

---

# “Misure Ottiche”

Corsi di Laurea Magistrale in Ingegneria  
Elettronica e delle Telecom. e Fisica

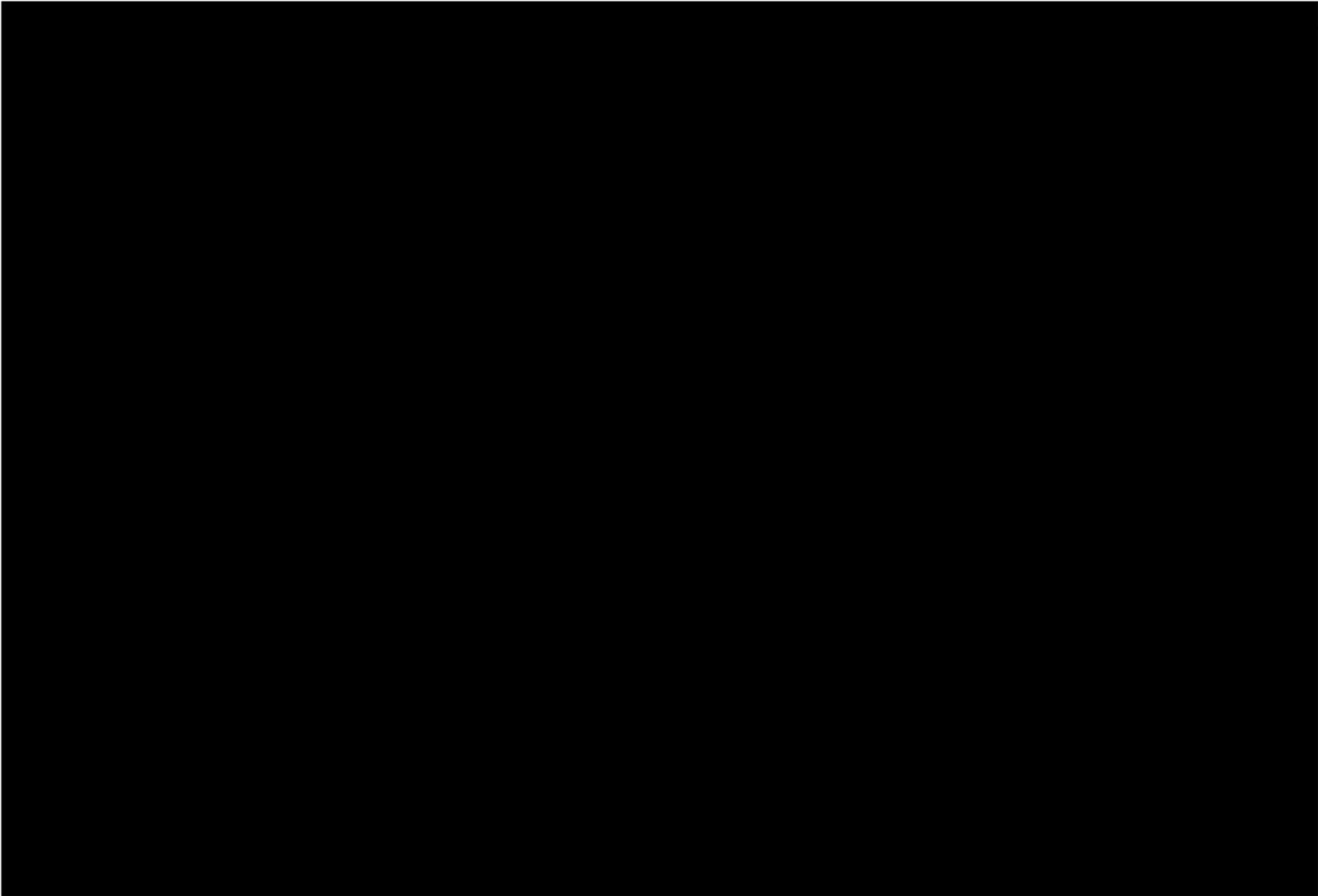


## **Sorgenti Laser: Principi di Funzionamento**

Cesare Svelto  
Politecnico di Milano

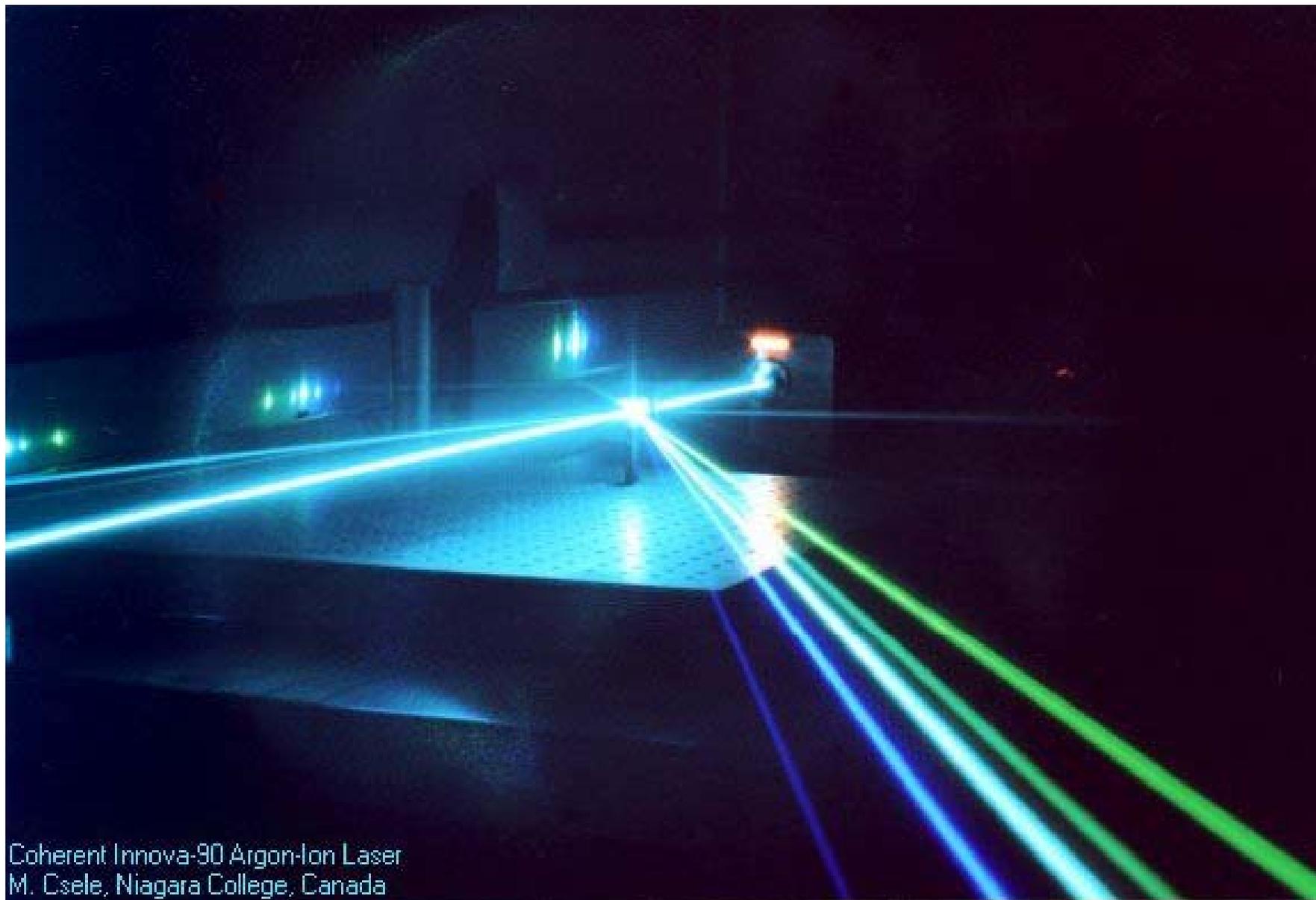


— Prima era il buio...



---

... e poi fu la **LUCE!**



Coherent Innova-90 Argon-Ion Laser  
M. Csele, Niagara College, Canada

---

# Sommario (1)

---

- Cenni storici, spettro e.m., e dualismo della luce
- Emissione stimolata, amplificazione ottica, risonatori, azione laser
- Meccanismi di pompa e inversione di popolazione
- Materiali attivi e tipi di laser
- Laser a gas (He-Ne)
- Laser a stato solido con pompa ottica (Nd:YAG)
  - Laser *side-pumped* e laser *end-pumped*
- Laser a semiconduttore
  - Laser a diodo per puntamento, lettura ottica, stampanti, ...
  - Laser a singolo modo per comunicazioni ottiche (DFB, DBR, VCSEL)
  - Laser a singolo modo (*narrow linewidth*) per misure di precisione: laser *extended cavity* (ECLD), laser a erbio in fibra e di tipo *bulk*

---

## Sommario (2)

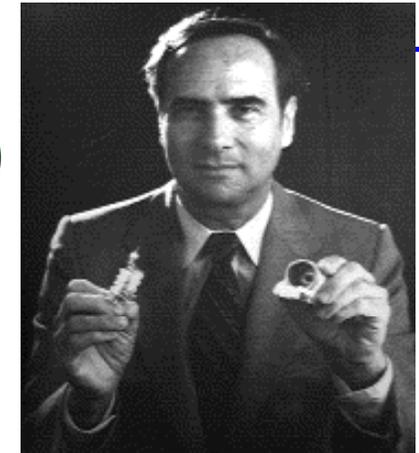
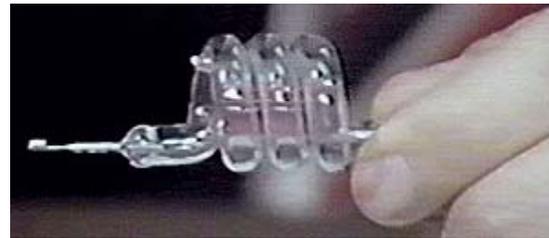
---

- Laser impulsati (*Q-switching* e *mode locking*)
- Esempi di laser comuni, caratteristiche, applicazioni
- Propagazione e misura spaziale della radiazione laser
  - Dimensione di macchia (*spot size*)
  - Divergenza
- Proprietà dei fasci laser
  - Caratteristiche spaziali e spettrali
  - Rumore di ampiezza e di frequenza
- Definizione e misura della potenza ottica
- Rivelazione diretta e rivelazione coerente
- Applicazioni e sicurezza laser
- Riferimenti bibliografici

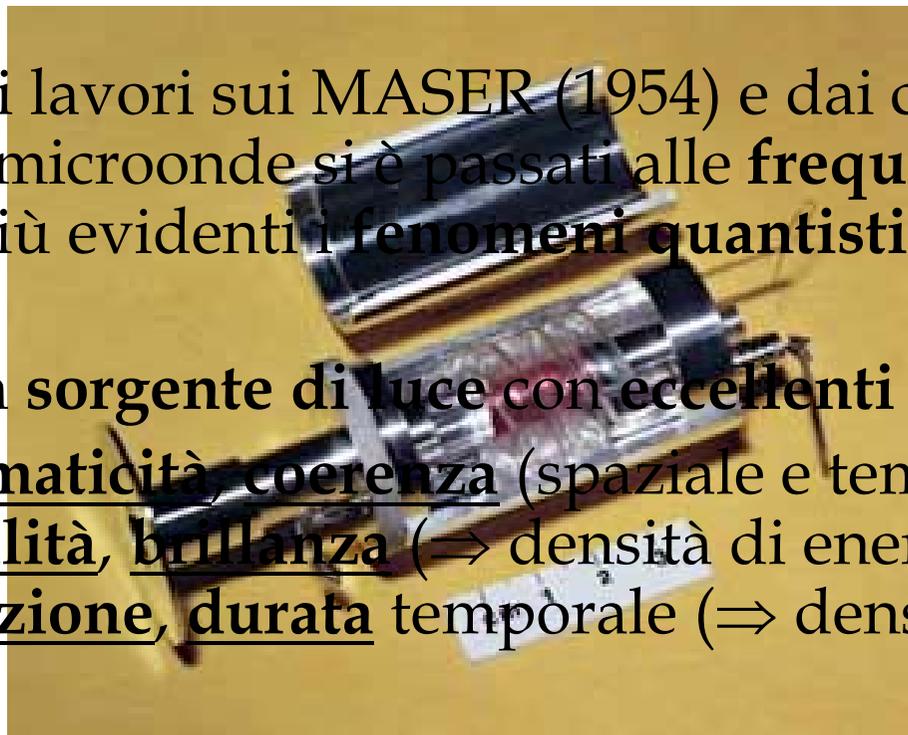
## Cenni storici e caratteristiche

- **LASER** inventato nel **1960** (T. Maiman)

**L**ight **A**mplification  
**b**y **S**timulated  
**E**mission of **R**adiation



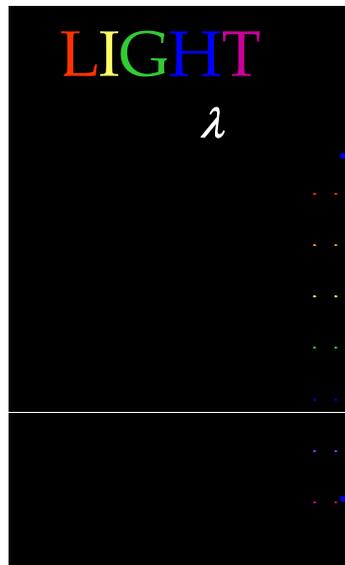
- Partendo dai lavori sui MASER (1954) e dai corrispondenti oscillatori a microonde si è passati alle **frequenze ottiche** dove sono più evidenti i **fenomeni quantistici**
- Il laser è una **sorgente di luce con eccellenti caratteristiche**:  
monocromaticità, coerenza (spaziale e temporale),  
direzionalità, brillanza ( $\Rightarrow$  densità di energia),  
polarizzazione, durata temporale ( $\Rightarrow$  densità di energia)



# Lo spettro elettromagnetico

- Oscillatori alle frequenze "ottiche" ( $f \sim 500$  THz)

$f \rightarrow \nu$  con  $\lambda = c/\nu$  lunghezza d'onda

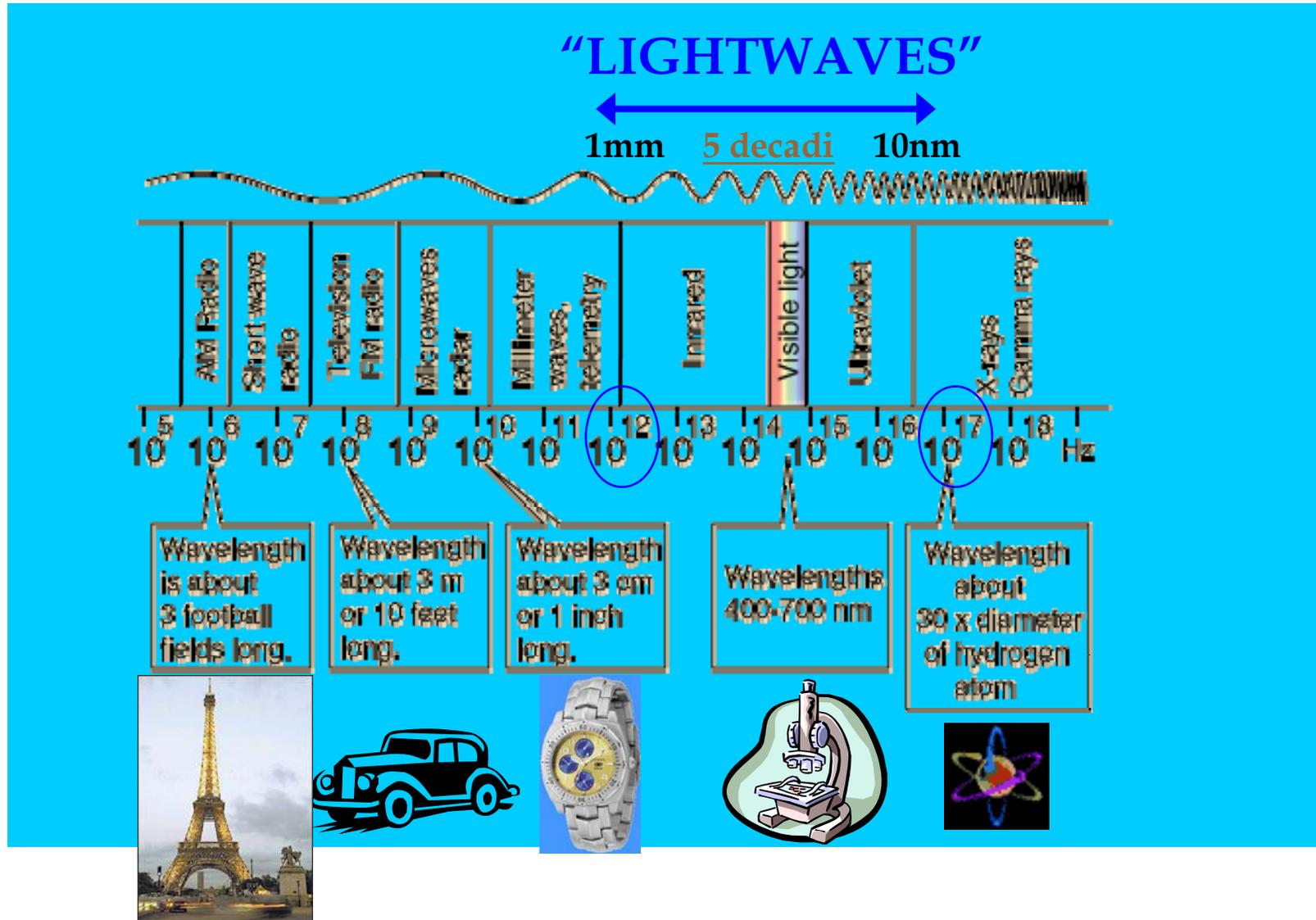


- onde millimetriche (10mm-1mm)
- IR lontano e medio (1000 $\mu$ m -2.5 $\mu$ m)
- vicino-IR (2.5-0.75 $\mu$ m)
- VISibile (750nm-380nm)
- UV (380nm-40nm)
- raggi-X *soft* (40nm-1nm)
- raggi-X *hard* (1nm-0.01nm)
- raggi  $\gamma$  (10pm-0.01pm)

