



## Introduction aux lasers

Claude Alibert

[alibertc@wanadoo.fr](mailto:alibertc@wanadoo.fr)

7 avril 2022

LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



## Plan

La lumière, c'est quoi ?

La premier laser Maiman 16 mai 1960

Quelques utilisations des lasers

Les lasers les plus utilisés

Les milieux lasers et les niveaux électroniques

Les conditions pour obtenir l'effet laser

Lasers adaptés à la découpe laser

- Laser à gaz
- Lasers solides
- Lasers semiconducteurs et à fibre

## La lumière, c'est quoi ?

- RAYONS

Systèmes optiques (lentilles, miroirs)

Réflexion, réfraction

- ONDE

Interférences

Diffraction

- PHOTON

Quantification de l'énergie du photon Einstein (1905)

Un photon rouge ( $\lambda=650$  nm) a une énergie de  $3.06 \times 10^{-19}$  J

Interaction radiation/matière (absorption, émission)

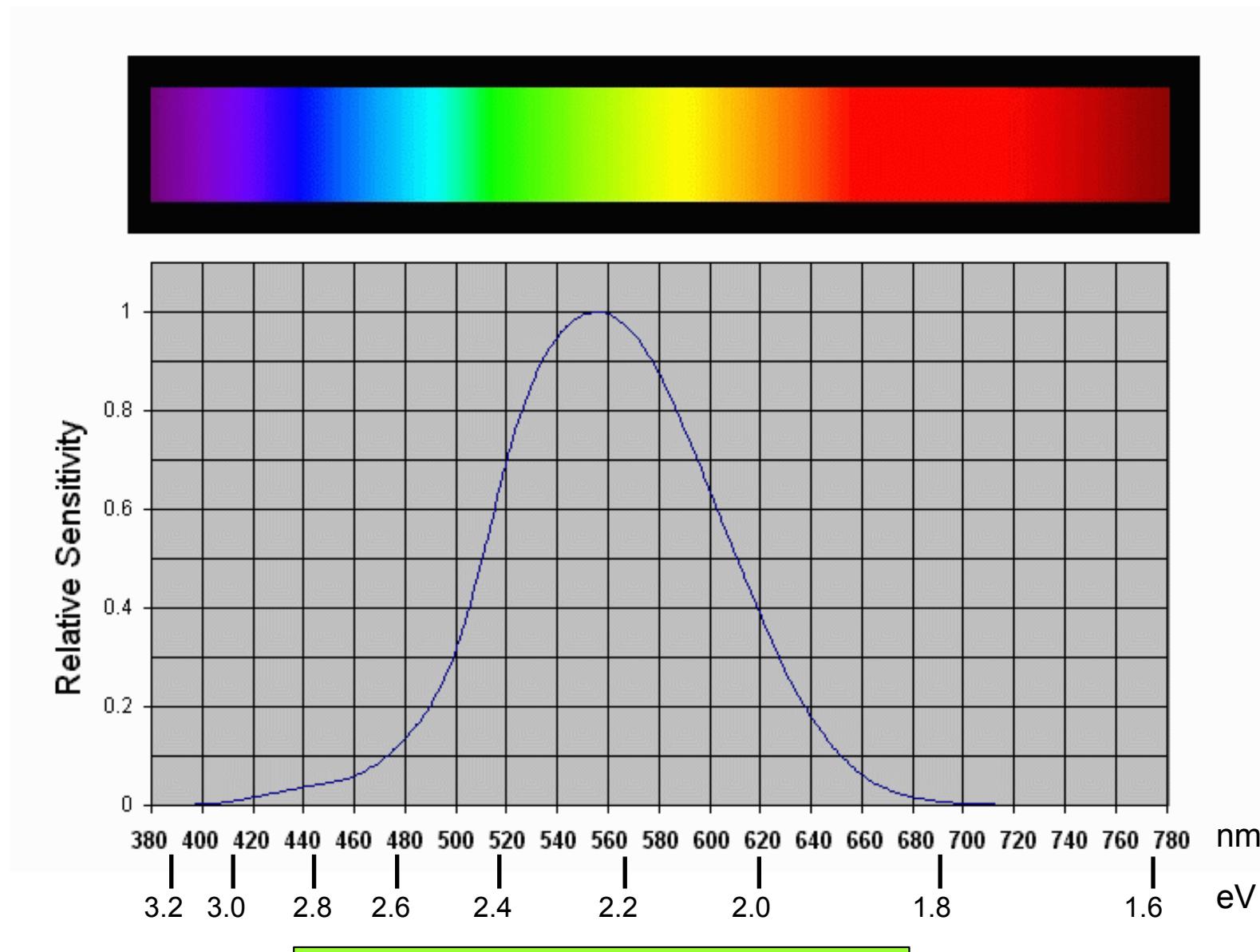
Energie d'un photon rouge en eV : 1.91 eV

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

$$h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s} \quad c=2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \quad e= 1.602 \times 10^{-19}$$

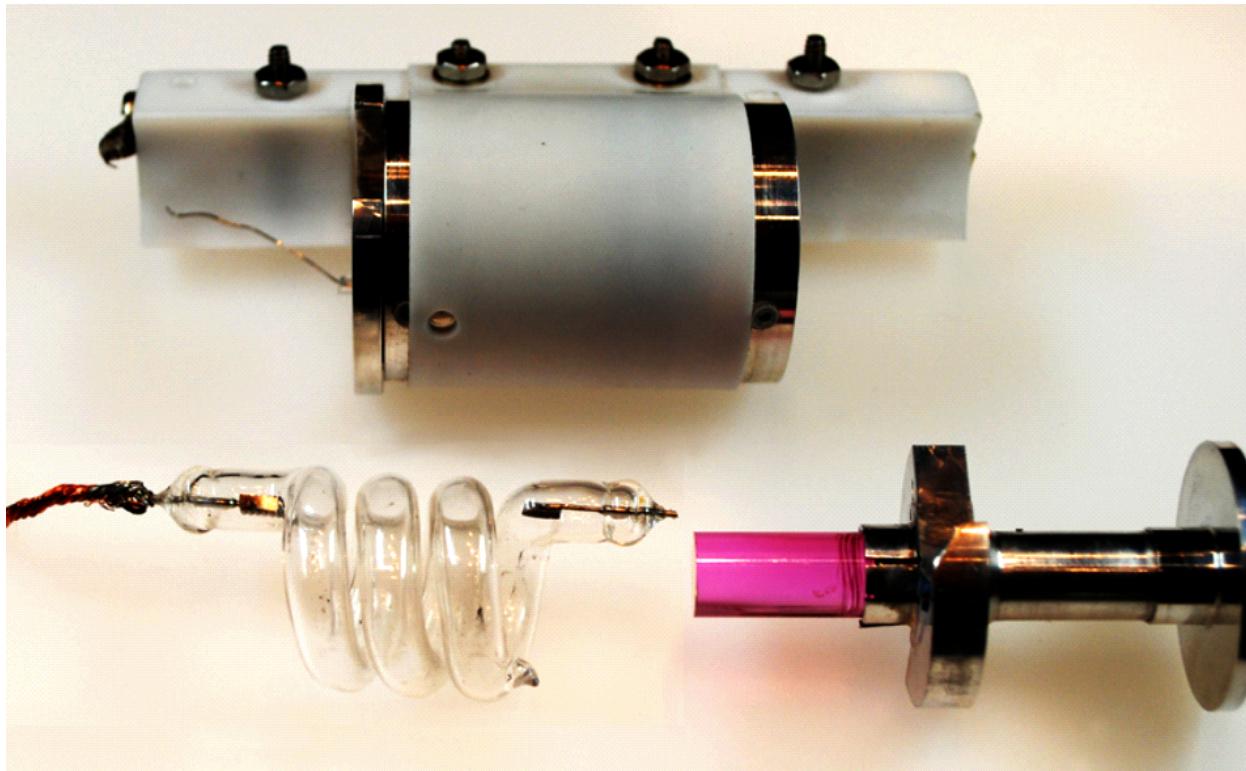
$$E(\text{en eV}) = E(\text{en J})/e$$

Réponse de l'œil humain en fonction de la longueur d'onde en nm.

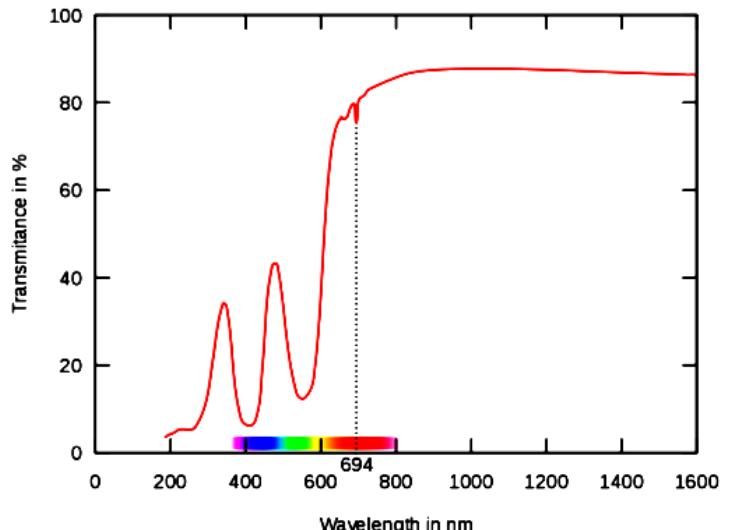


Relation entre nm et eV :  $\text{nm} \times \text{eV} = 1240$

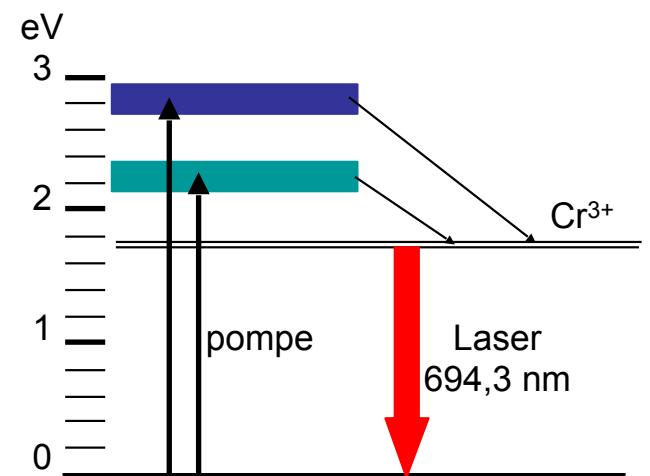
## Le premier laser (T. Maiman 16 mai 1960)



Milieu actif : rubis synthétique :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + Chrome (0.05%)  
Une face réfléchissante R=99,9% et une face R=99,5%  
Pompage par lampe flash.  
Émission laser dans le rouge : 694,3 nm.



Transmission du rubis



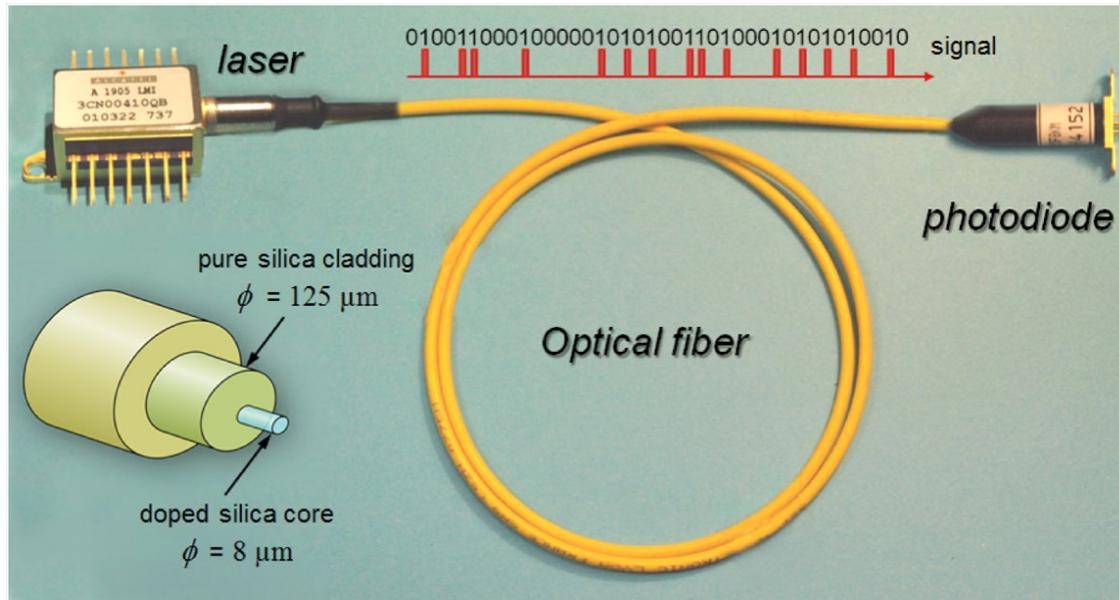
## Ordre de grandeur des rendements des lasers usuels

Type de laser	Nom	Puissance électrique typique consommée	Puissance optique typique	Rendement à la prise
Gaz	HeCd	1 kW	100 mW	0.002 – 0.02 %
	Ar	40 kW	4 W	0.01 %
	HeNe	100 W	1 mW	0.01 %
	CO <sub>2</sub>	1 kW	100 W	10 % à 30 %
Terres rares dans une matrice solide	Nd:YAG (lampe) Nd:YAG (DL)	1 kW 100 W	3 W 10 W	3 % 10 %
Semi-conducteur		50 mW 35 W 12 W	5 mW 25 W 5 W	10 % rouge 70 % 808 nm 40% 450 nm
Fibre laser	Fibre Yb pompée par diode	1.7 kW	1 kW	60 %

Laser semiconducteurs : > 200 000 000 / an

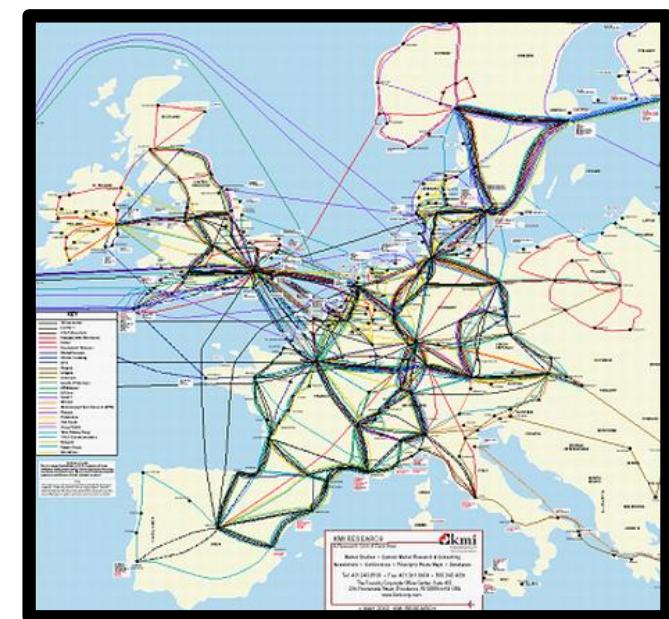
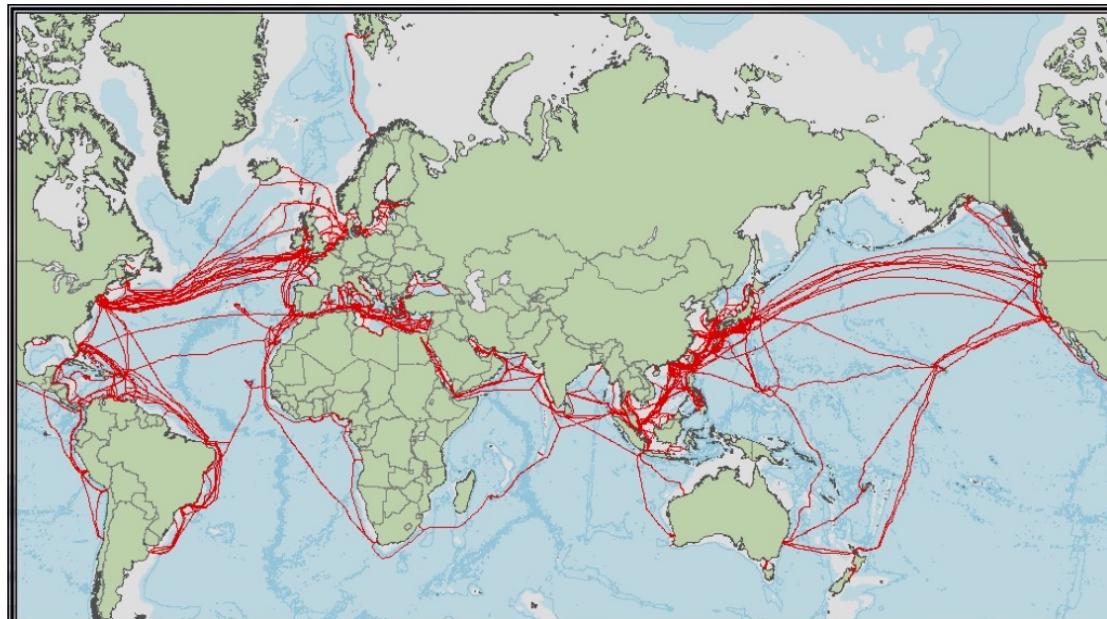
Autres lasers 100 000 / an

# Communication par fibre optique : Le plus grand réseau d'optoélectronique construit par l'homme

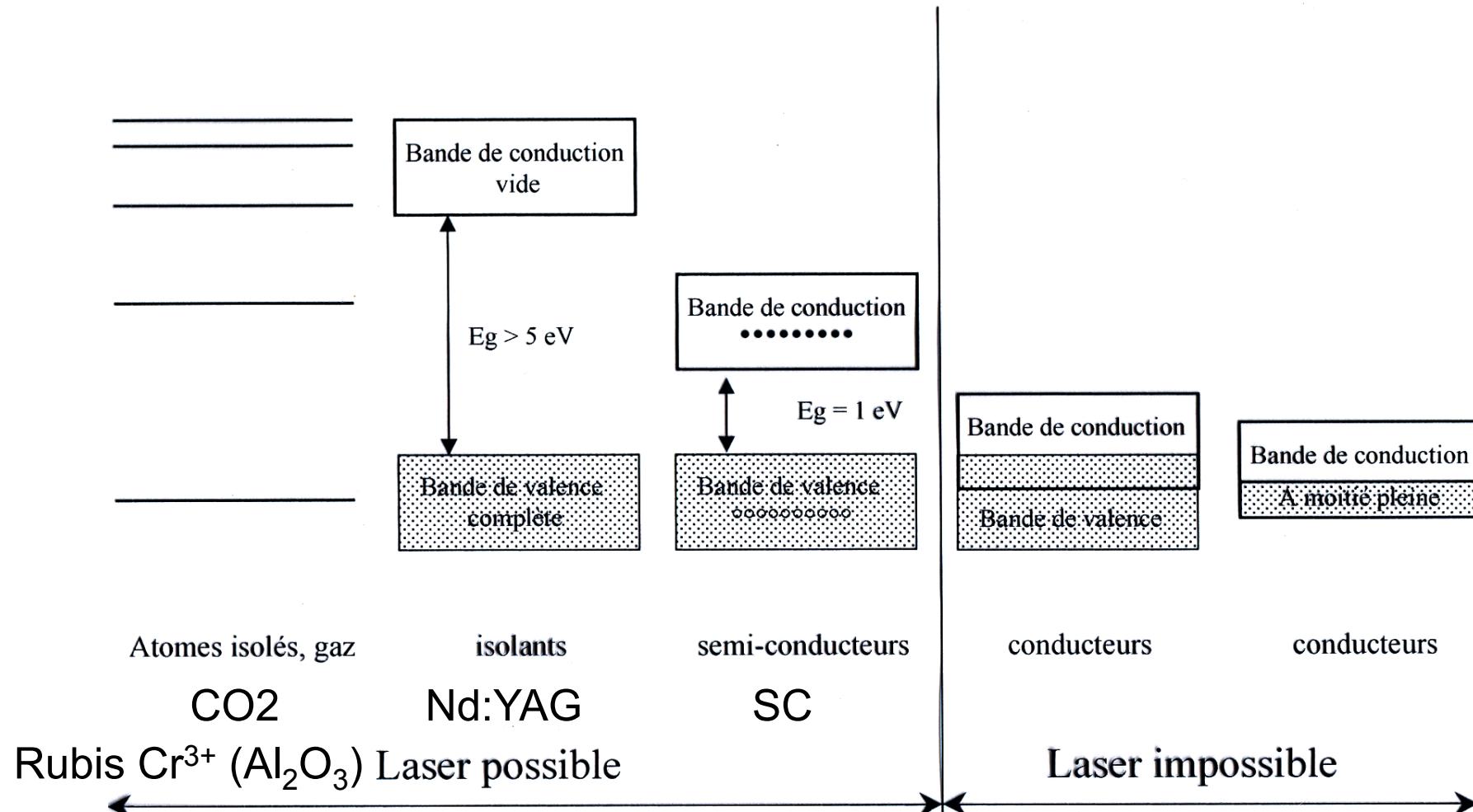


En 1970 Keck démontre chez Corning une atténuation de 20 dB/km.  
Pour une puissance injectée de 1, au bout de 20 km il reste 1 %.

En 2017 Corning a produit 1 milliard de km de fibre. Soit 25.000 fois le tour de la terre.  
Atténuation 0.2 dB/km. Au bout de 100 km, il reste 1%.



