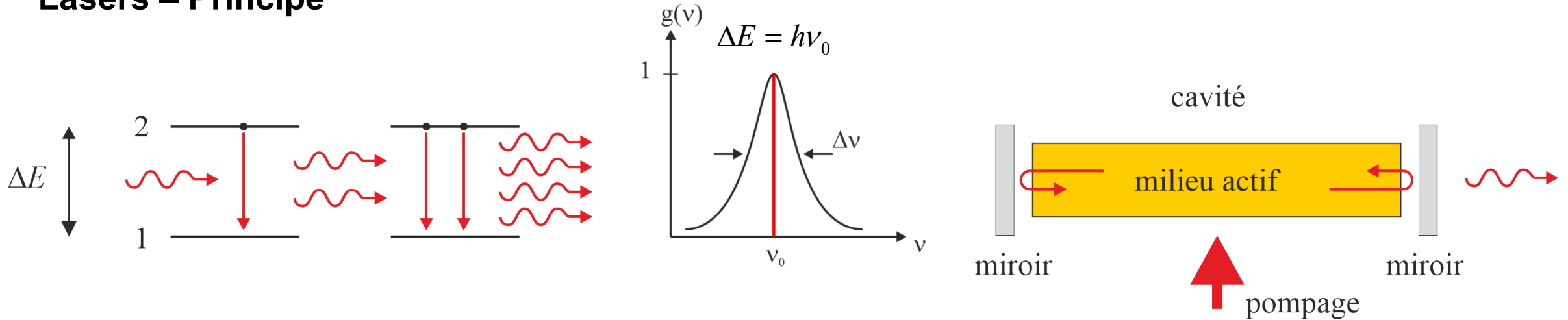
Townes, Gordon (et Zeiger) 1954, prl.aps.org



Townes listening to the 100 Hz beating produced by the interference of the first two masers

- 1958: Shalow et Townes, travail théorique
- 1960: Maiman premier laser rubis
- 1962: première diode laser
- 1964: prix Nobel (Basov, Prokhorov et Townes)

Lasers – Principe



- Objectif: amplifier la lumière et créer un rayonnement cohérent (donc avec une très petite largeur spectrale) en utilisant l'interaction lumière-matière
- Ingrédients?
 - émission stimulée → milieu actif
 - pompage → optique, électrique, chimique
 - feedback et effet de filtre → cavité, résonateur

Cavité laser (Fabry-Perot)

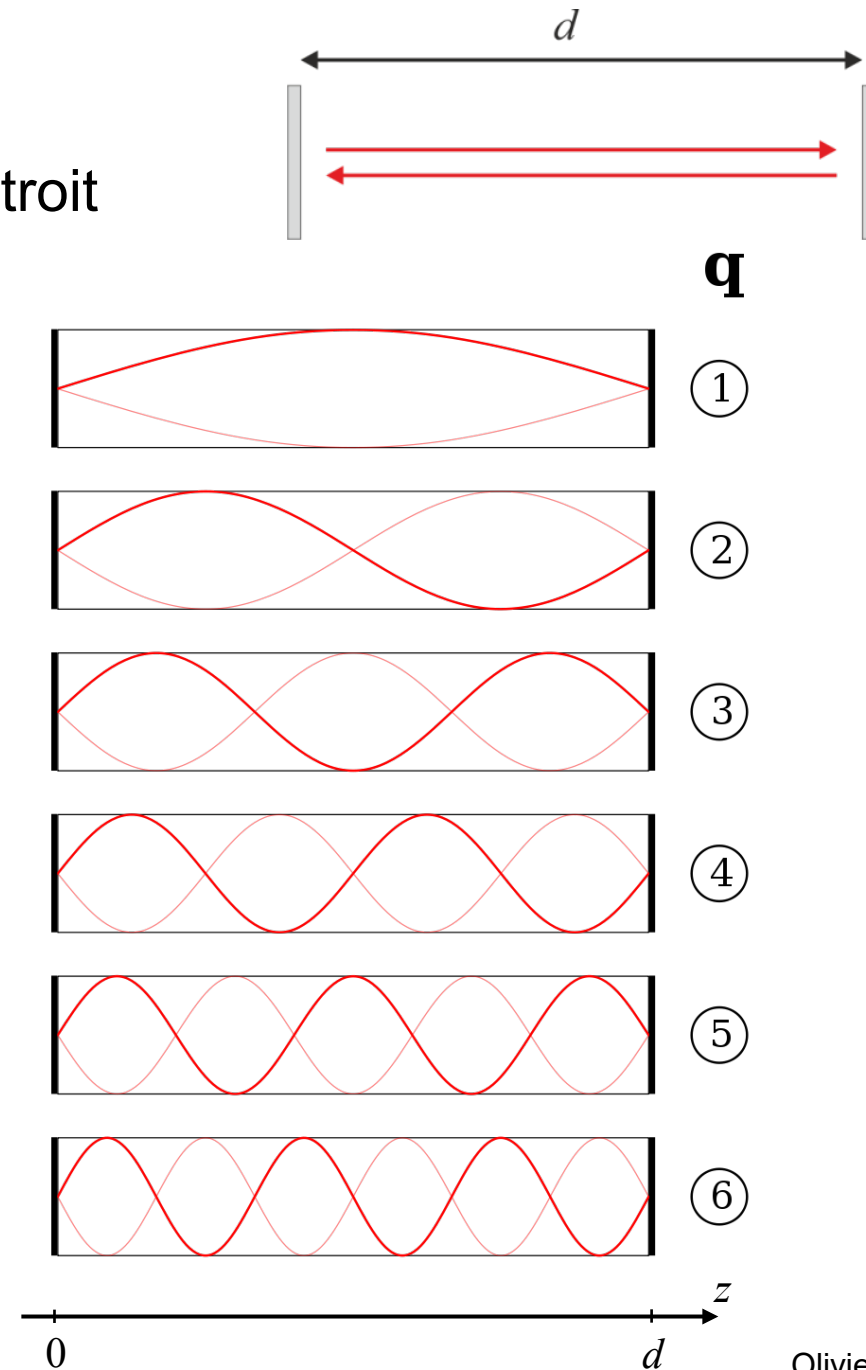
- Rôle principal: créer un spectre d'émission étroit
- Champ électrique dans la cavité
(modes de la cavité):

$$u(z, t) = \Re \{ U(z) \exp(j2\pi\nu t) \}$$

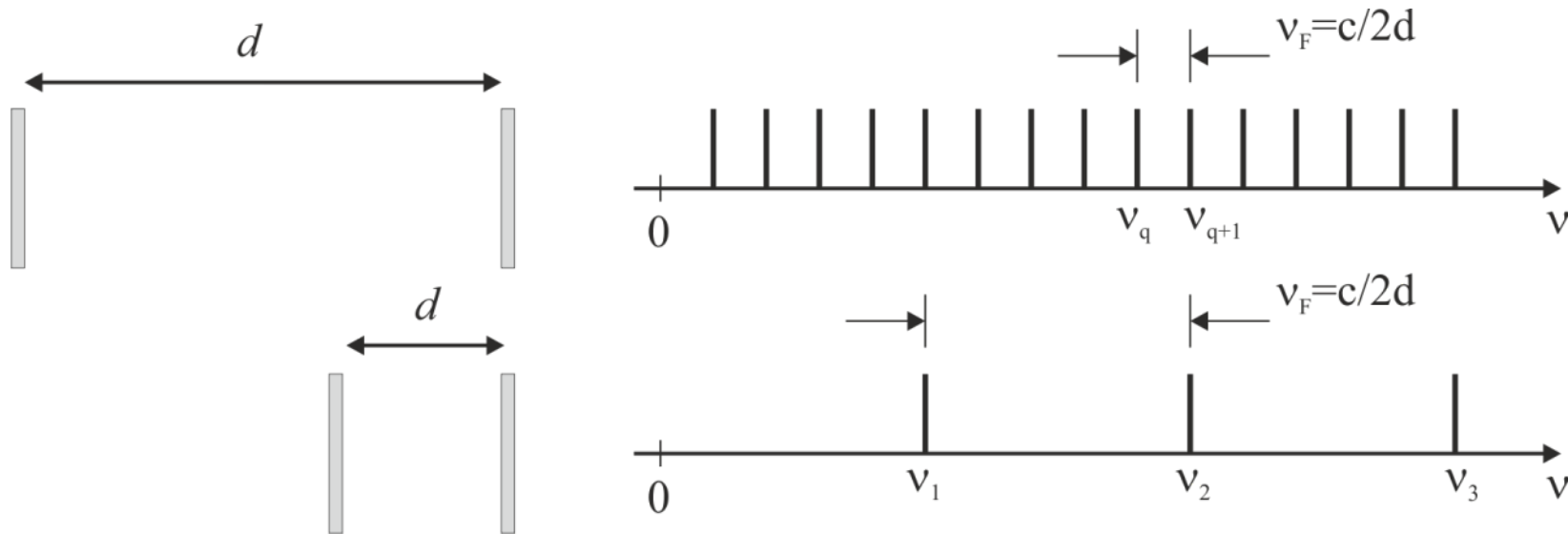
$$= \Re \{ A_q \sin(k_q z) \exp(j2\pi\nu_q t) \}$$

s'annule en $z=0$ et $z=d$

$$k_q = q \frac{\pi}{d} \quad (q = 1, 2, \dots)$$



Cavité laser (Fabry-Perot) – Miroirs parfaits

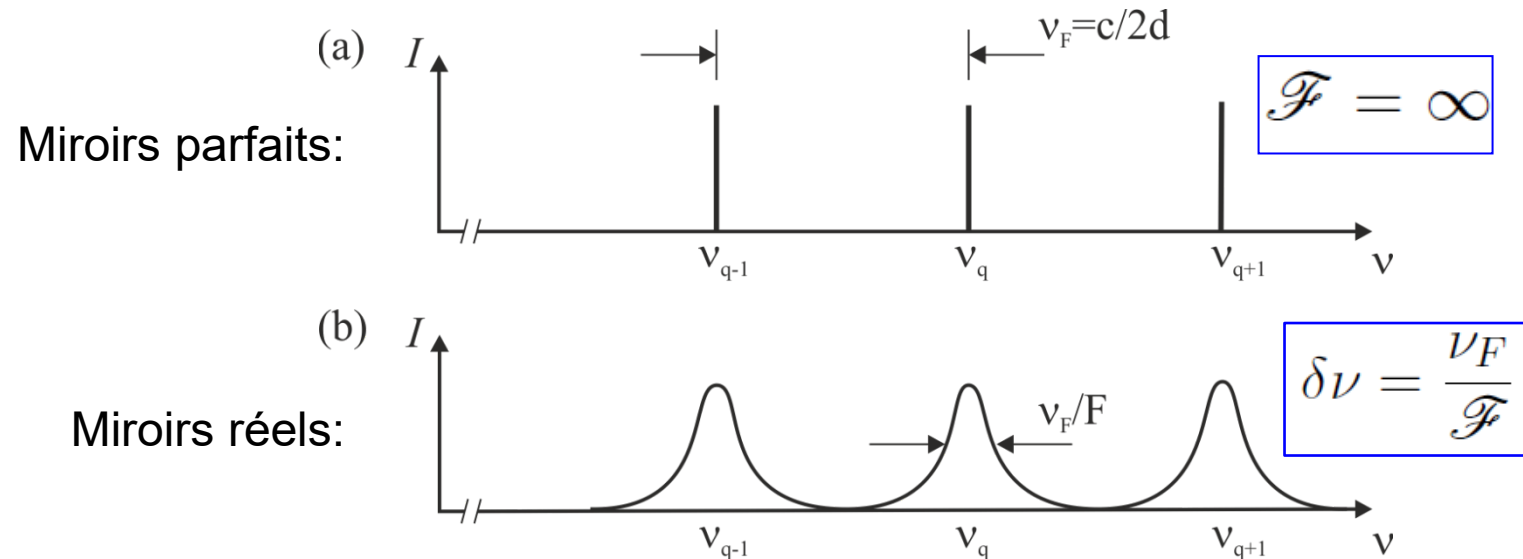


- On considère des miroirs ($r = 1$) parfaits et pas de perte dans le milieu se trouvant dans la cavité
- Les modes sont espacés régulièrement dans l'espace des fréquences ν
- Cet espacement (ν_F *free spectral range*) dépend de la taille de la cavité

$$\nu_q = \frac{ck_q}{2\pi} = q \frac{c}{2d}, \quad q = 1, 2, \dots$$

$$\nu_F = \frac{c}{2d}$$

Cavité laser (Fabry-Perot) – Miroirs réels



- Avec des miroirs réels ($r \neq 1$) ou de l'absorption dans la cavité, l'intensité diminue d'un facteur $|r|^2$ pendant un aller-retour et le spectre d'intensité prend une autre forme:

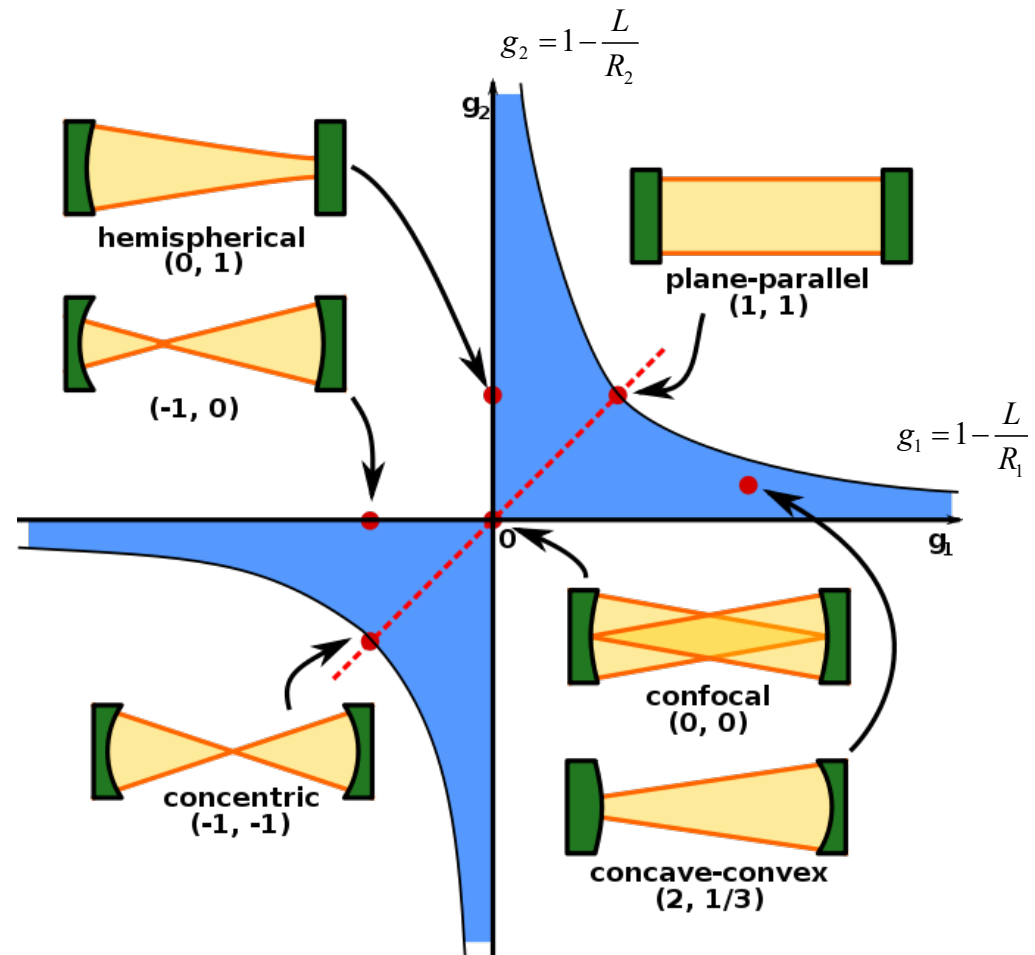
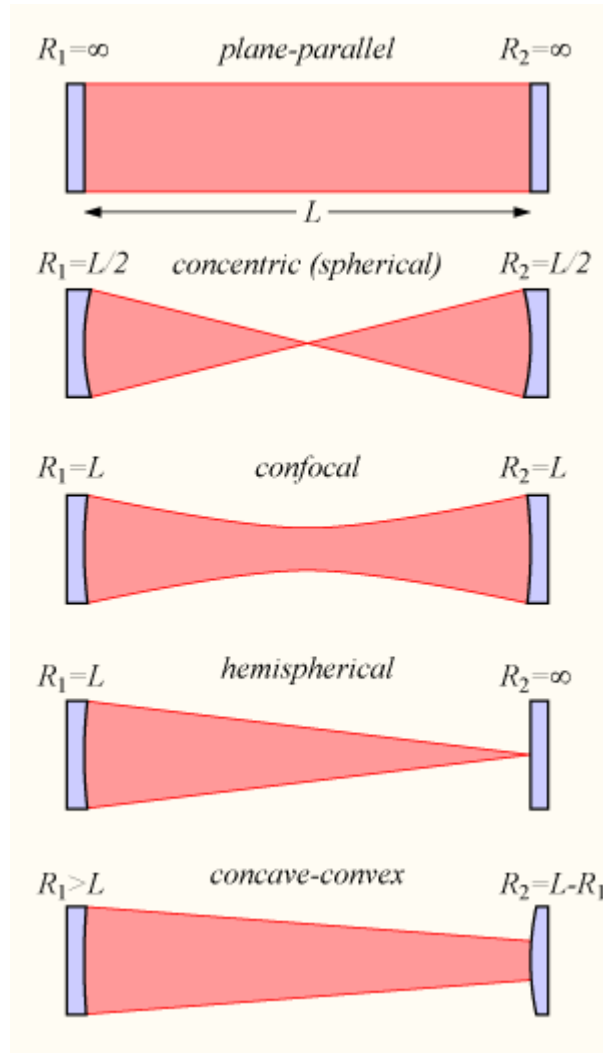
$$I = \frac{I_{\max}}{1 + (2\mathcal{F}/\pi)^2 \sin^2(\pi\nu/\nu_F)}, \quad I_{\max} = \frac{I_0}{(1 - |r|)^2}$$