	$\lambda$ [nm]	$\nu$ [THz]
mm	$10^7$	0.03
IR	$10^6$	0.3
n-IR	2500	120
VIS	750	400
UV	380	790
X	40	7500
	1	$3 \times 10^5$
$\gamma$		

- LASER con funzionamento in **regime continuo o impulsato**  
(portante ottica stazionaria o modulata)

# Lunghezze d'onda "ottiche"



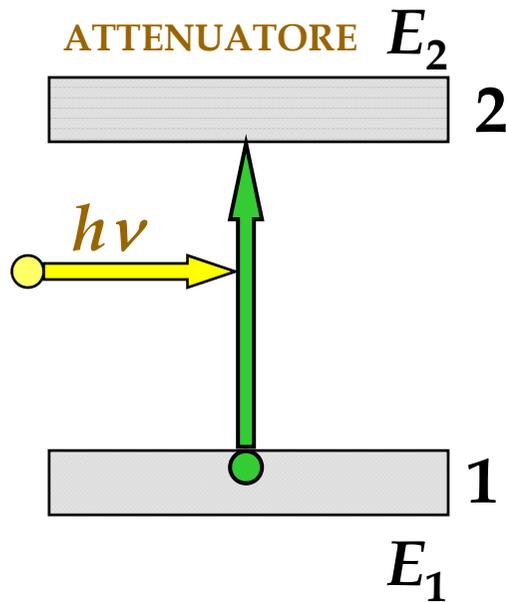
---

# Rappresentazione della luce

---

- **ONDA** ( teoria ondulatoria )
  - fenomeni di interferenza
  - effetti di diffrazione
- **FOTONE** ( teoria corpuscolare )
  - quantizzazione dell'energia  $E=h\nu$
  - interazione radiazione/materia  
(assorbimento/emissione fotoni)
- **RAGGI** ( ottica geometrica )
  - analisi sistemi ottici: riflessione e rifrazione
  - più finemente: ottica gaussiana

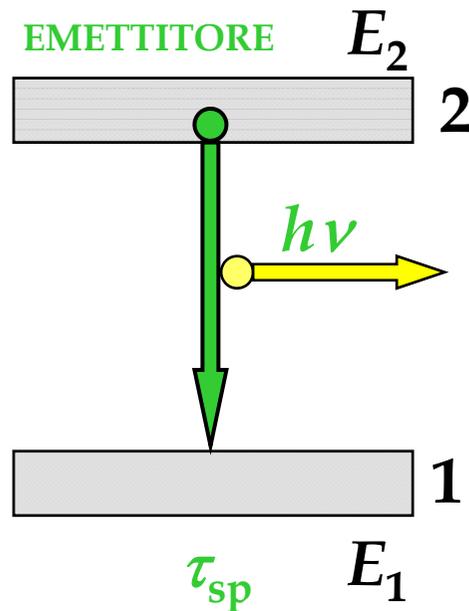
# Assorbimento, emissione spontanea, emissione stimolata



**assorbimento**

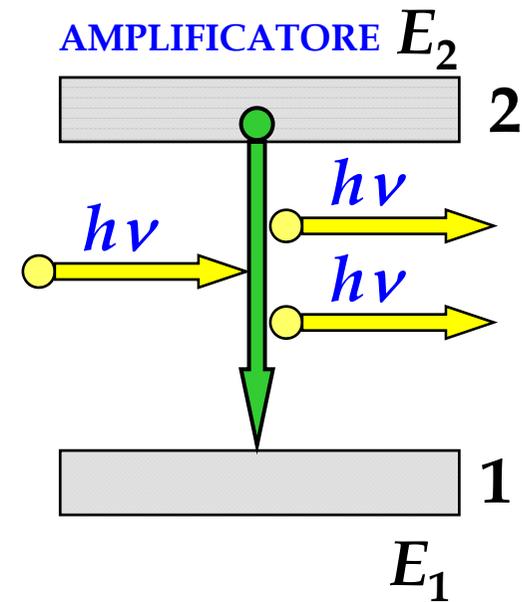
$$h\nu = E_2 - E_1$$

$$\lambda = hc / (E_2 - E_1)$$



**emissione spontanea**

Nel caso dell'emissione stimolata,  
un **fotone** incidente viene "amplificato"  
producendo **due fotoni coerenti**



---

# Amplificazione ottica (coerente)

---

Emissione spontanea: (*emissione incoerente*)

l'energia viene emessa con fase e direzione casuale

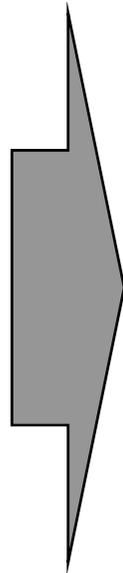
Emissione stimolata: (*emissione coerente*)

l'energia viene emessa con la stessa fase, frequenza, direzione

**LIVELLI ENERGETICI**

superiore:  $E_2$

inferiore:  $E_1$



**atomi**

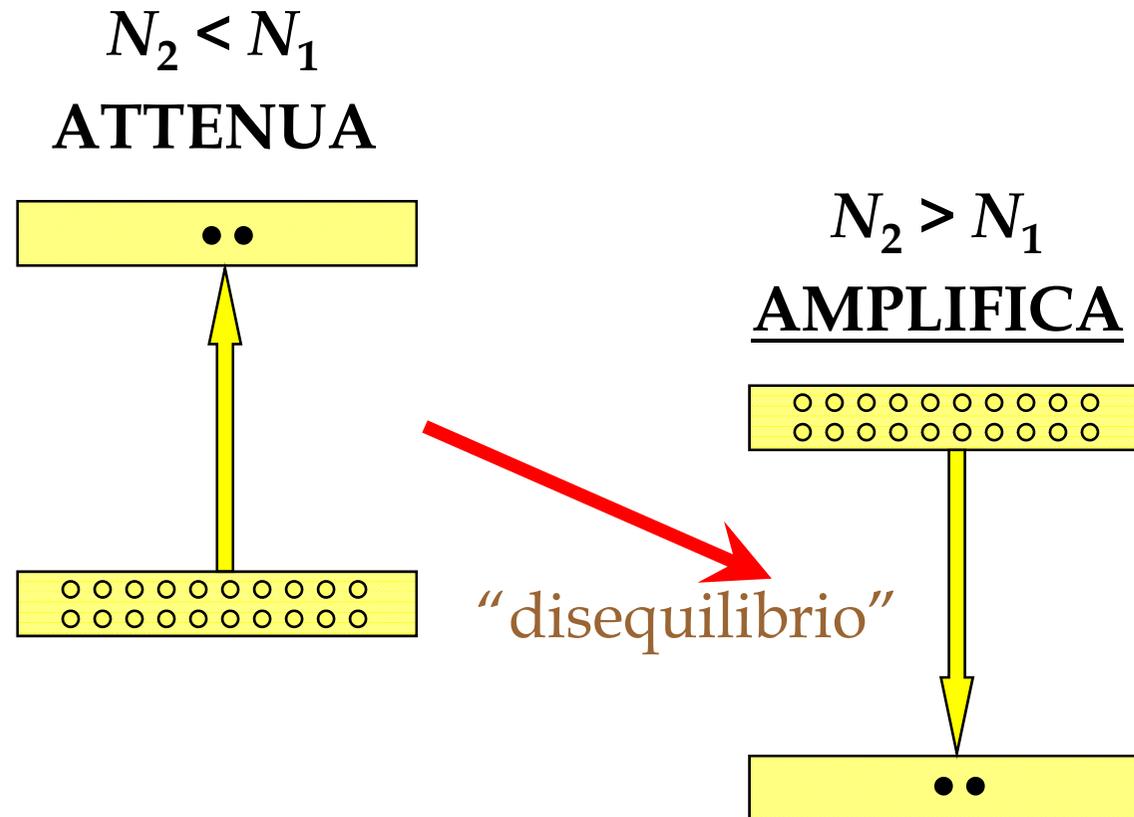
**ioni in vetri o cristalli**

**molecole (*anche vibrazionali*)**

**bande (semiconduttori)**

# Inversione di popolazione

All'equilibrio  
termodinamico,  
con  $E_2 > E_1$ ,  
è sempre  $N_2 < N_1$



$\Delta N = (N_2 - N_1)$  è detta **INVERSIONE DI POPOLAZIONE**

Se  $N_2 = N_1$  (il che vale anche per  $N_2 = N_1 = 0$ ) il materiale è  
"trasparente" alla  $\nu$  e  $\lambda$  considerate

## Diapositiva 12

---

CS1

incluso questo lucido è terminata la 1a lez 04-05 in aula GR.1.4

Cesare Svelto; 17/03/2005

# Componenti di un oscillatore laser

## 1. Materiale Attivo

atomi/ioni/molecole con “opportuni” livelli energetici

## 2. Meccanismo di Pompa

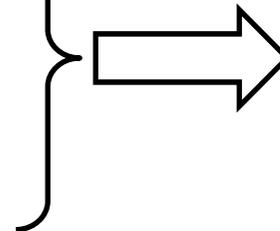
trasferimento di energia che consente una “**inversione di popolazione**”, “eccitando” il Materiale Attivo così da ottenere un **guadagno ottico**

## 3. Risonatore Ottico

sistema di **confinamento della radiazione e.m.**

1. + 2. → dispositivo con guadagno  
amplificatore (*azione laser*)

3. → sistema di retroazione  
reazione (+)



**OSCILLATORE**  
(*oscillazione laser*)

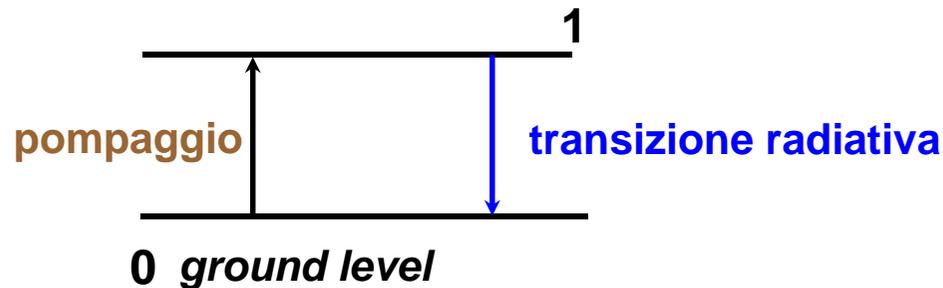


# Amplificazione ottica (??? 2 livelli)

**Pur fornendo energia al sistema,  
è impossibile ottenere amplificazione  
dal sistema a 2 livelli**

**( quando  $N_1=N_0=N/2$  un'ulteriore energia di pompaggio  
da la stessa probabilità di transizione  $0 \rightarrow 1$  e  $1 \rightarrow 0$  )**

**Sistema a  
due livelli**

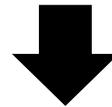


**condizione per amplificazione:  $N_1 > N_0$  (impossibile)**

“Non basta promuovere  $N/2$  atomi sul livello superiore”  
(e non si riesce a promuoverne più di  $N/2$ )

# Amplificazione ottica (3 livelli)

Per ottenere amplificazione devo fornire energia a un sistema con più di 2 livelli



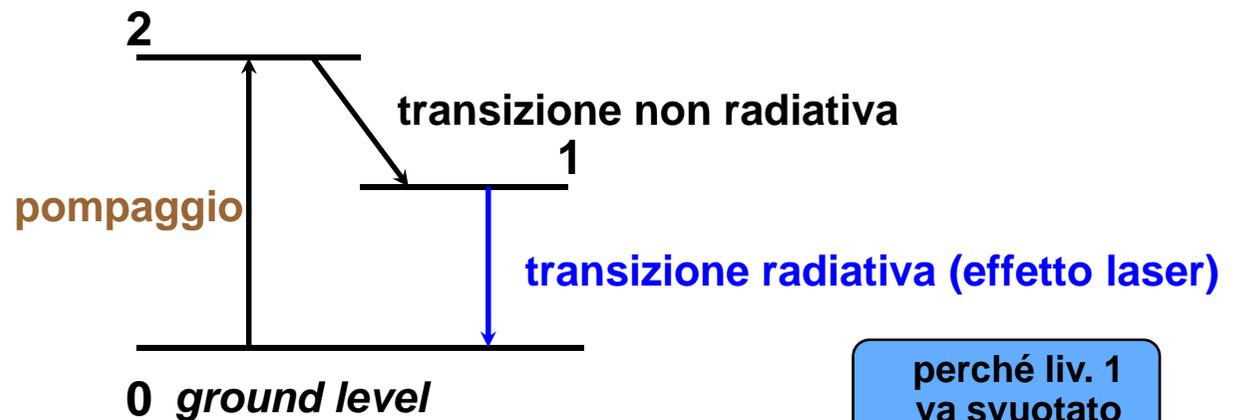
**INVERSIONE DI POPOLAZIONE**

$$N_1 - N_0 > 0$$

**Sistema a tre livelli**

**condizione per il funzionamento**

$$\tau_{21} \ll \tau_{10}$$

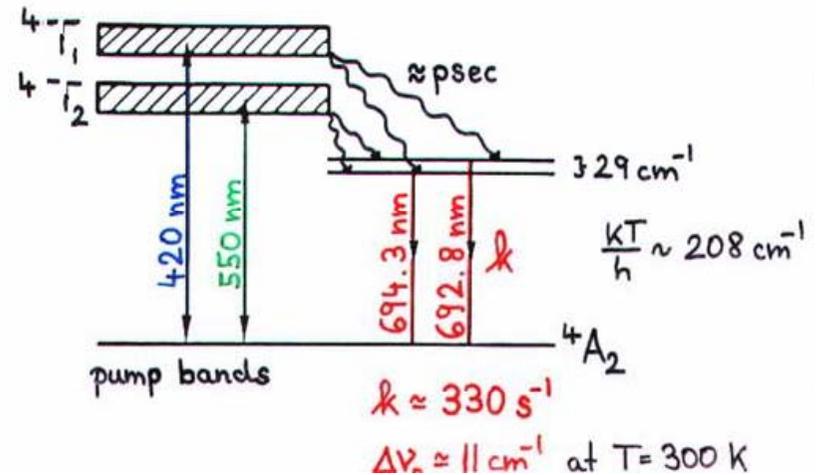
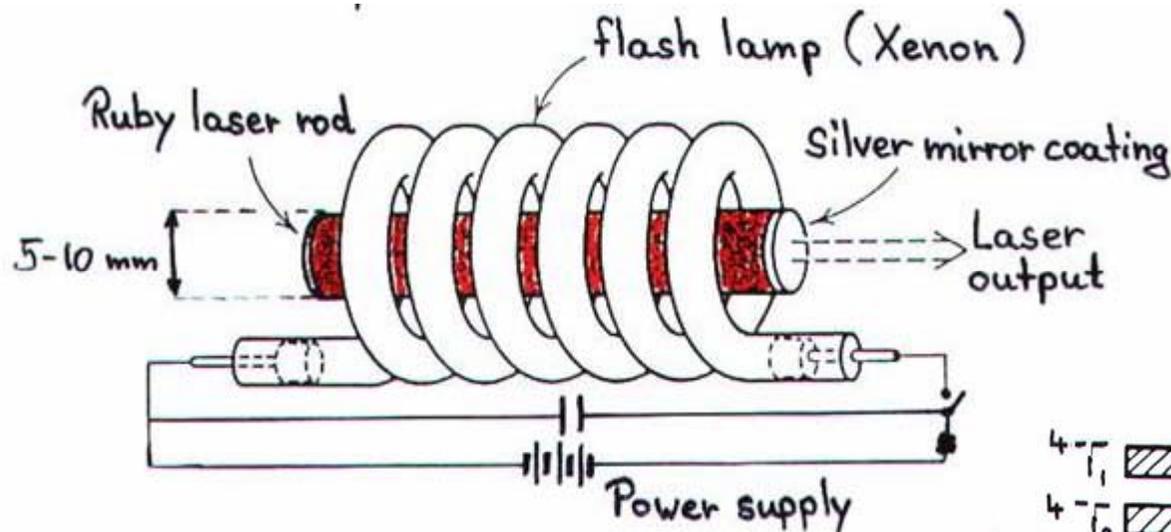