# Niveaux électroniques dans les gaz, les isolants, les semiconducteurs et les métaux



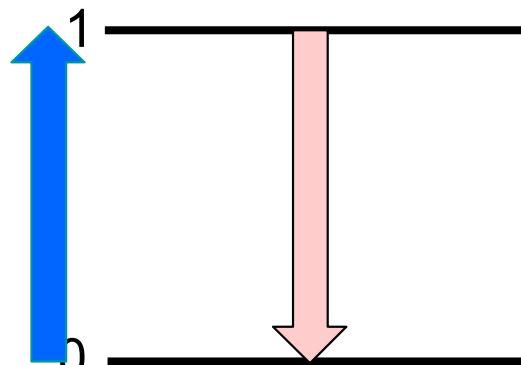
## Niveaux électroniques et principe de l'amplification optique

↑ Excitation ou pompage

↖ Transition non radiative rapide

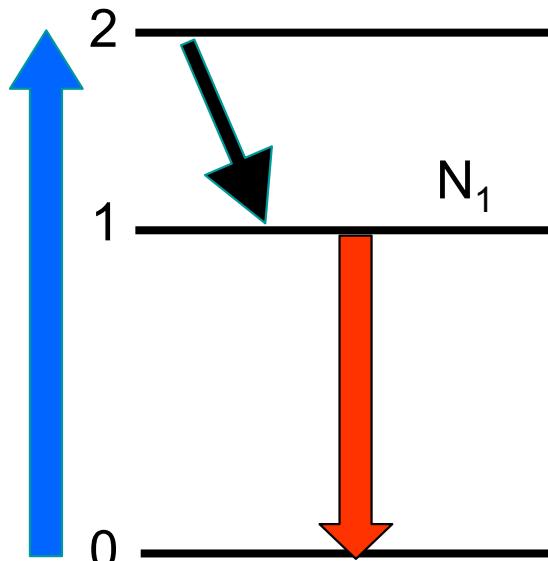
↓ Transparency avec photoluminescence

↓ Amplification (laser)



Système à 2 niveaux

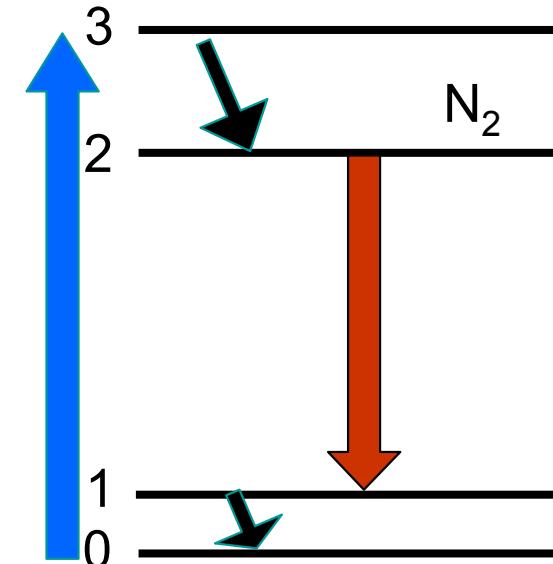
Condition d'amplification  
Impossible  
 $N_1 = N_2 = N/2$



3 niveaux  $N_2$

Condition d'amplification  
 $N_1 > N_2$  possible si  
 $\tau_{21} \ll \tau_{10}$

Laser Ruby



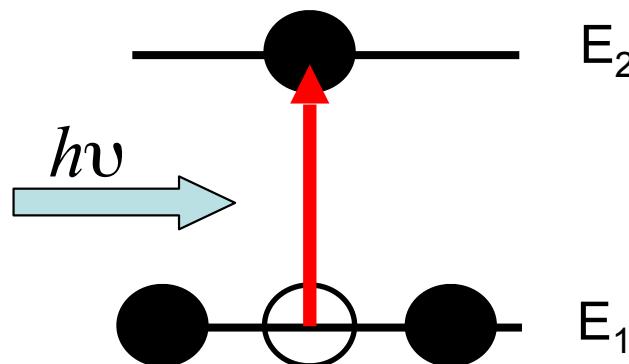
4 niveaux  $N_1$

Condition d'amplification  
 $N_2 > N_1$  possible si  
 $\tau_{32}$  et  $\tau_{10} \ll \tau_{21}$

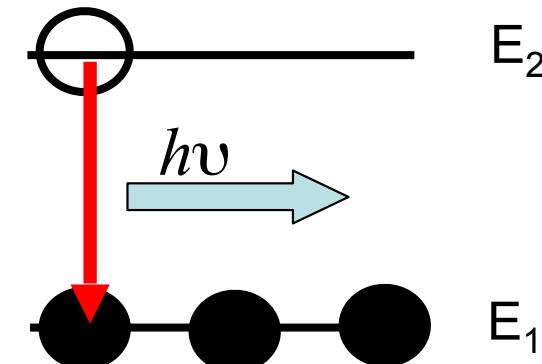
Laser Nd:YAG, C02

## Photons et niveaux d'énergie des électrons

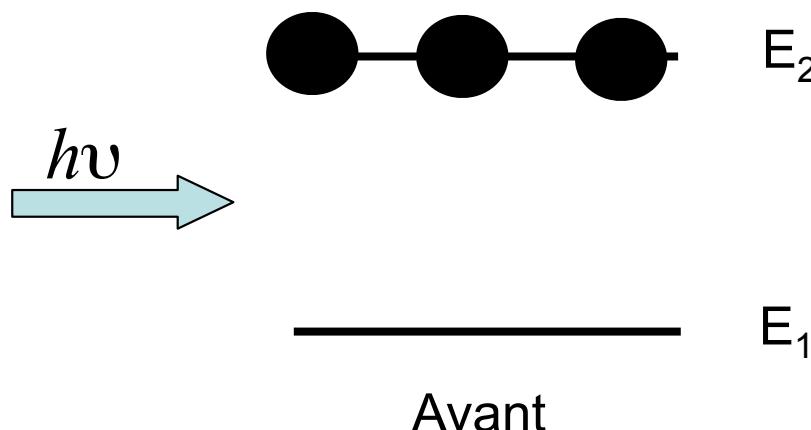
En 1905 Einstein a démontré la quantification des photons :  $E = h\nu$



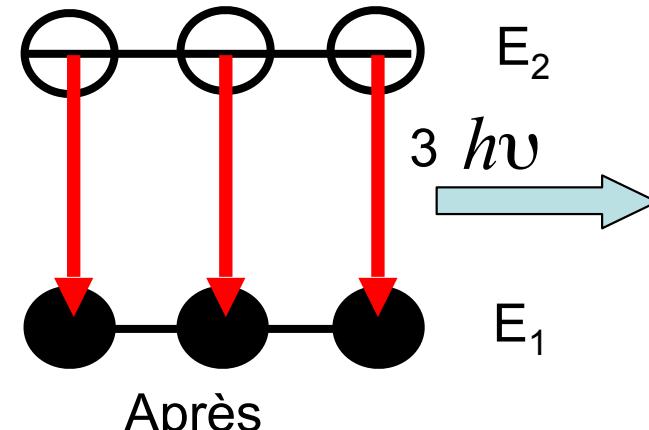
Absorption si  
 $E_2 - E_1 = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$



Emission  
spontanée



Avant



Après

Emission stimulée ou induite par photons

## Émission spontanée et émission stimulée

- Émission **spontanée**

L'énergie  $h\nu$  des photons est égale à  $E_2 - E_1$

Le moment d'apparition est aléatoire

Direction aléatoire

Phase aléatoire

Si  $N(E_2) < N(E_1)$  alors on a de l'émission **spontanée**

} **Émission incohérente**

- Émission **stimulée\*** ou **induite** par photons

Un photon déclenche **simultanément** plusieurs photons identiques

L'énergie  $h\nu$  des photons est égale à  $E_2 - E_1$

Direction identique

Phase identique

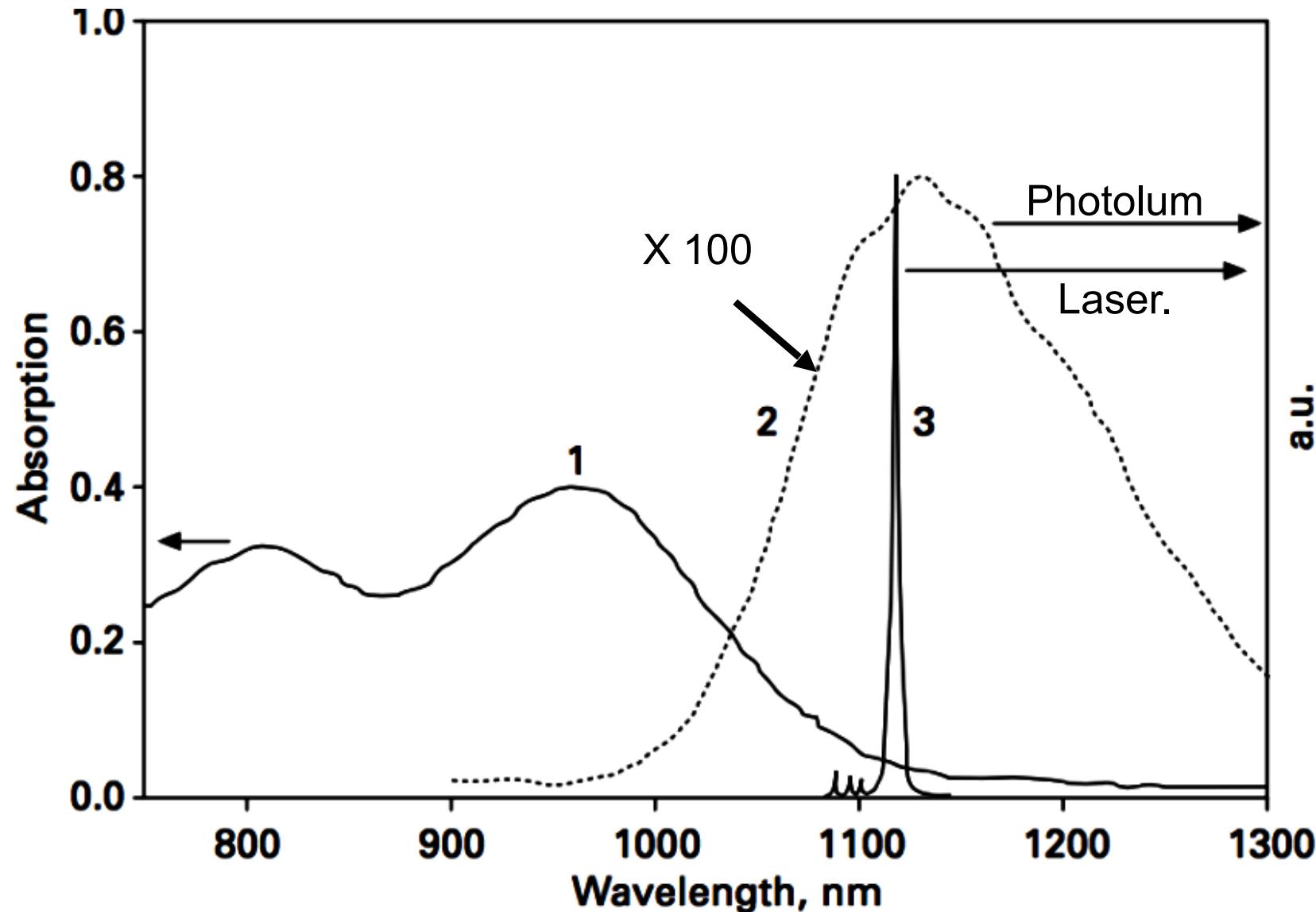
Si  $N(E_2) > N(E_1)$  alors on a de l'émission **stimulée**

} **Émission cohérente**

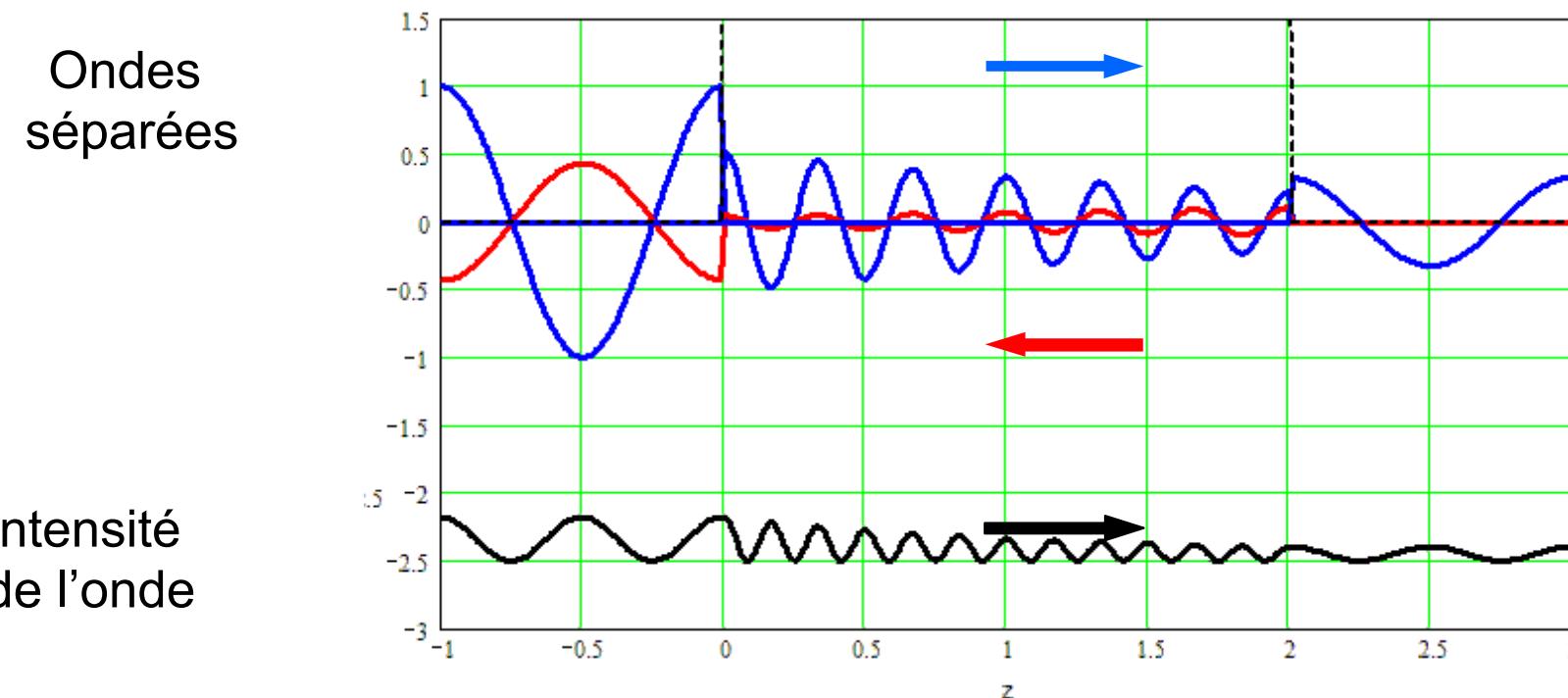
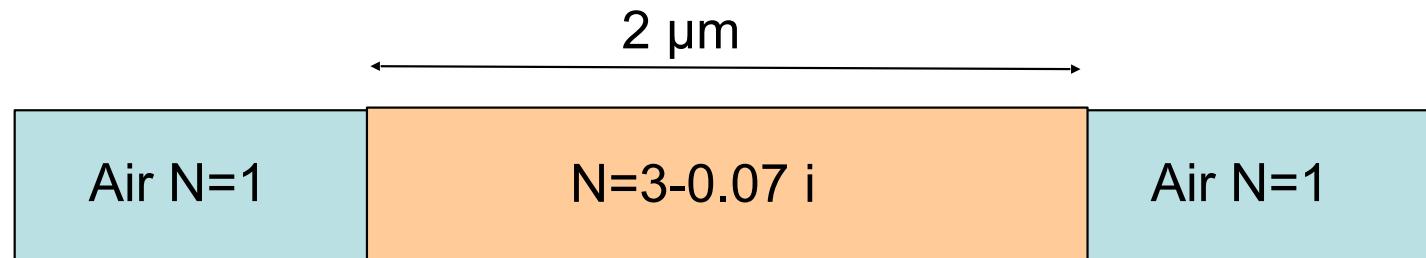
\* Einstein a postulé l'existence de l'émission stimulée en 1917 alors que la mécanique quantique n'était pas encore établie.

L'effet laser confirme l'hypothèse d'Einstein

Absorption, photoluminescence et effet laser pour un laser solide  
Exemple laser YAG (Ytterbium Aluminium Garnet)



## Illustration de la propagation d'une onde dans un milieu **avec PERTES** en fonction du temps



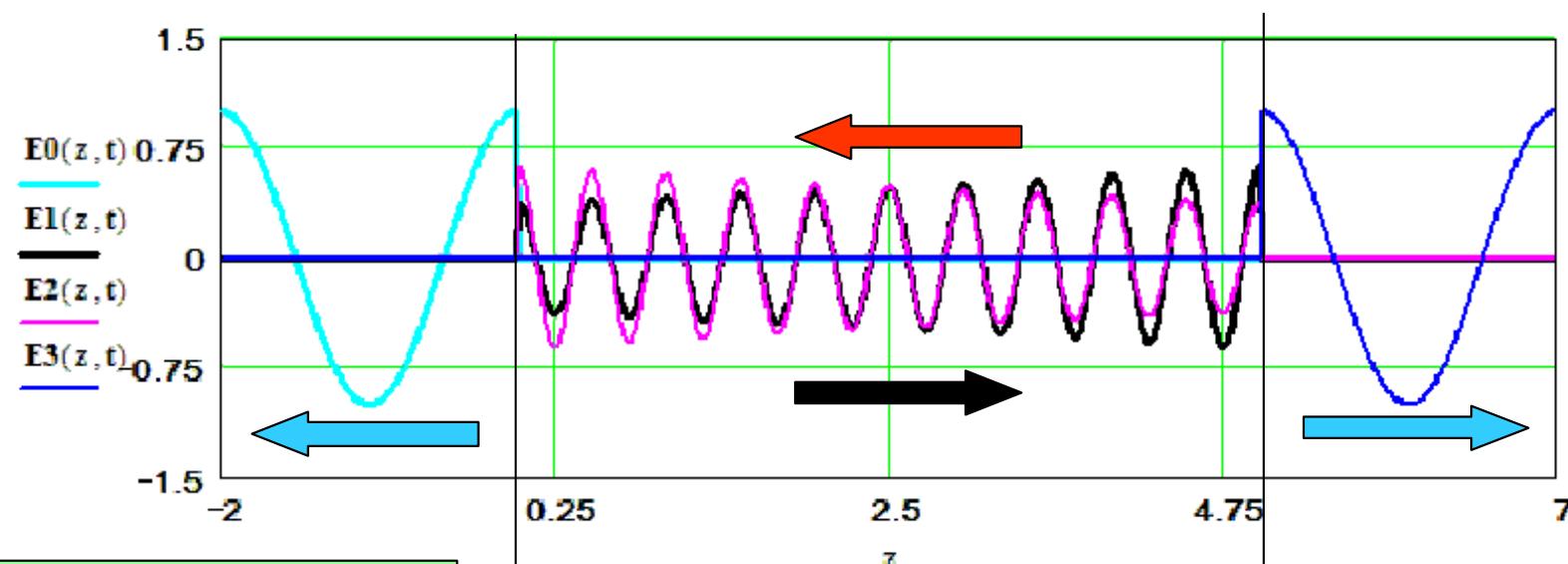
$$k=0.07$$

$$\alpha = 4\pi k/\lambda$$

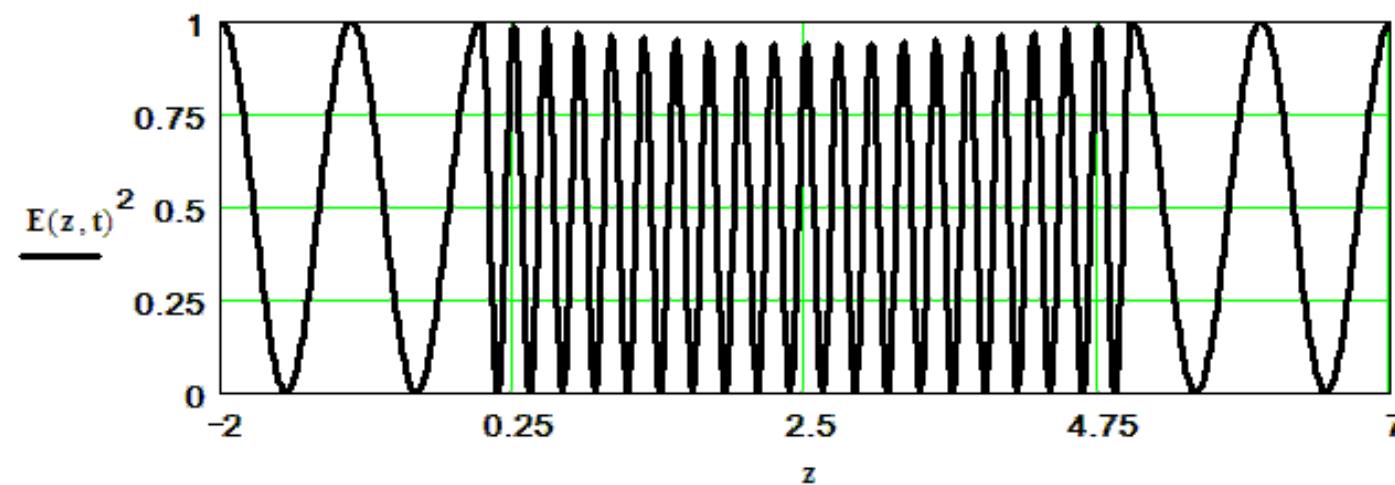
$$\text{avec } \lambda = 1 \quad \alpha = 0.879 \mu\text{m}^{-1} \text{ ou } 8796 \text{ cm}^{-1}$$

$$\alpha d = 1 \text{ pour } 1.137 \mu\text{m}$$

- Illustration de la propagation d'une onde dans un milieu avec GAIN en fonction du temps



Résonance si  
 $L = m \frac{\lambda}{2n}$  avec  $m \in 1, 2, 3, \dots$



## Les 3 conditions pour obtenir l'effet laser

Il faut un matériau adapté.

Atomes/ions/molécules/gaz/liquides/solides avec des niveaux d'énergies adaptés.

Ce milieu doit pouvoir être rendu actif (présenter un gain > pertes) par un **mécanisme d'excitation** (pompage) qui crée l'inversion de population par apport d'énergie : décharge électrique, pompage optique, réaction chimique.

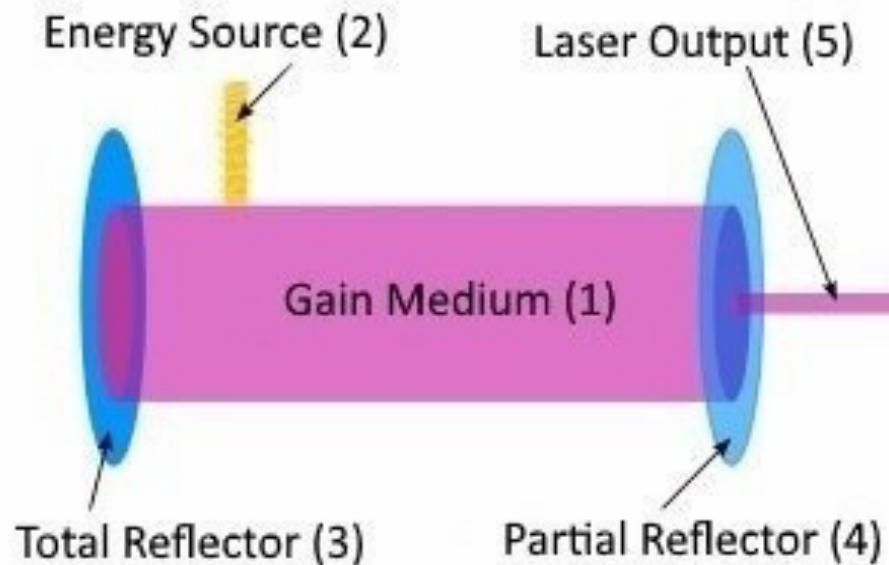
Il faut confiner la radiation dans un **résonateur optique**

Résonance si

$$L = m \frac{\lambda}{2n} \quad \text{avec } m \in 1, 2, 3, \dots$$

Il existe de nombreux matériaux susceptibles de laser mais, seuls quelques rares matériaux ont une efficacité énergétique ou une longueur d'onde appropriée à l'application visée.

## Schéma de principe d'un laser



Laser à gaz : C0<sub>2</sub>  
Pompage électrique par plasma

Laser Solide (YAG)  
Pompage optique

Diodes laser  
Pompage électrique

## Découpe laser

Principe de la découpe laser.

Propriétés des matériaux.

Propriétés optiques des faisceaux laser (BPP).

Les diodes laser.

Les lasers adaptés à la découpe.