- On a introduit la finesse de la cavité

$$\mathcal{F} = \frac{\pi \sqrt{|r|}}{1 - |r|}$$

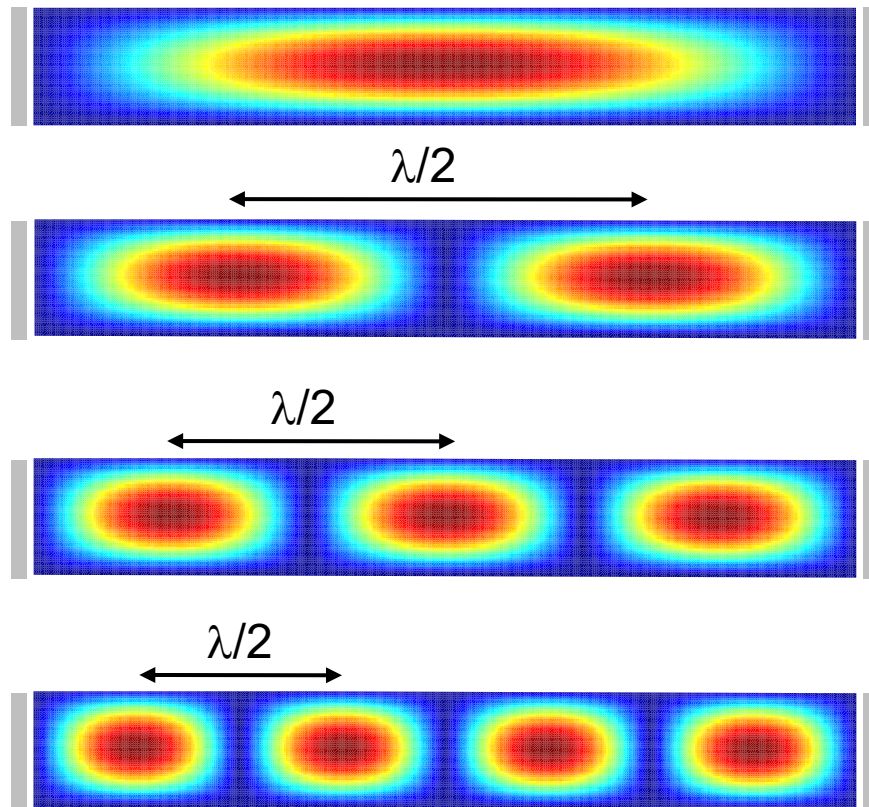
Cavité laser (Fabry-Perot) – Conditions de stabilité

- Il existe différentes géométries de résonateurs
- L'alignement d'un résonateur est primordial pour sa stabilité

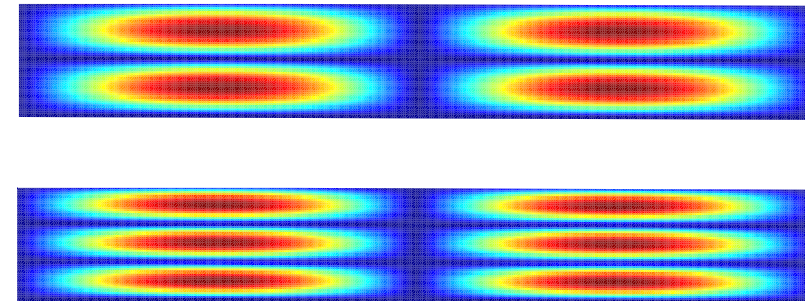


Cavité laser (Fabry-Perot) – Modes transverses

- En plus des modes longitudinaux que nous venons de voir, il existe aussi des modes transverses, correspondant à la répartition transverse du champ électrique (comme les modes d'un guide d'onde)
- On essaie de limiter ces modes transverses car ils produisent un faisceau laser de mauvaise qualité



Modes transverses d'ordre plus élevés

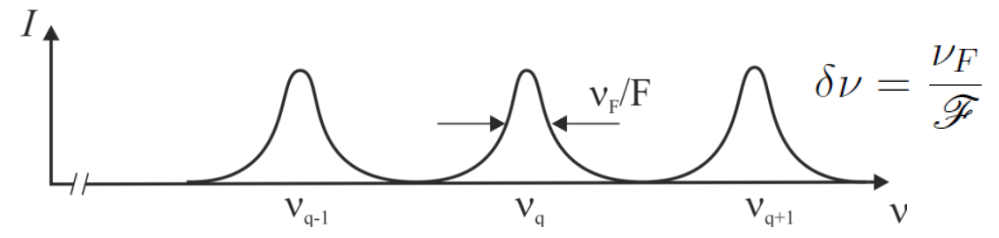


Cavité optique

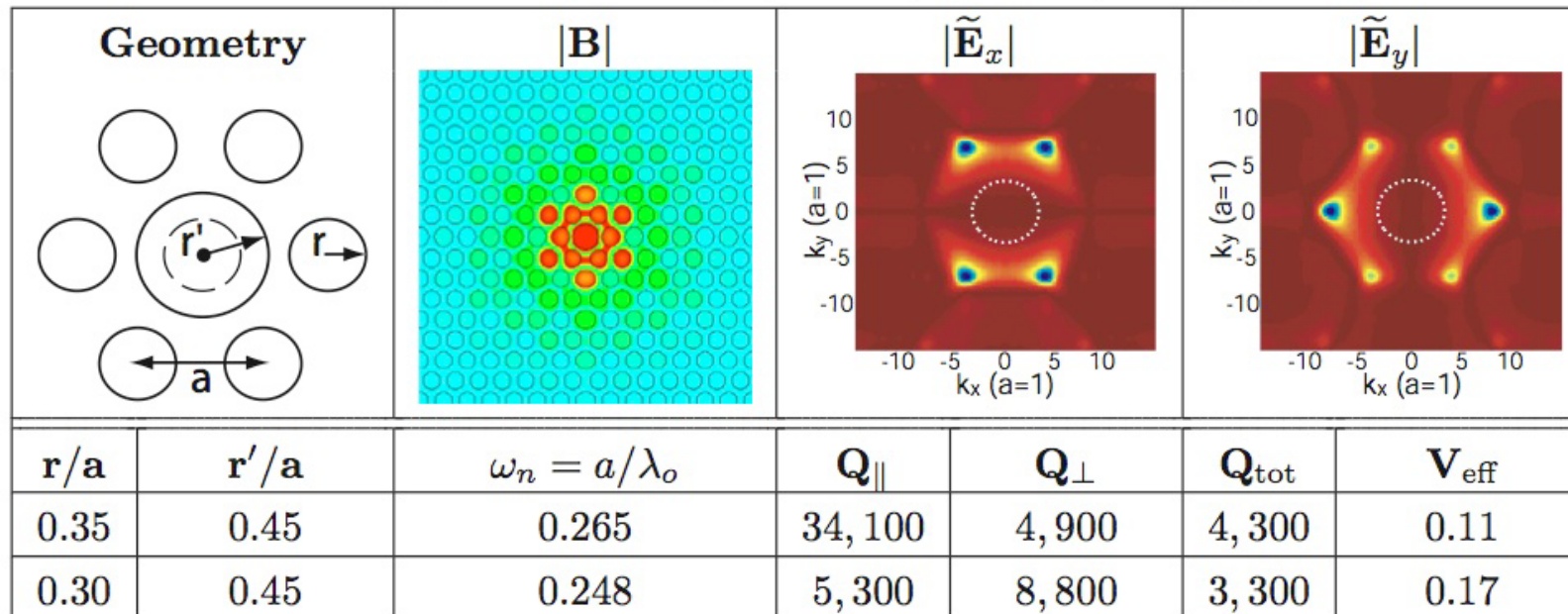
- Facteur de qualité d'une cavité:

$$Q = 2\pi \frac{\text{Energie emmagasinée}}{\text{Energie perdue par cycle}}$$

$$Q = \frac{\nu_0}{\delta\nu} = \frac{\nu_0}{\nu_F} \mathcal{F}$$



- Valeur typique: 10^6 , mais peuvent atteindre des facteurs de qualité extrêmement élevés ($\sim 10^{11}$)



Ingénierie optique

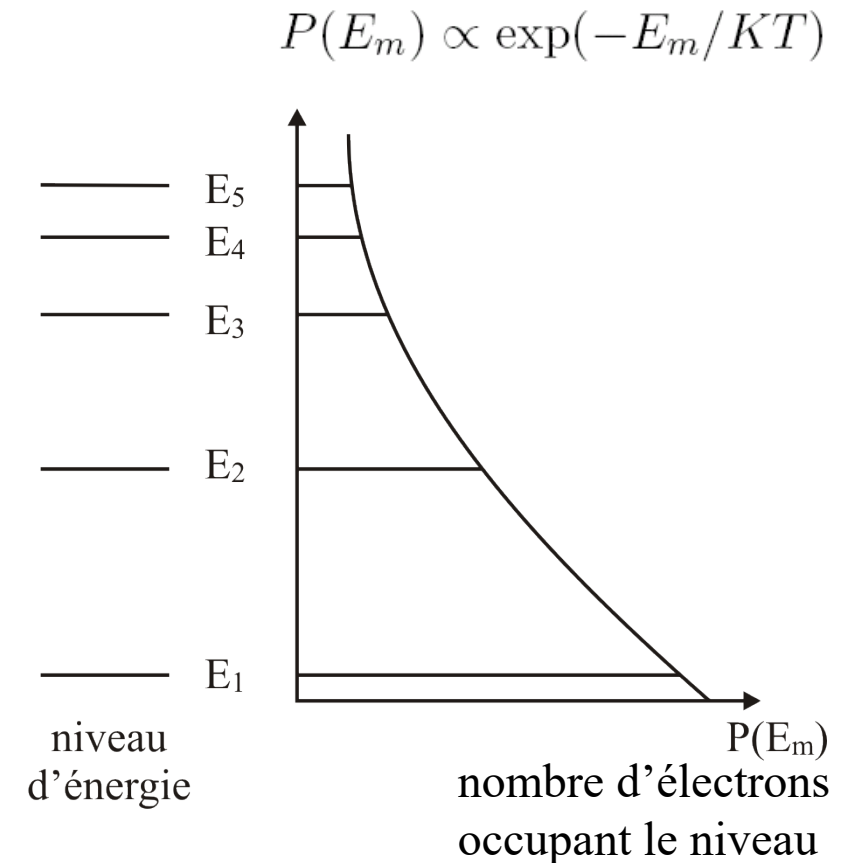
Semaine 13 – partie 2

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

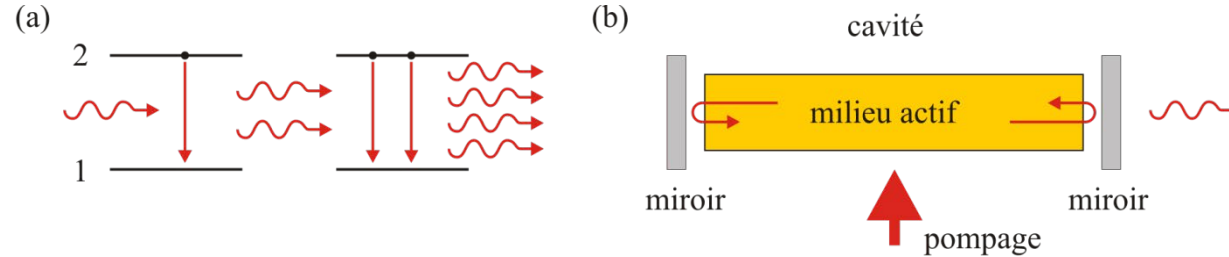


Dynamique du laser

- Les niveaux énergétiques sont donné par le matériau
- A l'équilibre, leur occupation est déterminée par la distribution de Boltzmann
- A température ambiante, tous les électrons se trouvent dans le niveau d'énergie le plus bas
- L'absorption est bien plus probable que l'émission stimulée
- Pour atteindre le lasage, il faut tout d'abord pomper des électrons vers les niveaux d'énergie plus élevés en fournissant de l'énergie au système
- Ici, nous nous intéressons à décrire l'évolution du nombre d'électrons sur les différents niveaux d'énergie
- On parle de la population de chaque niveau



Amplification laser

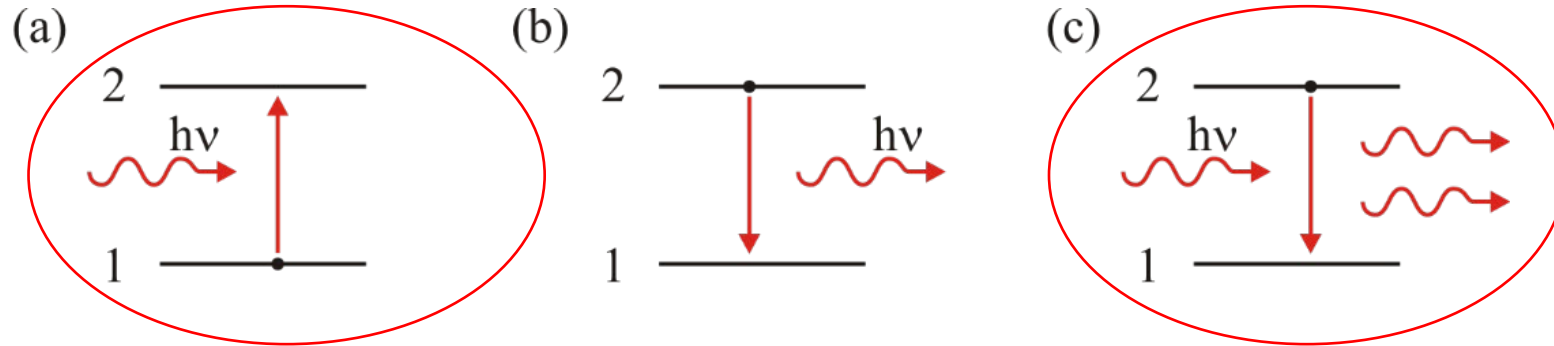


- On considère une cavité avec une onde $E(z) \exp(j2\pi\nu t)$ se propageant dans la direction z (intensité $I(z) = |E(z)|^2/2\eta$, impédance du milieu: $\eta = \sqrt{(\mu_0/\epsilon_0\epsilon_r)}$)
- Flux de photons $\phi(z) = I(z)/h\nu$
- Durant la propagation dans le cavité, le flux de photons est modifié:

$$\frac{d\phi(z)}{dz} = \gamma(\nu)\phi(z)$$

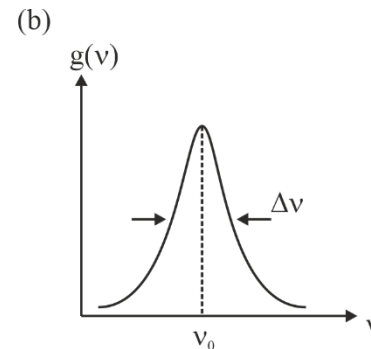
- $\gamma(\nu)$ changement d'amplitude (gain si >0 ; absorption si <0),

Amplification laser



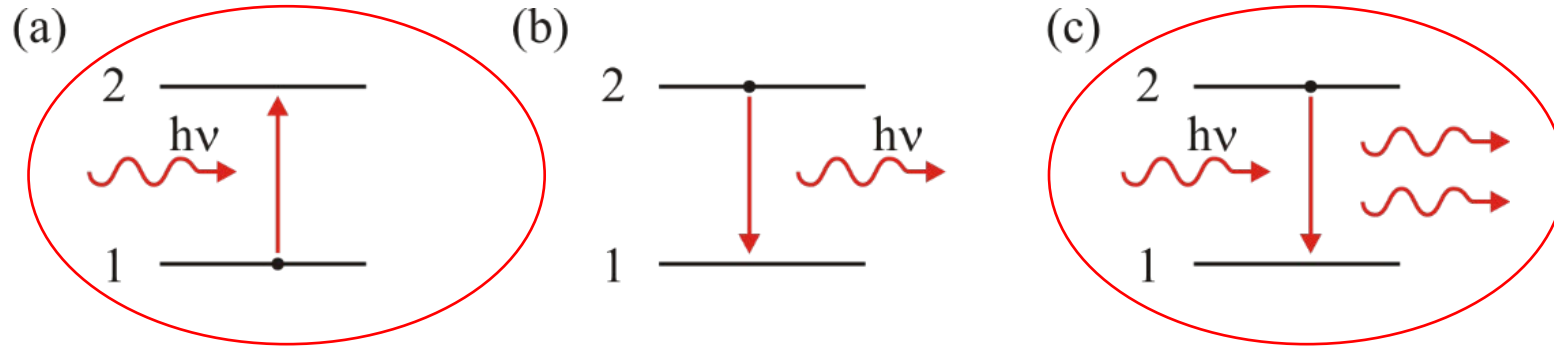
- L'absorption participe à l'atténuation de l'onde, l'émission stimulée participe à son amplification. L'émission spontanée ne participe qu'au bruit avec un photon émis sans relation avec l'onde incidente (photon incohérent)
- Probabilité/taux d'absorption **ou** d'émission stimulée: $W_i = \phi\sigma(\nu)$
- Les coefficients d'Einstein permettent de relier cette probabilité à la courbe de gain:

$$\sigma(\nu) = \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}} g(\nu)$$