**condizione per amplificazione:  $N_1 > N_0$  (non facile)**

“Occorre promuovere  $N/2 + n$  atomi sul livello superiore”

# Esempio di laser a 3 livelli (rubino)

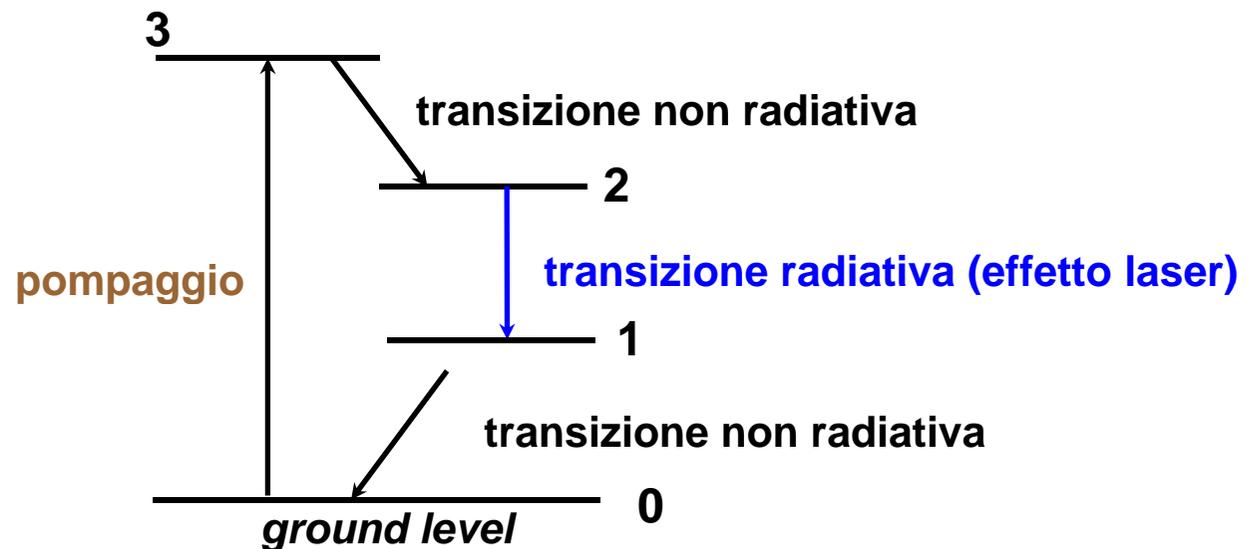
Rubino:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (allumina o corindone)  
con alcuni ioni di  $\text{Al}^{3+}$  sostituiti da  $\text{Cr}^{3+}$



# Amplificazione ottica (4 livelli)

## Sistema più efficiente: 4 LIVELLI

Sistema a quattro livelli



condizione per il funzionamento

$$\tau_{10}, \tau_{32} \ll \tau_{21}$$

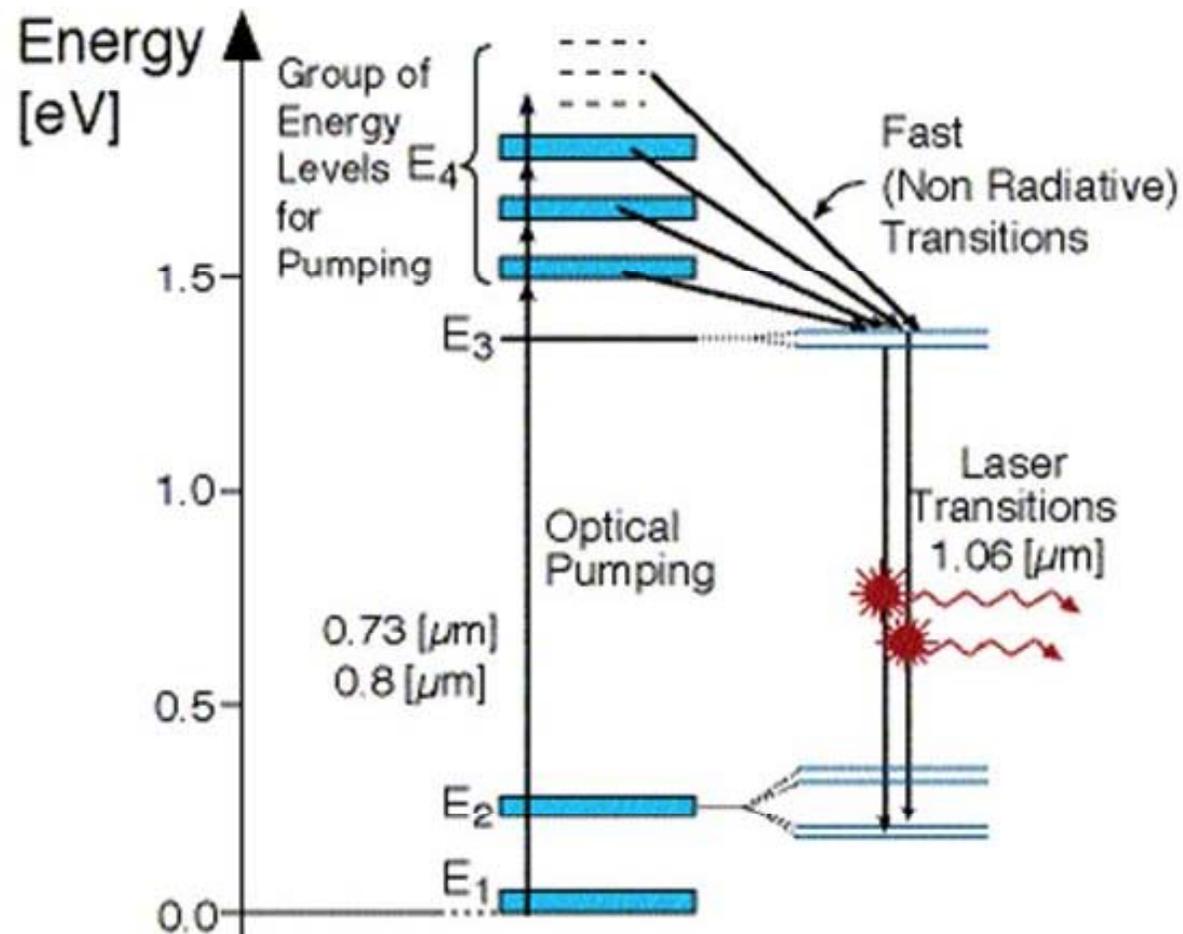
perché liv. 1 è già vuoto

**condizione per amplificazione:  $N_2 > 0$  (semplice)**

“E’ sufficiente promuovere  $n$  atomi sul livello superiore”

# Esempio di laser a 4 livelli (Nd:YAG)

**YAG: Yttrium Aluminium Garnet ( $\text{Y}_2\text{Al}_5\text{O}_{12}$  con alcuni atomi di  $\text{Y}^{3+}$  sostituiti da  $\text{Nd}^{3+}$ )**



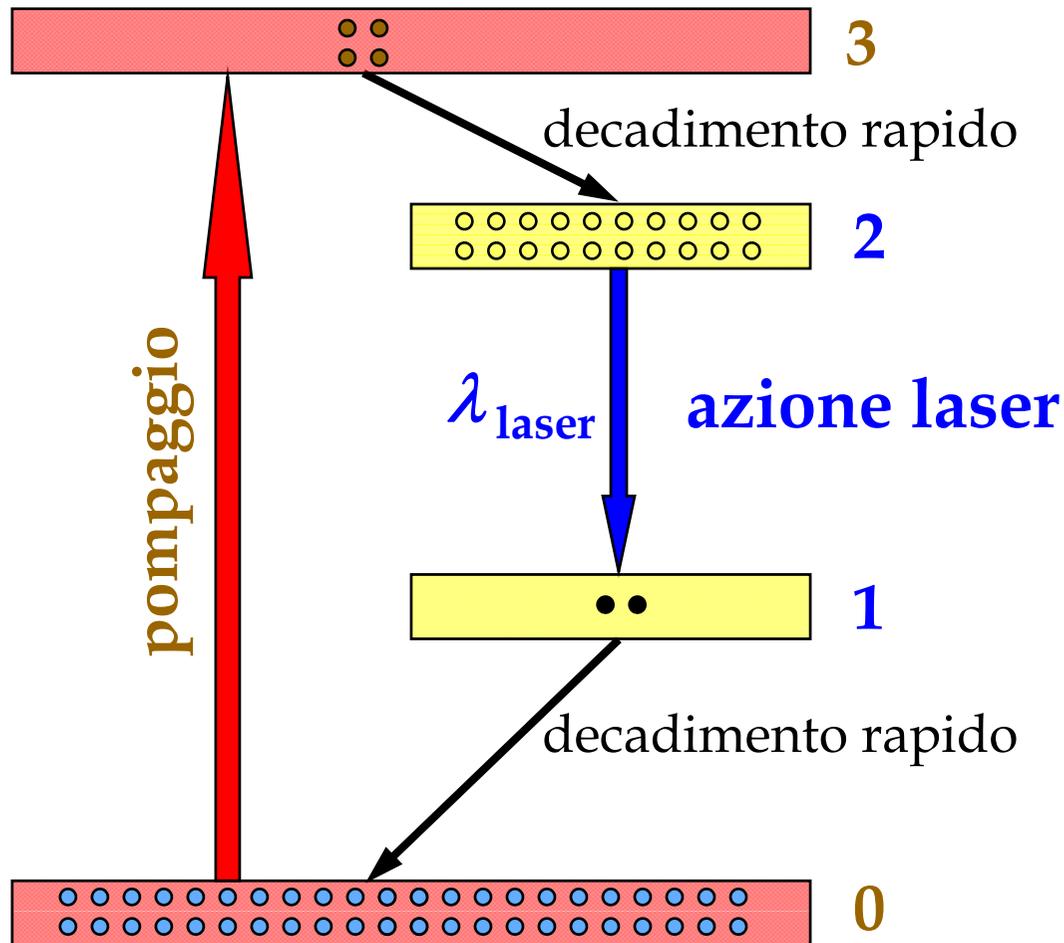
---

## Diversi tipi di pompaggio

---

- **SCARICA ELETTRICA** ( gas )
  - l'energia della scarica eccita, mediante urti (energia cinetica) gli atomi/ioni
- **OTTICO** ( cristalli, vetri, liquidi )
  - i fotoni di pompa eccitano gli atomi/ioni
- **ELETTRICO** ( semiconduttore )
  - l'energia della corrente elettrica (energia di elettroni e lacune che si ricombinano) comporta l'irraggiamento di fotoni di luce

# Livelli energetici, pompaggio, e inversione di popolazione (4 liv.)



$$N_3 \cong 0 \cong N_1$$

$$\tau_{21} \gg \tau_{32}, \tau_{10}$$

*Inversione di popolazione:*

$$N_2 > N_1$$

Il materiale attivo è in grado di **amplificare** la radiazione a  $\lambda_{\text{laser}}$

# Guadagno in un materiale attivo

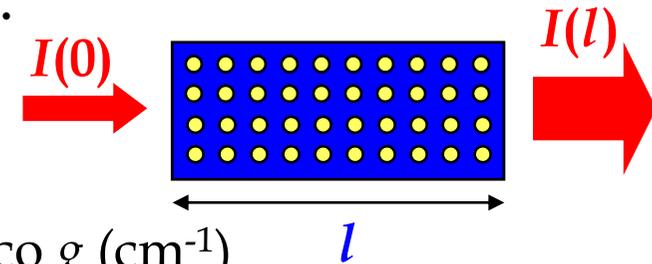
Amplificazione per unità di lunghezza nel materiale attivo

$$\frac{dI}{dz} = \underbrace{\sigma}_{\substack{\text{cross section di emissione (cm}^2\text{)}}} \underbrace{(N_2 - N_1)}_{\substack{\Delta N \text{ inversione di popolazione (cm}^{-3}\text{)}}} I$$

intensità ottica (W/cm<sup>2</sup>)

Per un materiale attivo di lunghezza  $l$ :

$$I(l) = I(0) \exp \left[ \underbrace{\sigma (N_2 - N_1)}_{\text{guadagno logaritmico } g \text{ (cm}^{-1}\text{)}} l \right]$$



$$\frac{I(l)}{I(0)} = G = \exp[g l] \text{ guadagno ottico per singolo passo}$$

# Componenti di un oscillatore laser (bis)

## 1. Materiale Attivo

atomi/ioni/molecole con "opportuni" livelli energetici

## 2. Meccanismo di Pompa

trasferimento di energia che consente una "inversione di popolazione", "eccitando" il Materiale Attivo così da ottenere un guadagno ottico

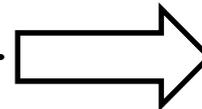
VISTI

## 3. Risonatore Ottico

sistema di confinamento della radiazione e.m.

1. + 2. → dispositivo con guadagno  
amplificatore (*azione laser*)

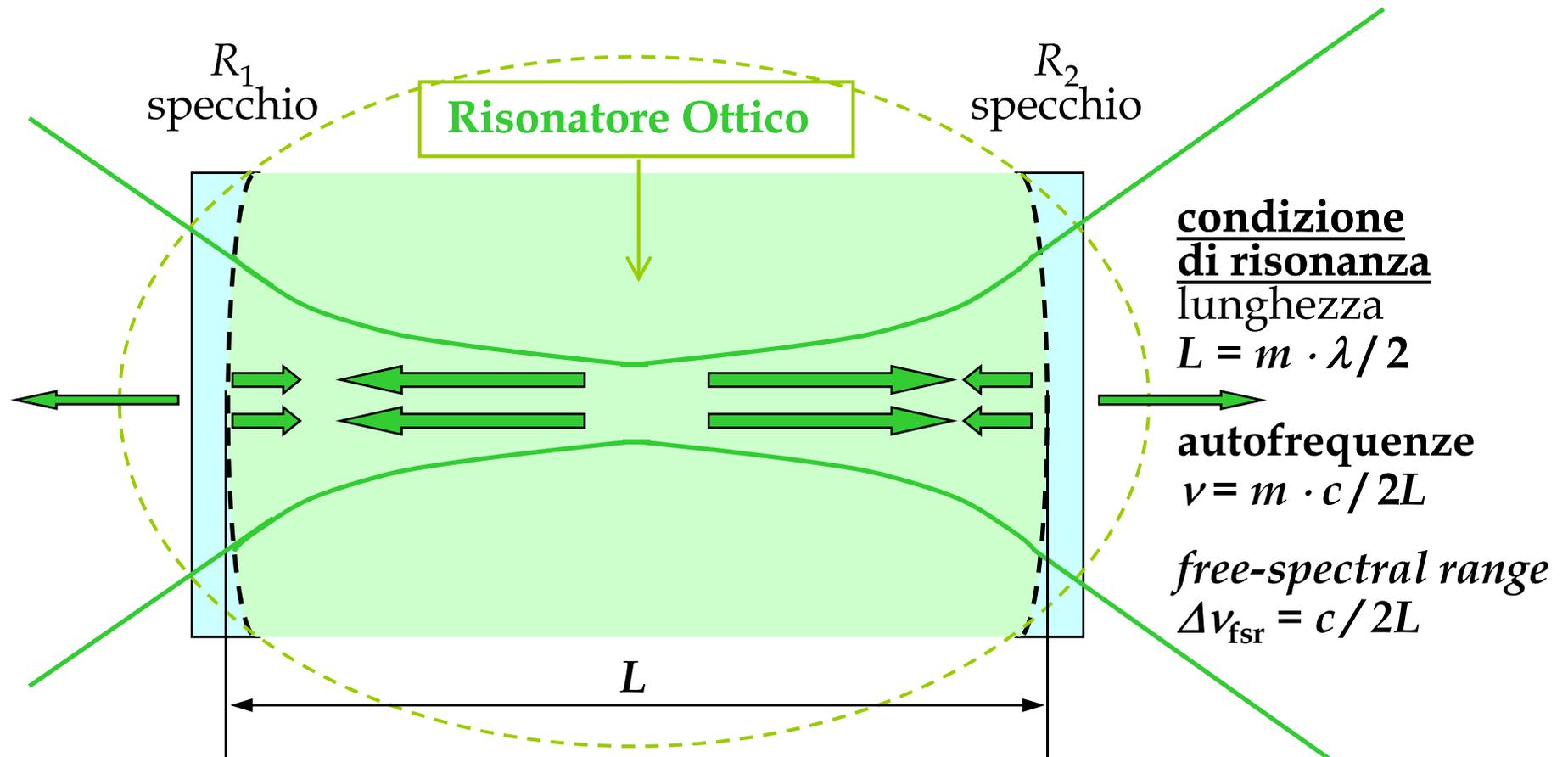
3. → sistema di retroazione  
reazione (+)