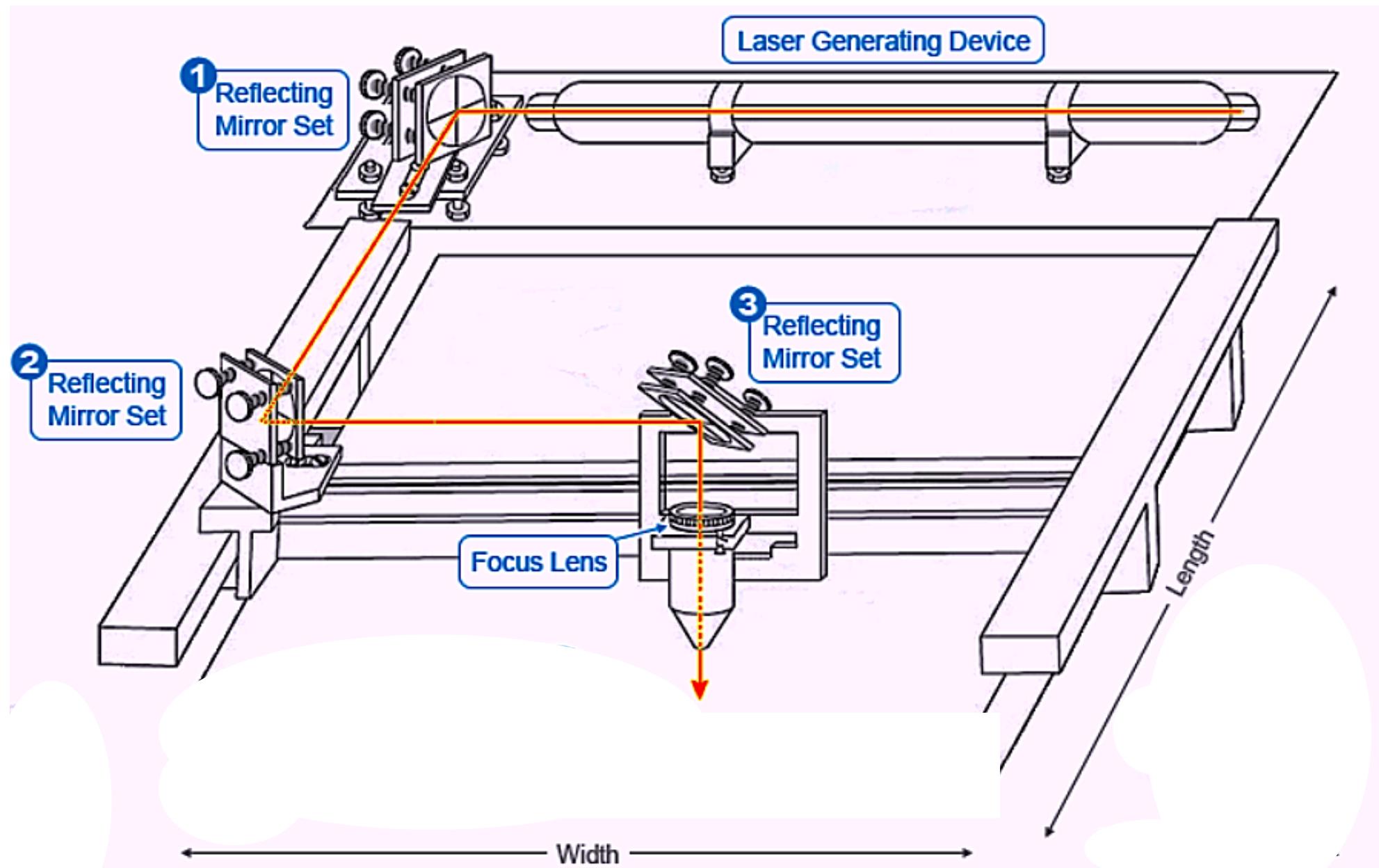
Laser CO<sub>2</sub>.

Laser YAG.

Fibre Laser.

Laser bleu pulsé pour le Cuivre.

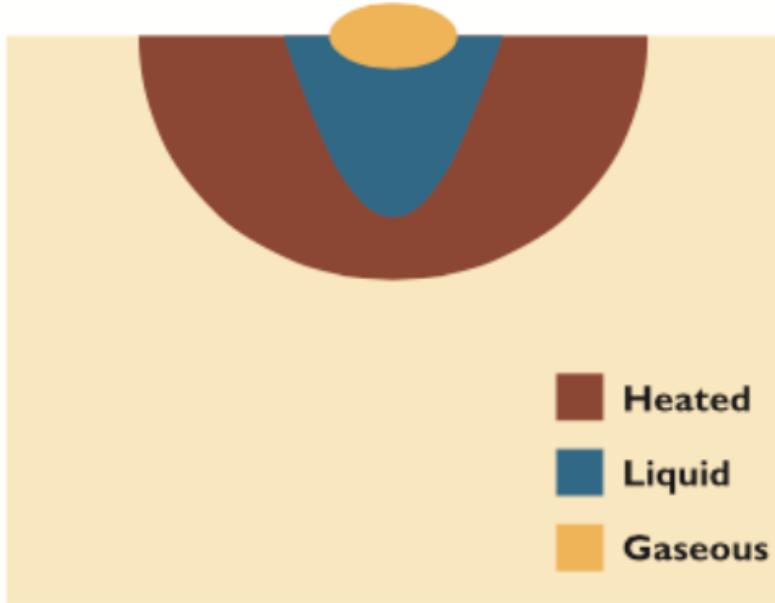
## Schéma d'une découpeuse laser à laser CO<sub>2</sub>



## Découpe laser et propriétés des matériaux

### Bombardment Zone

Shows the zone affected by heat after laser bombardment



Propriétés favorables

### Matériau

Forte valeur de coefficient d'absorption optique  
Faible valeur du coefficient de réflexion  
Faible valeur du coefficient de diffusion thermique

### Laser

Puissance  
Focalisation (BPP)  
Impulsions temporelles courtes

## Découpe des matériaux par laser

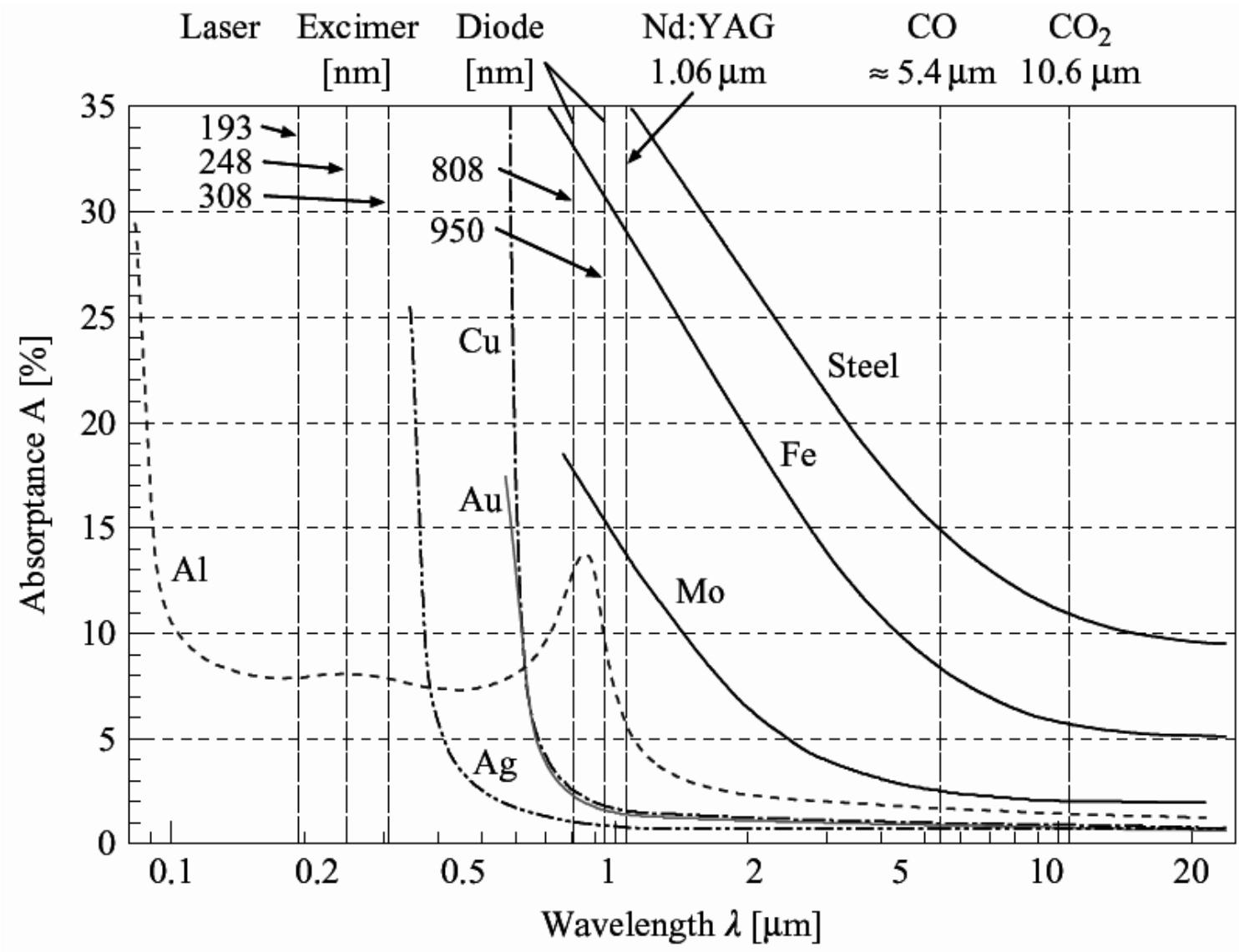
### 3 paramètres essentiels :

- Propriétés optiques : absorption/pouvoir réflecteur du faisceau laser
- Température de **combustion** (matériaux organique) ou d'**ébullition** (métaux)
- Propriétés physiques : conductivité thermique, capacité calorifique, ....

Métal	Conductivité thermique W/mK	Température de fusion °C	Température d'ébullition °C
Acier	45	1450	3000
Aluminium	237	660	2519
Cuivre	386	1084	2595
Fer	80	1538	3000
Laiton	120	900	--
Nickel	91	1555	3075
Plomb	35	327	1700
Zinc	116	419	920
Tungstène	174	3655	5930

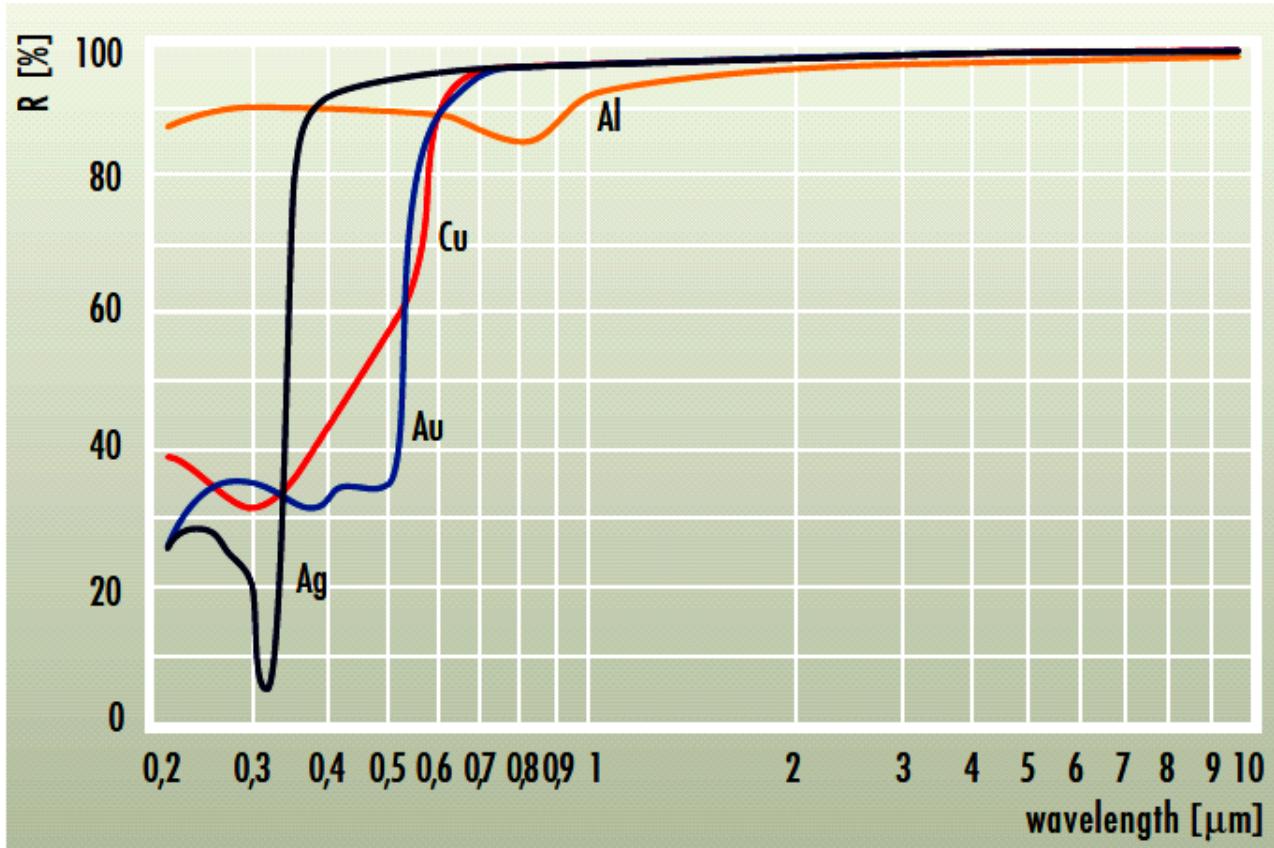
## Découpe laser et propriétés optiques des métaux Exemple du cuivre et de l'acier

Epaisseur inconnue



## Découpe laser et propriétés optiques des métaux

### Exemple du cuivre et de l'acier



Facteurs défavorables :

$R \sim 0.98$

Haute température de vaporisation  
Forte conductivité Thermique

Facteurs favorable

Forte absorption

$R$  diminue avec la température

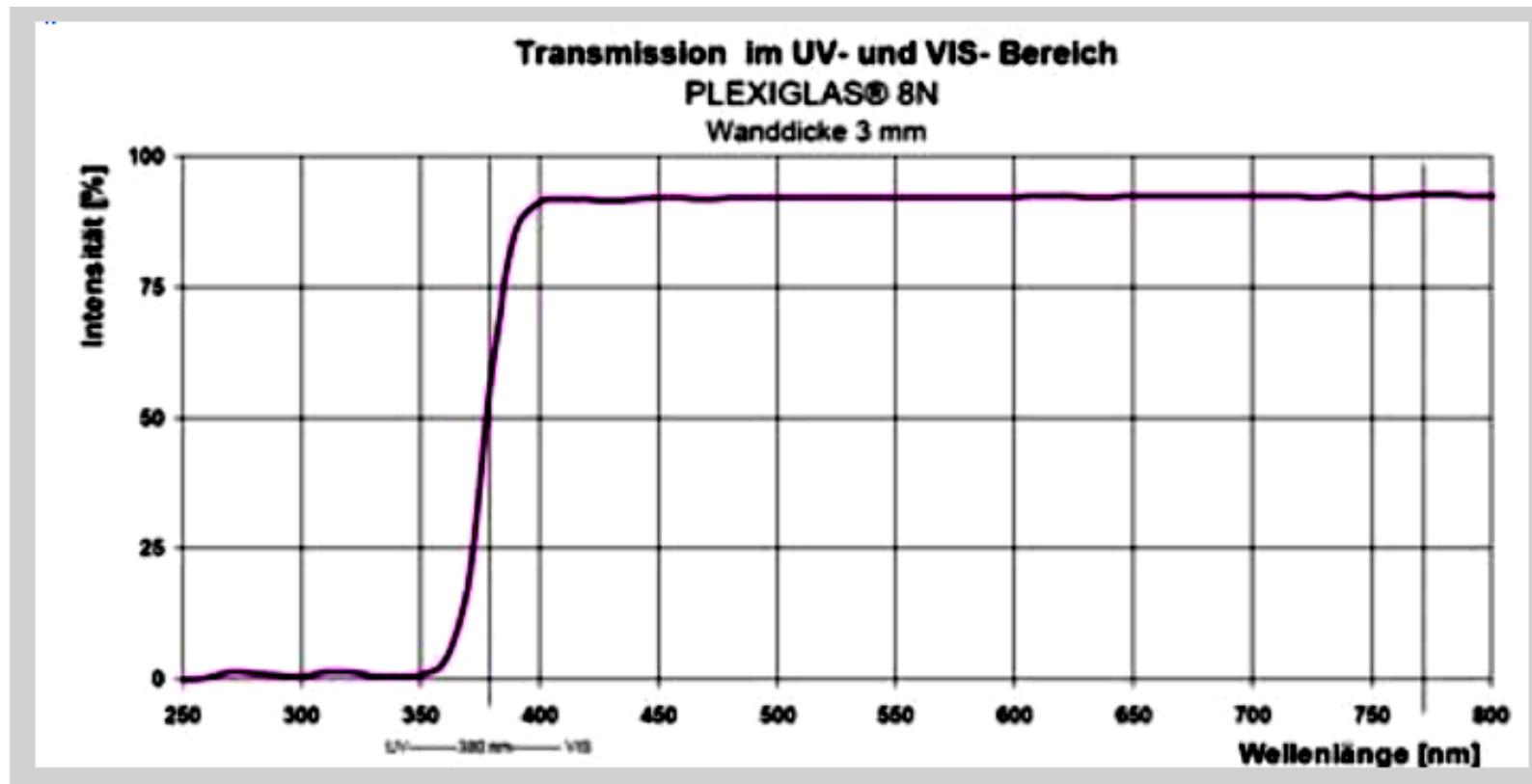
Pour l'acier la seule solution est de disposer d'une très forte puissance (5 à 20 kW) CO<sub>2</sub> ou YAG.

Pour le cuivre (circuits imprimés) La gravure peut être obtenue en utilisant :

- un laser UV Nd:Yag Triplé ( $1.060 \mu\text{m} / 3 = 0.355 \mu\text{m}$ ) ;
- un laser émettant des impulsions courtes ( $\sim 1 \text{ ns}$  et  $100 \text{ kHz}$ ) pour éviter la diffusion thermique ;
- un spot de l'ordre de  $20 \mu\text{m}$ .

## Exemple du PolyMethylMethAcrylate (PMMA) ou plexiglas

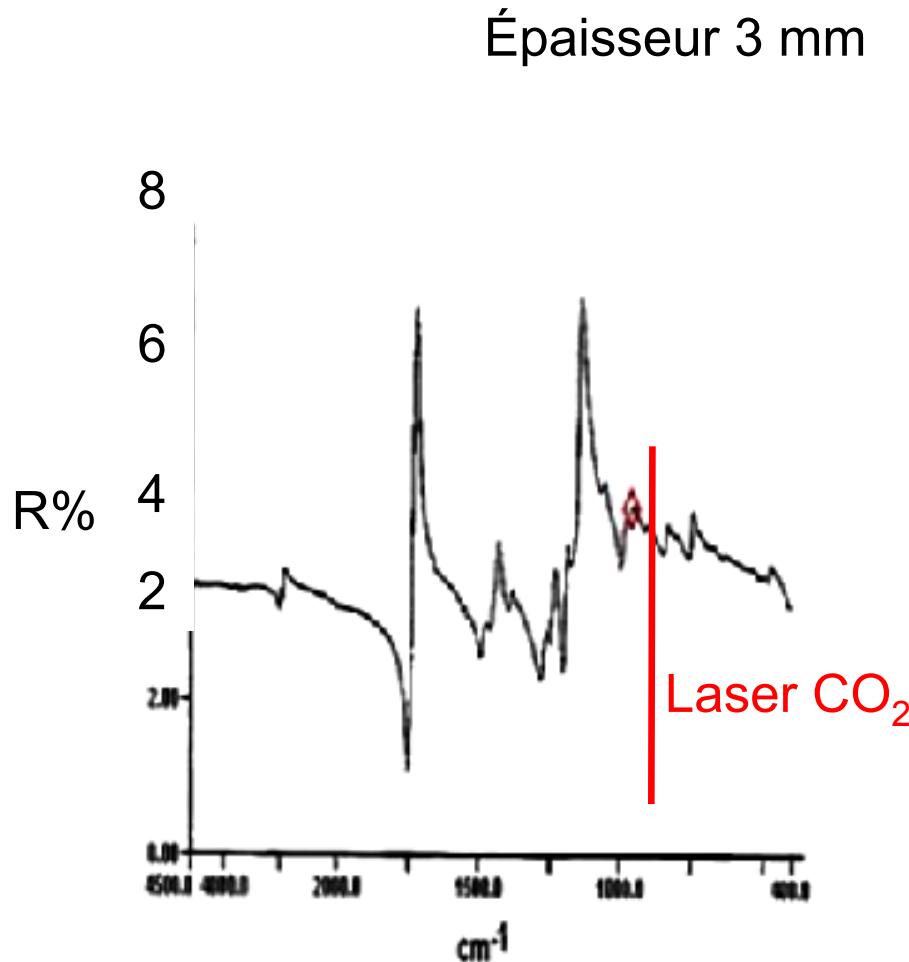
PMMA non dopé (transparent dans le visible)



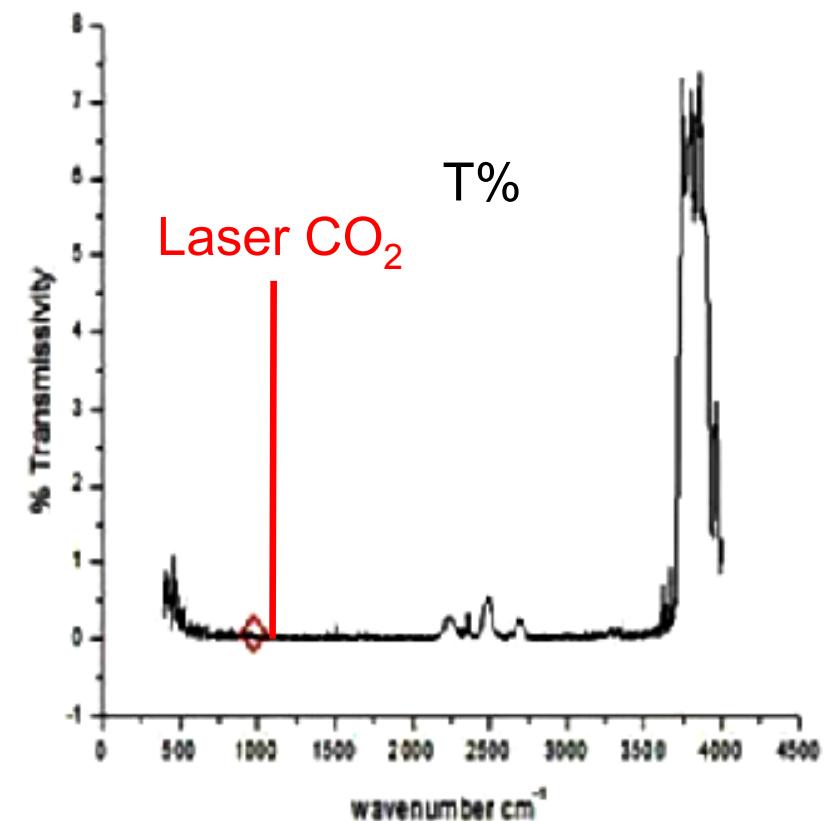
Conclusions :

La découpe est possible dans l'UV. Mais les lasers sont trop chers dans ce domaine  
Découpe impossible dans le visible et le poche infra-rouge.