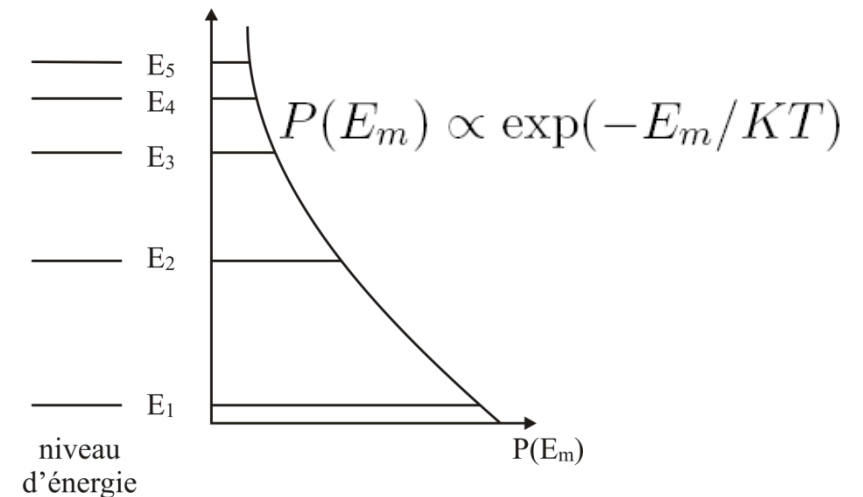


Amplification laser

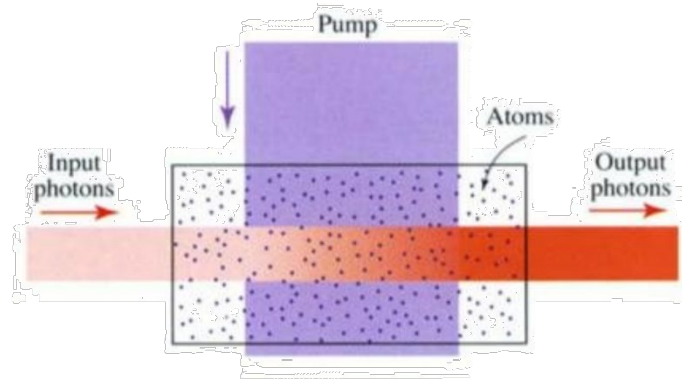
$$[W_i] = s^{-1}$$



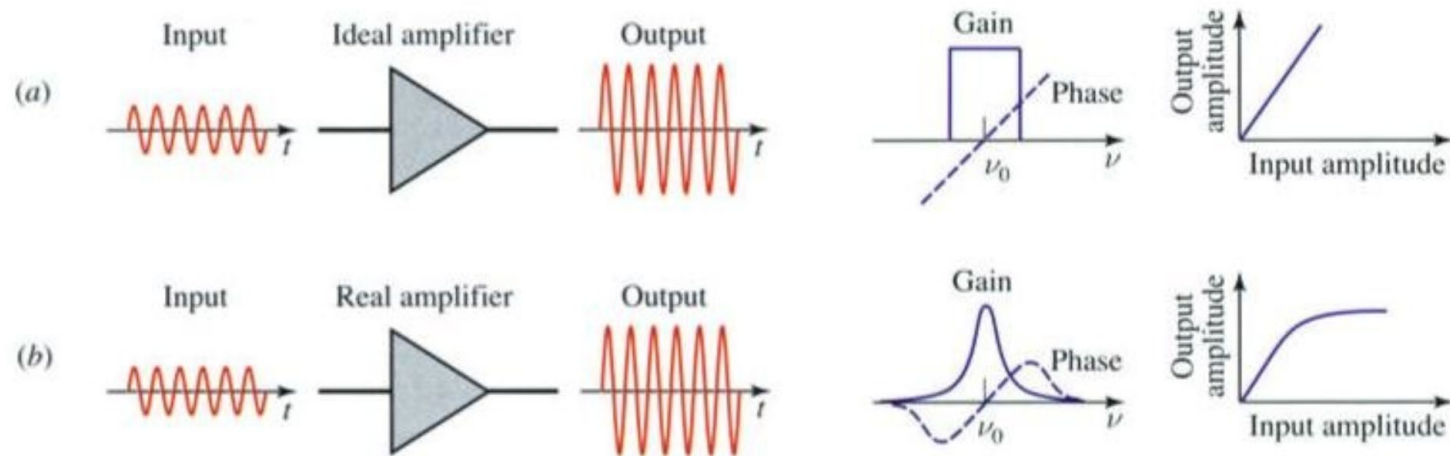
- L'absorption et l'émission stimulée participent au processus d'amplification laser cohérent, pas l'émission spontanée
- $N_1 W_i$ photons absorbés et $N_2 W_i$ photons produits par émission stimulée.
Bilan: $(N_2 - N_1) W_i = N W_i$ photons produits
- N positif: inversion de population le milieu peut amplifier la lumière (nécessite un pompage)
- $N=0$ pas d'interaction, le milieu est transparent
- $N < 0$ négatif: le milieu absorbe la lumière



Amplification laser

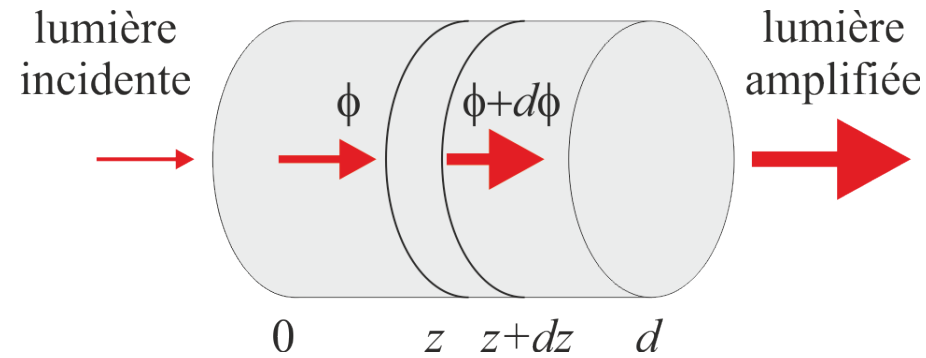


- On souhaite amplifier la lumière tout en gardant la phase du signal original
- Amplificateur idéal ou amplificateur réel:



Saleh & Teich

Amplification laser



- On suppose $N > 0$ (il existe une inversion de populations)
- Augmentation de la densité de photons sur une épaisseur dz : $d\phi = NW_i dz$

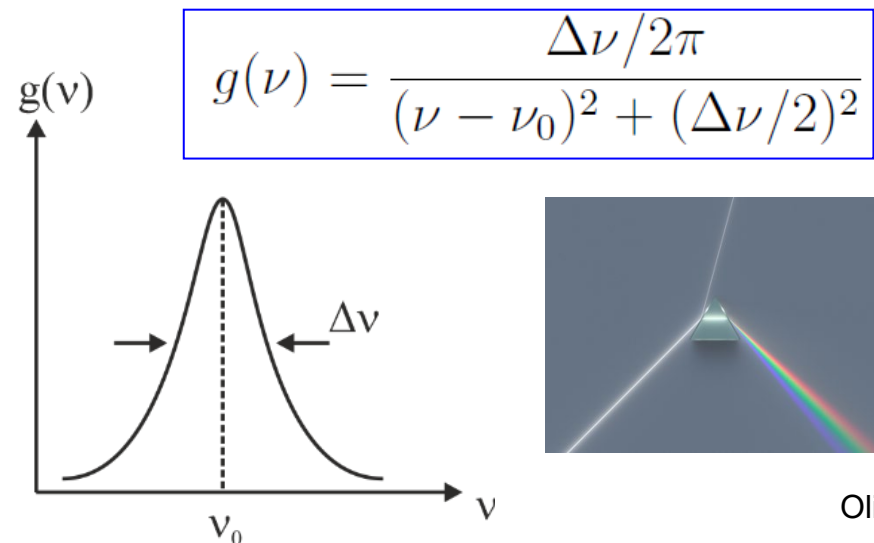
$$\phi(z) = \phi(0) \exp(\gamma(\nu)z)$$

- Coefficient de gain $\gamma(\nu) = N\sigma(\nu) = N \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}} g(\nu)$

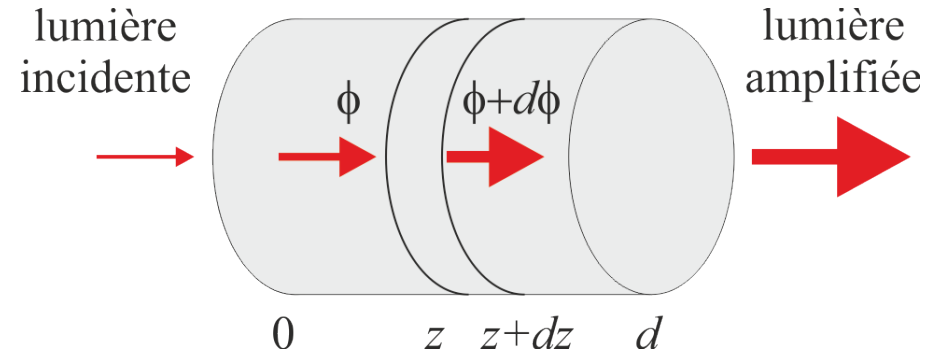
- Section efficace, largeur de ligne (forme Lorentzienne)

- Le coefficient de gain dépend de la fréquence!

- On a donc un milieu dispersif!



Amplification laser



- Evolution de la densité de photons et de l'intensité

$$\phi(z) = \phi(0) \exp(\gamma(\nu)z) \quad I(z) = I(0) \exp(\gamma(\nu)z) \quad (I(z) = h\nu\phi(z))$$

- Gain total (pour la longueur d): $G(\nu) = \exp(\gamma(\nu)d)$
- Si la ligne spectrale est Lorentzienne, le coefficient de gain l'est aussi:

$$\gamma(\nu) = \gamma(\nu_0) \frac{(\Delta\nu/2)^2}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu/2)^2}$$

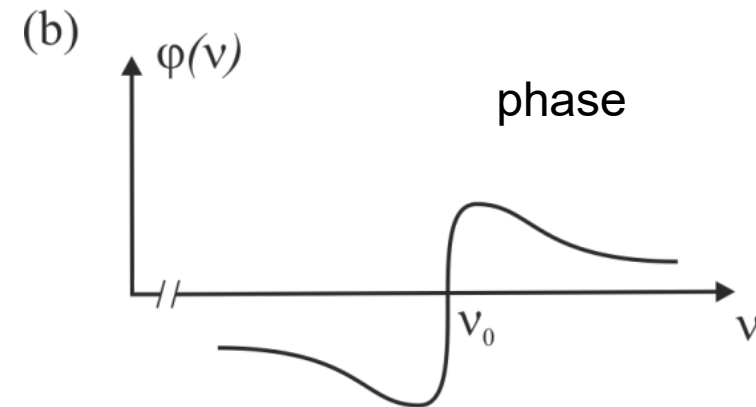
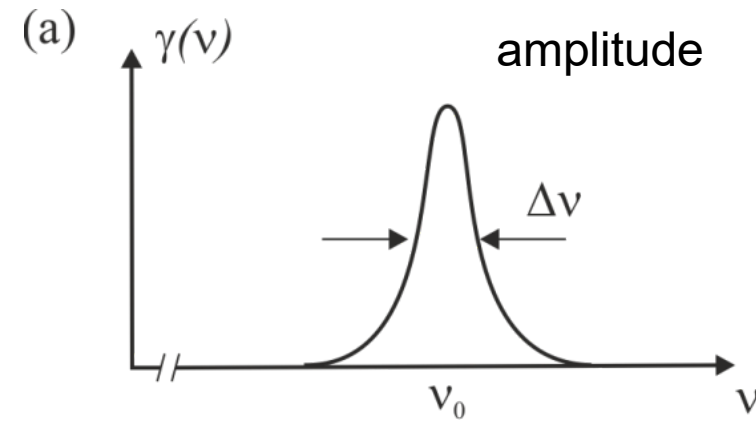
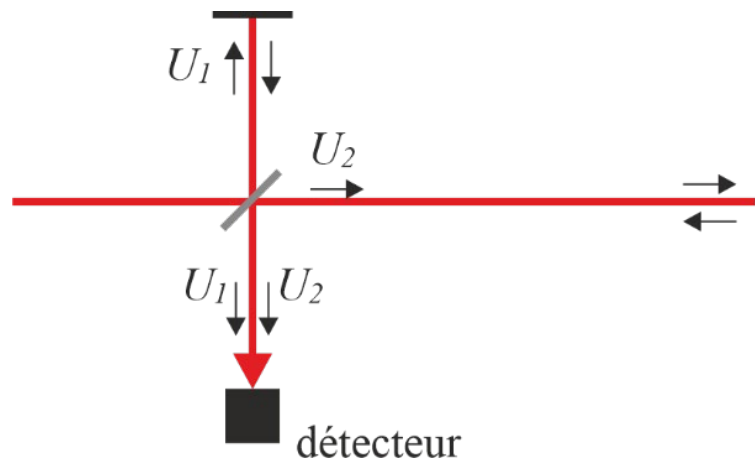
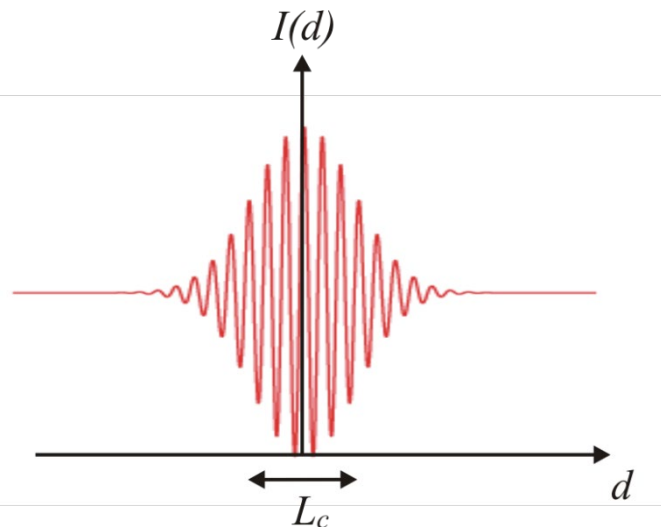
- Gain pour la fréquence centrale: $\gamma(\nu_0) = N(\lambda^2/4\pi^2 t_{sp} \Delta\nu)$

Amplification laser

- En plus de voir son amplitude varier à cause du milieu amplifiant, l'onde dans la cavité voit aussi sa phase varier (le milieu est dispersif):

$$\varphi(\nu) = \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu} \gamma(\nu)$$

- Cet effet limite la cohérence:



Ingénierie optique

Semaine 12 – partie 3

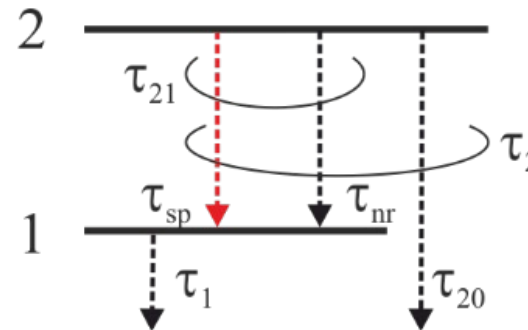
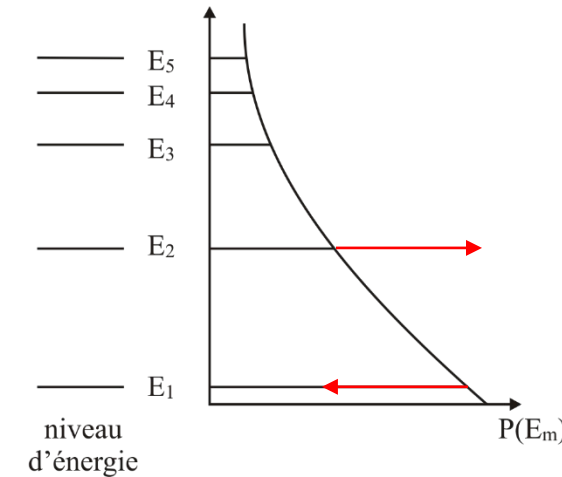
Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



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

Rate equations

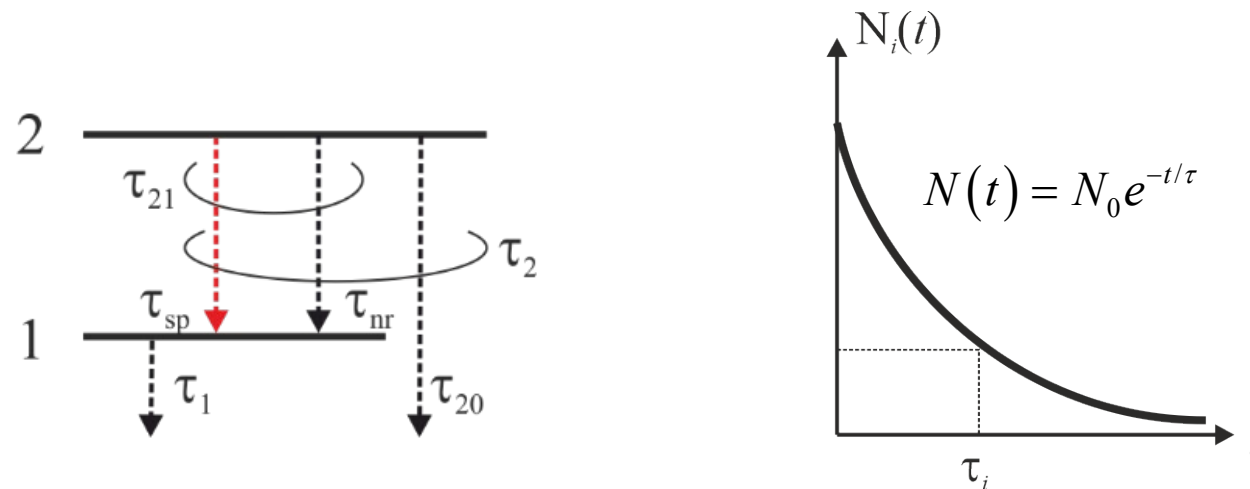
- On souhaite suivre l'évolution dans le temps des populations des niveaux 1 et 2
- Le lasage nécessite une inversion de population
- Il faut maintenir dans le temps $N = N_2 - N_1 > 0$ entre ces populations
- On se concentre sur les niveaux 1 et 2
- D'abord on ne considère pas la présence de lumière (pas d'absorption, pas d'émission stimulée)