**OSCILLATORE**  
(*oscillazione laser*)

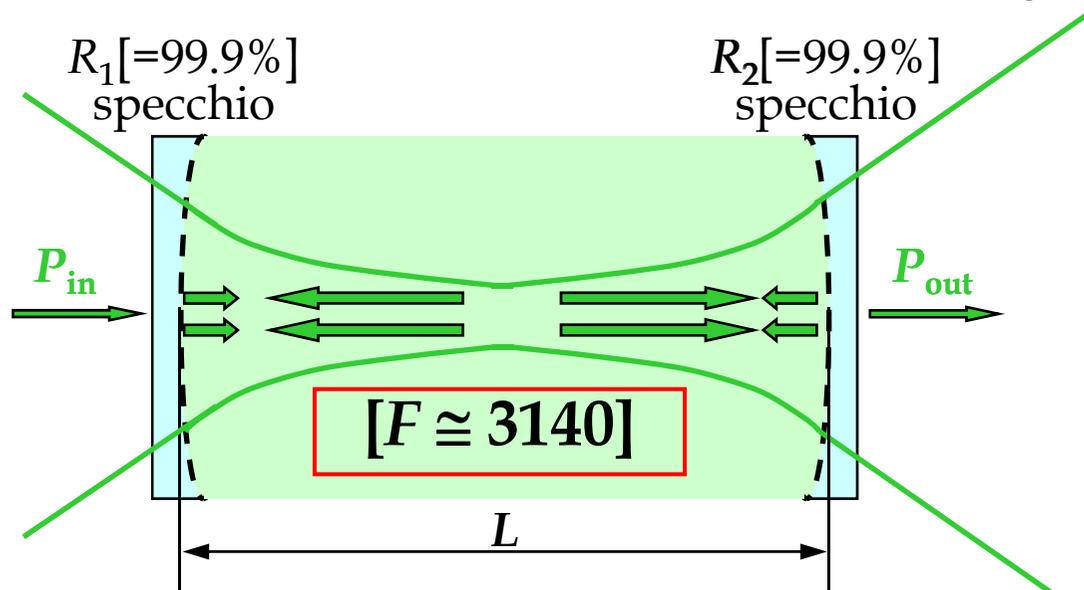


# Risonatori ottici di tipo Fabry - Perot



$m$ , intero, è l'ordine del modo di risonanza  
ci dice quante  $\lambda$  ci sono in un *round-trip* ( $2L$ )  
o su quale ordine del FSR è la frequenza  $\nu$

# Parametri del Fabry - Perot



**Finesse**  $F = \Delta\nu_{fsr} / \Delta\nu_c$   
 $F = \pi(R_1 R_2)^{1/4} / \{1 - (R_1 R_2)^{1/2}\}$

**$F = \pi R^{1/2} / (1 - R)$  con  $R = R_1 = R_2$**

( con gli specchi migliori si è ottenuto  $F=600\,000$ , dunque  $R=99.9995\%$  "mis. ind." )

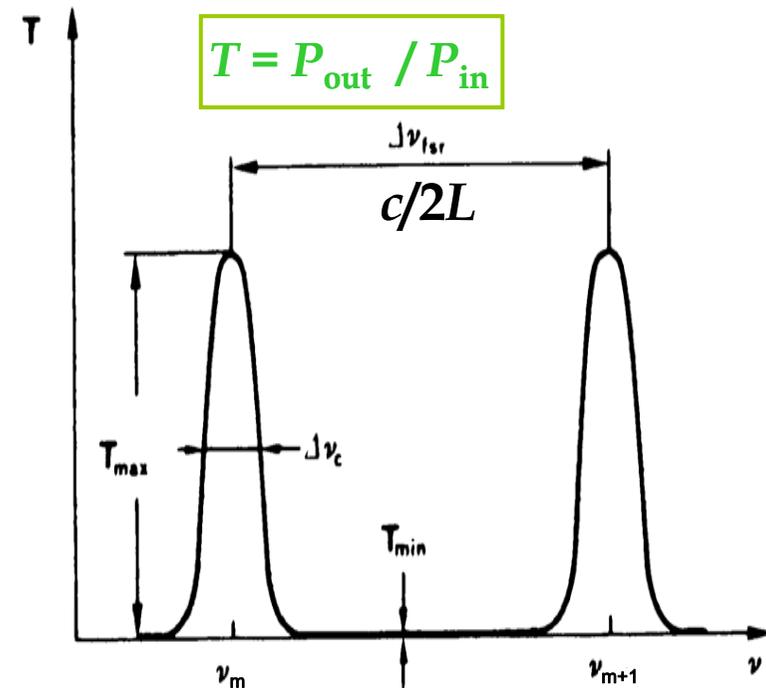
**Larghezza di riga**

$$\Delta\nu_c = 1 / 2\pi\tau_c = c\gamma / 2\pi L$$

**Cavity lifetime**

$$\tau_c = L / c\gamma$$

$\gamma$  perdite (logaritmiche)  
per passaggio (v. dopo)



**Fattore di merito**

$$Q = \nu / \Delta\nu_c$$

$$Q = (\nu / \Delta\nu_{fsr}) \cdot F$$

$$Q = m \cdot F$$

# Trasmissione del Fabry - Perot

## Profilo di Airy

$$T(\varphi) = \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos\varphi}$$

$\cos(\varphi = +1 \Rightarrow \varphi = 0$   
 $\cos(\varphi = -1 \Rightarrow \varphi = \pi$   
 per  $R=R_1=R_2$   
 e  $\varphi = (2\pi \cdot 2L / \lambda)$   
 $= (ks) =$

$\pi$   
*round trip*

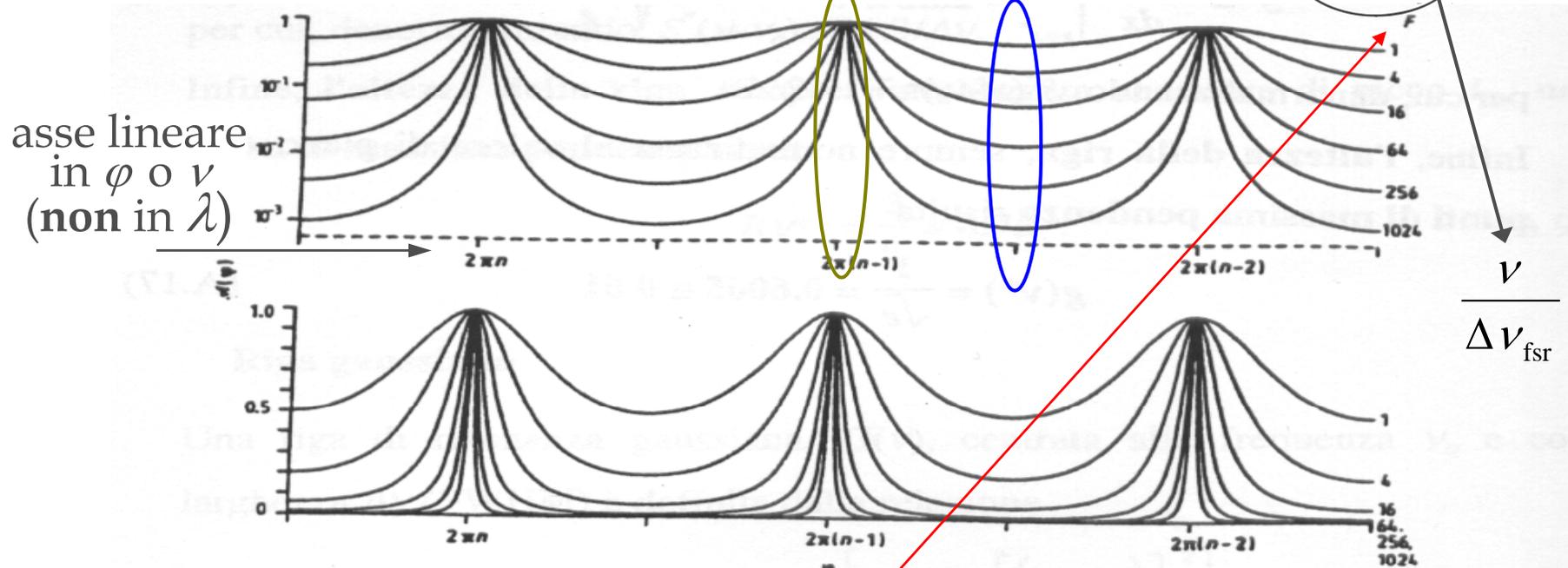


Fig. A.1 Profilo spettrale delle curve di Airy corrispondenti alla trasmissione in potenza di un interferometro Fabry-Perot. Il parametro  $F$  è uguale a  $\pi\sqrt{R}/(1-R)$ ; la variabile  $\varphi$ , e quindi la frequenza ottica  $\nu$ , varia linearmente sull'asse orizzontale.

---

## Guadagno in un materiale attivo (bis)

---

Amplificazione per unità di lunghezza nel materiale attivo

$$\frac{dI}{dz} = \sigma \Delta N \cdot I$$

Per un materiale attivo di lunghezza  $l$ :

$$\frac{I(l)}{I(0)} = G \quad \text{guadagno ottico per singolo passo}$$

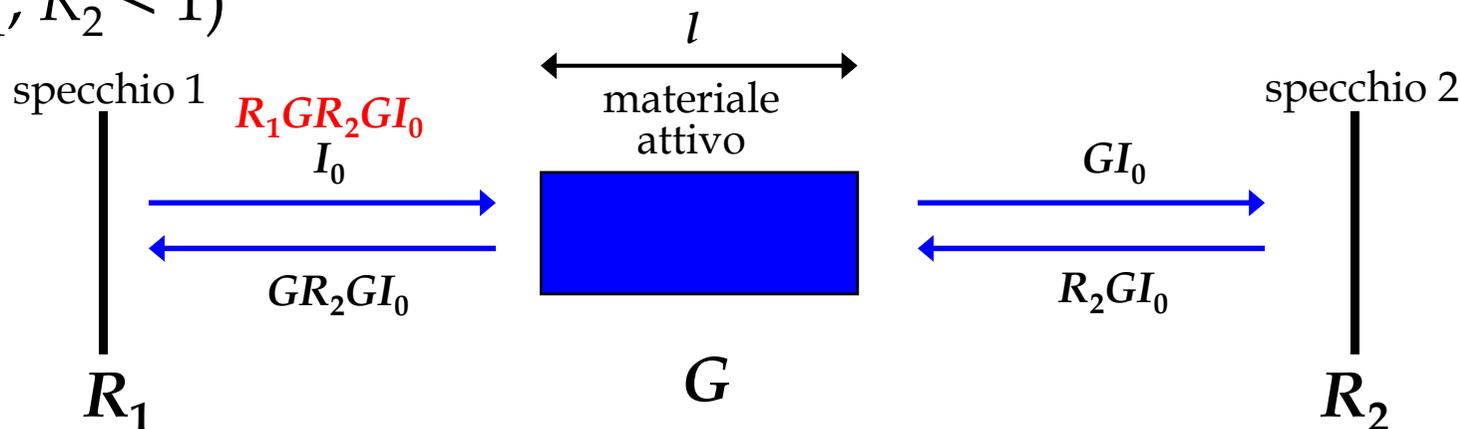
**Si ha un guadagno ottico  $G$  in intensità/potenza a ogni attraversamento del materiale attivo**

Ricaviamo ora il valore di guadagno critico (o l'inversione critica) che consente di innescare l'oscillazione laser in un materiale attivo retroazionato positivamente

# Condizione di soglia per l'azione laser

Il guadagno di *round-trip* (doppio passaggio) deve eguagliare le perdite nel risonatore (riflettività specchi, superfici e materiali attraversati dal fascio, diffrazione).

Considerando solo le riflettività parziali degli specchi ( $R_1, R_2 < 1$ )



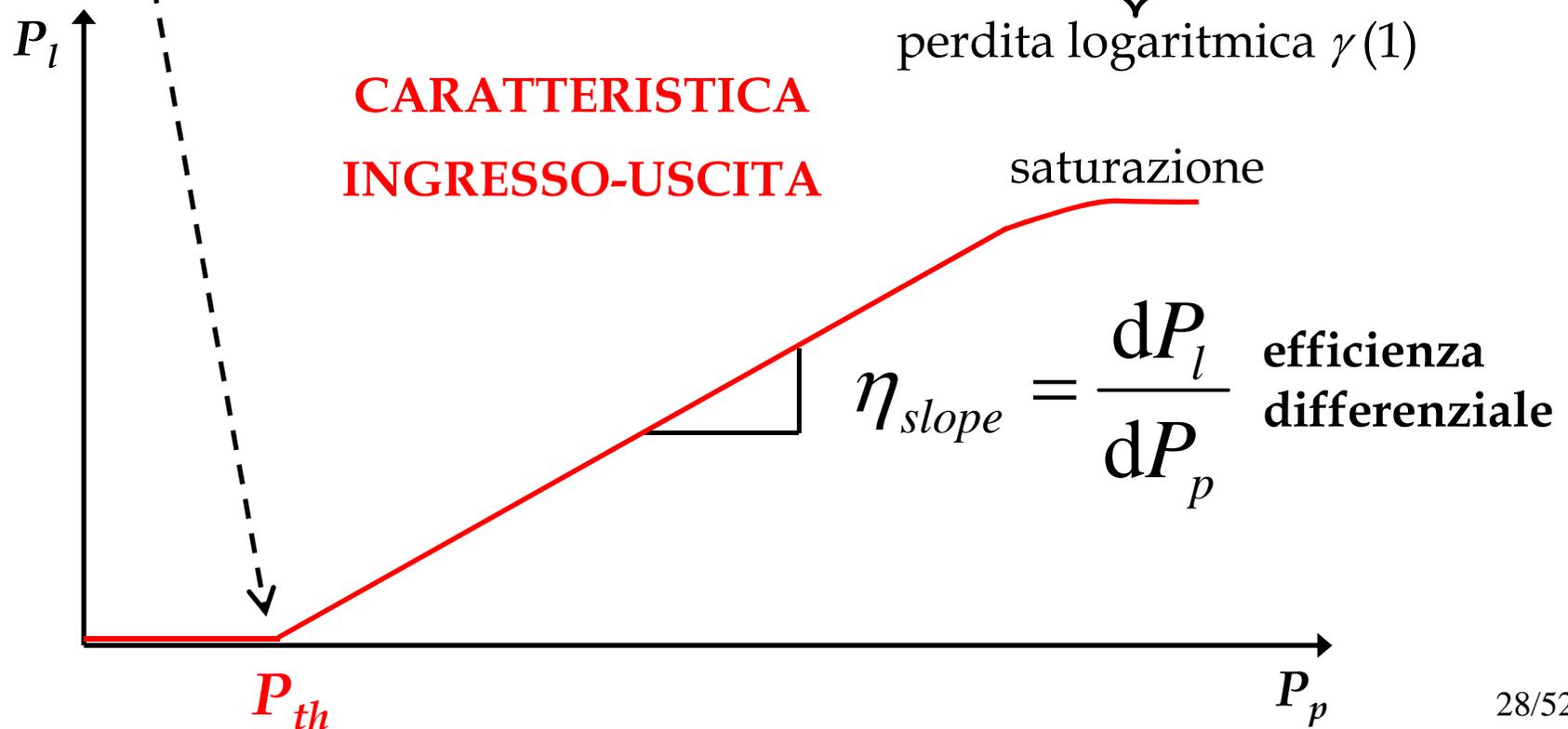
sul *round-trip* deve essere  $R_1GR_2GI_0 = I_0 \Rightarrow G^2 = 1/(R_1R_2)$

$$\exp[2\sigma(N_2 - N_1)l] = 1/(R_1R_2) \Rightarrow \sigma(N_2 - N_1)l = (1/2)[- \ln(R_1) - \ln(R_2)]$$