## Exemple du PolyMethylMethAcrylate (PMMA) ou plexiglas Propriétés optiques à 10,6 µm (laser CO<sub>2</sub>)



A 10.6 µm (943 cm<sup>-1</sup>)  
R= 0.047  
T = 0.003  
A=1-R-T= 0.95



Conclusion : Le laser CO<sub>2</sub> est bien adapté à la découpe du PMMA

## Découpe laser

Principe de la découpe laser.

Propriétés des matériaux.

**Propriétés optiques des faisceaux laser (BPP).**

Les diodes laser.

Les lasers adaptés à la découpe.

Laser CO<sub>2</sub>.

Laser YAG

Fibre Laser

Laser bleu pulsé pour le Cuivre

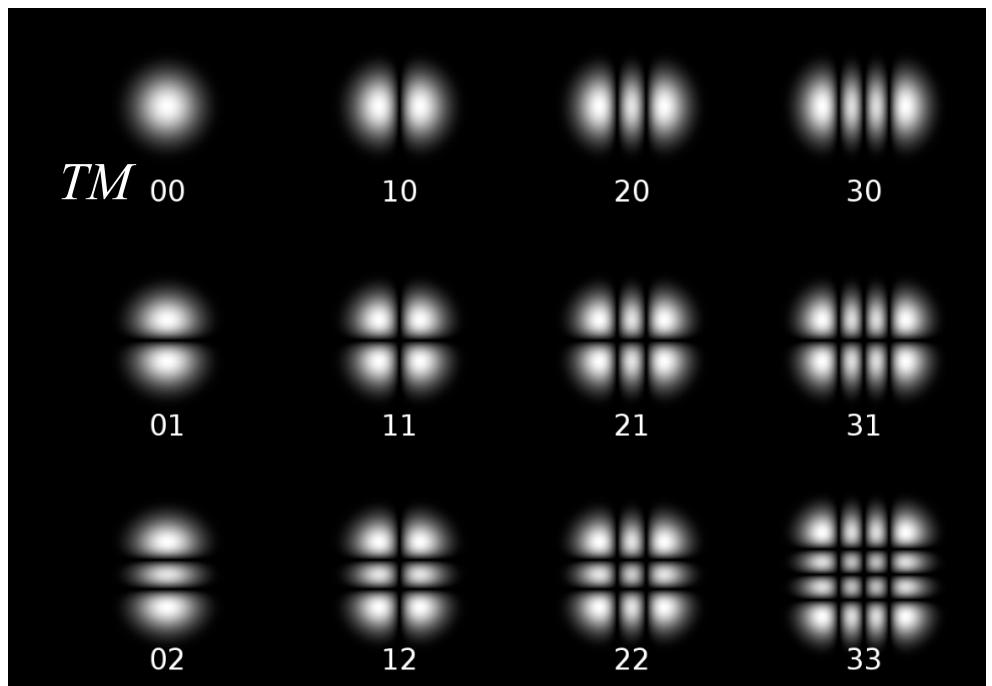
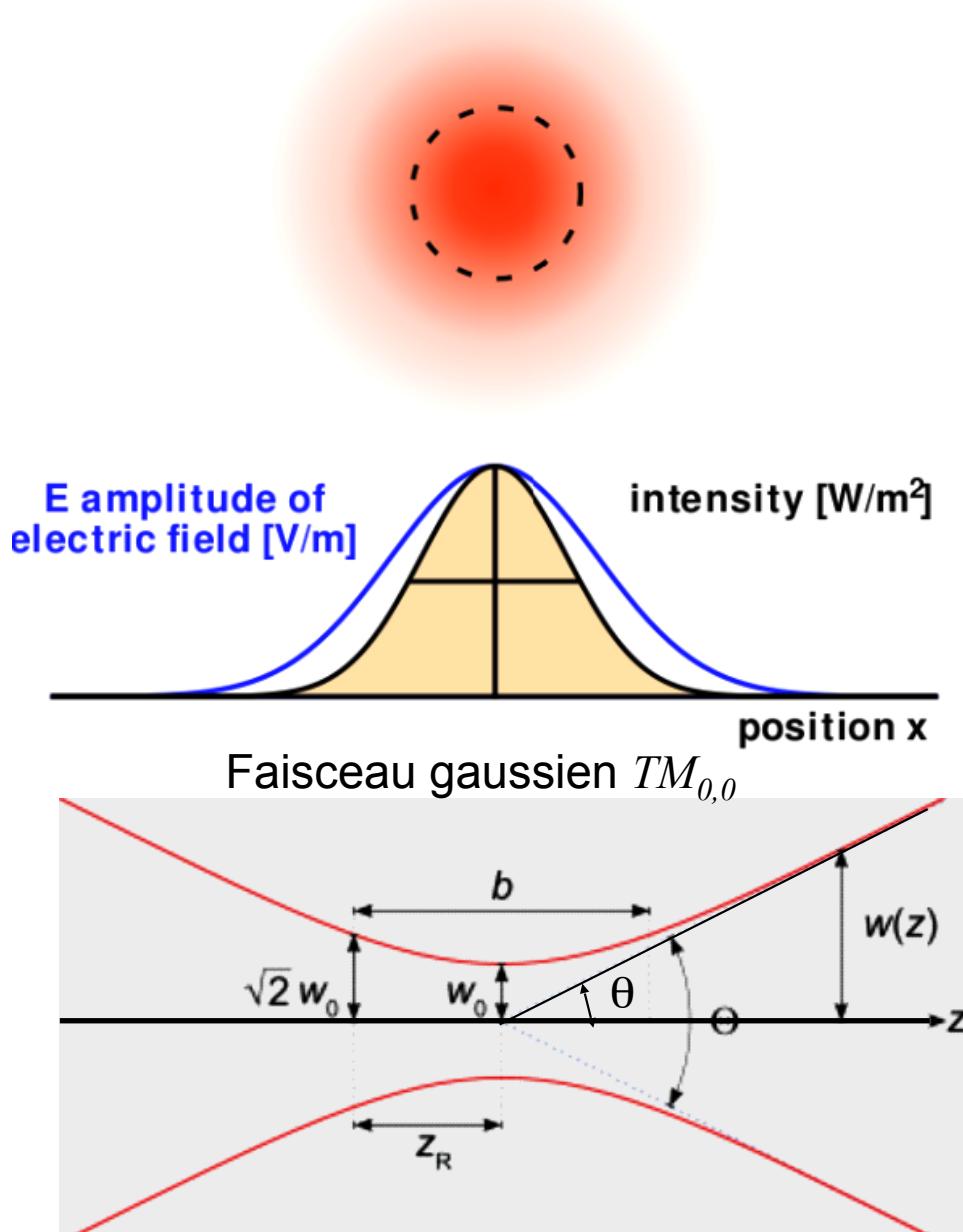
## Propriétés essentielles d'un faisceau laser

- Puissance
- Longueur d'onde
- Qualité de faisceau, Brillance et **Beam Parameter Product (BPP, M<sup>2</sup>)**

Le rayon  $r$  (mm) du spot laser et le demi angle d'ouverture  $\theta$  (mrad) du faisceau sont deux paramètres essentiels

$$\text{BPP} = r \times \theta \text{ mm} \times \text{mrad}$$

## Faisceau Gaussien, faisceau multi modes $TM_{m,n}$ et BPP



Faisceau multi modes  $TM_{m,n}$

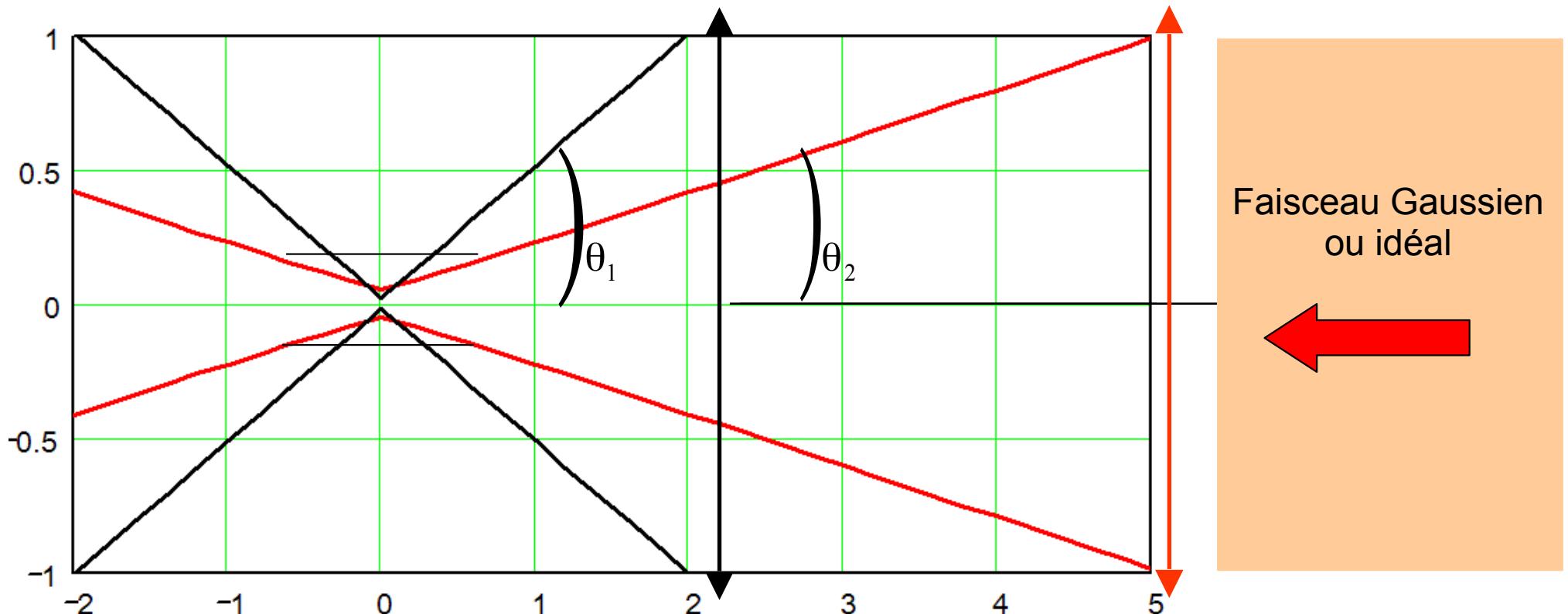
**Beam Parameter Product (mm x mrad)**

$$BPP = w_0 \times \theta \text{ mm} \times \text{mrad}$$

**Quels que soient les éléments optiques qui transforment le faisceau, le BPP est conservé**

## Beam parameter product (BPP) et focalisation

Dans le cas d'une optique parfaite (lentilles minces) le **BPP est invariant**



$$\theta_1 = 464 \text{ mrad} \quad d_1 = 0,043 \text{ mm}$$

$$\theta_2 = 200 \text{ mrad} \quad d_2 = 0,100 \text{ mm}$$

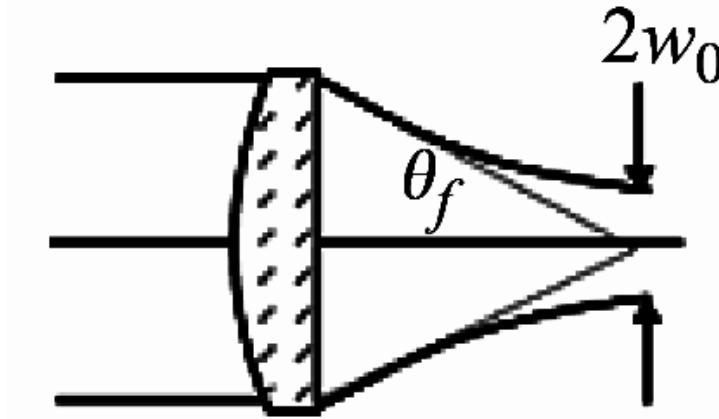
$$\text{BPP} = 20 \text{ mm} \times \text{mrad}$$

Valeurs typiques pour laser CO<sub>2</sub>

Pour le laser CO<sub>2</sub>, Les lentilles de forme ménisque en ZnSe minimisent les aberrations

## Un paramètre essentiel : Beam Parameter Product (BPP)

Définition :  $BPP = w_0 \times \theta$



Unité : mm x mrad

Cas des faisceaux Gaussien :  $BPP_{Gauss} = \lambda / \pi$        $\frac{BPP}{BPP_{Gauss}} = M^2$

$M^2$  : facteur de qualité du faisceau

À la longueur d'onde 0.355 µm) des lasers YAG triplé :  $BPP_{Gauss} = 0,12 \text{ mm} \times \text{mrad}$

À la longueur d'onde (1.064 µm) des lasers à fibre :  $BPP_{Gauss} = 0,34 \text{ mm} \times \text{mrad}$

À la longueur d'onde (10,6µm) des lasers CO<sub>2</sub> :  $BPP_{Gauss} = 3,37 \text{ mm} \times \text{mrad}$

## Découpe laser

Principe de la découpe laser.

Propriétés des matériaux.

Propriétés optiques des faisceaux laser (BPP).

### **Les diodes lasers.**

Les lasers adaptés à la découpe.

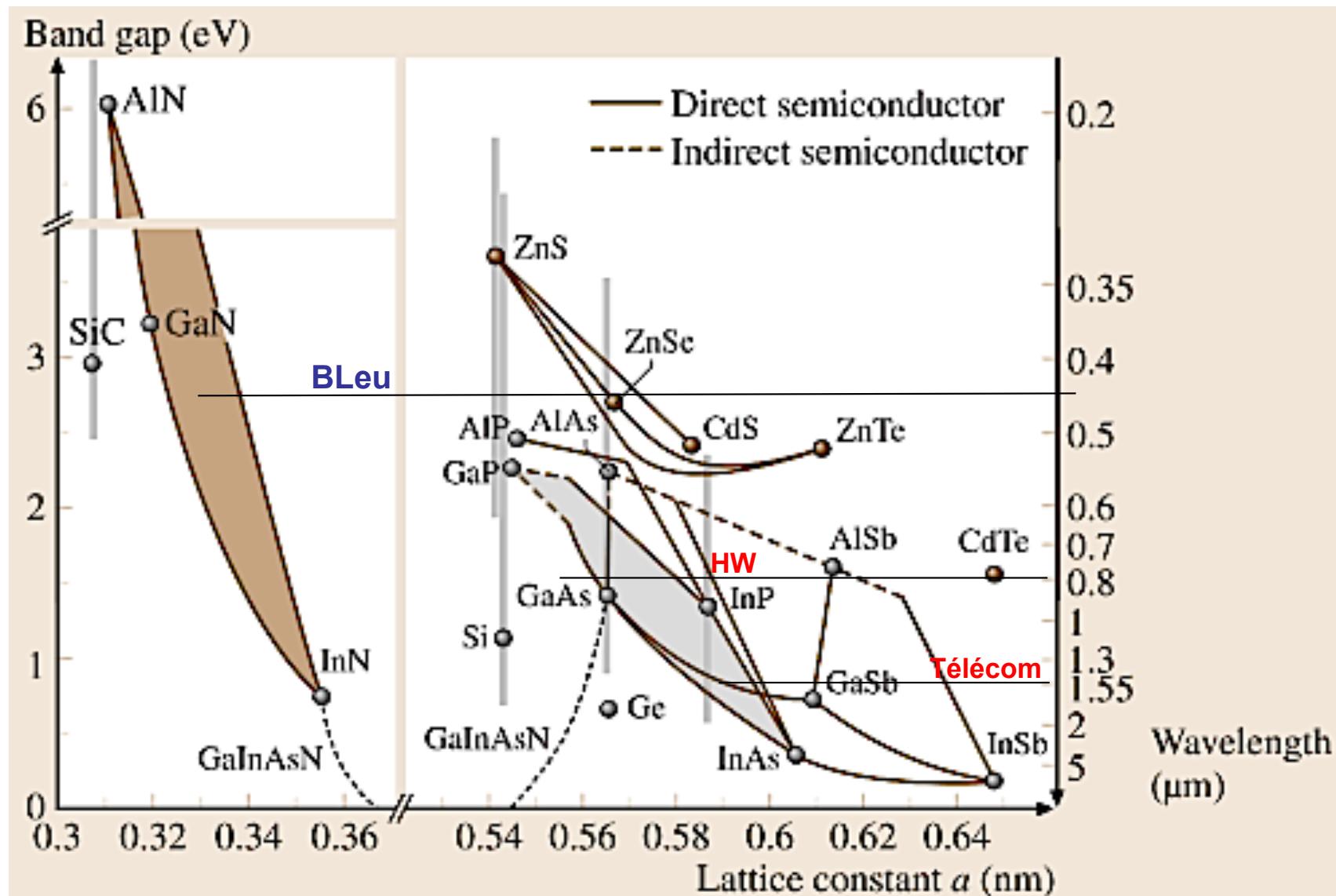
Laser CO<sub>2</sub>.

Laser YAG.

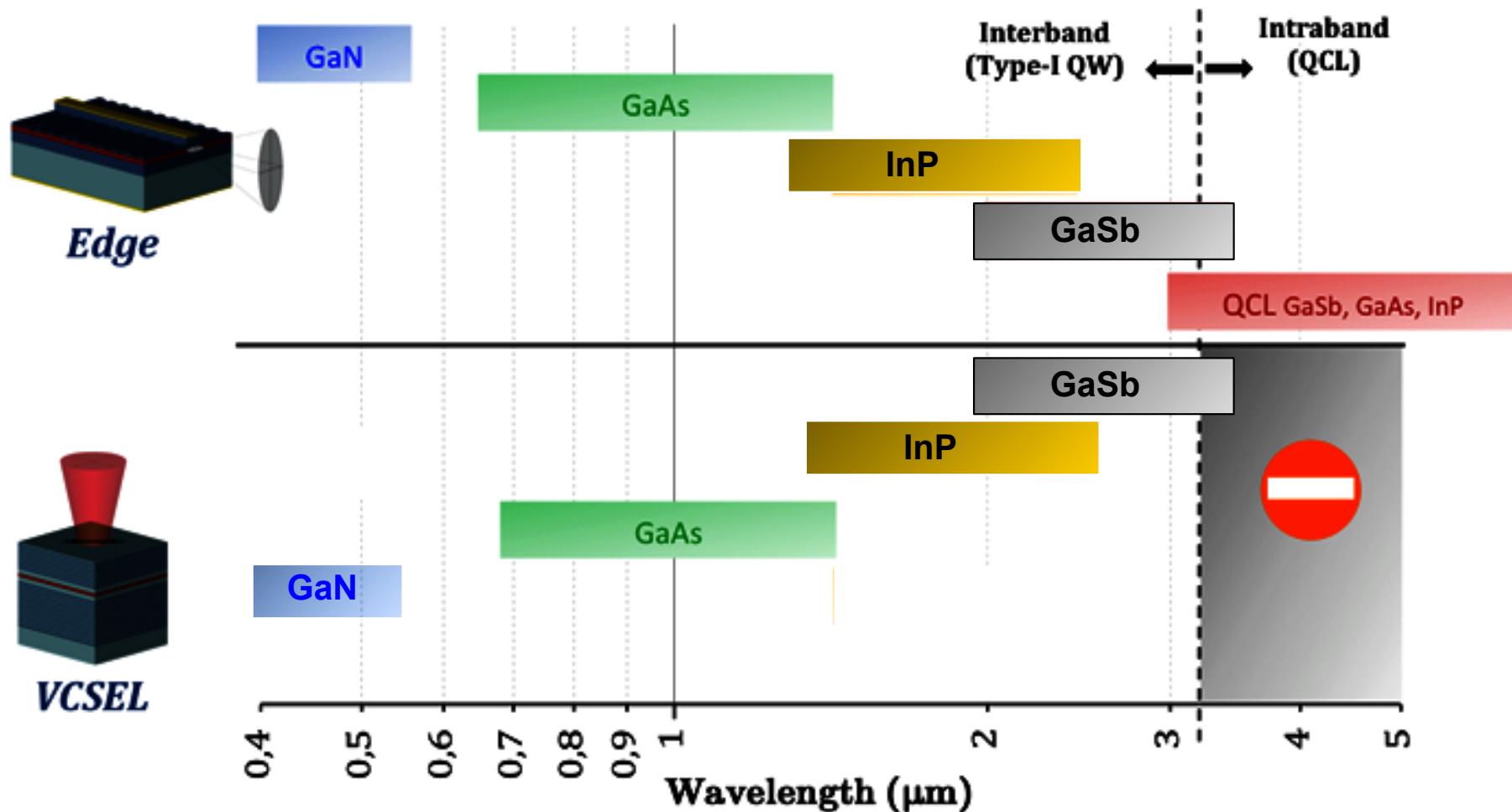
Fibre Laser.

Laser bleu pulsé pour le Cuivre.