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

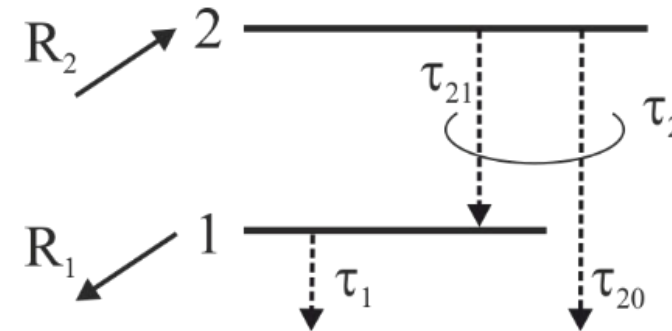
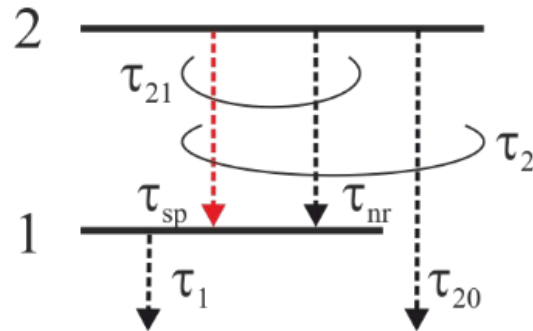
Rate equations

- Ce sont les taux [s^{-1}] que l'on additionne, pas les durées de vie [s]
- Pour le niveau 2 on a globalement $\tau_2^{-1} = \tau_{21}^{-1} + \tau_{20}^{-1}$ et $\tau_{21}^{-1} = \tau_{sp}^{-1} + \tau_{nr}^{-1}$
- Si au départ les occupations des niveaux sont N_1 et N_2 , le système va se désexciter progressivement en suivant les durées de vie τ_1 et τ_2 , avec une évolution exponentielle des populations



Rate equations

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



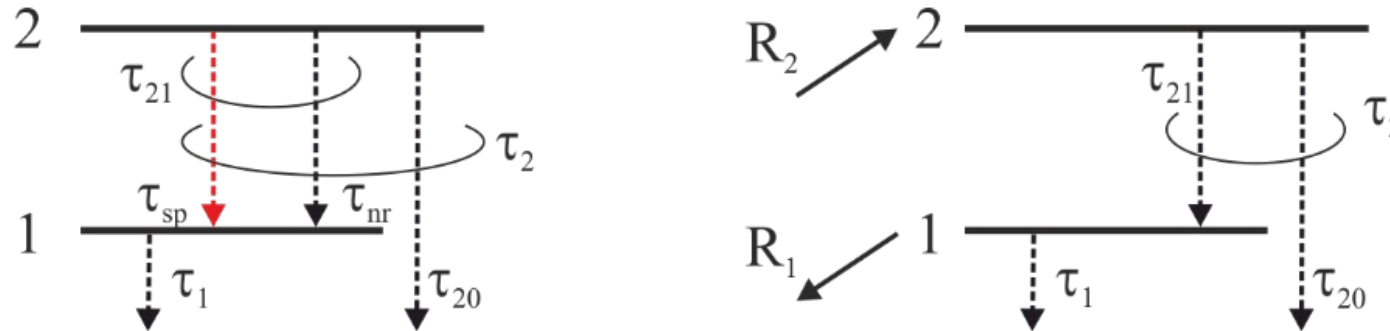
- On peut atteindre un état d'équilibre pour les populations des niveaux 1 et 2 en amenant des électrons vers le niveau 2 (à un taux R_2) et en enlevant des électrons du niveau 1 (à un taux R_1)

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

Rate equations
(équations des taux)

Rate equations

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



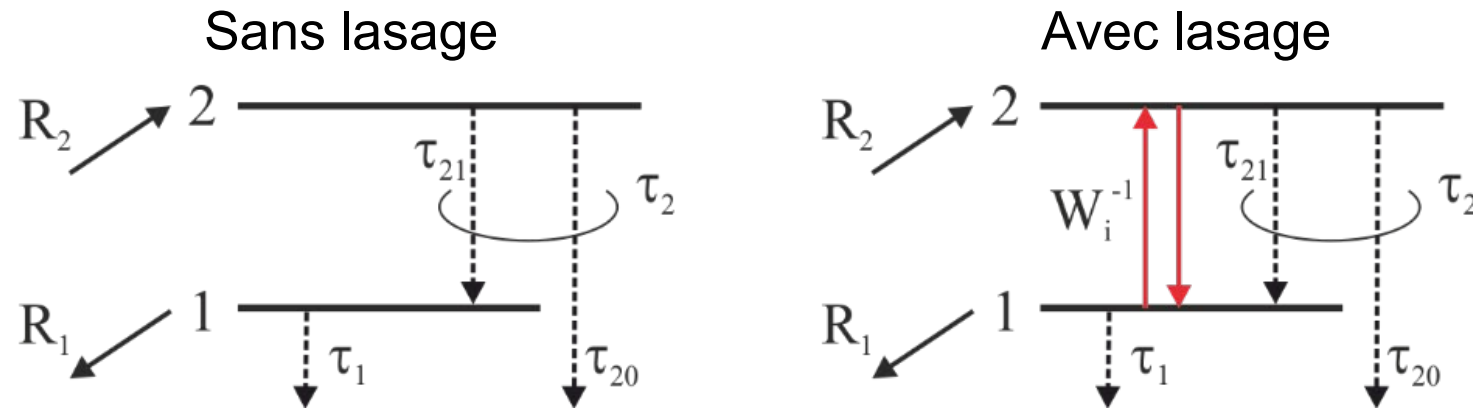
- A l'équilibre $dN_1/dt = dN_2/dt = 0$ on obtient la différence de populations

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

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

- A l'équilibre, on peut atteindre une grande différence de populations si le niveau 2 est pompé de façon intense et les électrons sont éliminés efficacement du niveau 1 (R_2 et R_1 grands)

Rate equations



- Avec absorption et émission stimulée:

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

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

$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 - \frac{N_2}{\tau_2} - N_2 W_i + N_1 W_i$$

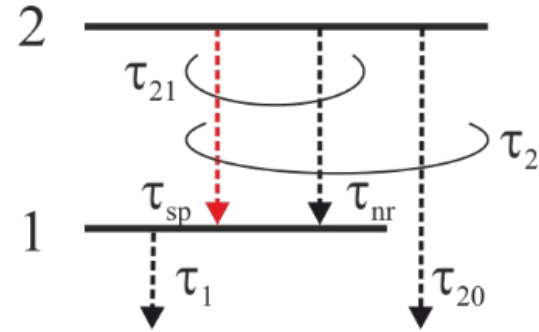
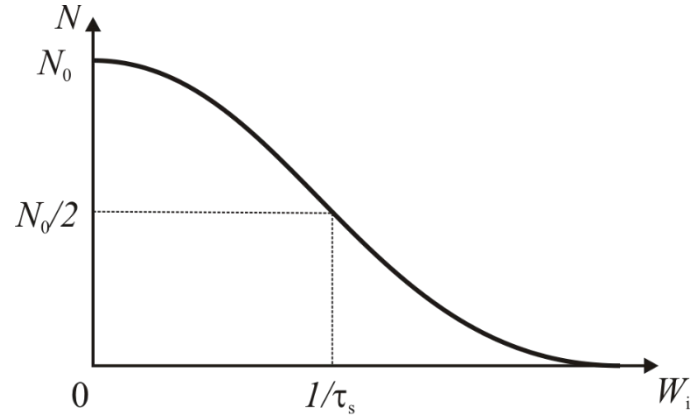
$$\frac{dN_1}{dt} = -R_1 - \frac{N_1}{\tau_1} + \frac{N_2}{\tau_{21}} + N_2 W_i - N_1 W_i$$

- A l'équilibre, $dN_1 / dt = dN_2 / dt = 0$:

$$N = \left(\frac{N_0}{1 + \tau_s W_i} \right) \quad N < N_0$$

Rate equations

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



- 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:

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

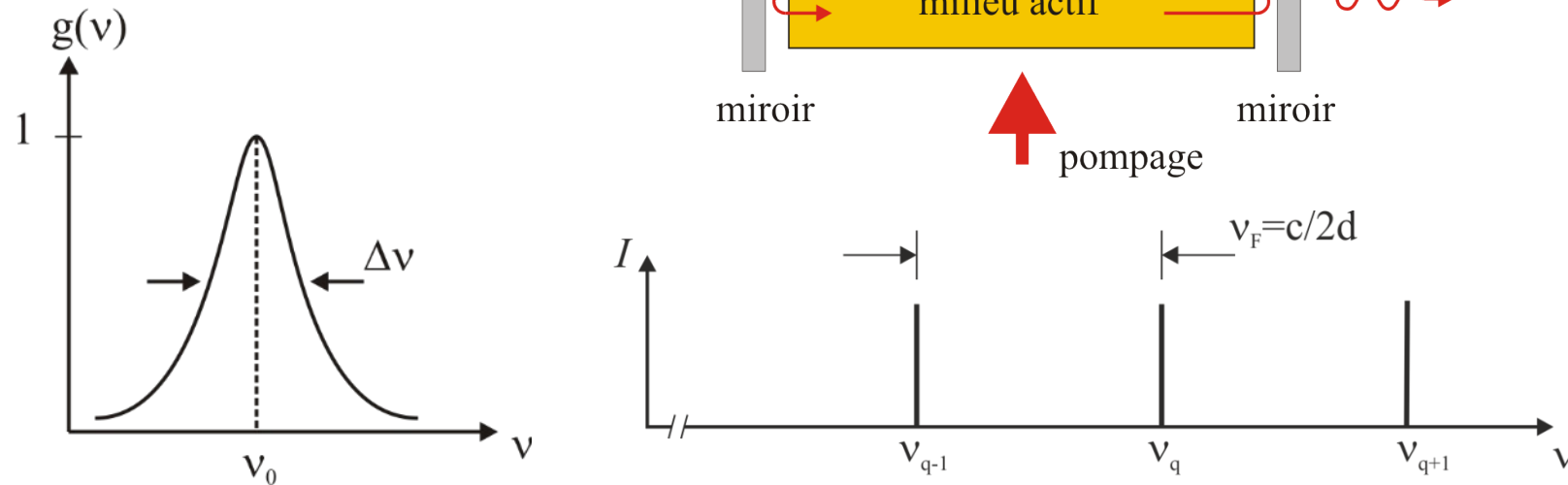
Ingénierie optique

Semaine 13 – partie 4

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

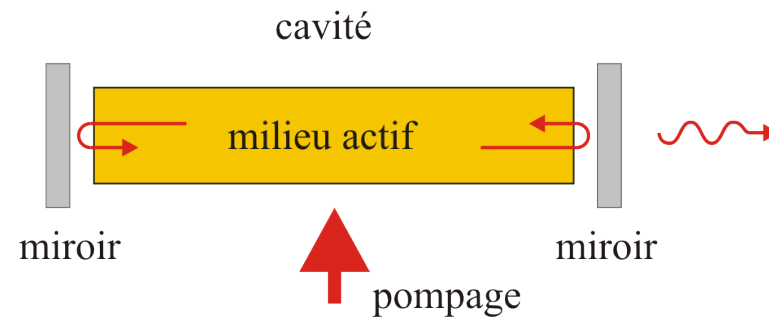


Système laser



- Nous combinons maintenant la courbe de gain des atomes et les modes supportés par la cavité
- Gain par unité de longueur: $\gamma_0(\nu) = N_0\sigma(\nu) = N_0\frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}}g(\nu)$ (N_0 différence de population initiale, à l'équilibre, créée par le pompage)
- 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
- En effet, le processus d'amplification fait décroître la différence de population $N < N_0$

Système laser – gain

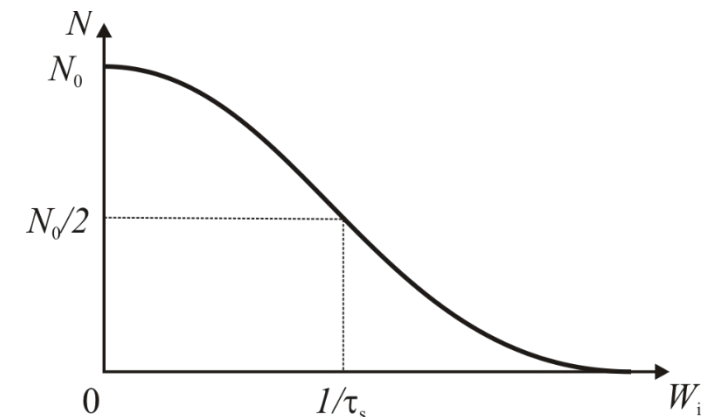


- Par conséquent, le coefficient de gain diminue avec l'augmentation de la densité de flux de photons

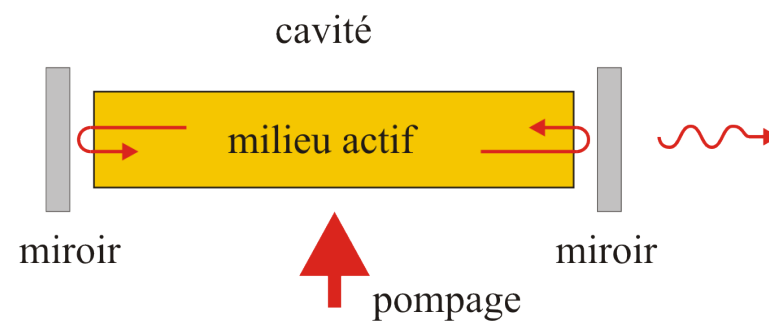
$$\gamma(\nu) = N\sigma(\nu) = \frac{\gamma_0(\nu)}{1 + \phi/\phi_s(\nu)}$$

- Une phase s'ajoute aussi à l'onde se propageant dans le système (cette phase provient de la dispersion des matériaux et du gain qui dépendent de la fréquence) $\varphi(\nu) = \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu} \gamma(\nu)$

- 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_s représente les pertes dans le milieu actif, alors que le coefficient α_r prend en compte toutes les pertes (traduites par unité de longueur) et inclut aussi les pertes liées aux miroirs:

$$\alpha_r = \alpha_s + \alpha_{m1} + \alpha_{m2} = \alpha_s + \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{\mathcal{R}_1 \mathcal{R}_2}$$

- On peut aussi introduire une 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

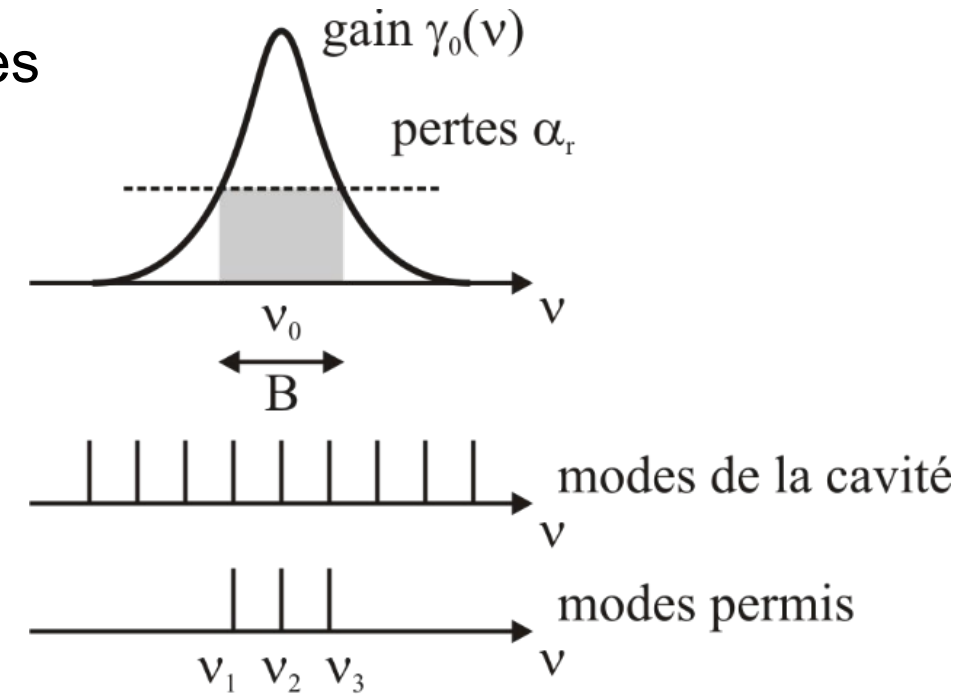
- Pour avoir lasage, il faut $\gamma_0(\nu) > \alpha_r$