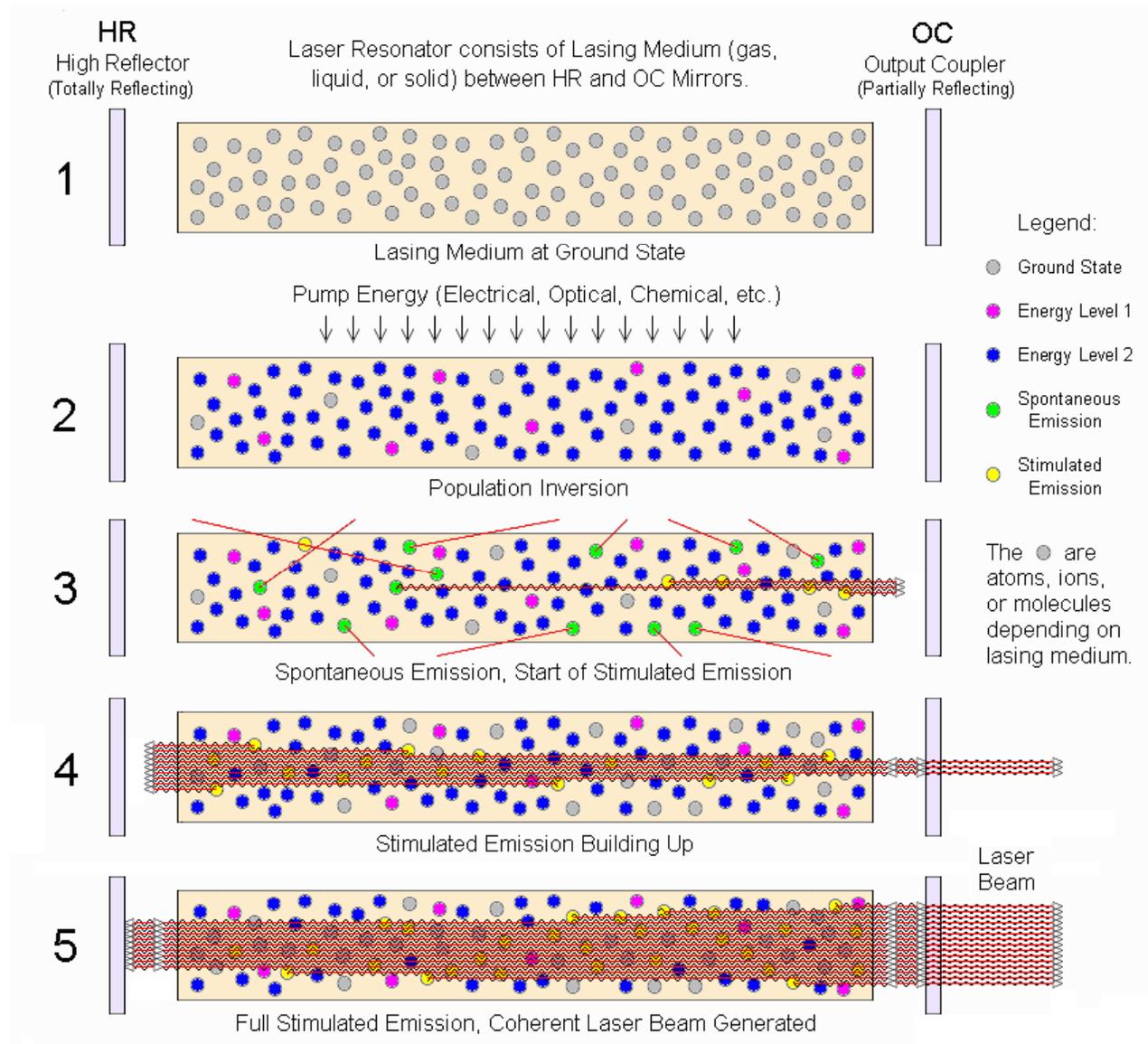
# Inversione critica e potenza di soglia e efficienza differenziale di un laser

$\gamma = (1/2)[- \ln(R_1) - \ln(R_2)]$  perdite log. guadagno = perdite  
 $\sigma(N_2 - N_1)l = \gamma$  (a soglia)

$$(N_2 - N_1)_{th} = \frac{\gamma}{\sigma l} \quad \text{con } \gamma = \underbrace{\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} = -\frac{\ln R_1}{2} - \frac{\ln R_2}{2}}_{\text{perdita logaritmica } \gamma(1)}$$



# Materiale attivo, pompaggio, inversione, azione laser, retroazione ottica, oscillazione laser



## Diapositiva 29

---

**CS4**

incluso questo lucido è terminata la 3a lez 04-05 in aula N.1.6

Cesare Svelto; 24/03/2005

---

# Componenti di un oscillatore laser <sup>(bis)</sup>

---

## 1. Materiale Attivo

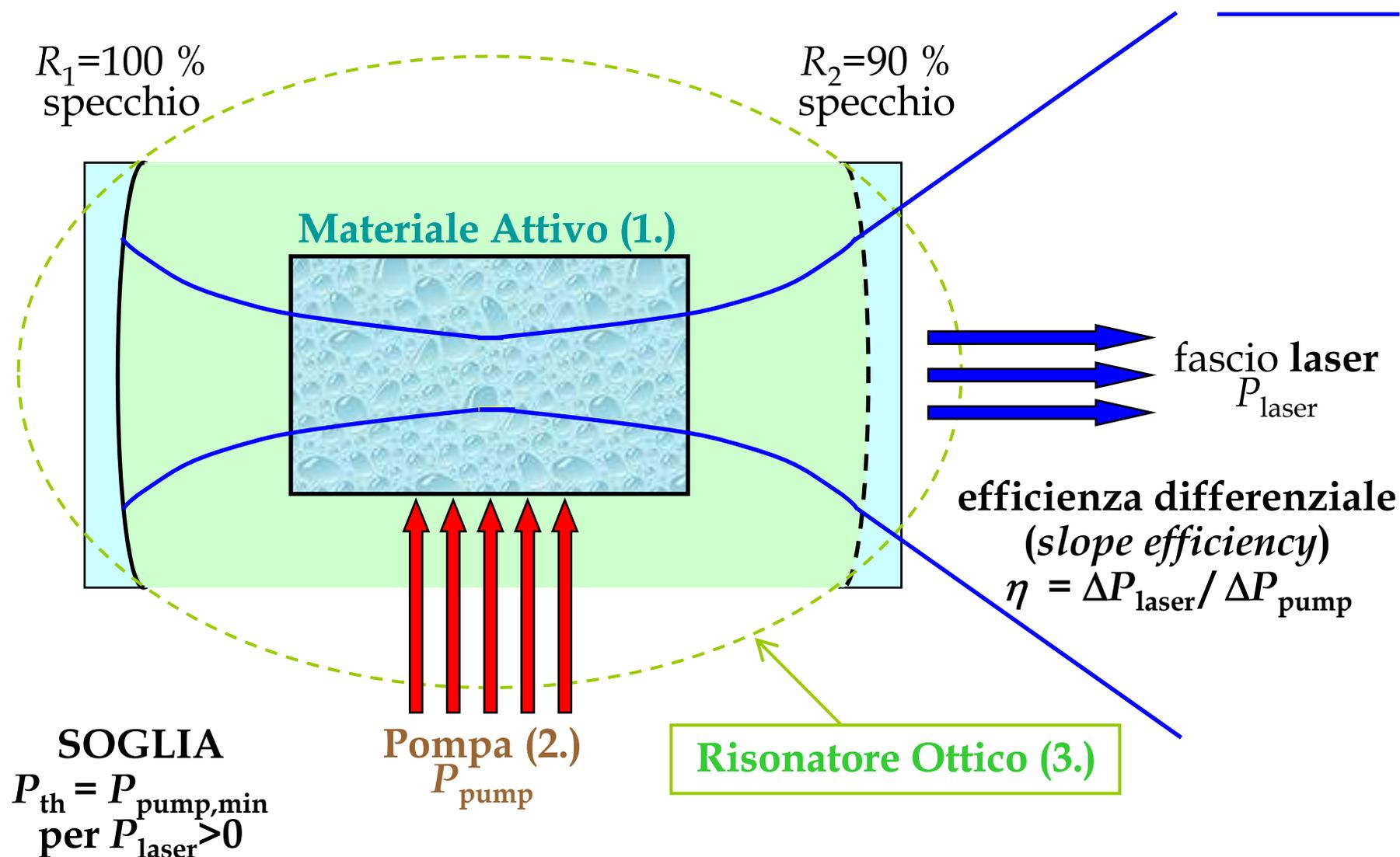
atomi/ioni/molecole con “opportuni” livelli energetici

2. Meccanismo di Pompa [e soglia laser]  
trasferimento di energia che consente una  
“**inversione di popolazione**” “eccitando” il  
Materiale Attivo così da ottenere un  
**guadagno ottico**

## 3. Risonatore Ottico

sistema di confinamento della radiazione e.m.

# Struttura di un oscillatore laser



I colori sono solo indicativi ...

---

# Tipi di laser (classificazioni possibili)

---

## 1. Stato fisico/ proprietà del **materiale attivo**:

- laser a **gas**
- laser a **coloranti (liquido)**
- laser a **stato solido** (in matrice cristallina o amorfa)
- laser a **semiconduttore**

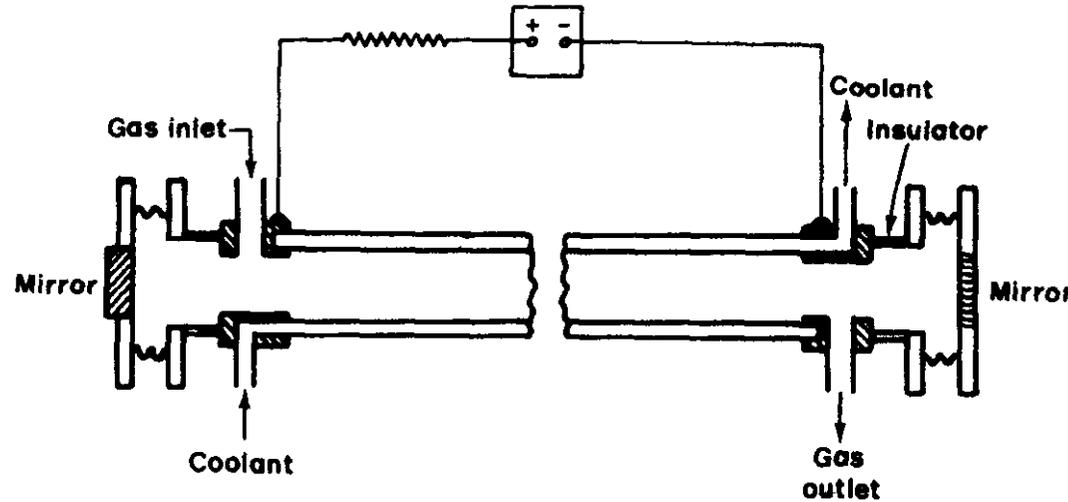
## 2. **Lunghezza d'onda** di emissione

- laser nell'**IR**, **VIS**, **UV**, e a raggi X

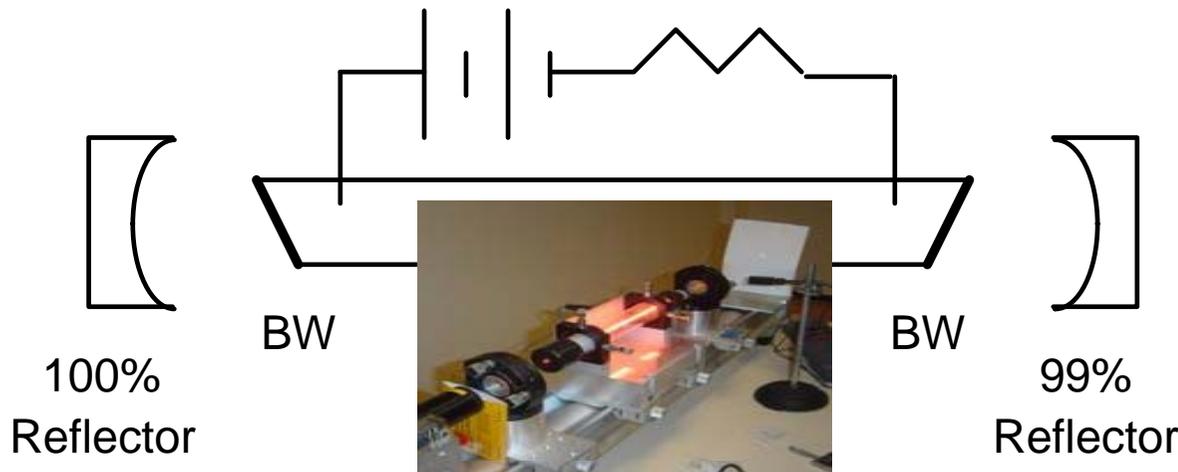
## 3. **Regime** di funzionamento

- laser in **CONTINUA (CW)**  
multimodo, singolo modo (long./trasv.), singola frequenza
- laser **IMPULSATI (*pulsed*)**  
*free-running, Q-switching, mode-locking*

# Laser a gas (pompa a scarica elettrica)



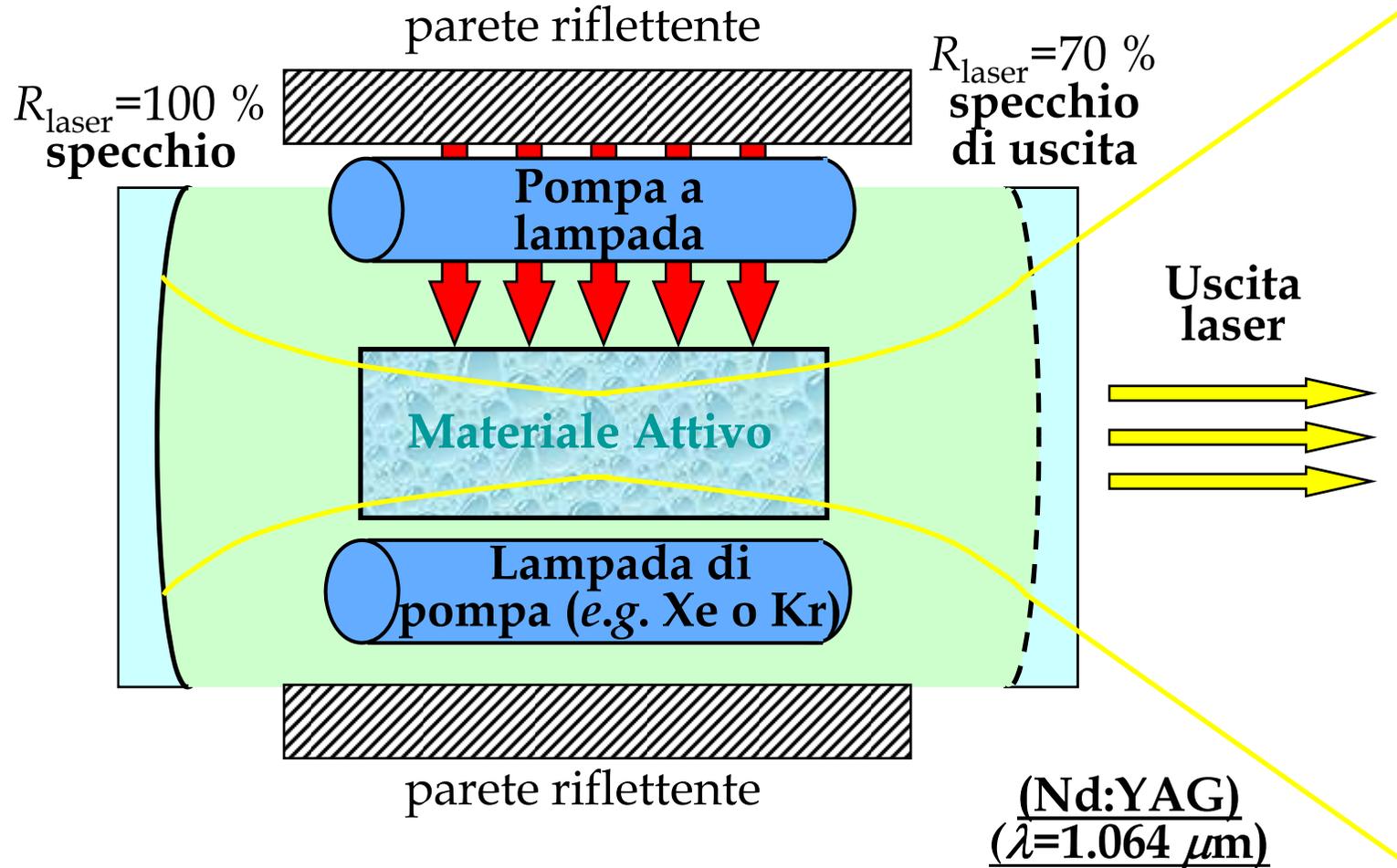
Tubo a flusso  
(CO<sub>2</sub>)