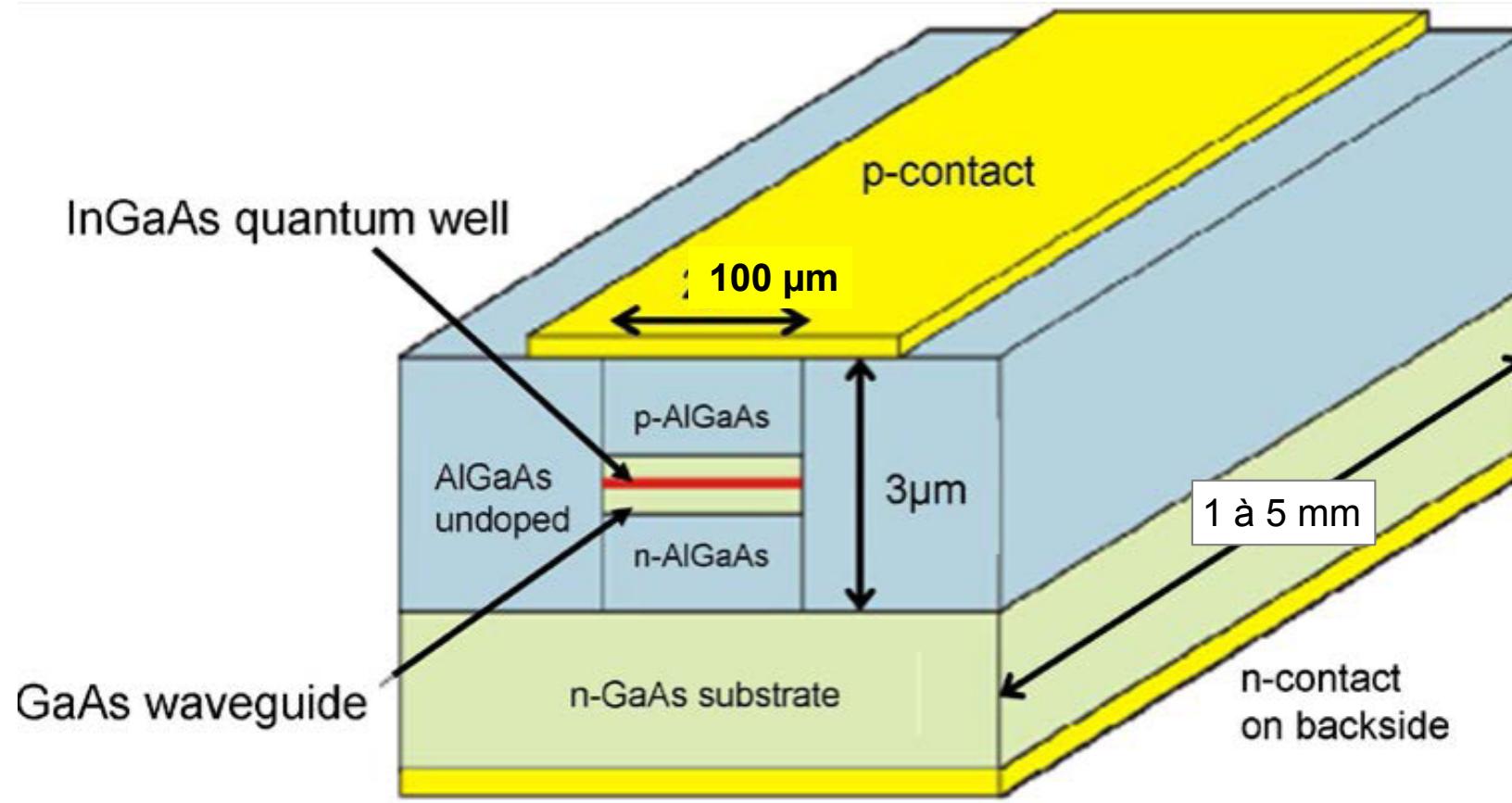
## Band gap des semi-conducteurs et des alliages III-V en fonction de la maille cristalline



## Les différentes filières de diodes lasers à émission par la tranche (Edge) et par la surface (VCSEL)



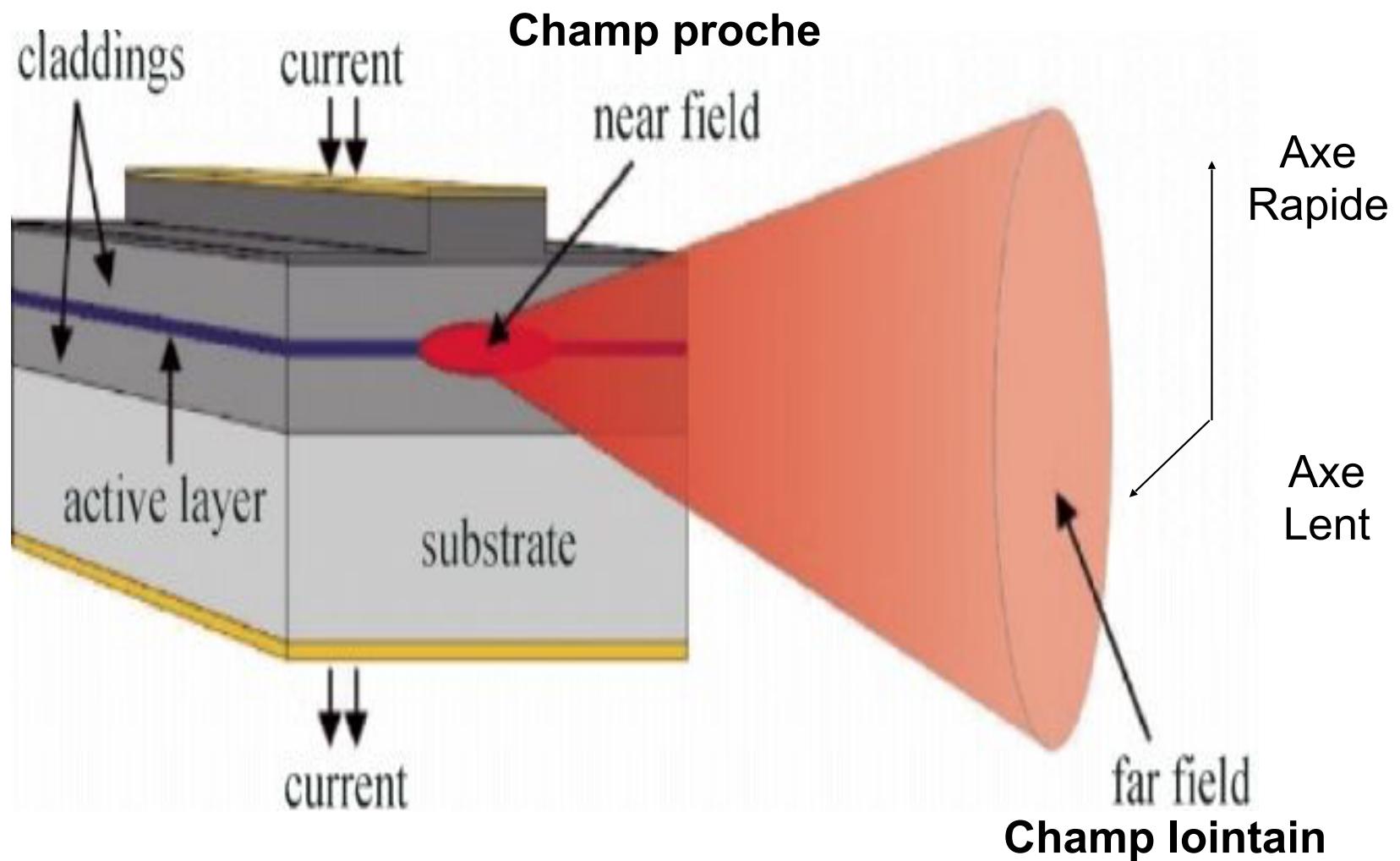
## Éléments typiques des diodes laser de puissance



## Champ proche et champ lointain d'une diode laser

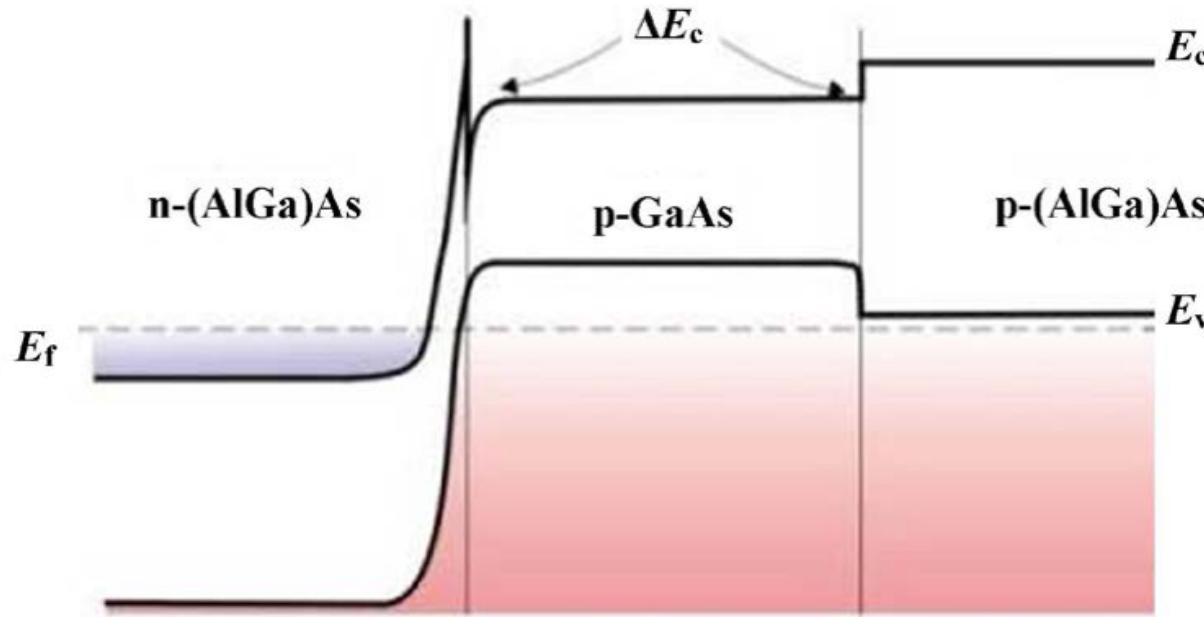
Structure de l'émission d'une diode laser

BPP = 8 à 20 mm x mrad



## Schéma du pompage électrique d'une diode laser

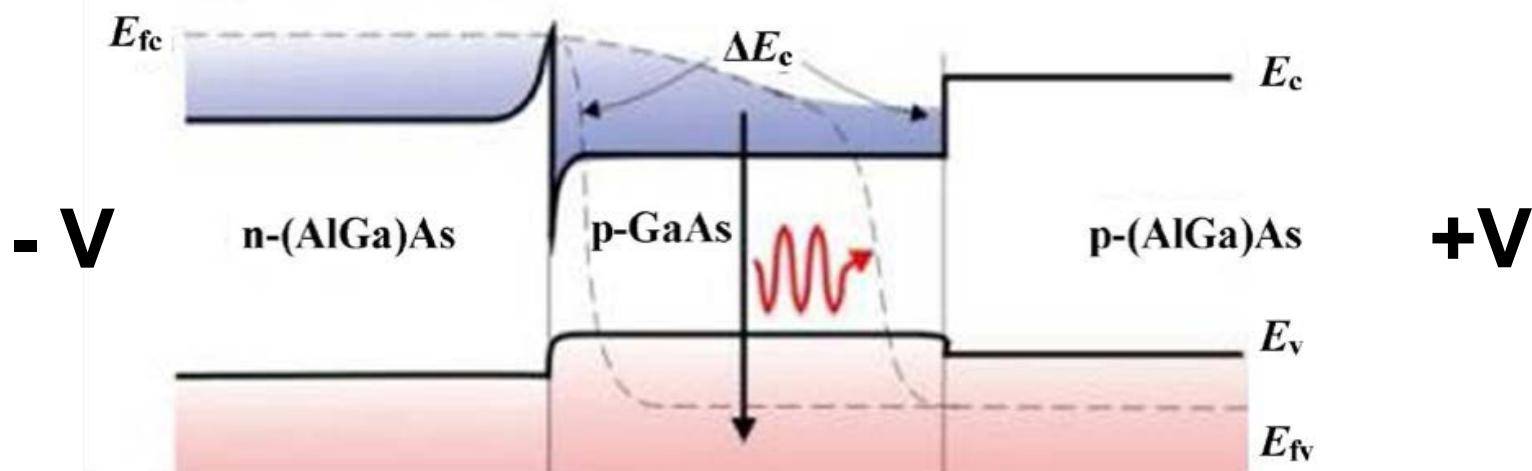
(a) Equilibrium bandstructure



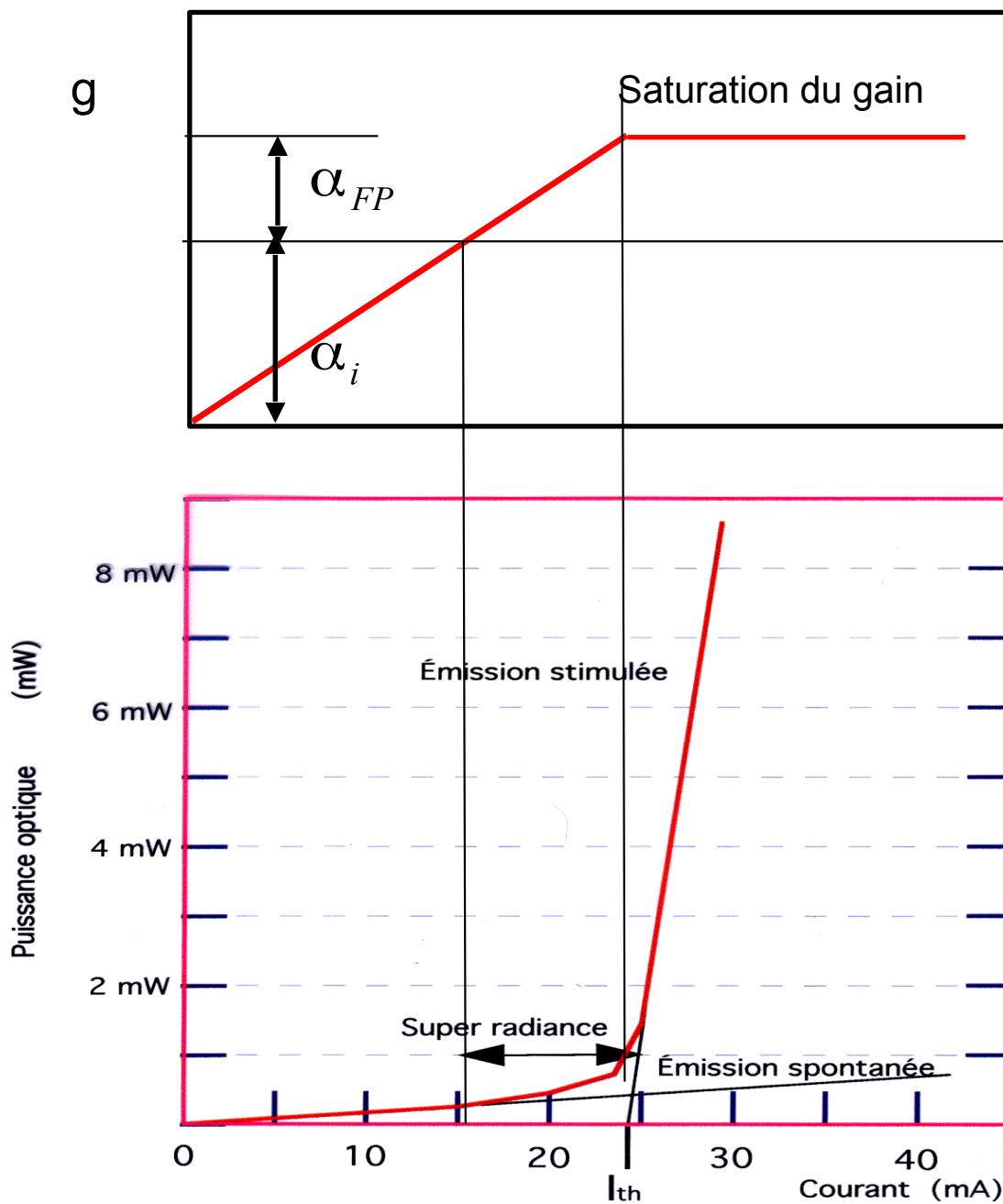
L'inversion de population est obtenue pour :

$$E_{fc} - E_{fv} > E_g$$

(b) Forward biased



## Gain et émission laser



## Structure d'une diode laser 980 nm à puits quantique

Waveguide  
 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$

InGaAs QW

500 nm

10 nm

500 nm

$e_2$   
 $e_1$

$E_g = 1.7 \text{ eV}$

$\hbar\omega = 1.28 \text{ eV}$

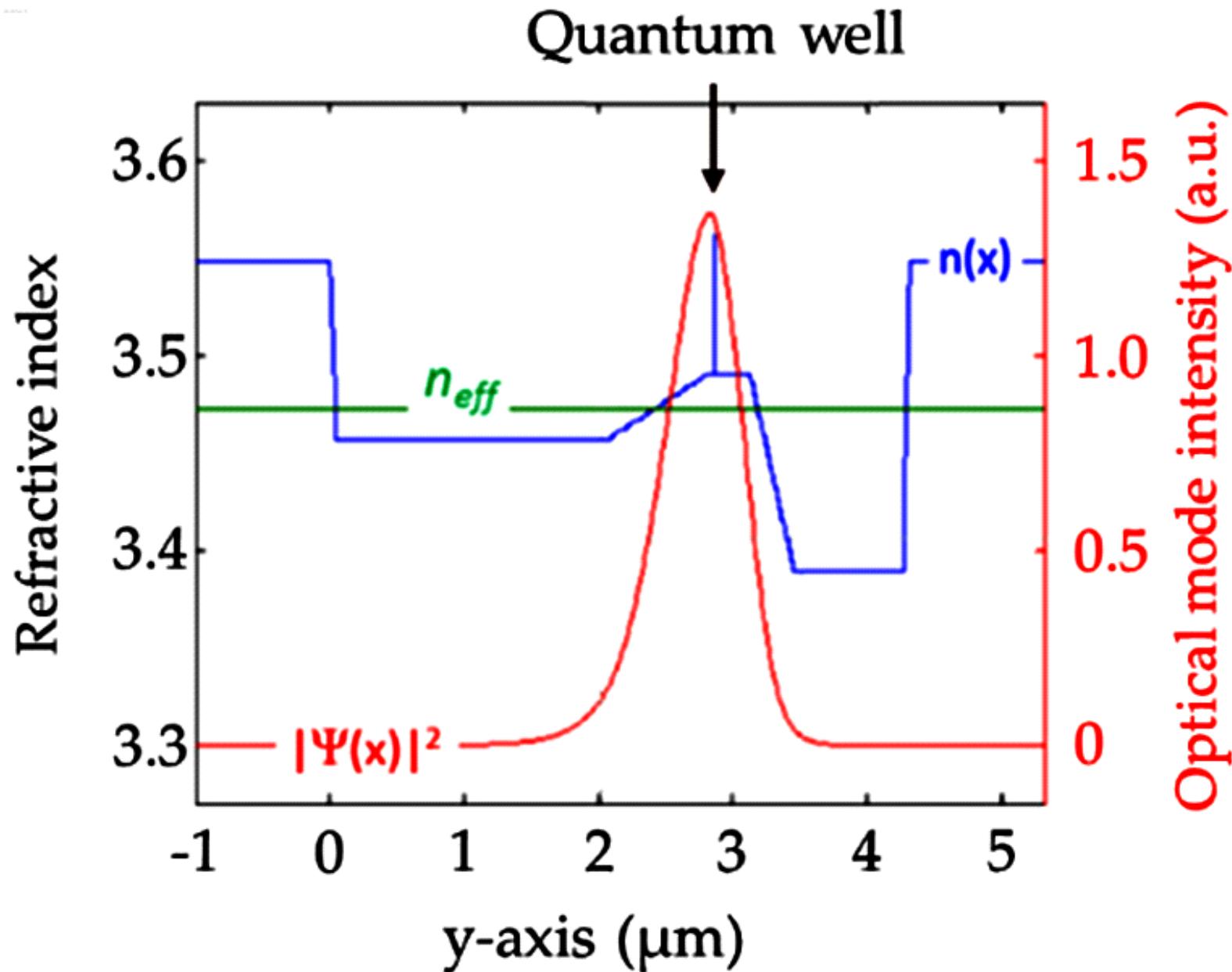
1.25 eV

1.7 eV

$hh_1$   
 $lh_1$

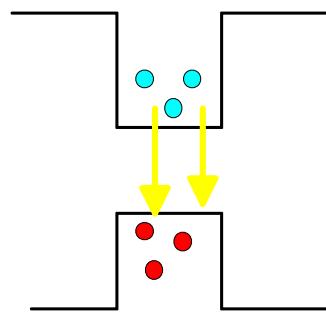
Le puits en GaInAs va confiner les électrons et les trous  
L'onde optique sera confinée par les barrières en GaAlAs