- Seuls quelques modes remplissent cette condition

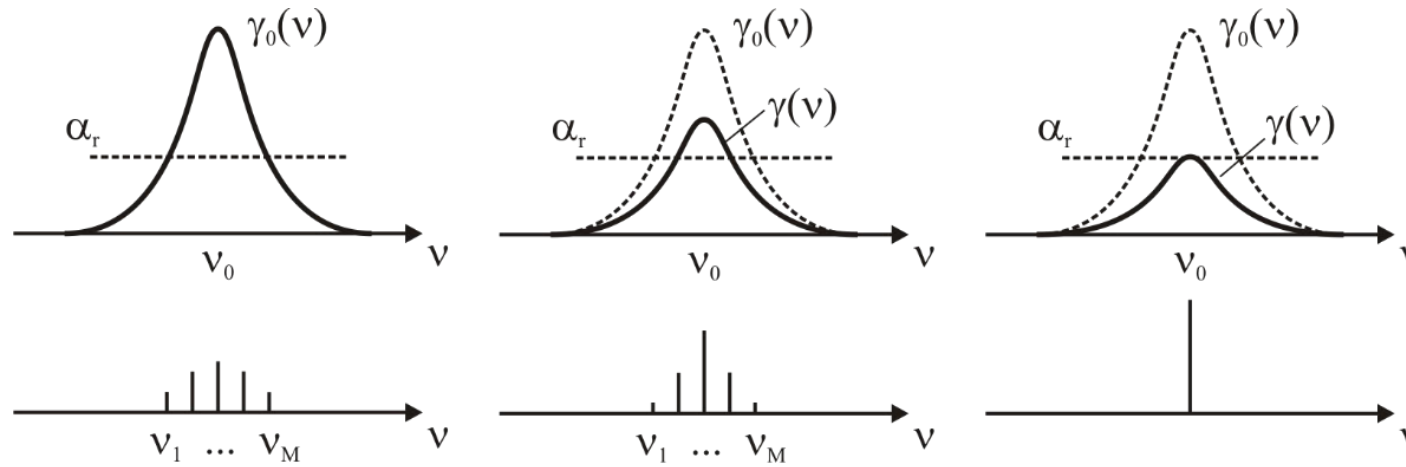
$$M \approx \frac{B}{\nu_F}$$

- 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

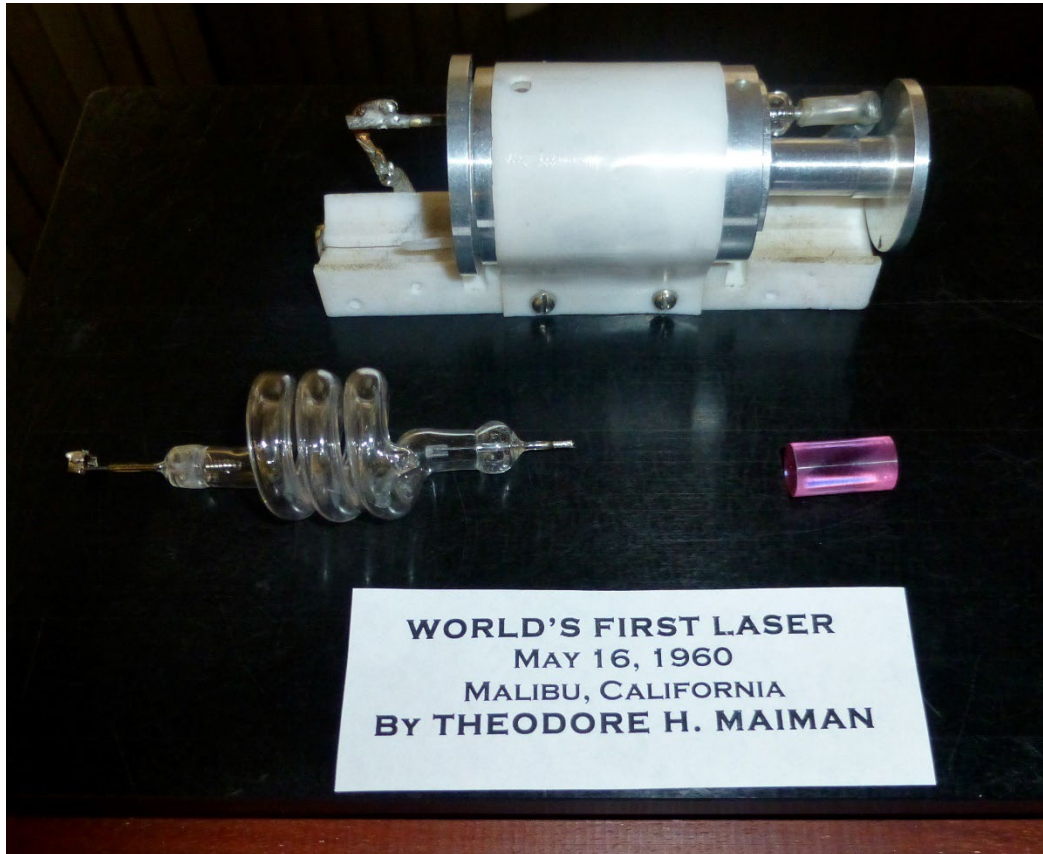
Semaine 13 – partie 5

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

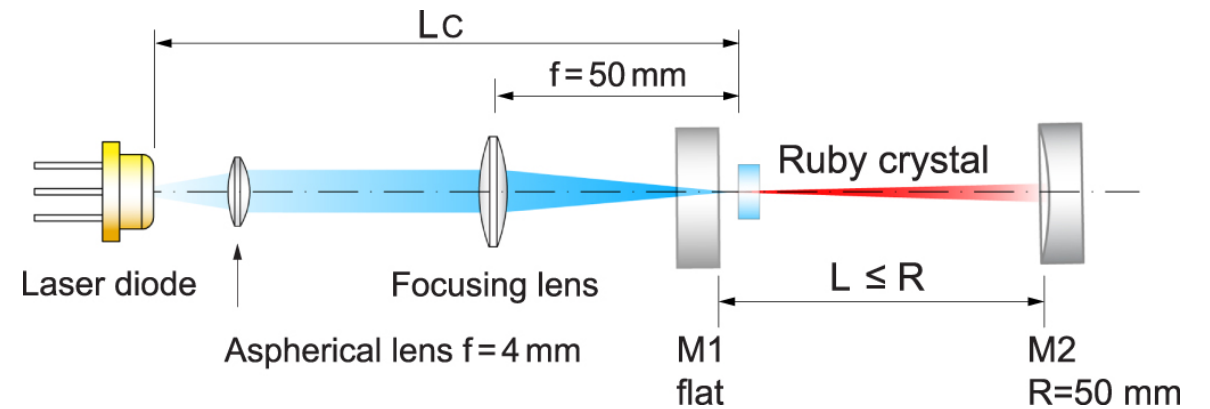
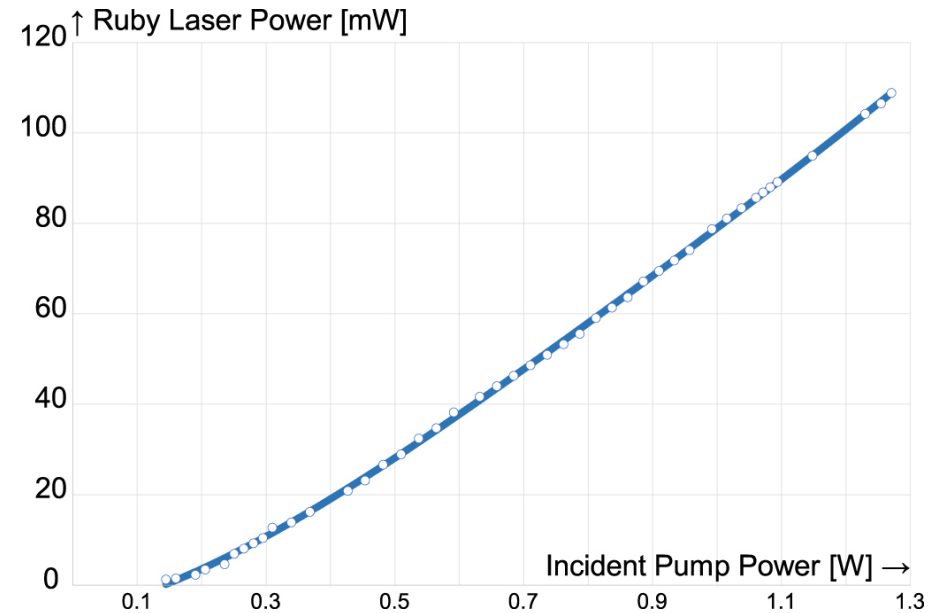


Le tout premier laser

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



Wikimedia

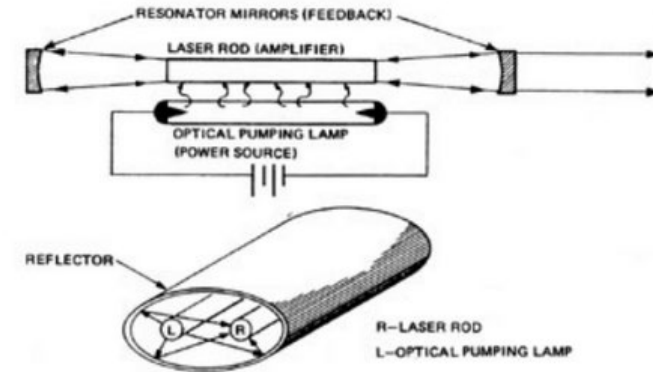
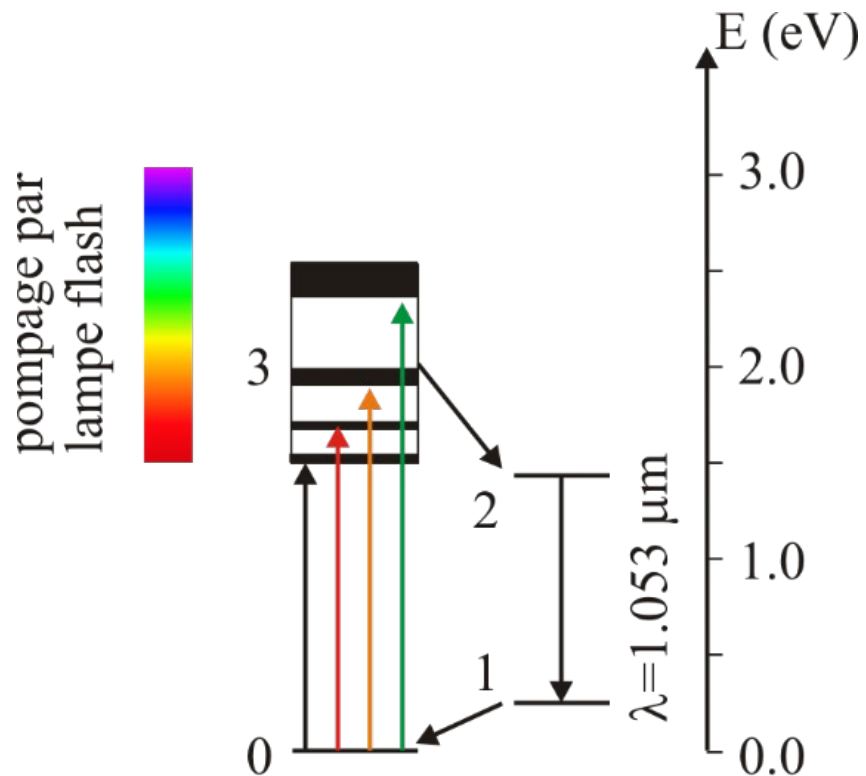


W. Luhs, *J. Phys. Commun.* vol. 5, p. 085012 (2021)

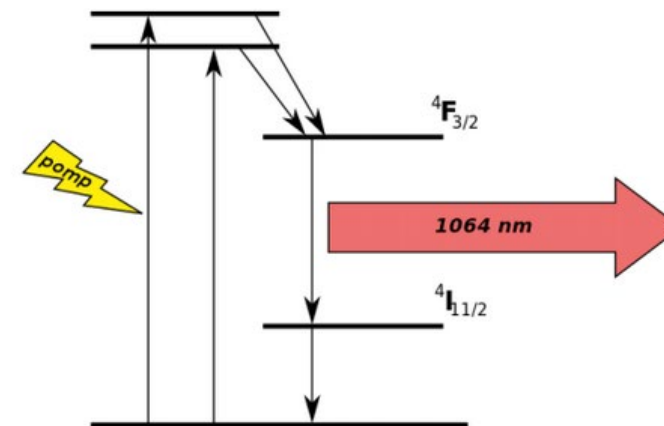
Olivier J.F. Martin

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:



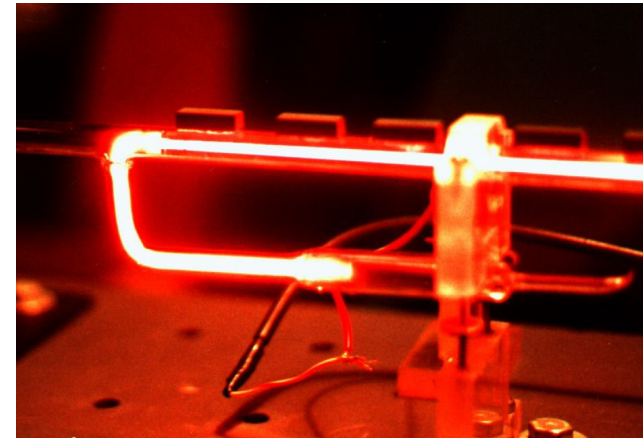
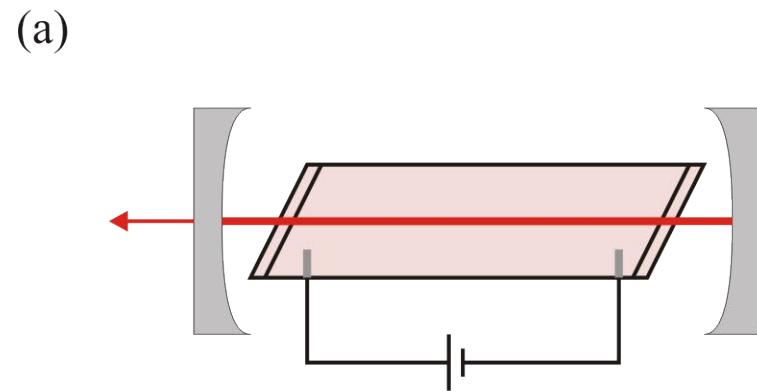
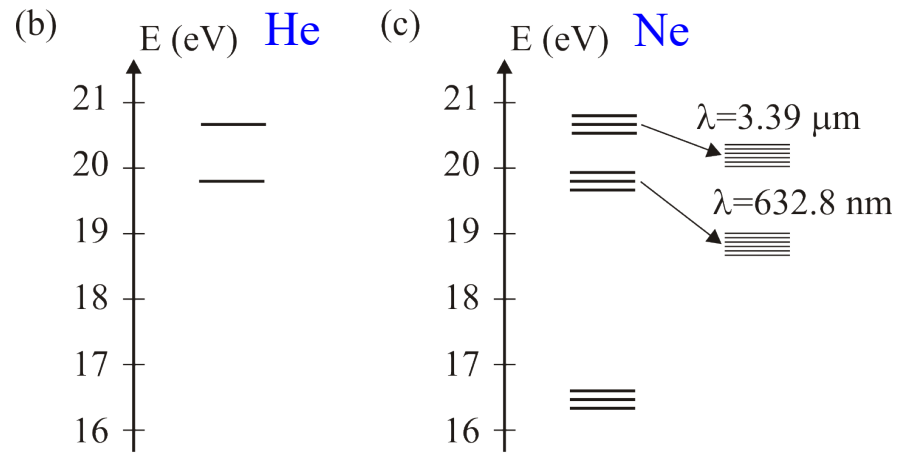
(a) Design of the cavity for the Nd:YAG laser



(b) Energy level scheme of Nd:YAG

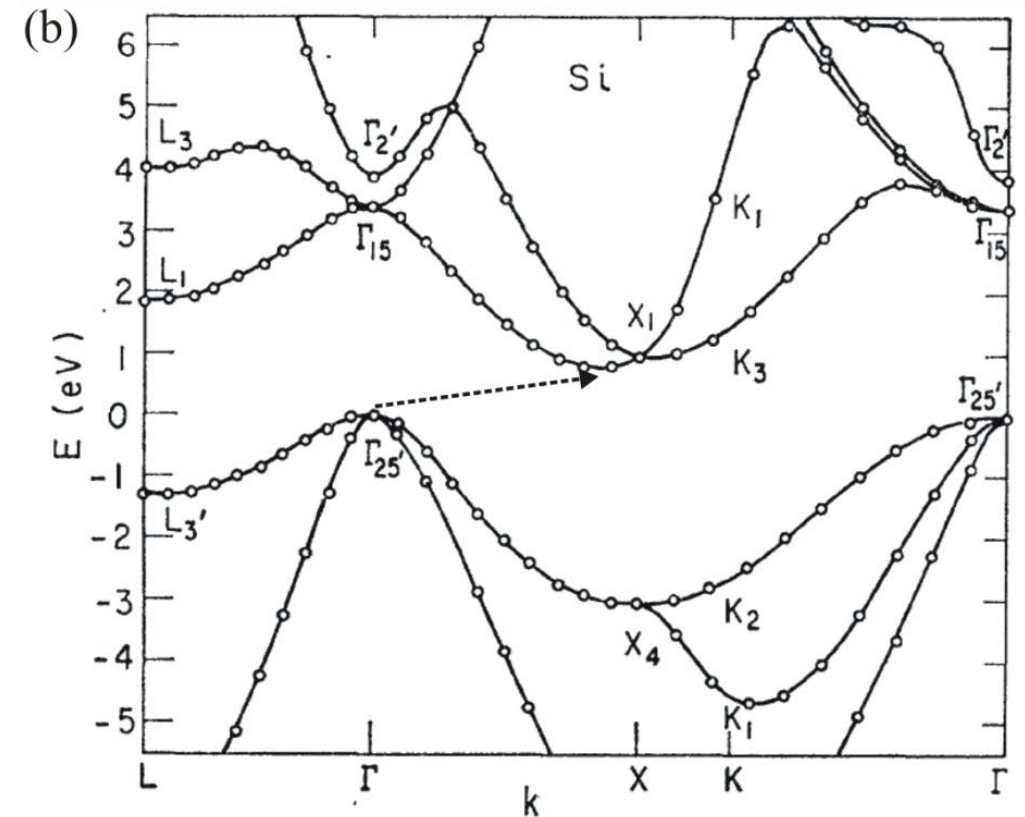
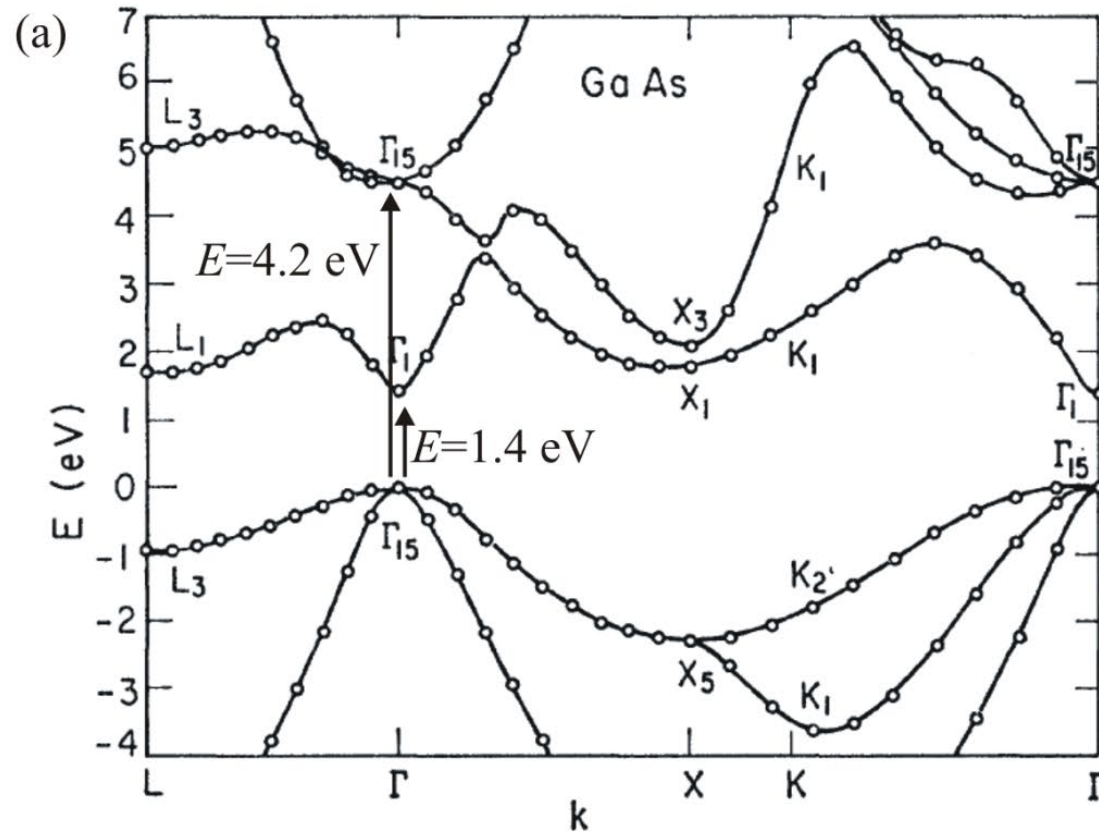
Laser He-Ne