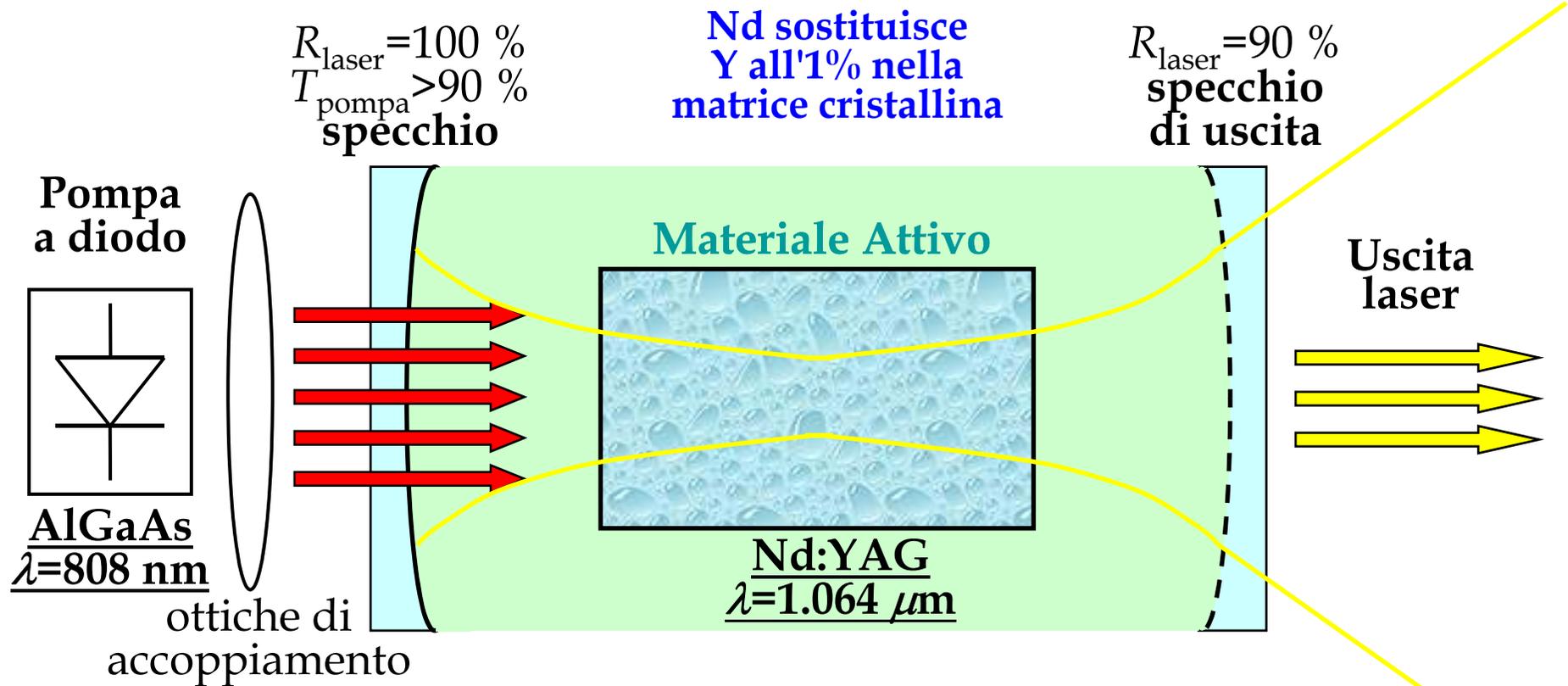
Tubo sigillato  
(He-Ne)  
(10 : 1)

La scarica elettrica eccita (per impatto elettrone-atomo) gli atomi di He che trasferiscono la loro energia di eccitazione (*resonant energy-transfer*) agli atomi di Ne che infine possono effettuare l'azione laser

# Laser a stato solido *side-pumped*



# Laser a stato solido *end-pumped* (esempio specifico con il Nd:YAG)



Yttrium Aluminum Garnet  
 $\text{YAG} \equiv \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$   
ittrio + allumina  
(Y +  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

---

# Caratteristiche materiale attivo

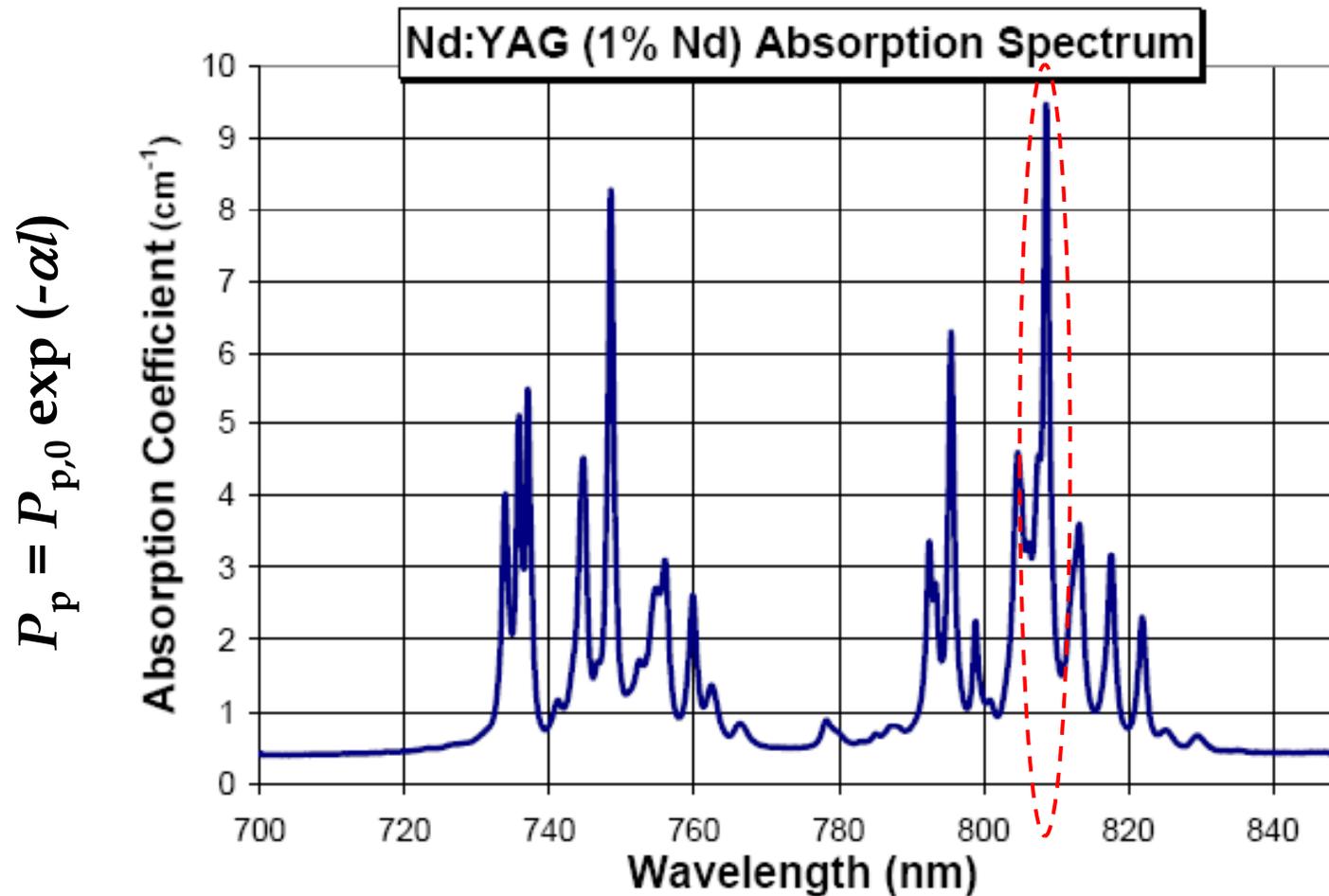
(il cristallo di Nd:YAG: 1%-atomico =0.725%-peso)

---

## Properties of Nd:YAG @ 25°C (with 1% Nd doping)

- Formula:  $Y_{2.97}Nd_{0.03}Al_5O_{12}$
- Weight of Nd: 0.725%
- Atoms of Nd per unit volume:  $1.38 \times 10^{20} / \text{cm}^3$
- Emission wavelength: 1064 nm (NIR)
- Transition:  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  (4 livelli)
- Duration of fluorescence: 230  $\mu\text{s}$  (molto lungo)
- Thermal conductivity:  $0.14 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (molto buona)
- Specific heat capacity:  $0.59 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- Thermal expansion:  $6.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (alcune ppm)
- $dn/dT$ :  $7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (modesta lente termica)
- Young's modulus:  $3.17 \times 10^4 \text{ K}\cdot\text{g}/\text{mm}^{-2}$
- Poisson's ratio: 0.25
- Resistance to thermal shock:  $790 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$  (elevata)

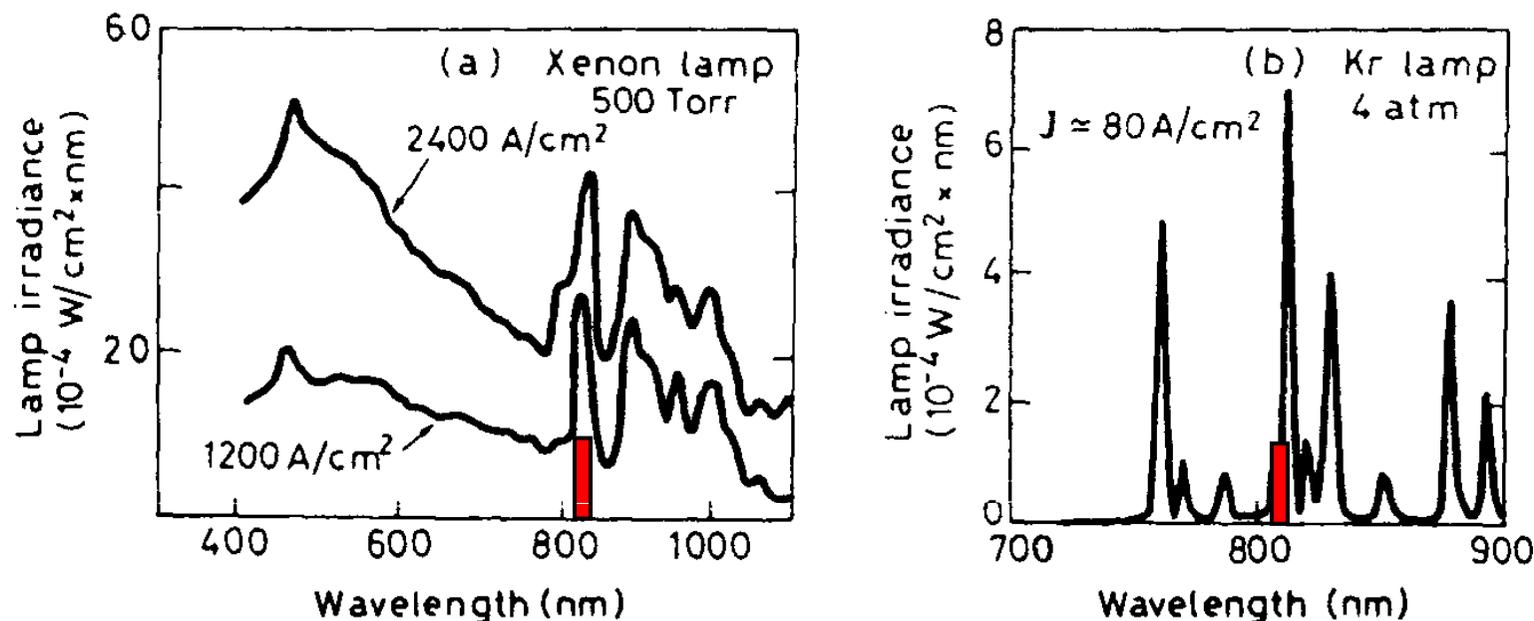
# Assorbimento del Nd:YAG



Lo spettro di assorbimento presenta un forte **picco a circa 808 nm**

# Pompa ottica: diodi vs lampada

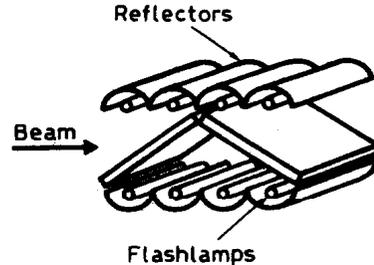
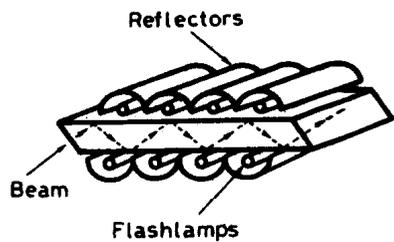
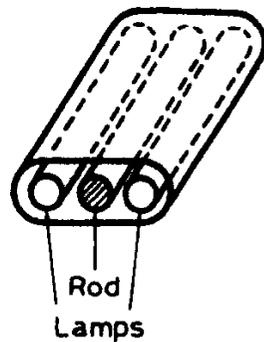
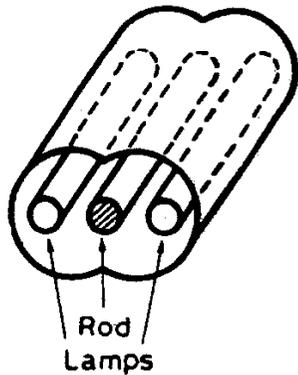
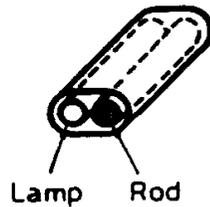
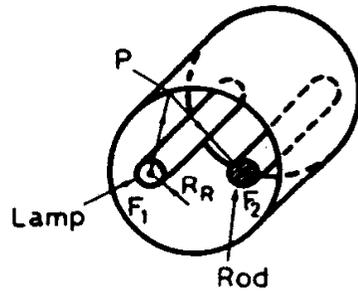
Spettri di emissione di lampade e diodi per pompa ottica di Nd:YAG



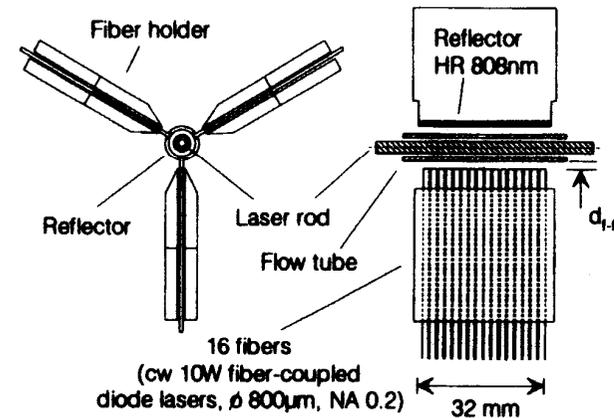
- L'efficienza spettrale della pompa a diodo [■] ( $\Delta\nu \sim 10$  nm) è molto maggiore che per la lampada [—] ( $\Delta\nu \sim 200\div 500$  nm)
- L'energia di pompa non utilmente assorbita produce calore in eccesso ( $\rightarrow$  lente termica e anche danni irreversibili)

# Geometrie di pompa: lampada vs diodi

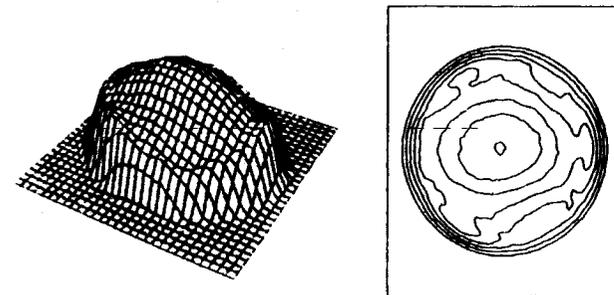
Pompaggio trasversale a una, due, e più lampade