## Structure optique d'une diode laser de puissance

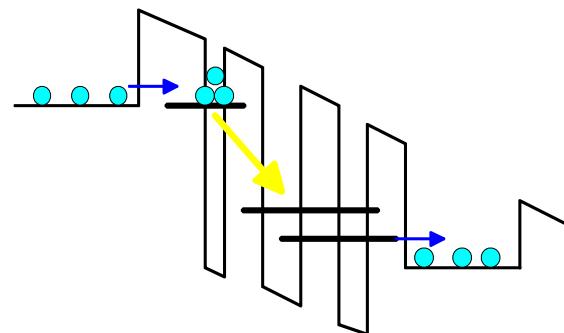


## Principe du laser à cascade quantique (QCL)

### Quantum Cascade Laser: A unipolar Semiconductor Laser



Laser interbande

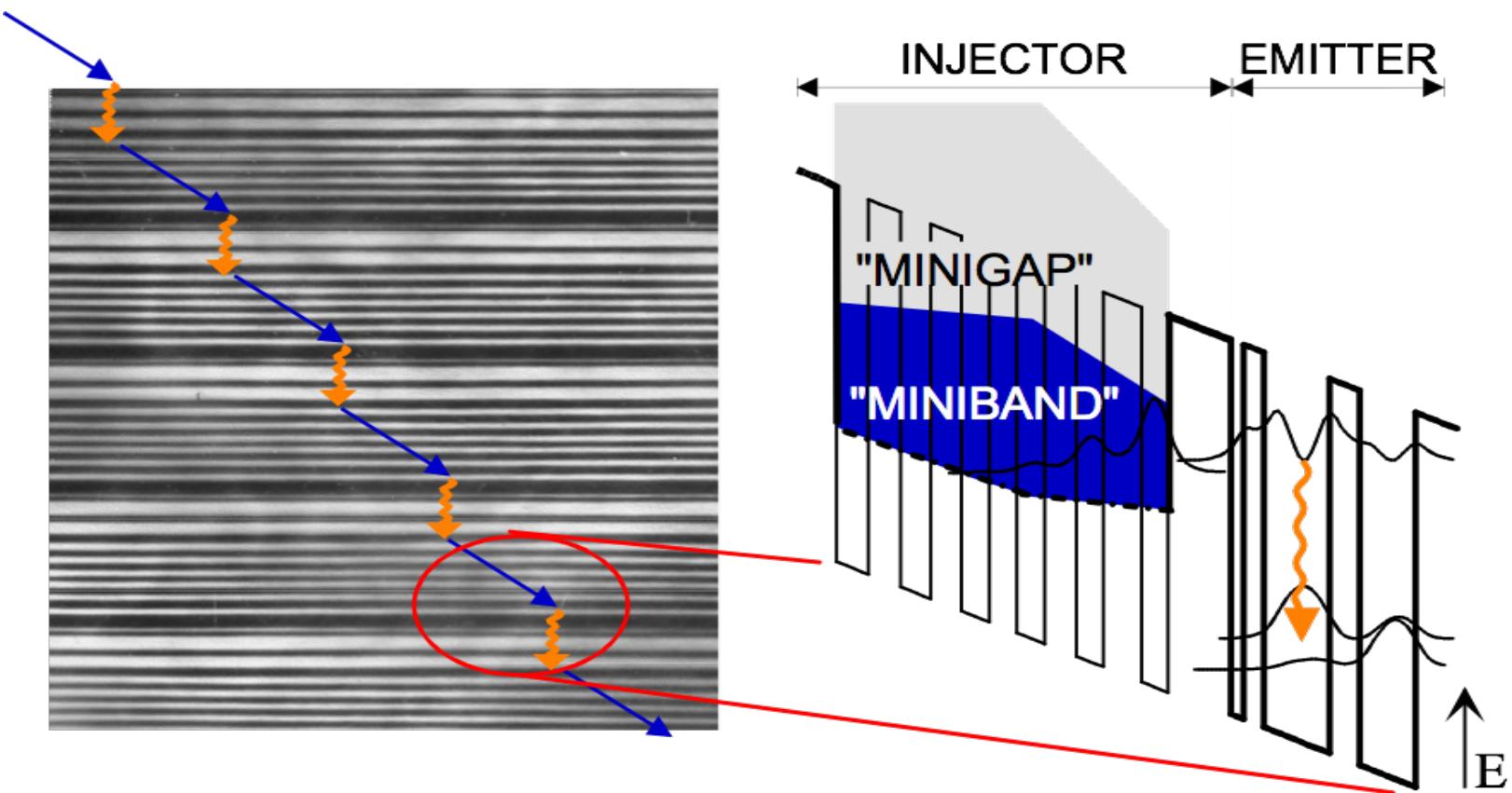


Laser QCL intrabande

No electron-valence band hole recombination

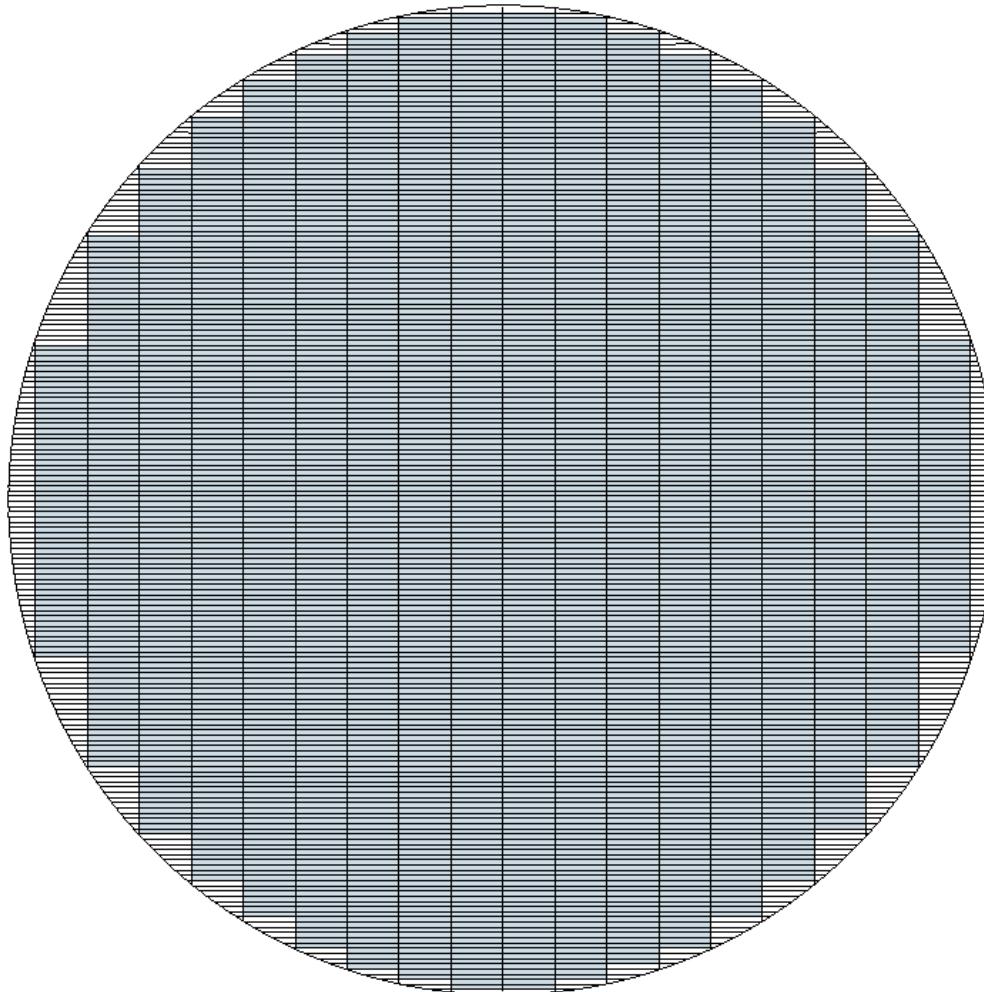
Les recombinaisons ont lieu entre niveaux quantiques de la bande de conduction.  
En conséquence les QCL sont adaptés aux grandes longueurs d'onde (2 à 50 µm)

## Structure d'un laser à cascade quantique (QCL)



Technologie AlSb-InAs  
Une spécialité de l'université de Montpellier

## Nombre de diodes laser sur un wafer de 3" (D≈76 mm)



Dans un wafer, il est possible d'extraire environ 2600 diode laser de  $4 \times 0,4 \text{ mm}^2$

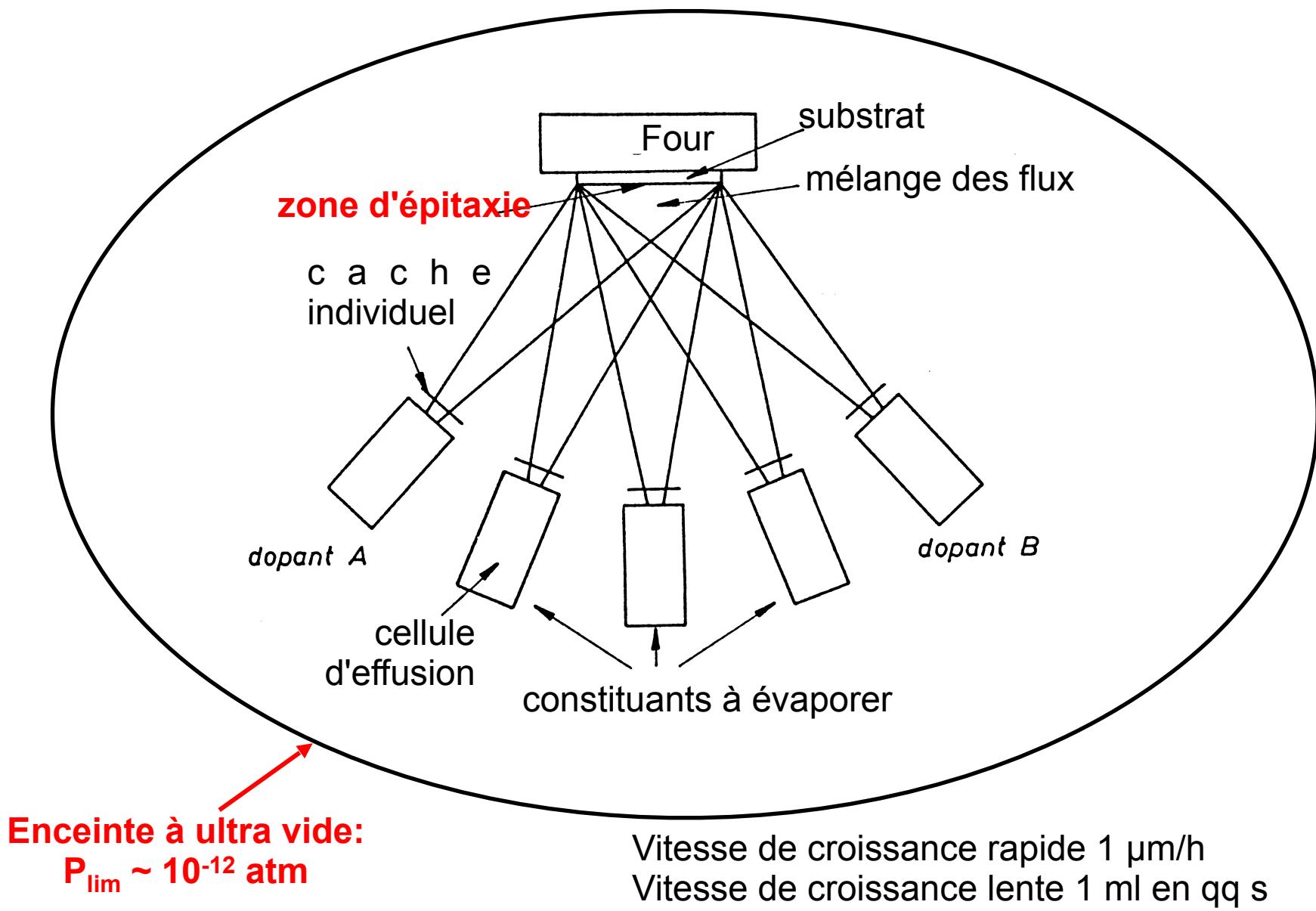
Pour une source fibrée de 1 kW, il faut Environ 125 diodes lasers.

$$\text{BPP} = 8 \text{ à } 20 \text{ mm} \times \text{mrad}$$

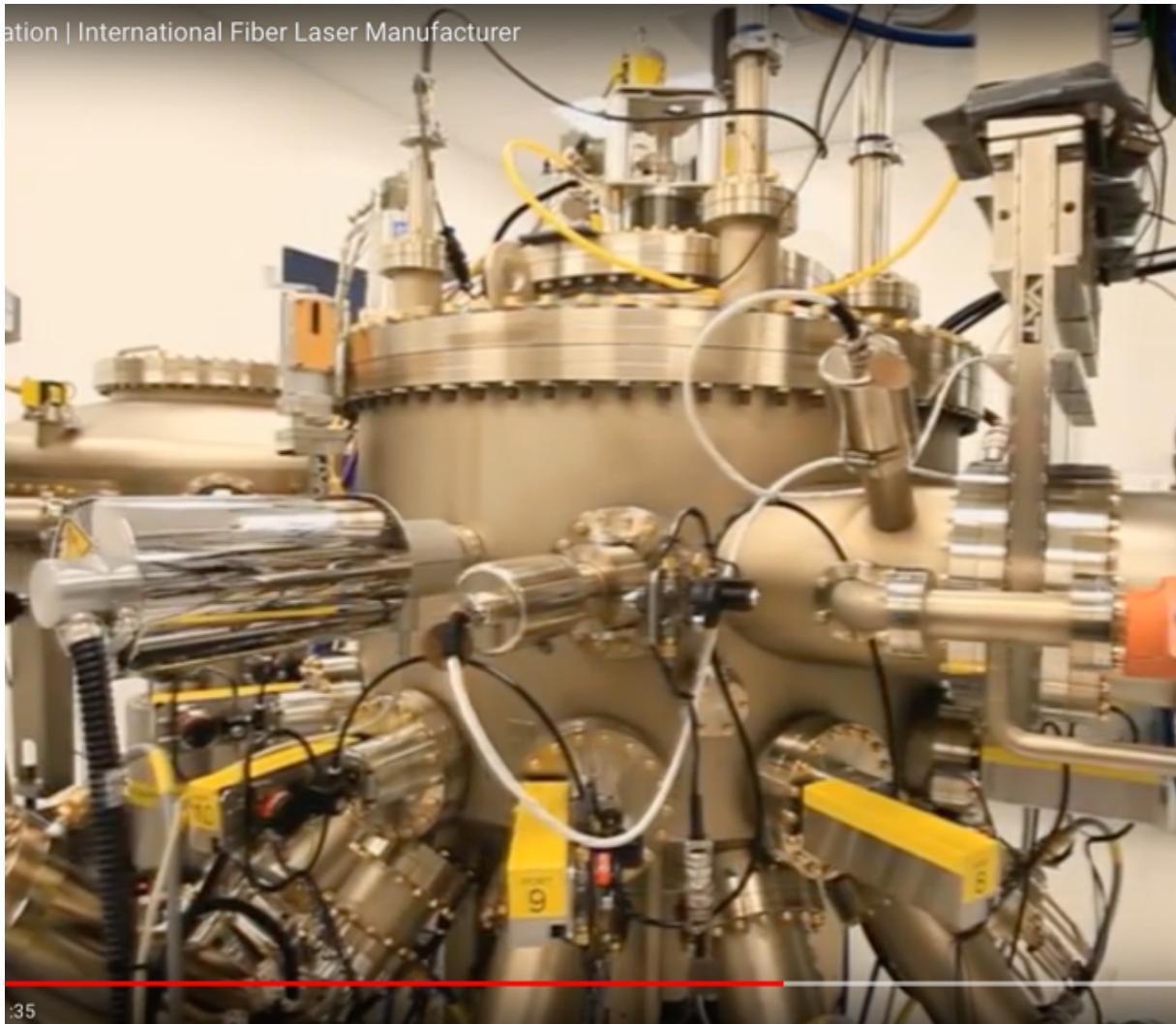
**Comment améliorer le BPP des DL et obtenir de la puissance ?**

**Réponse : le laser à fibre ou le laser à disque**

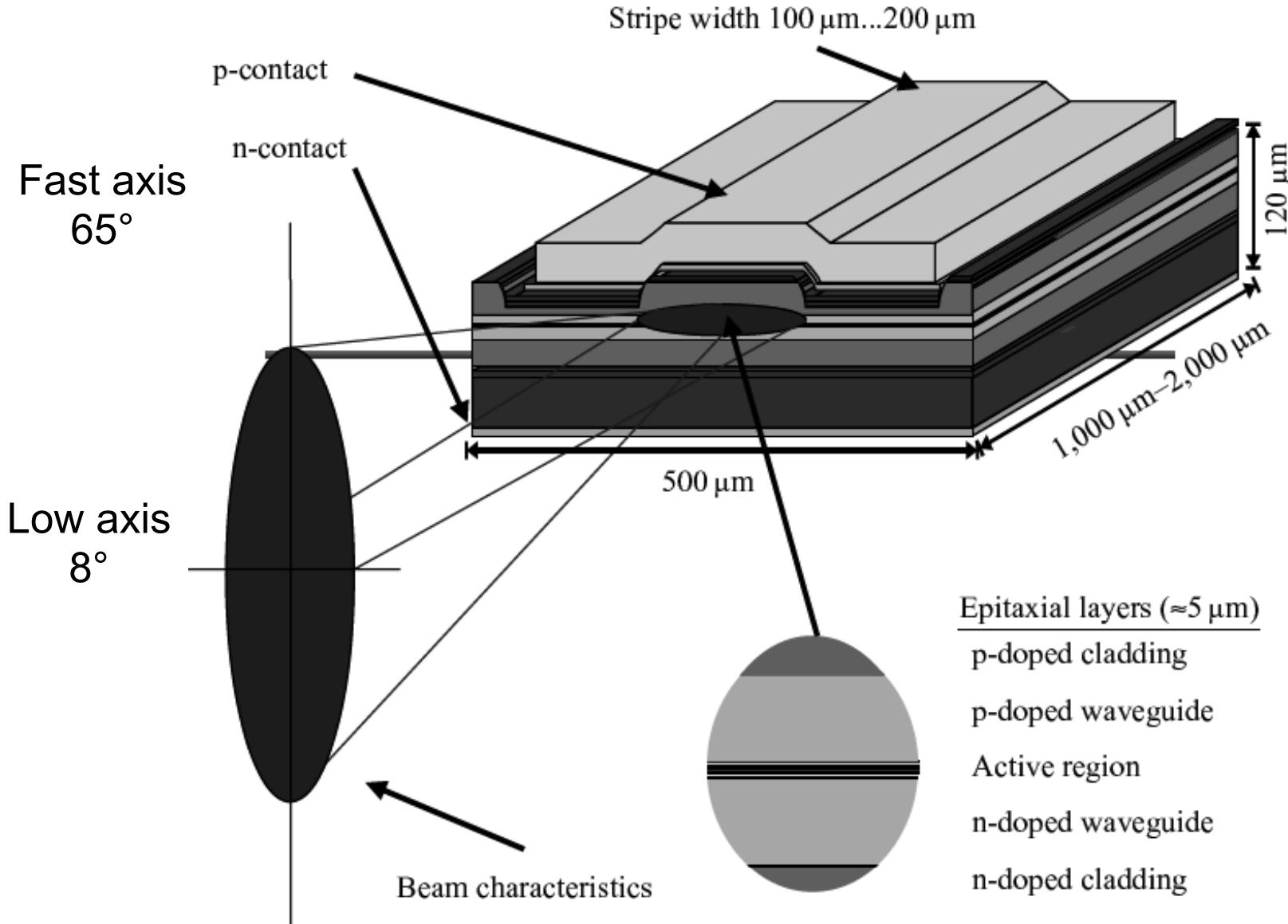
## Principe de la croissance par Jets Moléculaires (MBE)



## Banc de croissance par jets moléculaires



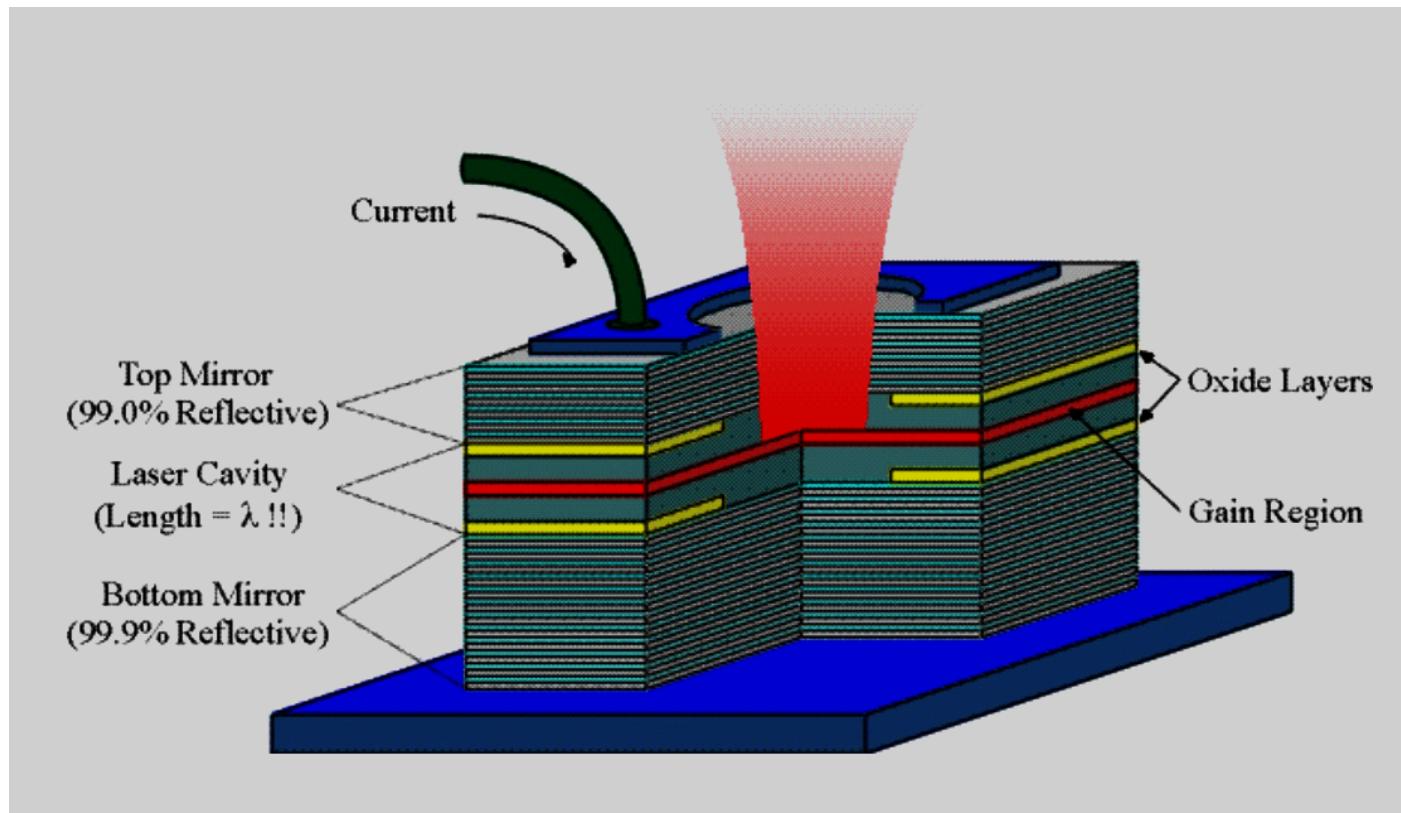
## Structure typique d'un laser semi-conducteur à émission par la tranche



## Structure d'un laser VCSEL (à émission par la surface)

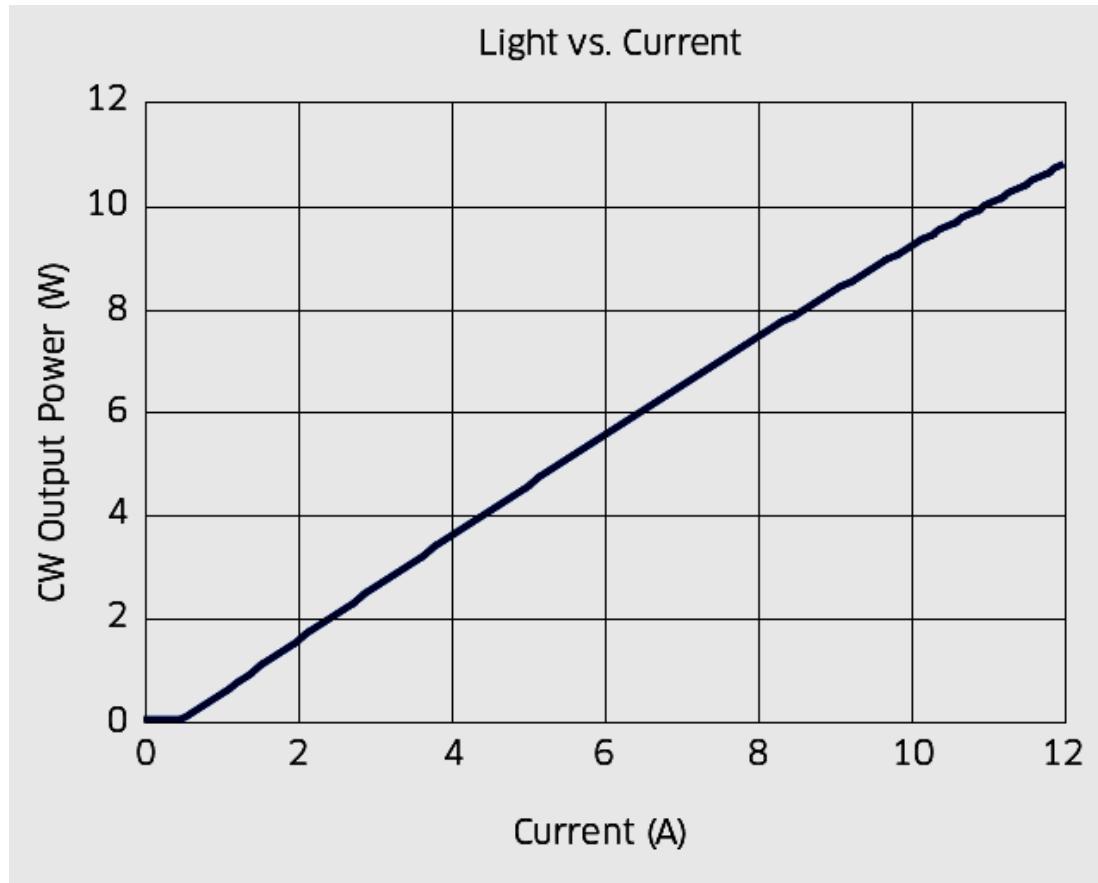
Pour n'avoir qu'un seul mode  $L = \lambda/2n$   
Ce qui impose des pouvoirs reflecteurs très élevés

$$g = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$$



Miroir de Bragg couches alternées, bas indice, haut indice, d'épaisseur  $\lambda/4n_i$