- 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 par collision



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

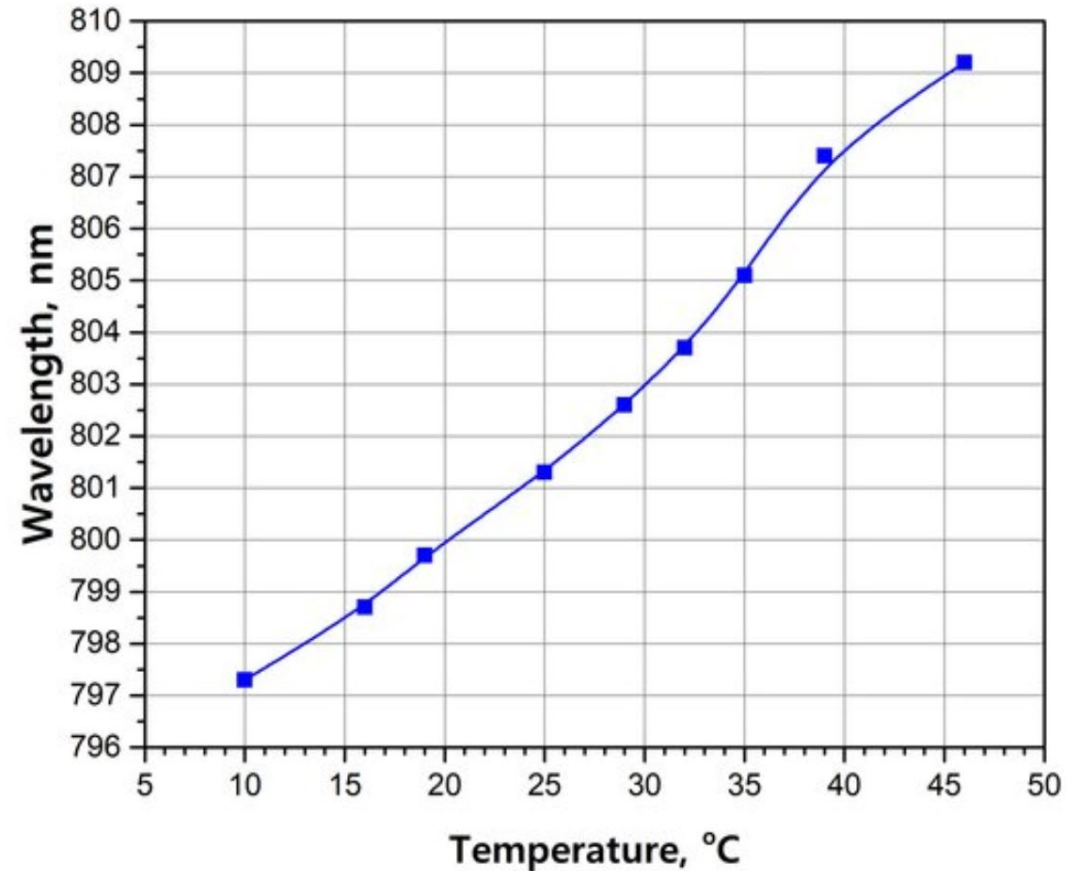
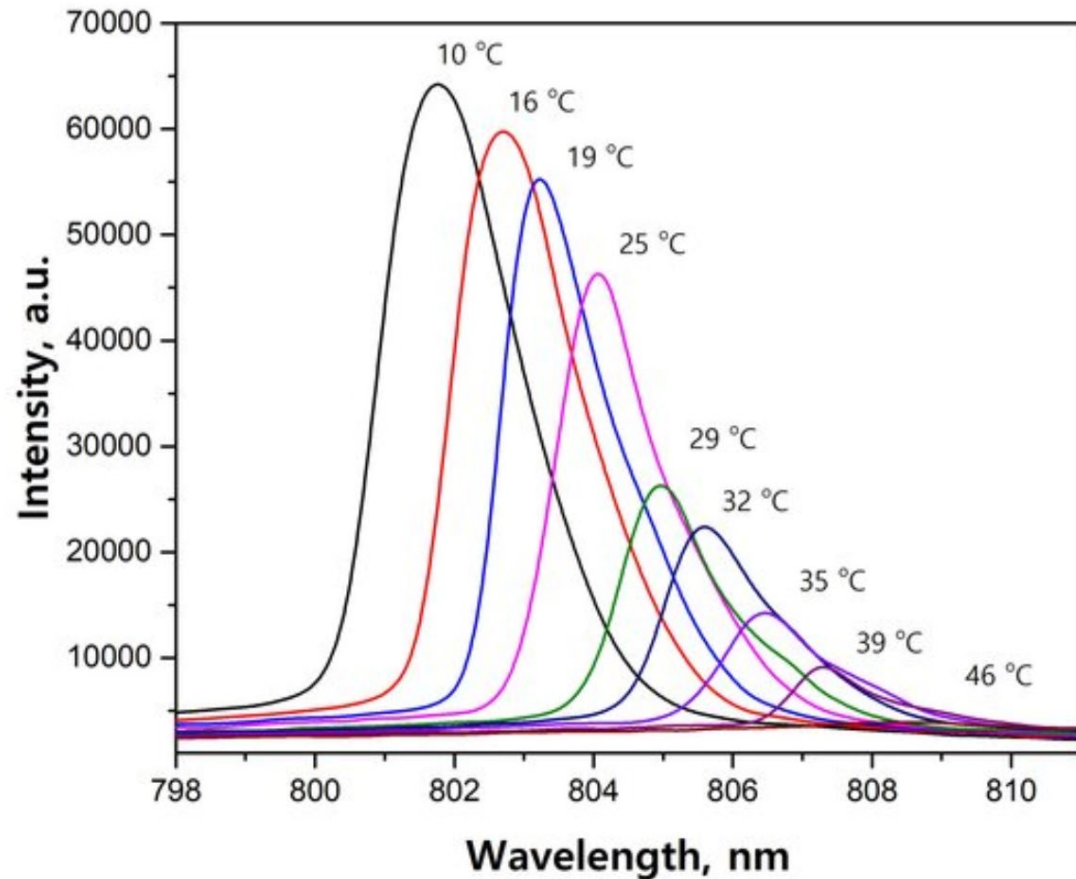
Semiconducteur	GaN	AlGaN	AlGaAs	GaInAsP	InP
E_g (eV)	3.4	3.4 – (5.9)	1.4 – 2.2	0.7 – 2	1.28
λ_0 (μm)	0.36	(0.2) – 0.4	(0.6) – 0.9	0.6 – 1.7	1

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

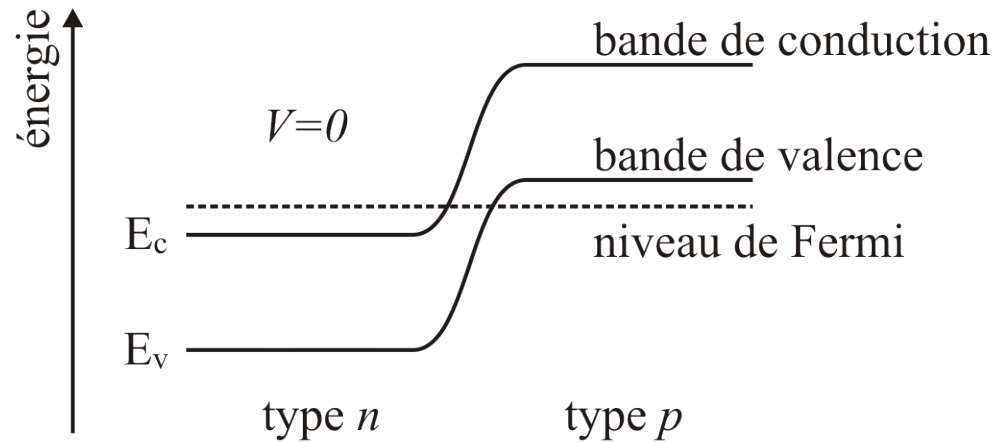


- On peut ajuster la longueur d'onde en chauffant le laser
- Il faut surtout contrôler sa température pour éviter que la longueur d'onde change!

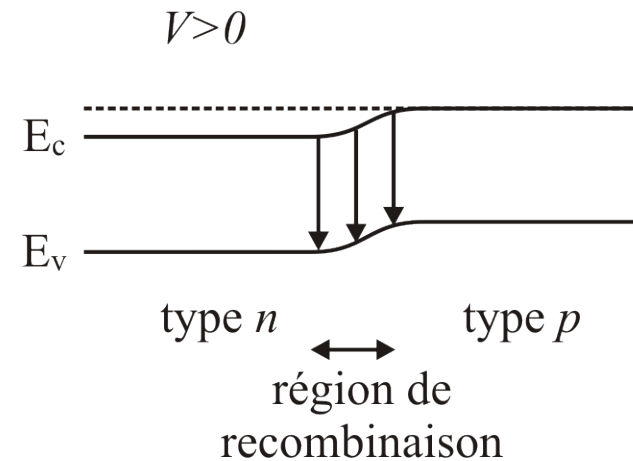
Laser à semiconducteur - Pompage

- 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)

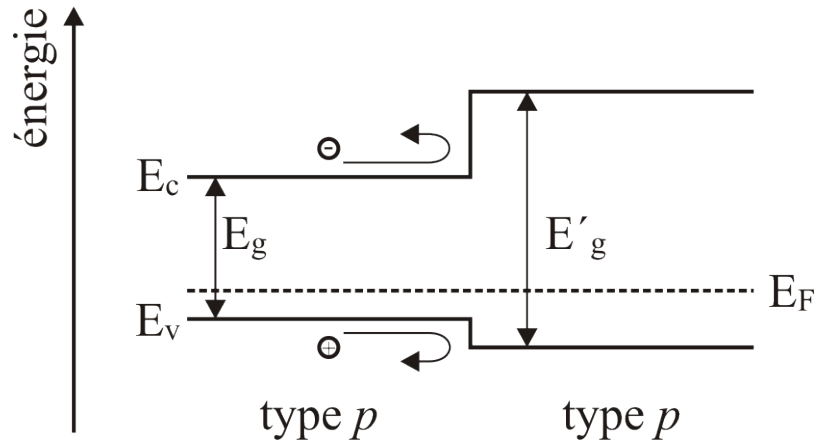


(b)

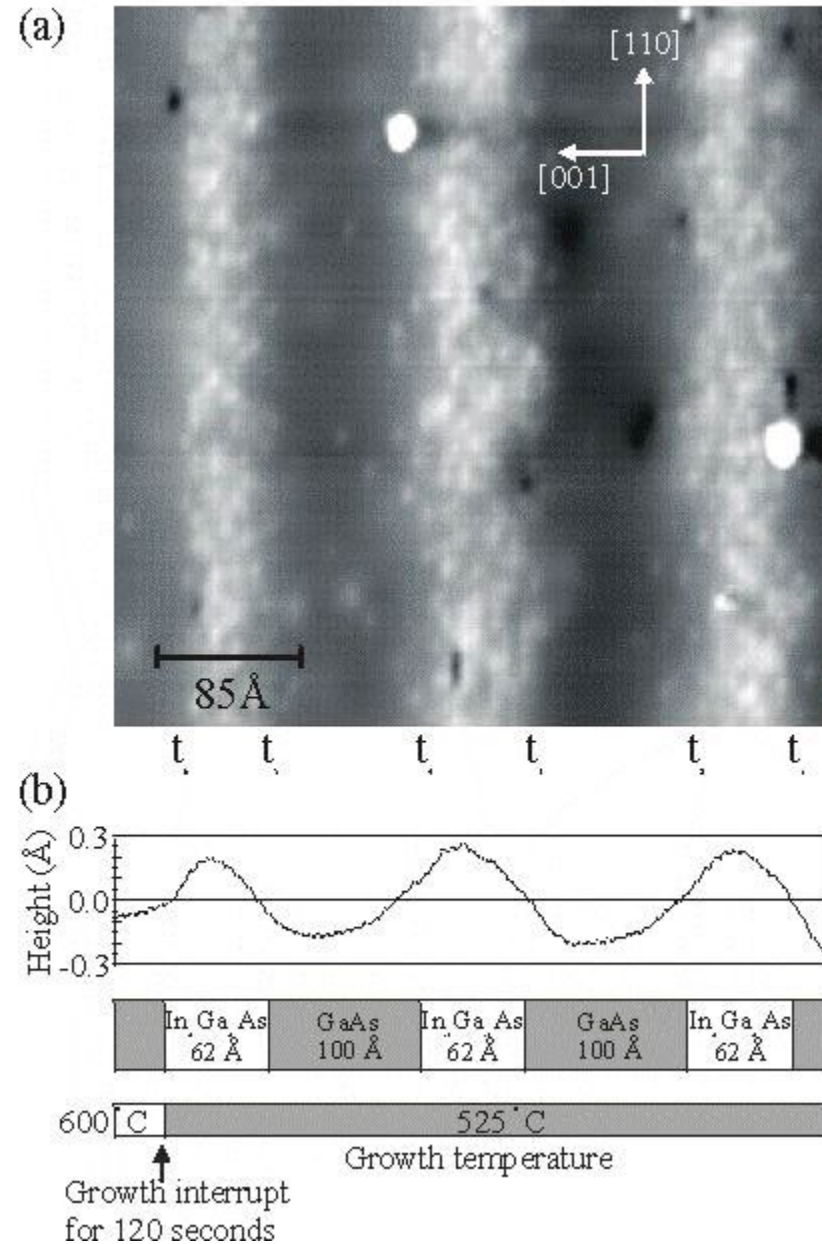


- Inconvénient: les porteurs de charge peuvent s'échapper de la région de recombinaison et ne produisent donc pas de lumière

Diode laser - Hétérostructure

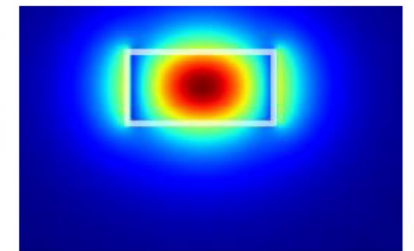
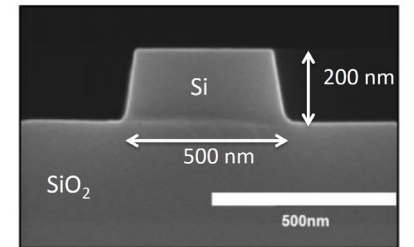
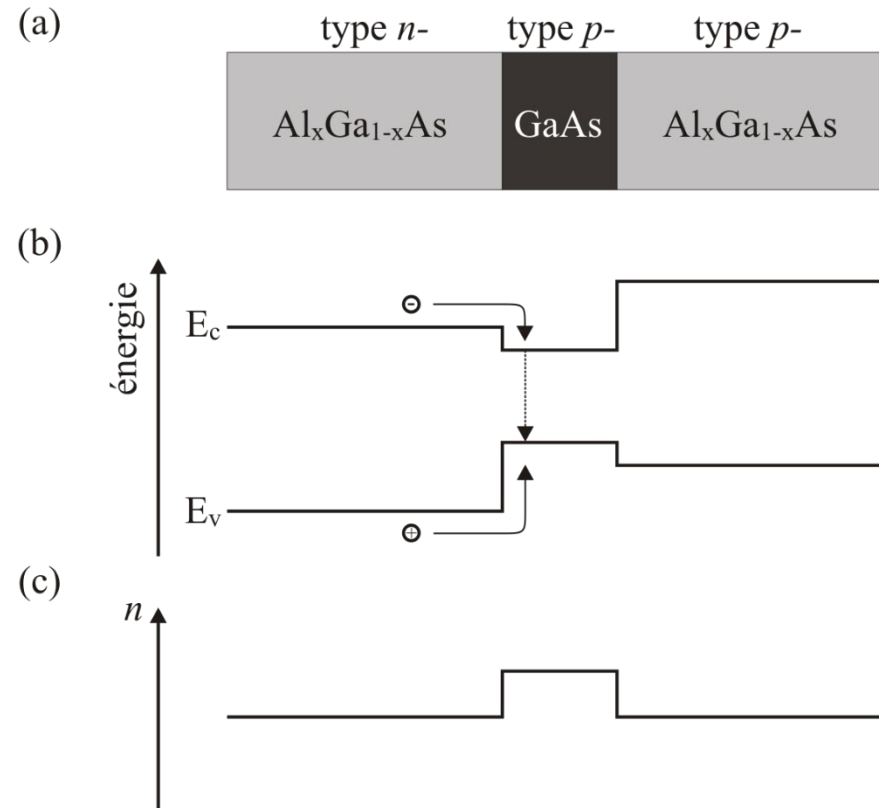