Pompaggio trasversale a diodi per una barretta di Nd:YAG

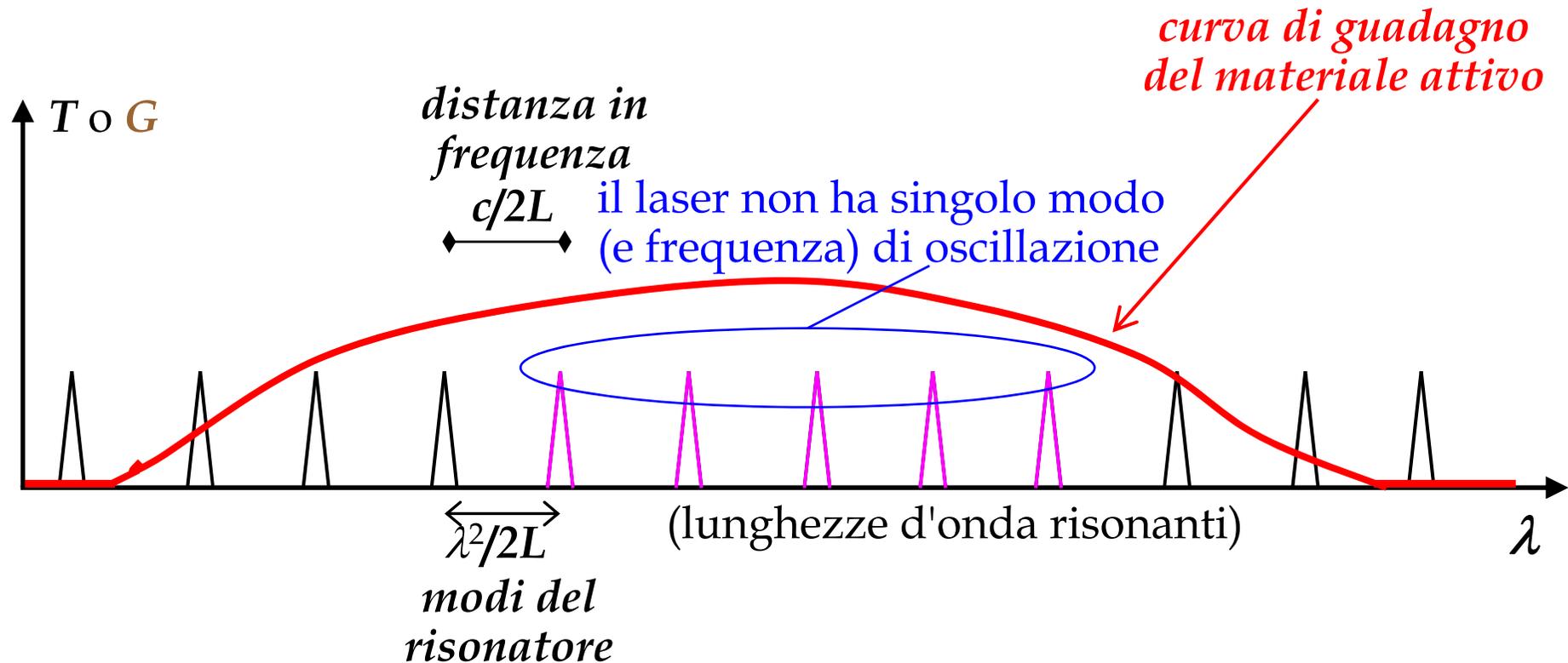


Distribuzione spaziale della pompa nel mezzo attivo



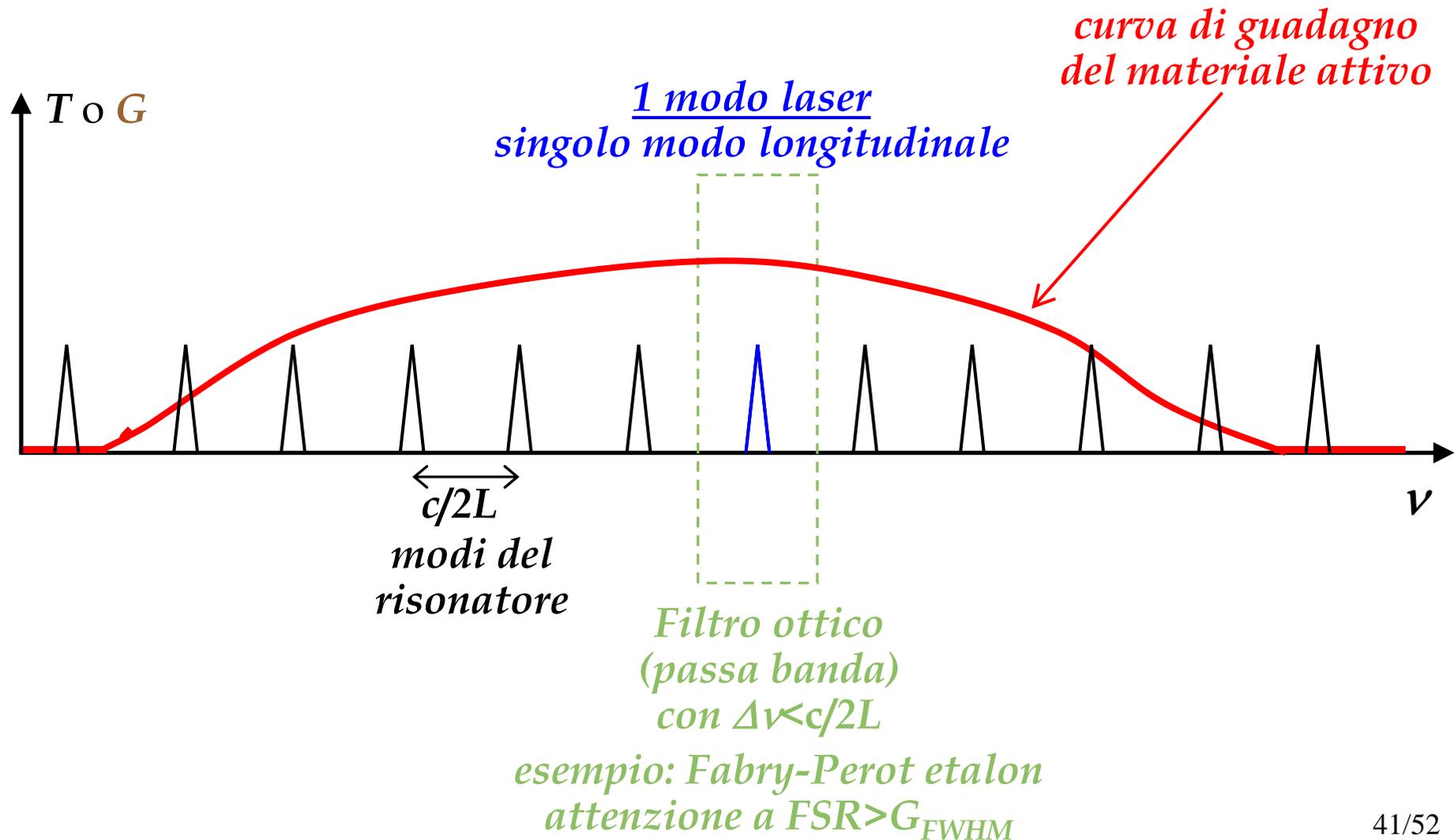
Pompa: 150 W Laser: 62 W CW TEM<sub>00</sub>

# Modi longitudinali e banda di guadagno



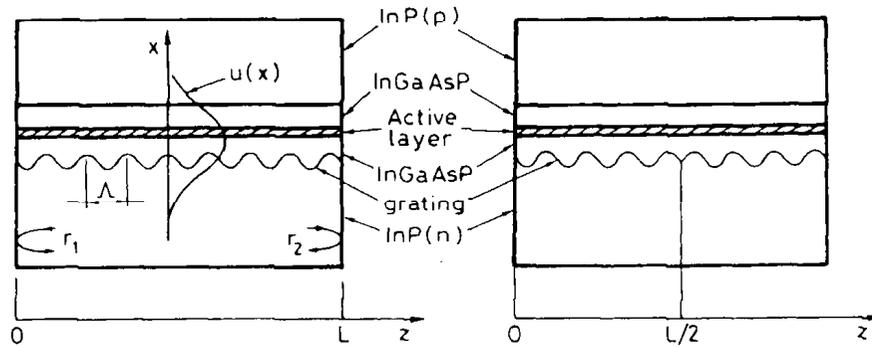
Potranno oscillare, anche simultaneamente, tutti i modi longitudinali (MLM) con abbastanza guadagno. Tipicamente oscillano quelli più vicini al picco della curva di guadagno

# Selezione del SLM

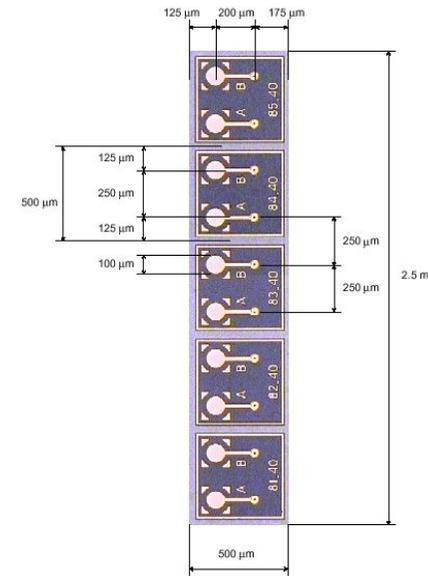


# Laser a semiconduttore *single-mode*

## Distributed Feed-Back (DFB)

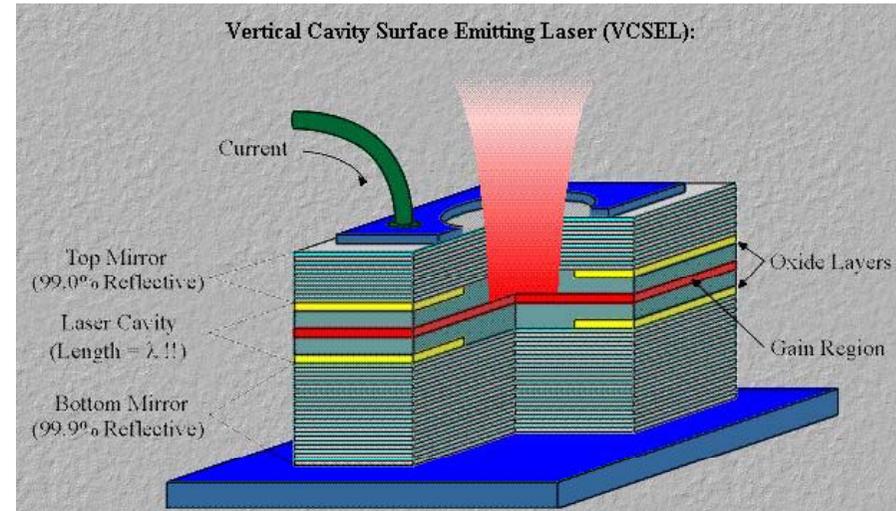
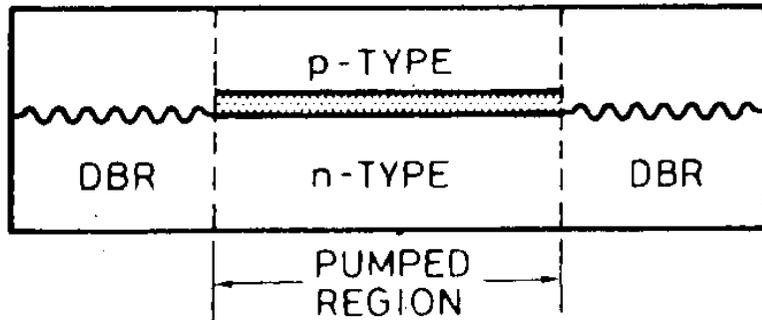


~~FP poco usato~~



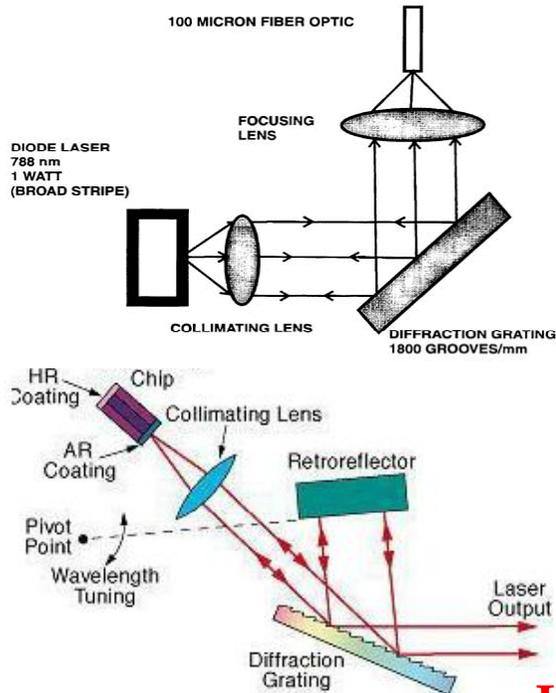
**VCSEL**

## Distributed Bragg Reflector (DBR)

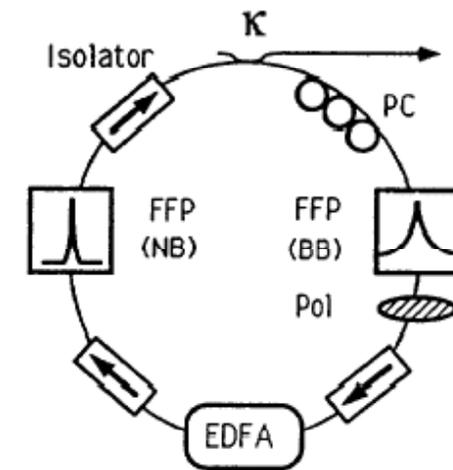
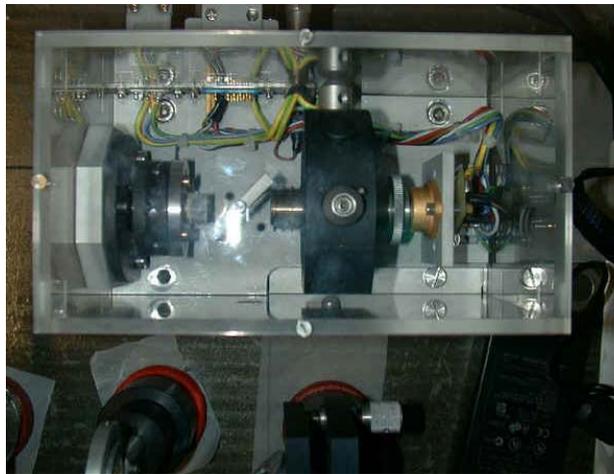


SLM grazie al filtraggio spettrale nel risonatore ottico "monolitico"

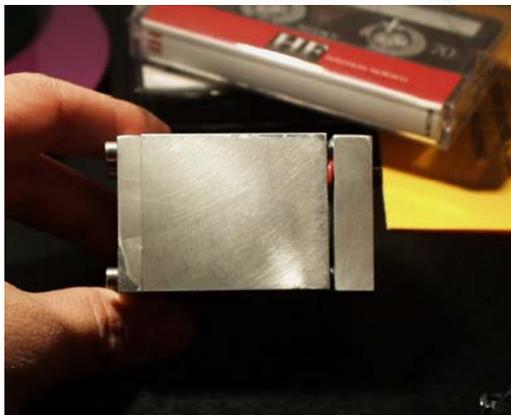
# Laser a $1.5 \mu\text{m}$ narrow-linewidth



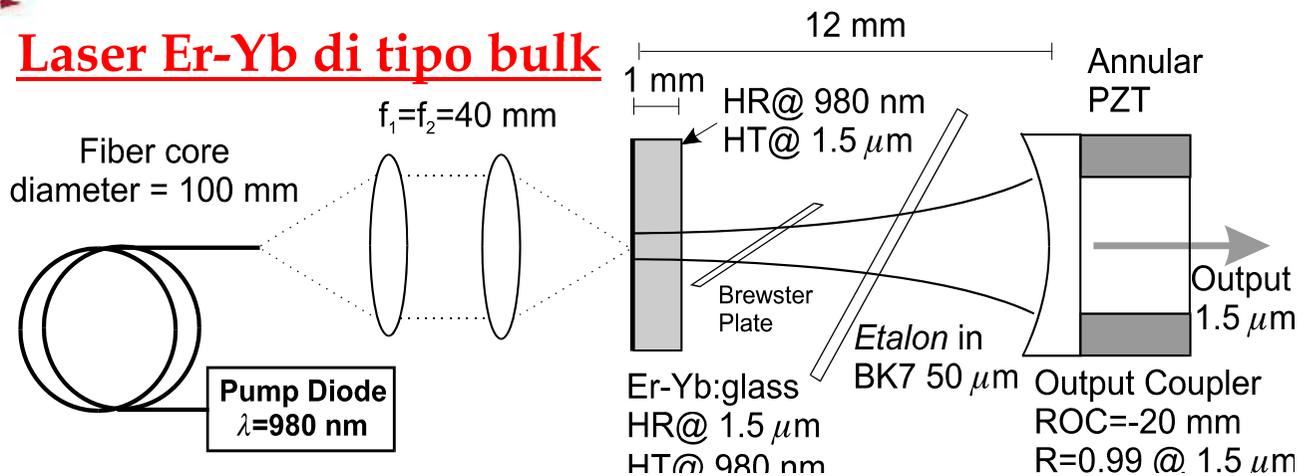
## Laser a cavità estesa (ECLD)