## Caractéristique puissance-courant d'un laser de 10 W



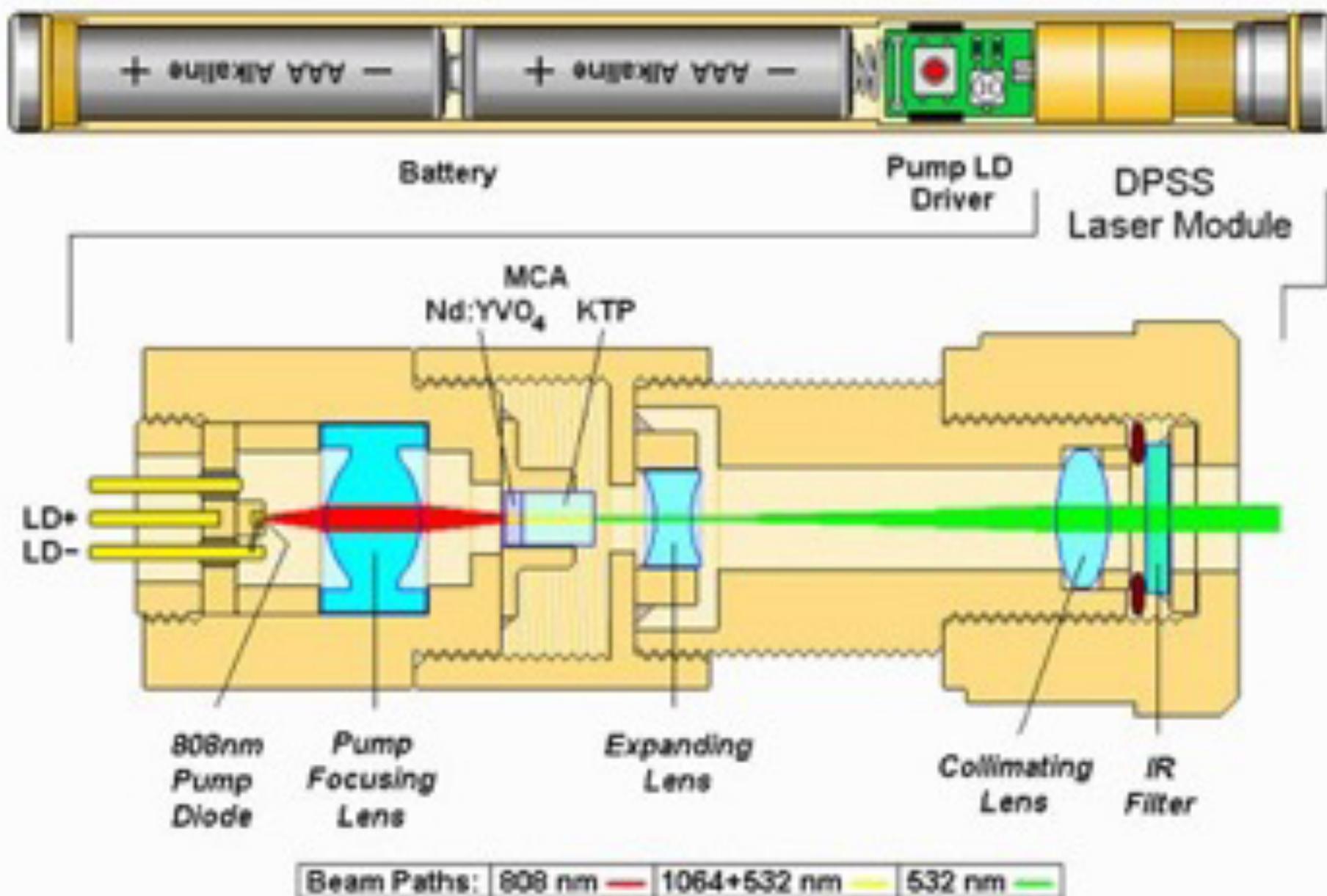
$V=1,5$  volts  
Rendement > 66 %

Puissance thermique  
à évacuer : 5 W

Pour une longueur de zone active de 4 mm et une largeur de 0.1 mm, la surface active est de  $0.4 \text{ mm}^2$ . Pour  $I=12\text{A}$  la densité de courant est de  $30 \text{ A / mm}^2$

Fil dans un transfo :  $2 \text{ A / mm}^2$ , fil dans un bâtiment 6 à  $10 \text{ A / mm}^2$

## Pointeur vert par doublage de fréquence



## Les diodes lasers comme source de pompage optique

Les diodes laser ne sont **pas adaptées à la découpe laser** :

- Faible puissance < 10 à 25 W
- Forte divergence du faisceau émis

Mais :

- Rendement électrique optique élevé  $\approx 60\% \text{ à } 70\%$
- Faible encombrement
- Fabrication industrielle
- Fiabilité
- Pompage électrique à basse tension
- **Bien adaptées au pompage des lasers à fibre et des lasers à disque**

Les diodes laser sont les éléments de base des lasers à fibre et des lasers à disque

## Découpe laser

Principe de la découpe laser.

Propriétés des matériaux.

Propriétés optiques des faisceaux laser (BPP).

Les diodes laser.

**Les lasers adaptés à la découpe.**

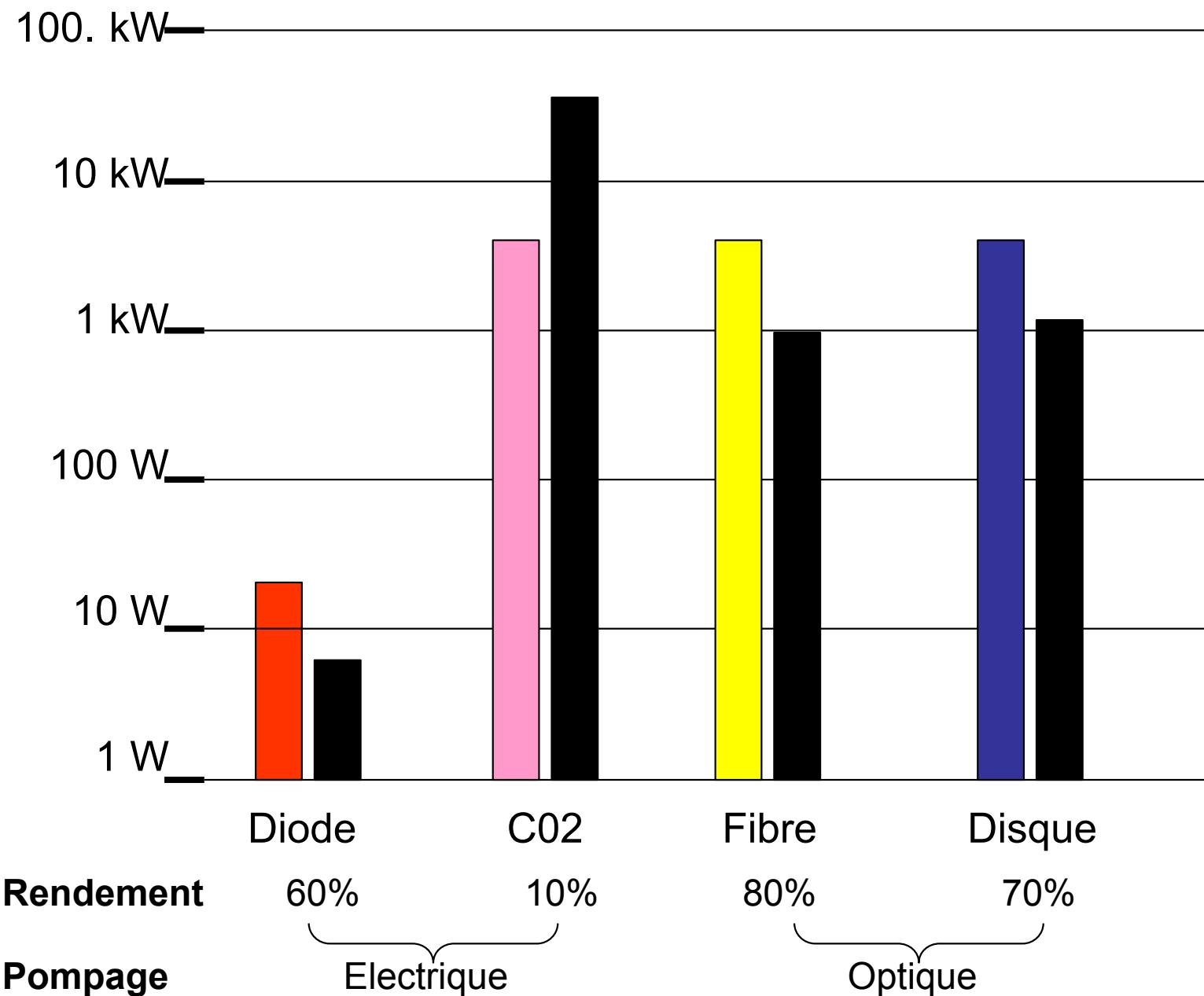
Laser CO<sub>2</sub>.

Laser YAG.

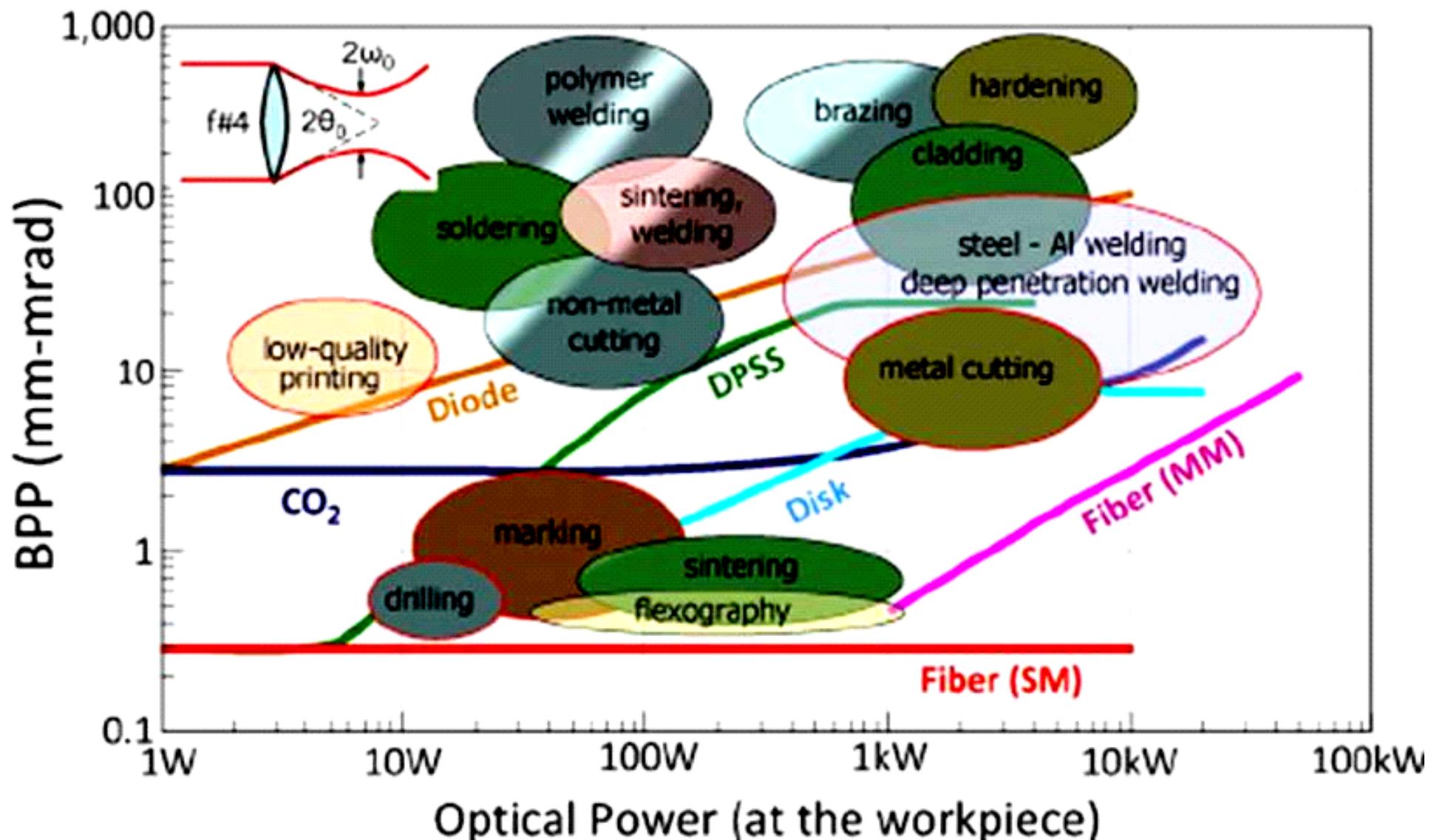
Fibre Laser.

**Laser bleu pulsé pour le Cuivre.**

## Rendement et puissance des lasers



## Beam Parameter Product en fonction de la puissance pour des applications spécifiques



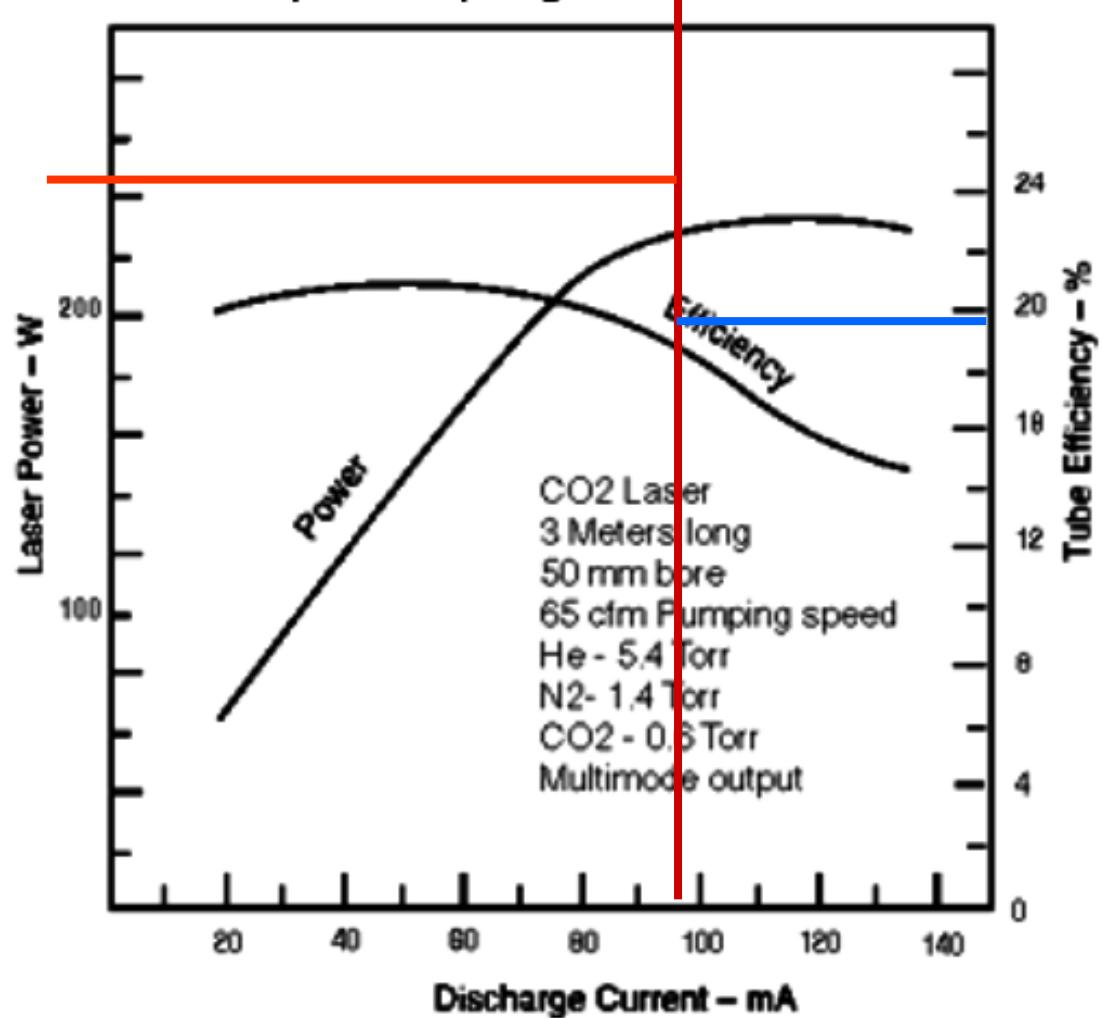
Exemple de tube laser CO<sub>2</sub> intégré à une machine de découpage



## Exemple de performances d'un laser CO<sub>2</sub>

**Fig 6. Output power and efficiency**

of typical CO<sub>2</sub> lasers. A dielectric-coated salt with a transmission coefficient of 35 per cent was used as the output coupling mirror



### Paramètres typiques

$$I = 100 \text{ mA}$$

$$V \approx 12 \text{ kV}$$

$$P_t = 1200 \text{ W}$$

$$P_i = 230 \text{ W}$$

$$R_d = 19,2 \%$$

Pour l'amorçage la tension est beaucoup plus importante. Lorsque le plasma est créé, le ballast ( $R$ ) limite le courant.

# Principe du laser à disque de Trumpf



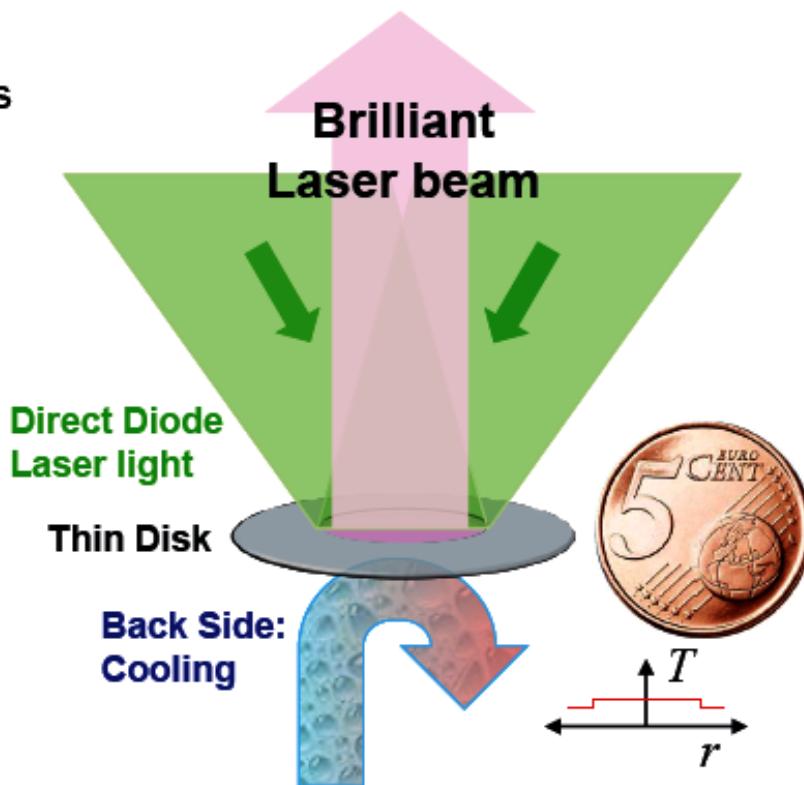
## Disk laser principle

### Basics:

- Diameter of pumped area  $\gg$  disk thickness
- Low power densities on active material  
 $I \propto P/D^2$
- Low brilliance requirements on diodes
- Efficient cooling from backside for flat temperature profiles

### Leading to:

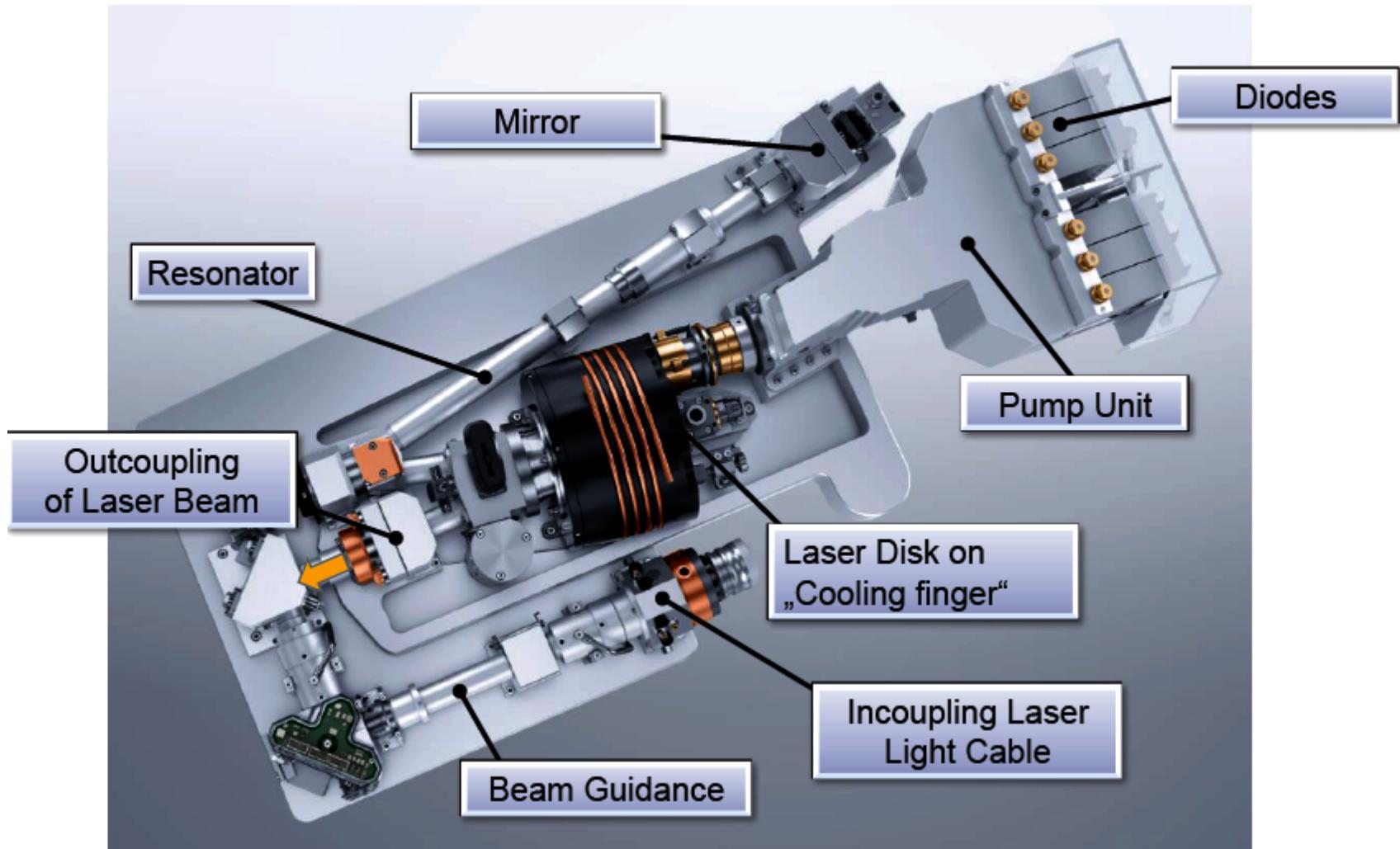
- Highest power levels for cw (and short / ultrashort pulse lasers)
- Excellent beam quality
- Insensitivity to back reflections
- Reliability: Power density levels have been proven to be robust and reliable over years without degradation



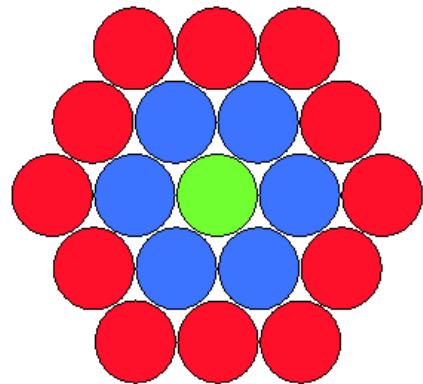
Disque : YAG

## 5 kW disk laser module (Trumpf) BPP de 4 mm.mrad

**Compactness and simplicity at high brightness**



## Couplage des modules laser par fusion de 7 ou 19 fibres multimodes

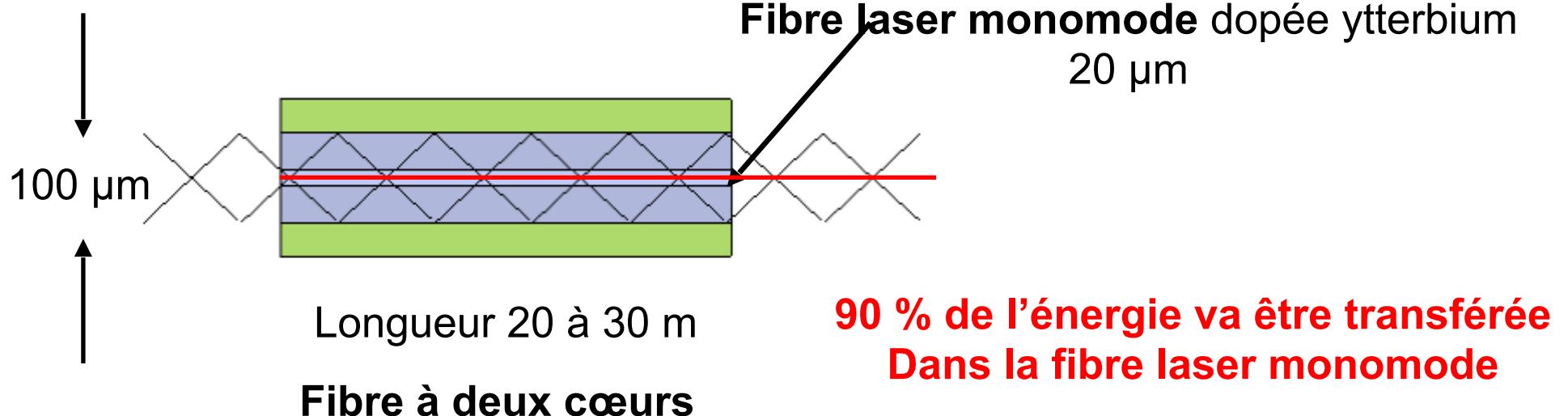


Après fusion on obtiens une fibre multimode de 100 µm

Cette fibre est soudée à un miroir de Bragg.