- Deux semiconducteurs avec des bandgaps différents
- Localisation des porteurs de charge à l'interface
- Réalisation par croissance épitaxiale



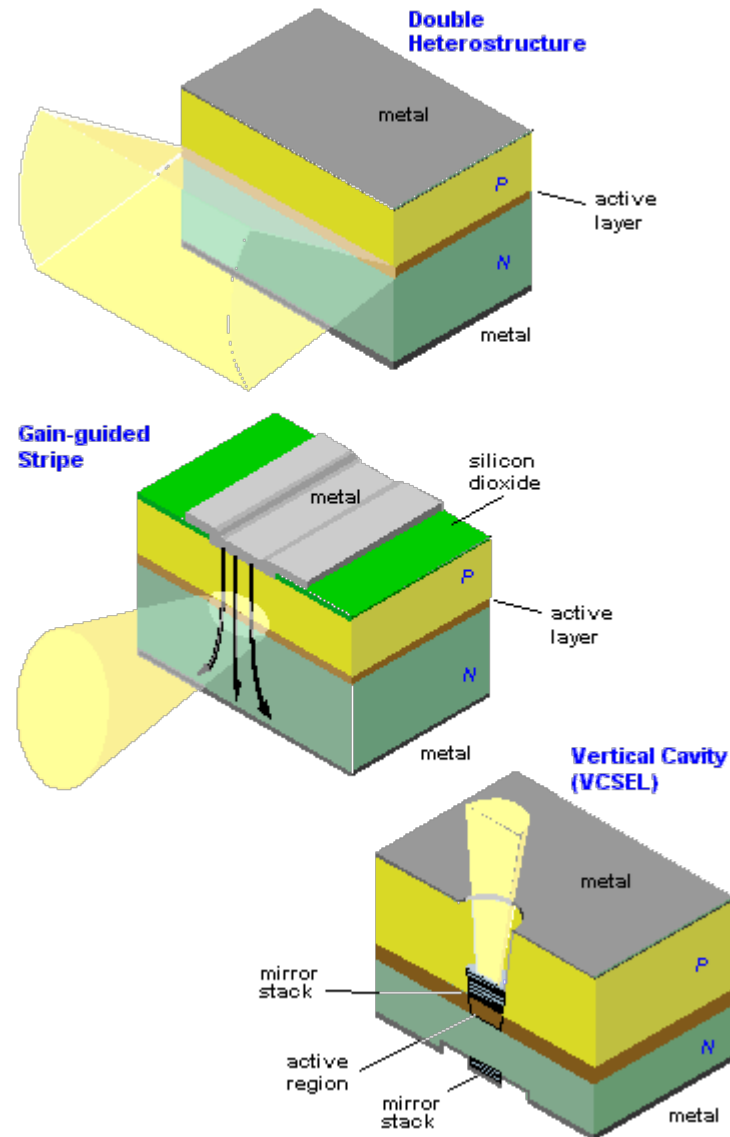
Diode laser – Double hétérostructure

- 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 réfraction plus élevé dans cette région) → couplage vers un guide d'onde intégré



Diode laser – Différentes architectures

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

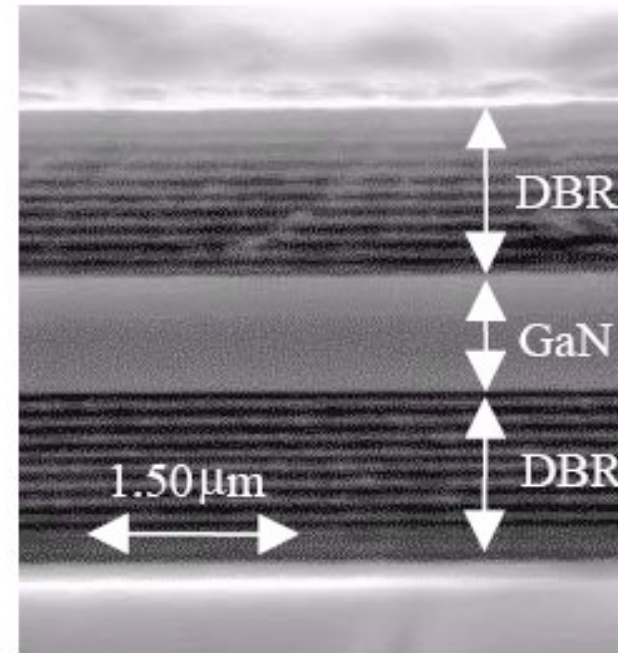
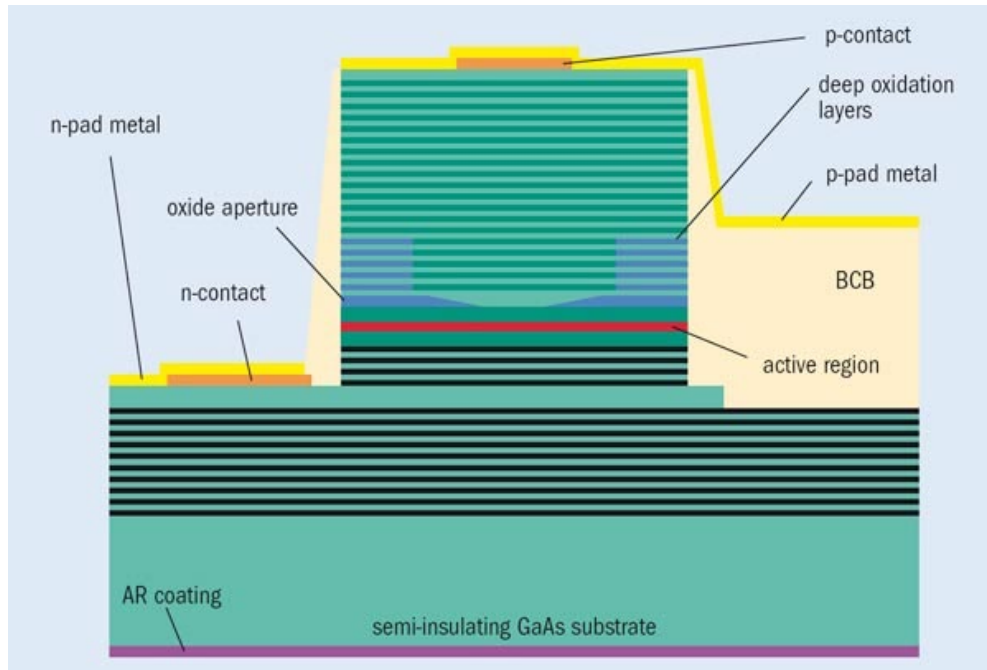


Fig. 5. GaN microcavity, $\sim 800\ \text{nm}$ thick, formed by laser-lift off and ICP etching

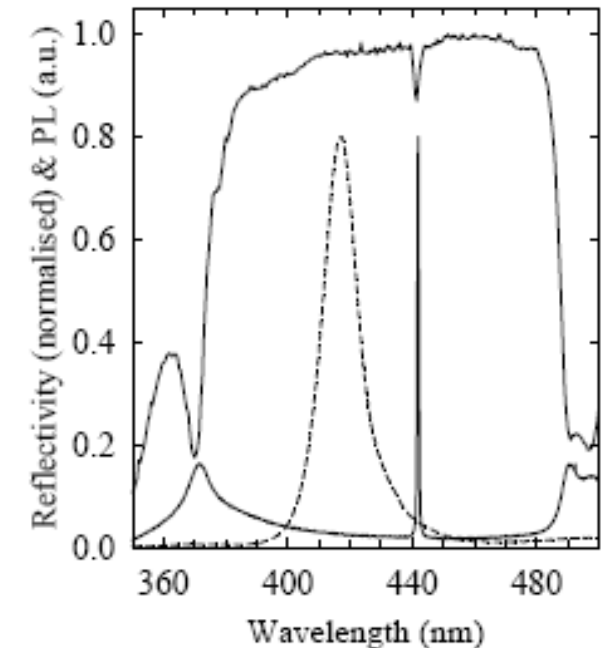
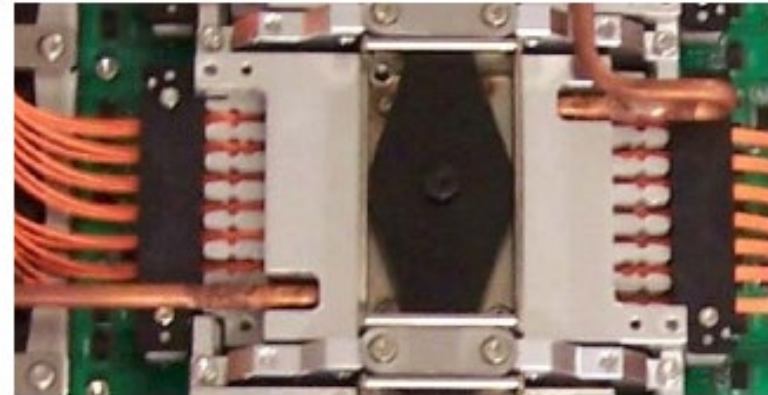
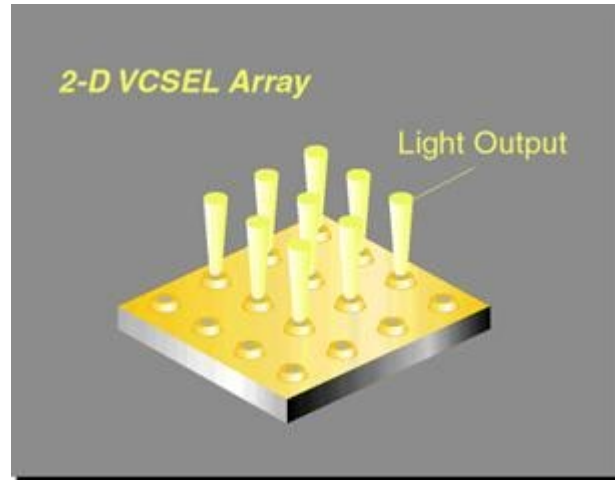


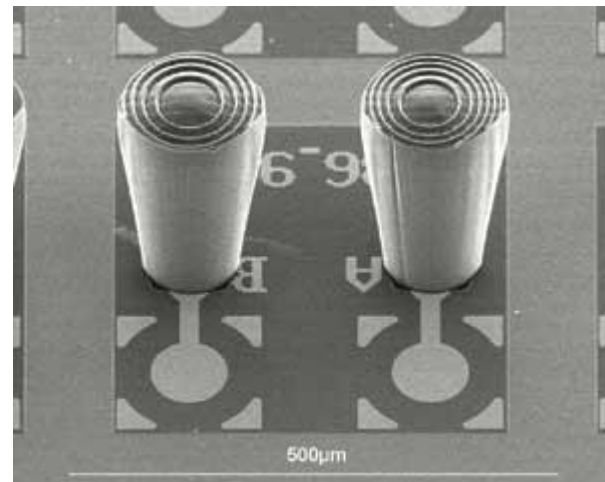
Fig. 6. RT reflectivity and PL data (solid lines) from a microcavity containing a single InGaN quantum well. The dashed line shows RT PL from the as grown wafer.

VCSEL

- Très bonnes possibilités d'intégration avec des fibres optiques

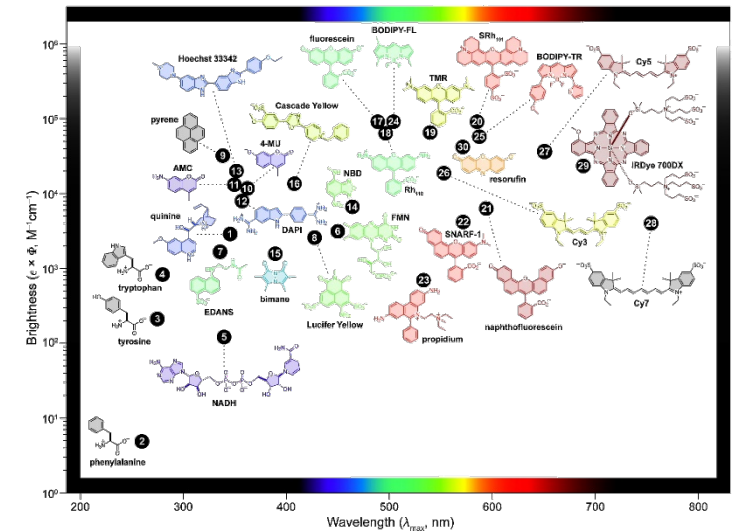


A. Benner et al., paper OTuH1, OFC 2010

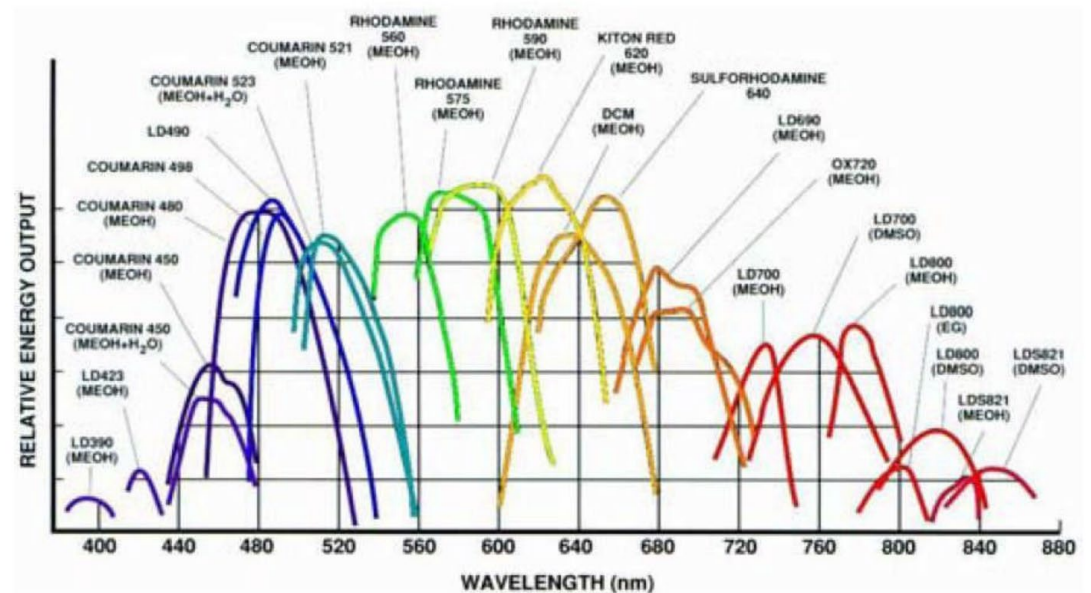
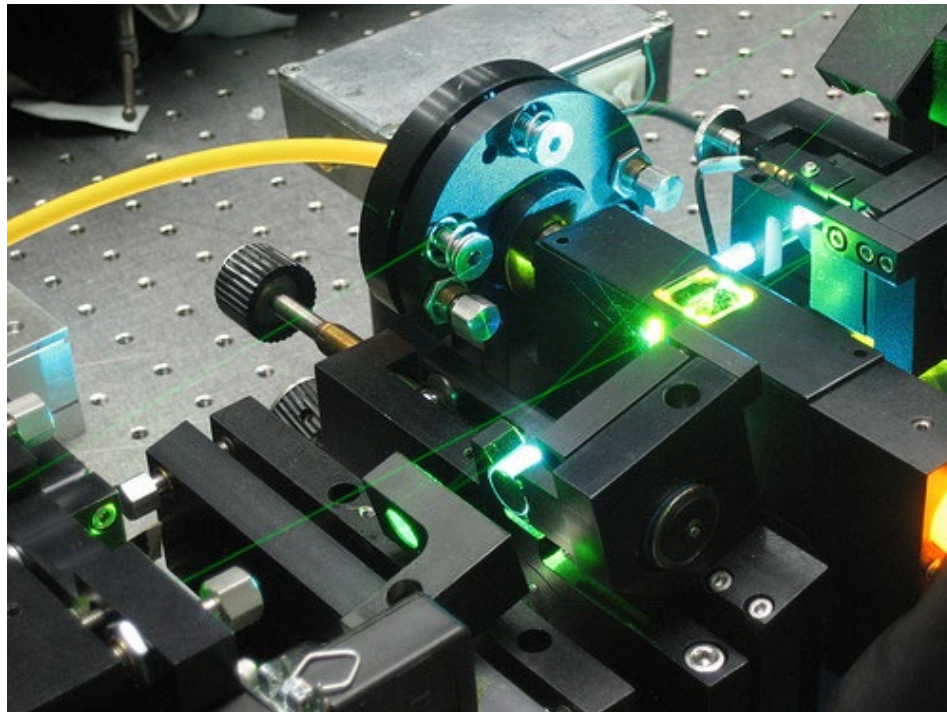