Puis, à une fibre laser composée de **deux cœurs**.

La cavité laser se termine par un miroir de Bragg.



Comment coupler des diodes lasers à des systèmes  
à fibre avec un excellent BPP.

Ce sont des technologies récentes développées par des chercheurs.

## Laser à Fibre

Le leader est **IPG Photonics** fondé par **Valentin P. Gapontsev**. C'est un chercheur qui a réalisé dans les années 1990 un laser à fibre d'une puissance de l'ordre de 1 W. En 2014, IPG a fait la démonstration d'un système de 100 kW !

En Chine, le chercheur **Yan Dapeng** est à l'origine de la création en 2015 de **Wuhan Raycus Fiber Laser Technologies co.**

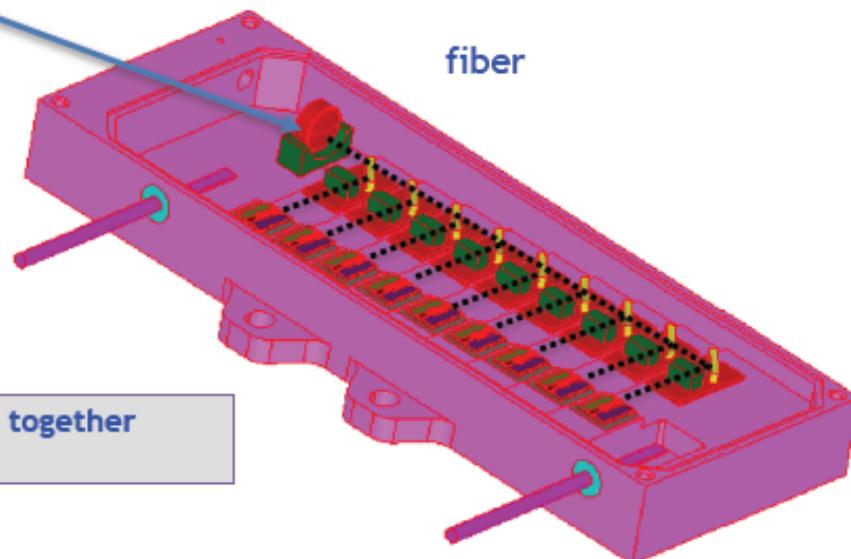
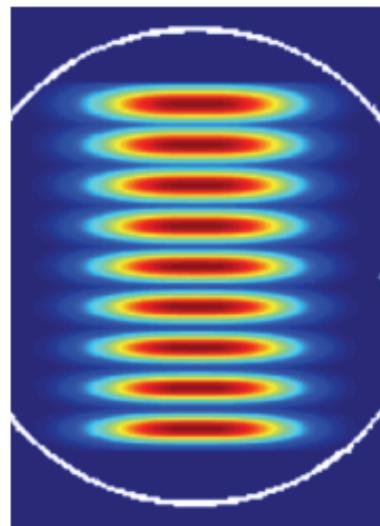
Raycus a fait la démonstration d'une source fibrée de 20 kW en 2018 à un prix de 40% moins cher que les concurrents extérieurs à la Chine.

## Laser à disque

Principe publié par (**Adolf Giesen**) et développé par Trumpf un des leaders des découpeuses laser pour métaux

## Module de pompe à diodes lasers pour laser à fibre

High Power: 100W using beam stacking



Individual beams are stacked together  
-> degradation of BPP

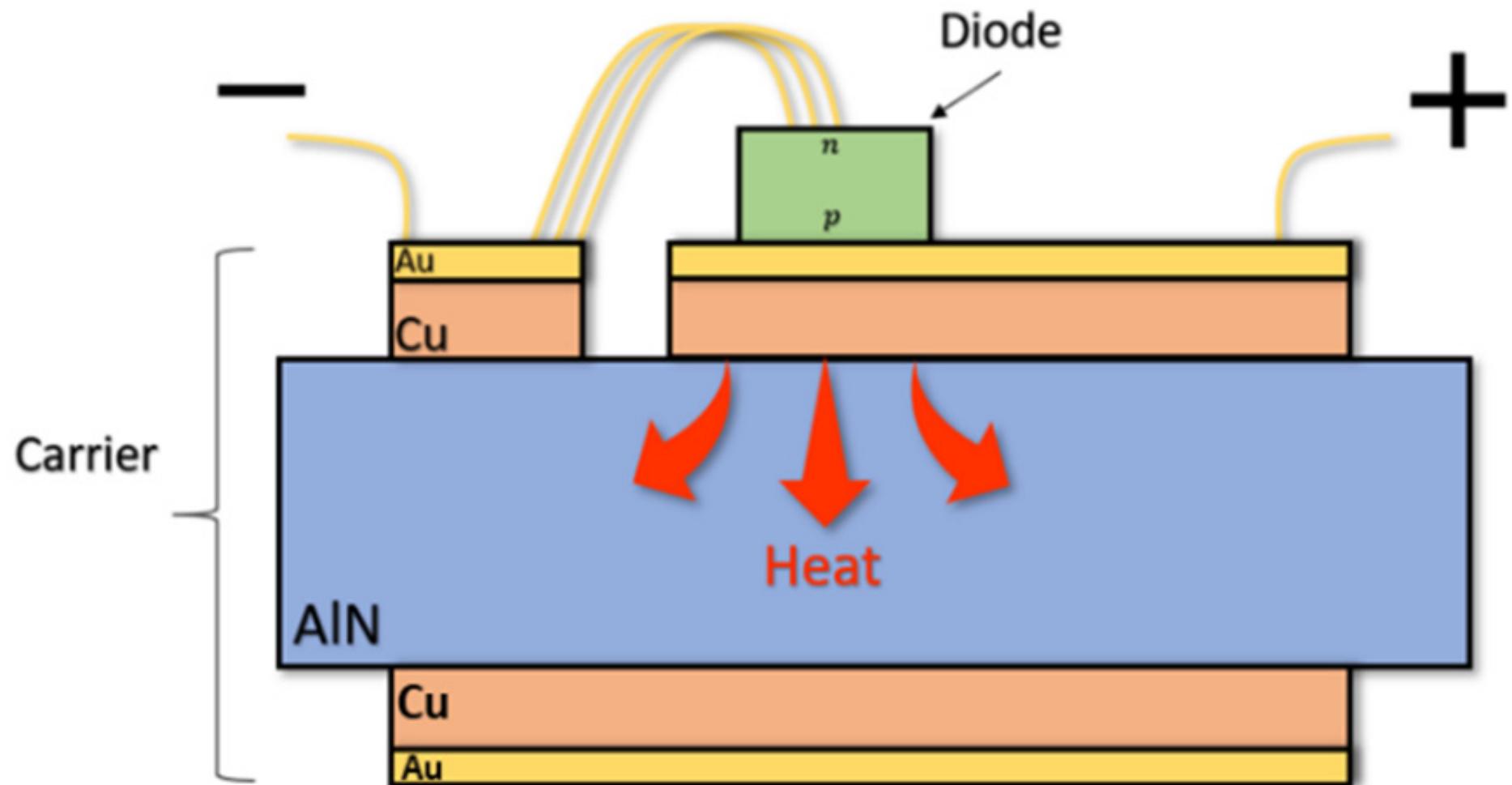
$$BPP = w \times \vartheta \text{ [mm mrad]}$$

### Beam Coupling:

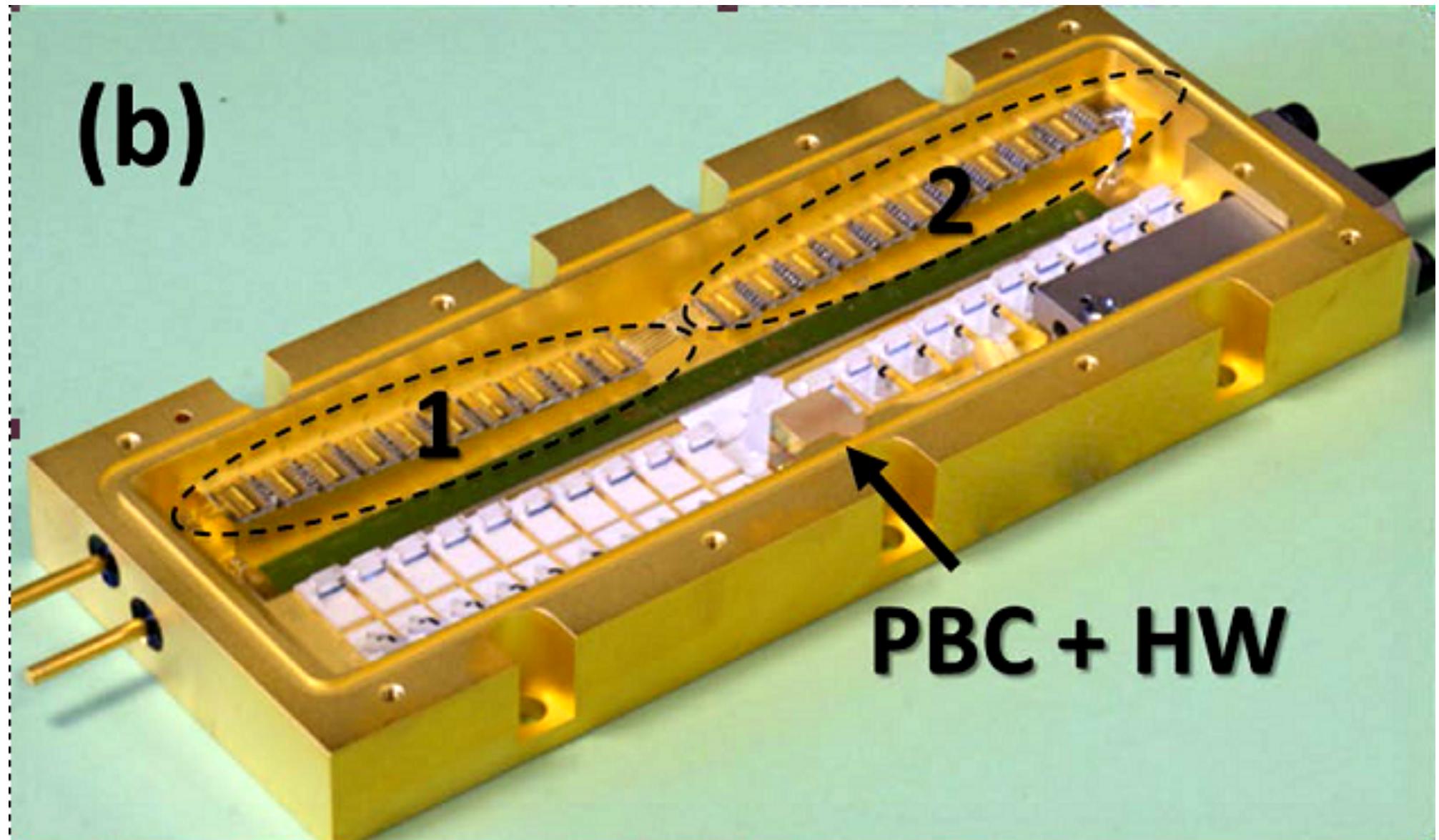
- each beam (from each diode) is focused by using lenses
- Fast Axis Collimator, FAC
- Slow Axis Collimator, SAC
- Beams are routed (usually by mirror) and stacked (usually by mechanical offset)  
-> *leads multi beam stacked in the output lens*
- focusing lens is collecting the beam stacking into the numerical aperture of the fiber

$$BPP = \sum_{i=1}^{i=9} BPP_i$$

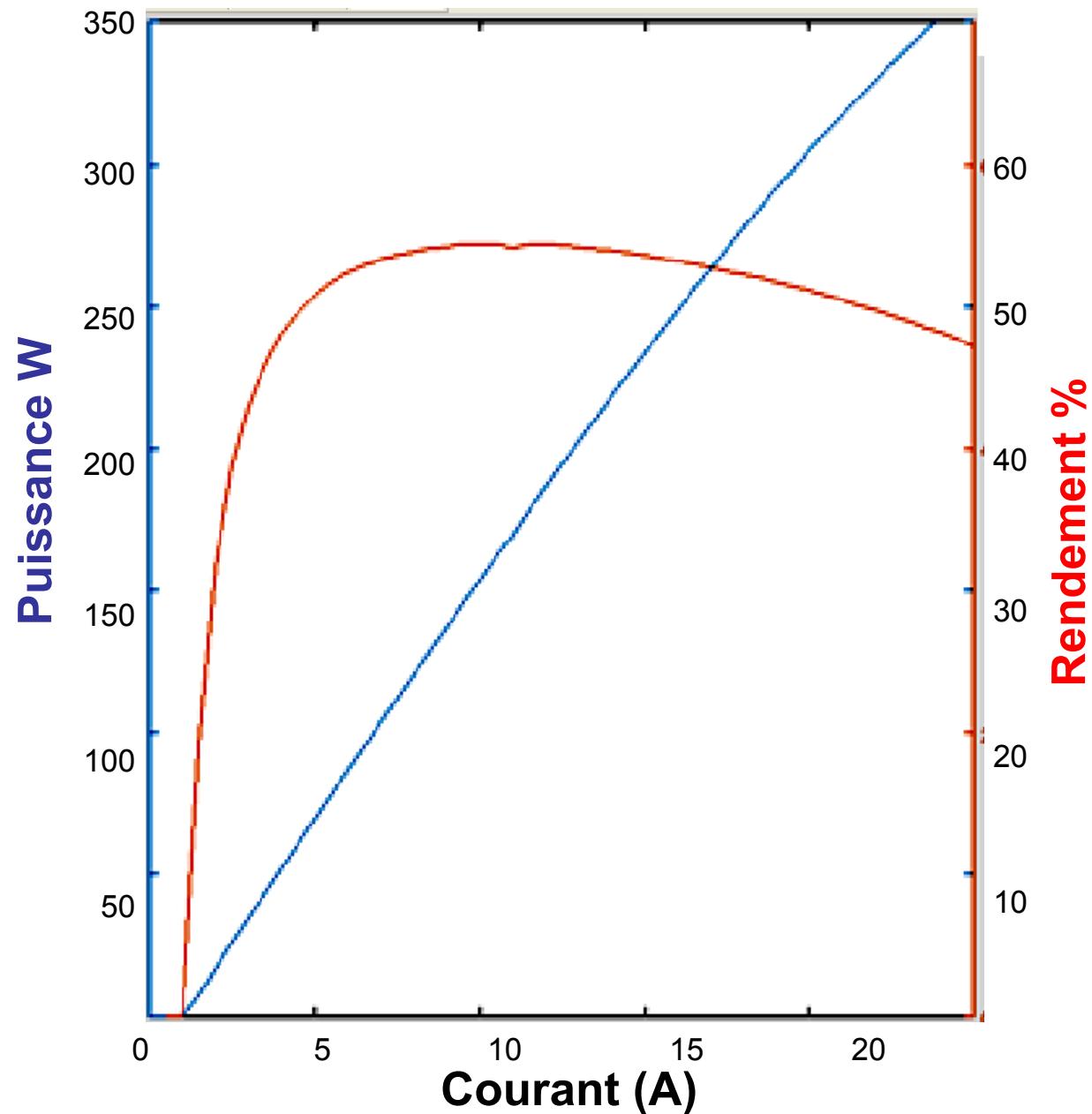
## Diode Laser de grande puissance émettant à 976 nm



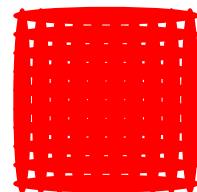
Module de 20 diodes laser de haute puissance : 350 W @ 976 nm (Prima Power)



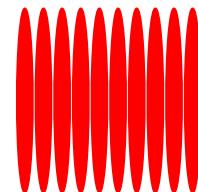
20 DLHP 350 W 976 nm (Prima power)



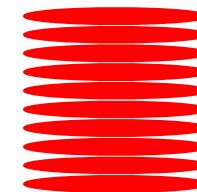
## Technique pour doubler la puissance : le multiplexage par polarisation



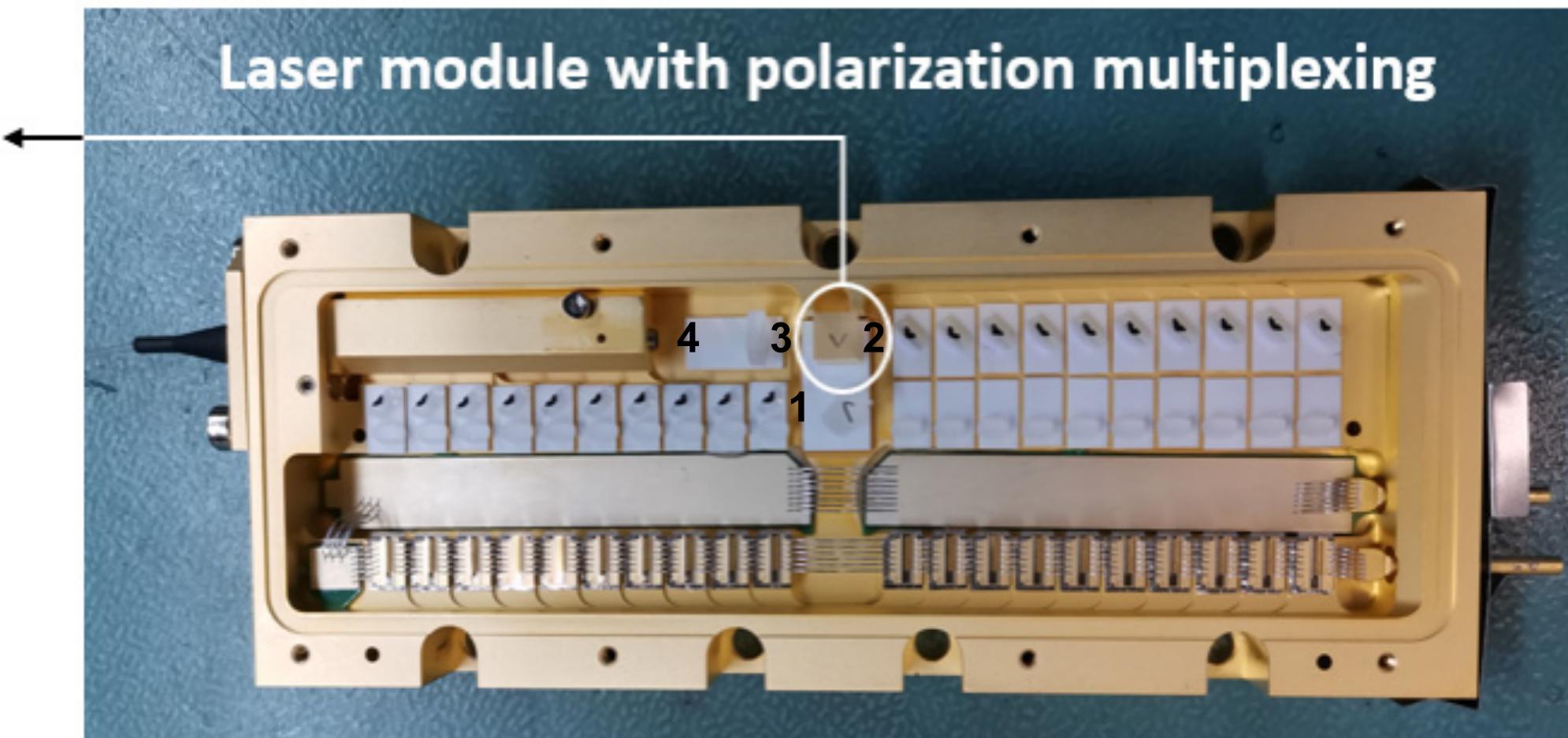
Somme des 2 faisceaux  
au point 4



Images au point 3 des faisceaux  
lasers issues du points 1 et  
rotation par le cube polariseur



Images des faisceaux lasers  
aux points 1 et 2



Prima Power utilise ces sources lasers avec une puissance en sortie de fibre de 1 kW en utilisant 5 sources multi-lasers

Merci à Claudio Coriasso et à son équipe qui m'ont transmis les dernières informations concernant les modules de 350 W.

Convergent Photonics - Prima Electro, Via Schiaparelli 12, 10148 Torino (Italy)