Laser à colorant

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

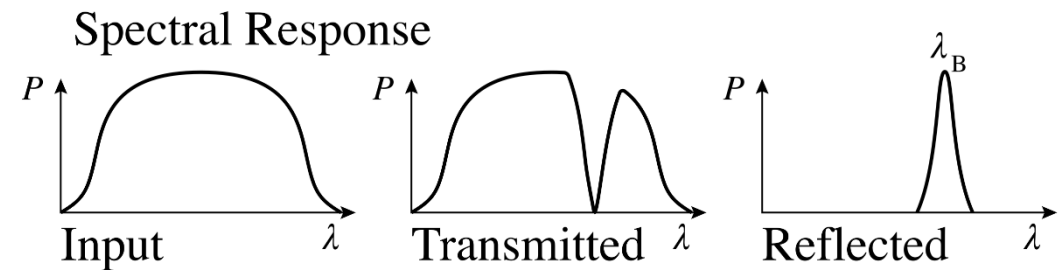
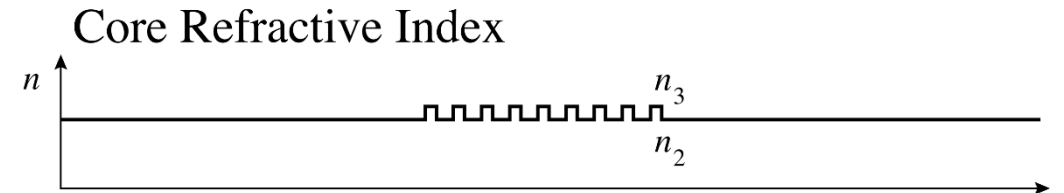
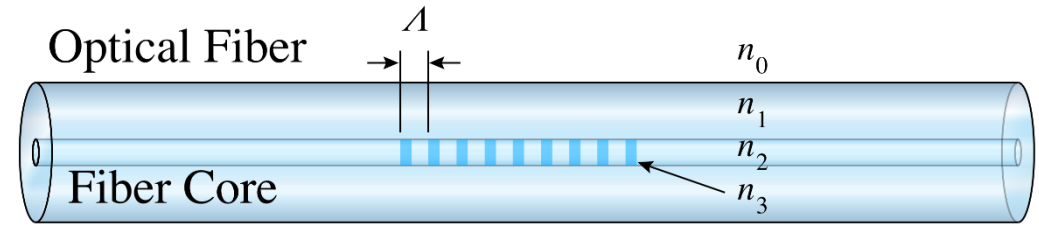
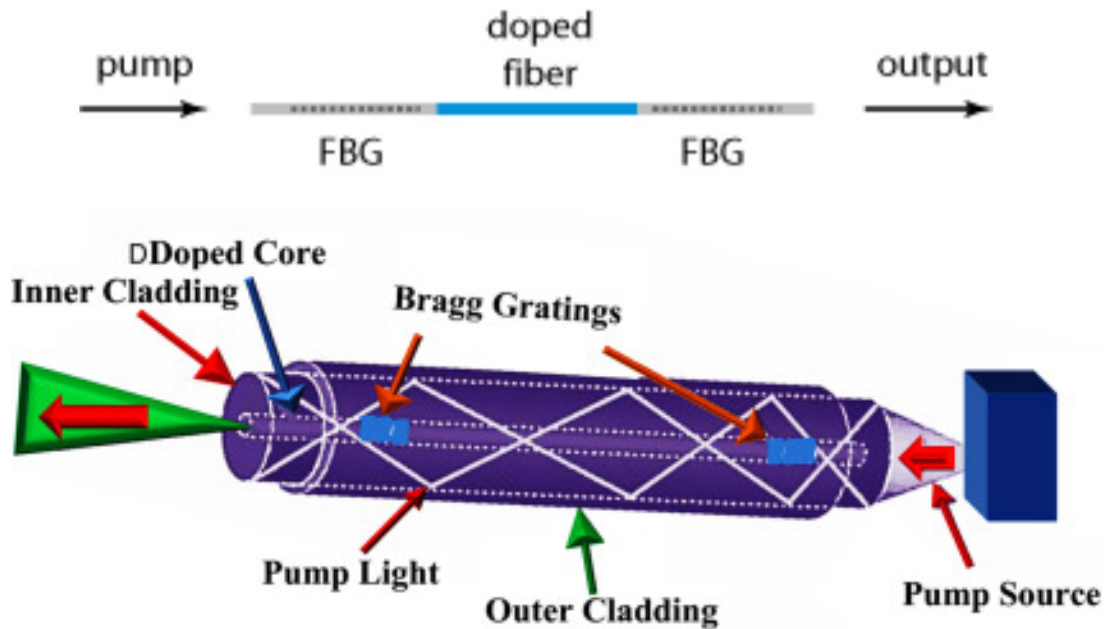


American Chemical Society



G. Shankarling, Resonance vol. 2010, p. 804 (2010)

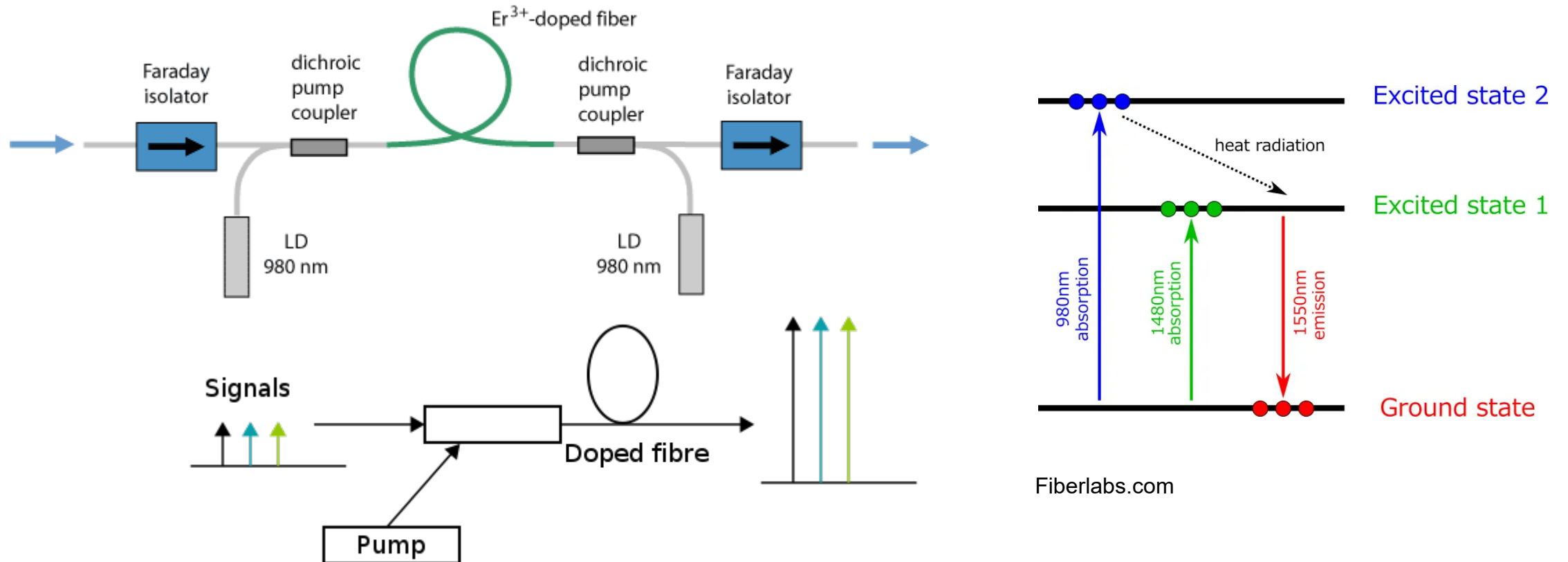
Laser à fibre



- 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

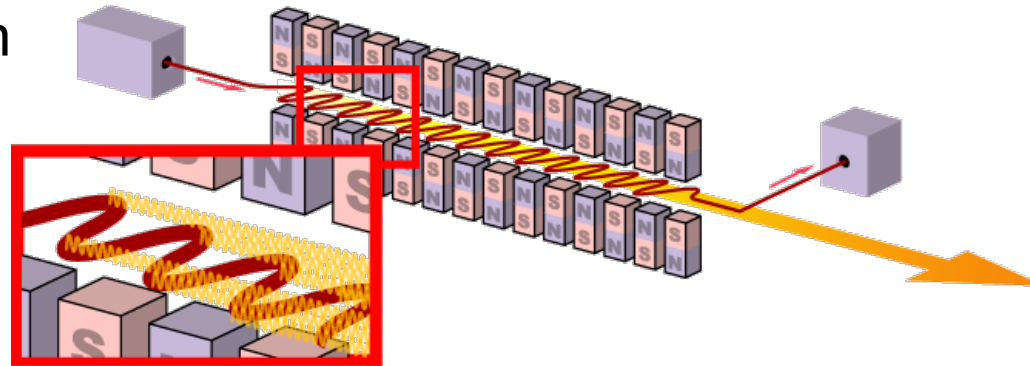
Amplificateur optique

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



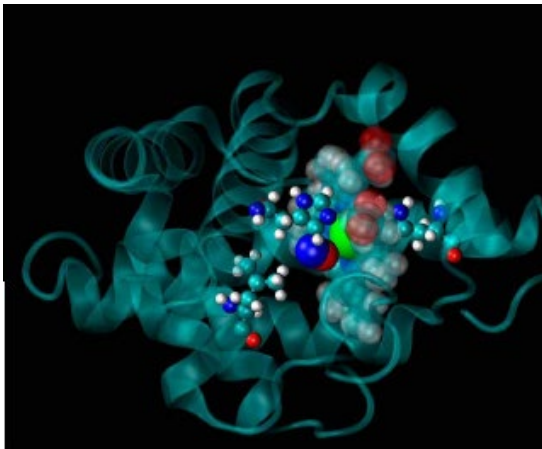
Laser à électron libre

- 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

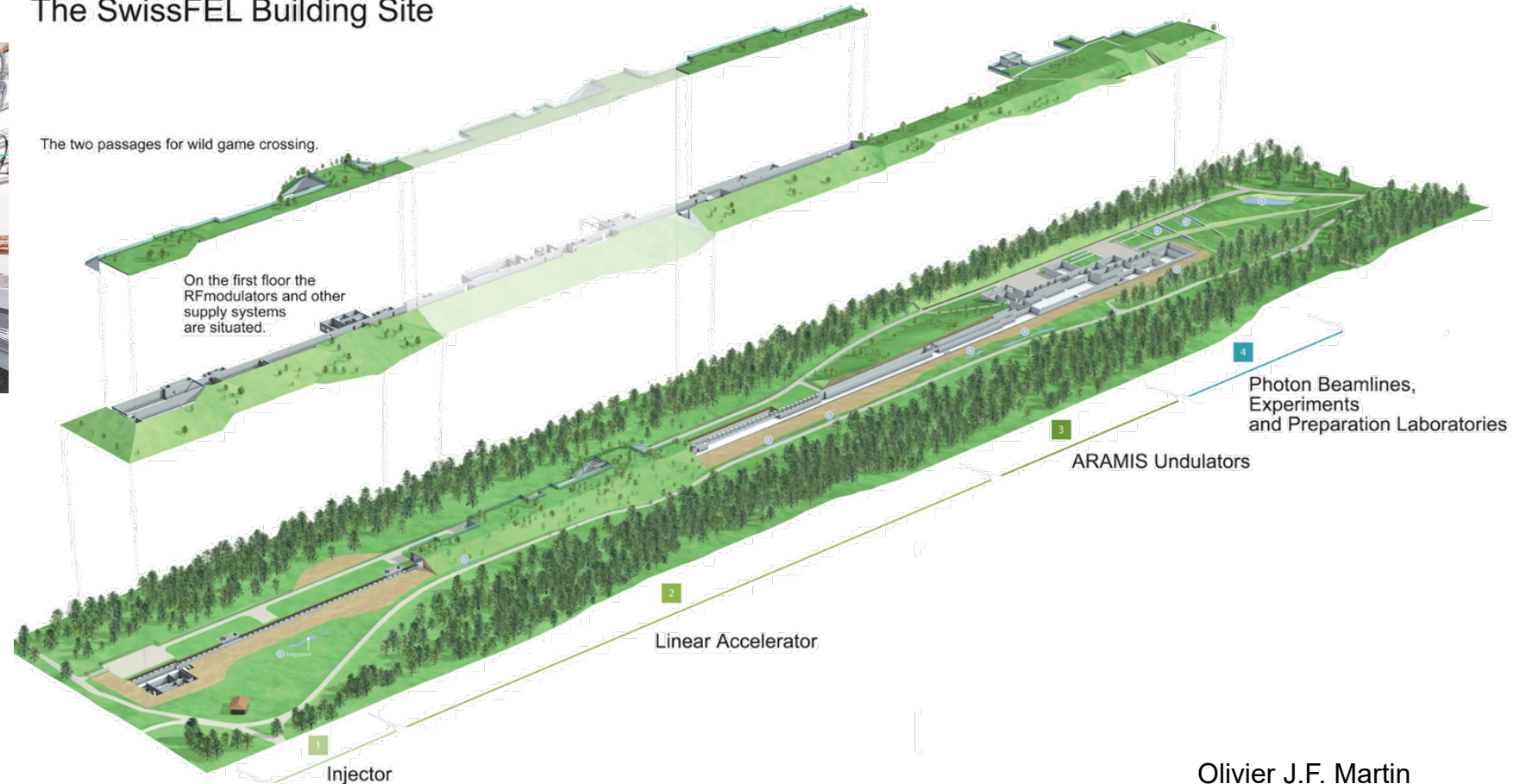


Laser à électron libre – Modèle suisse

- 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

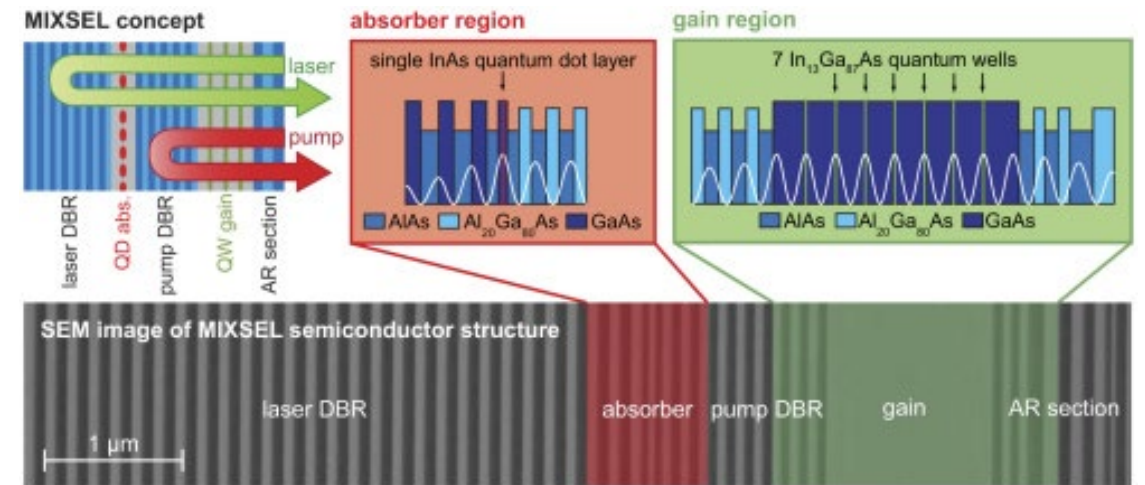
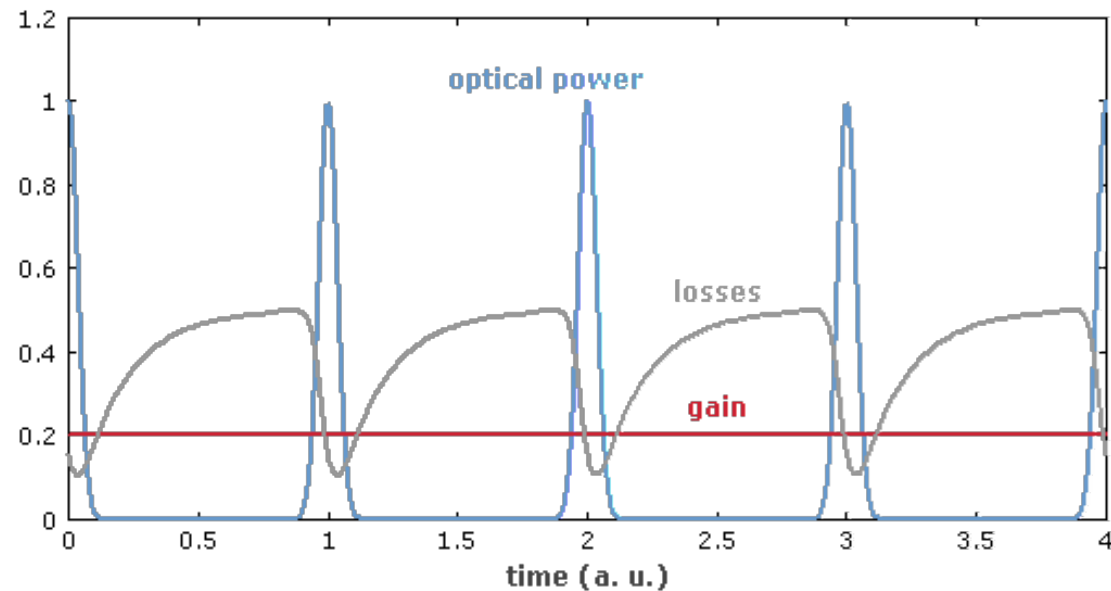


The SwissFEL Building Site



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, étroitesse du spectre) le rendent cependant irremplaçable!

Ingénierie optique

Semaine 13 – partie 6

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 sauf le chapitre 8 (photodétecteurs);
 - Tous les exercices.
- L'examen comporte un nombre important de questions, les étudiant.es sont encouragé.es 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, il est aussi possible de reproduire des figures du cours dans ce résumé
 - 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.