## Laser a Er in fibra



## Laser Er-Yb di tipo bulk



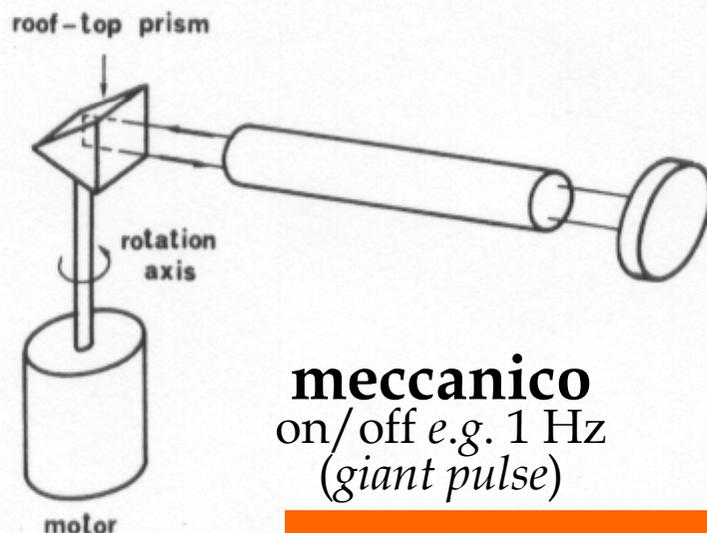
## Diapositiva 43

---

- CS3** incluso questo lucido è terminata la 3a lez 04-05 in aula GR.1.4  
Cesare Svelto; 24/03/2005
- CS9** incluso questo lucido è terminata la 2a lez 05-06 in aula F.1.2  
Cesare Svelto; 22/03/2006
- CS11** incluso questo lucido è terminata la 2a lez 07-08 in aula E.G.5  
Cesare Svelto; 18/03/2008

# Laser impulsati: *Q-switching*

A basso  $Q$  si può salire di molto con l'inversione ottenendo un  $\Delta N$  ben superiore a  $\Delta N_{th}$

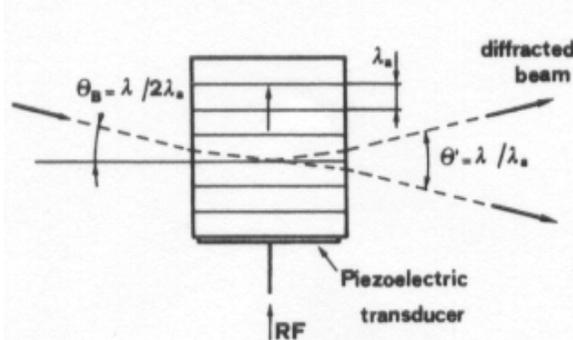
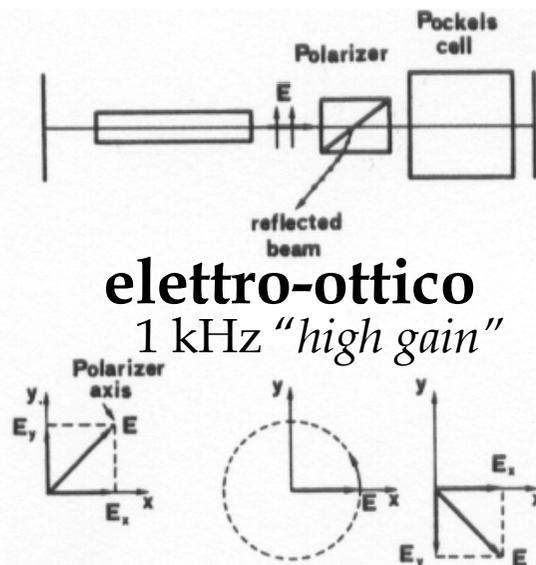


**meccanico**  
on/off e.g. 1 Hz  
(giant pulse)

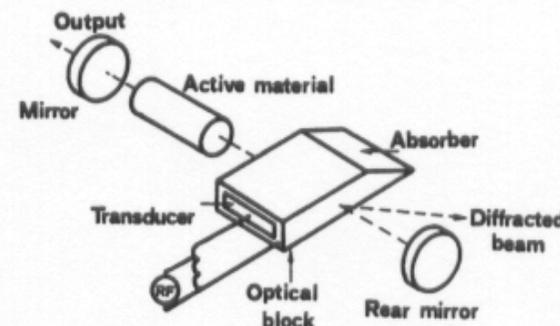
Tutta l'energia di pompa accumulata nel materiale attivo viene liberata quando il risonatore "è allineato" (ad alto  $Q$ )

intervallo  $\tau_p$  tra impulsi successivi: dipende dallo *switch*  
durata dell'impulso  $\Delta\tau_p$ : dipende dal mat. attivo (10 ns)  
*duty cycle* ( $\Delta\tau_p/\tau_p$ ) basso  $\Rightarrow$  potenza di picco alta (MW)

**elettro-ottico**  
1 kHz "high gain"



**acusto-ottico**  
10-100 kHz "low gain"



# Laser impulsati: *mode locking*

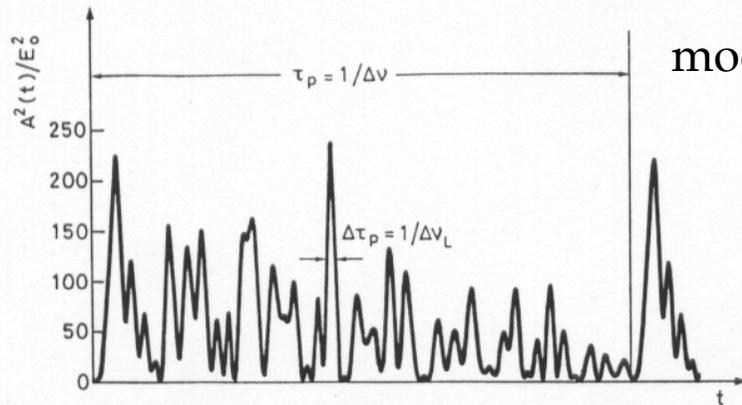


FIG. 8.15. Example of time behavior of the squared amplitude of the total electric field,  $|A(t)|^2$ , for the case of 51 oscillating modes, all with the same amplitude  $E_0$  and with random phases.

modi longitudinali agganziati in fase

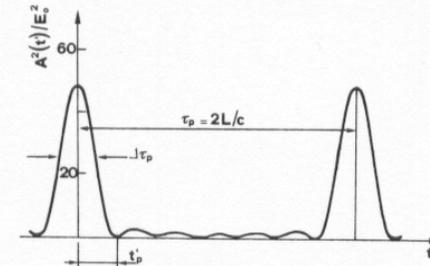
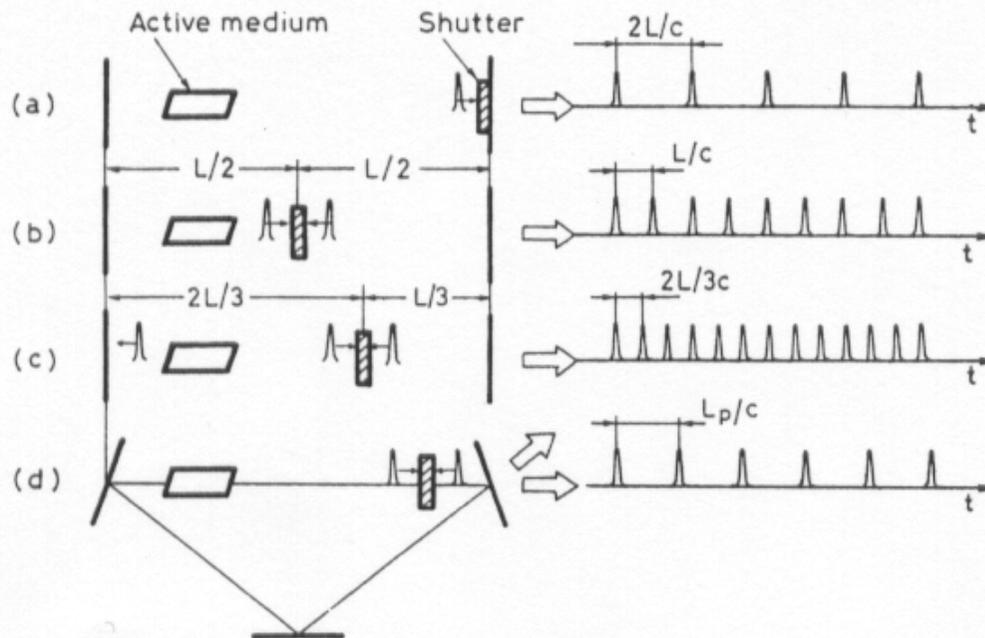


FIG. 8.17. Time behavior of the squared amplitude of the electric field for the case of seven oscillating modes with locked phases and equal amplitudes,  $E_0$ .



$\tau_p = 2L/c$  (round trip)  
 $f_{\text{rep}} = 1/\tau_p$  (100 MHz - 10 GHz)  
 $\Delta\tau_p = 1/B_{\text{laser}}$  (10 ps - 100 fs)  
 $P_{\text{peak}}$  molto alta (anche >GW)

# Laser (in *mode locking*) a femtosecondi

**MenloSystems**

Precision Made in Germany

Products

Applications

Home > →Products →fs Lasers →1560-nm Er-doped lasers → M-Fiber Femtosecond Laser

Overview

Specifications

Options

Applications



Er-doped femtosecond oscillator and optional amplifier at 250 MHz repetition rate

## M-Fiber Femtosecond Laser

### M-Fiber Femtosecond Laser

Boost up your optical power with the models of the M-Fiber series erbium-doped fiber lasers. They are running at 250 MHz repetition rate on our scientific platform, delivering pulses with power levels above 400 mW.

The passively mode-locked state-of-the-art laser offers turnkey operation through embedded microcontroller. Your ideal choice for demanding applications in the ultrafast world of science and industry.

### Advanced Features and Benefits

- ▶ average output power >400 mW @ 250 MHz
- ▶ pulse length <90 fs
- ▶ synchronization to external clock signal
- ▶ highest stability, reliable operation
- ▶ truly turnkey operation by self-starting modelocking mechanism
- ▶ embedded microcontroller for trouble-free operation
- ▶ long lifetime and low cost of ownership

$$\tau_p = L_f/c \text{ (round trip)}$$

$$f_{\text{rep}} = 1/\tau_p \text{ (250 MHz)}$$

$$L_f = \tau_p \cdot c = \tau_p / f = 1.2 \text{ m}$$

$$\Delta\tau_p = 1/B_{\text{laser}} \text{ (<90 fs e.g. 80 fs)}$$

$$P_{\text{ave}} = 10 \text{ mW} / 400 \text{ mW (e.g. 200 mW)}$$

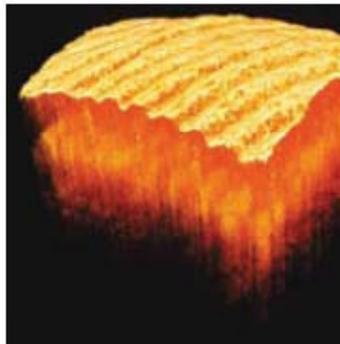
$$P_p = P_{\text{ave}} [T_{\text{rep}}/\tau_p] = 200 \text{ mW} [4 \text{ ns}/80 \text{ fs}] = 100 \text{ kW (con } P_{\text{elet}} = 100 \text{ W)}$$

# Applicazioni dei laser a femtosecondi



## Medical Research

Ultrafast lasers open up new possibilities in the medical technology of micro surgery. They interact with matter in a way that is fundamentally different from all other lasers, e.g. providing the capability to precisely cut three-dimensional structures in the tissue volume. When deployed at lower, non-ablative energy levels, ultrafast light can trigger molecular and cellular phenomena with broad implications for medical treatments.



## Optical Coherence Tomography

Optical coherence tomography (OCT) is an optical signal acquisition and processing method allowing extremely high-quality, micrometer-resolution and three-dimensional images within optical scattering media (e.g. biological tissue). Axial resolution of an OCT system is inherently connected to the probe light bandwidth. Recent developments have shown that ultra wide spectra can be generated when small core diameter fibers are irradiated by femtosecond pulses. A supercontinuum is produced by highly non-linear effects within a long interaction region, confined by the waveguide.



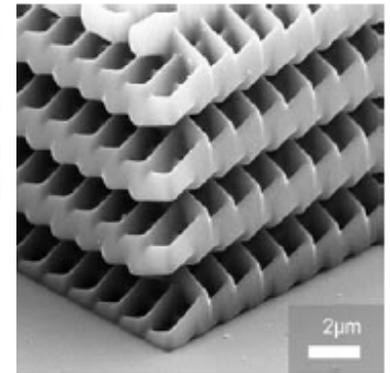
## Spectroscopy

The methods of high resolution spectroscopy as well as time resolved laser spectroscopy have added significantly to our understanding of atoms and molecules as well as their interaction among each other. E.g. atomic and molecular elementary reactions, such as molecular oscillations, chemical reactions and the formation of transitional stages take place in a period of femtoseconds. To directly observe, analyze or even manipulate these phenomena ultrafast lasers are adequate tools to provide durations on the same time scale as elementary reactions.



## Frequency Metrology

Optical frequency combs revolutionized the frequency metrology in the last years as they benefit from the robustness and reliability of ultrafast fiber lasers. These lasers create highly correlated light pulses that have a spectrum that consists of an evenly spaced frequency comb of hundreds of thousands of sharp spectral lines. The patented frequency comb technology has received highest recognition with the award of the Nobel Prize in Physics 2005 to Prof. Theodor W. Hänsch, co-founder of Menlo Systems. To this day, the comb systems are the most precise measurement tool offering 14 digits resolution.

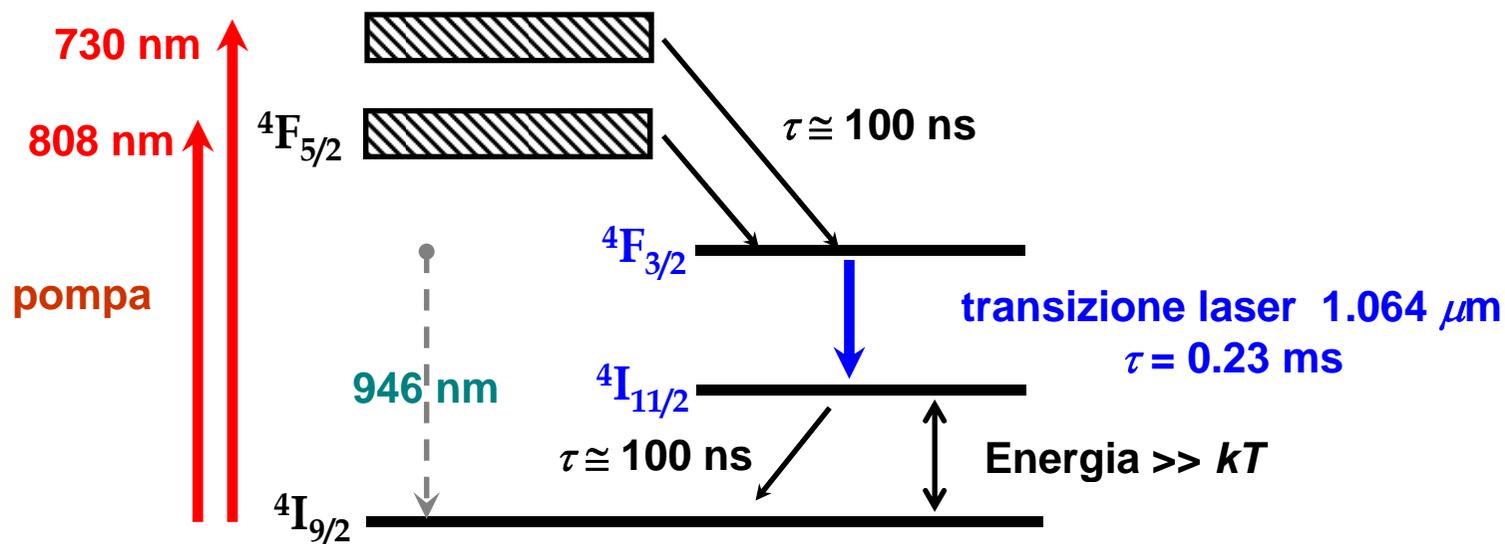


## Micromachining

When micro material processes permit only highest quality standards, lowest production tolerances and best material requisitions, the ultrafast laser is generally applied. Applications for these lasers range from high-precision ablation of metals to direct laser writing of photosensitive materials in three dimensions.

# Proprietà del laser a Nd:YAG

- Livelli energetici ione  $\text{Nd}^{3+}$  in matrice YAG ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ )



- Drogaggio dell'ordine di 1-2 % ( $\text{Nd}^{3+}$  sostituisce  $\text{Y}^{3+}$ )
- Banda di guadagno  $\Delta\nu = 125 \text{ GHz}$  ( $\sim 0.4 \text{ nm}$ ) [40 $\times$  in vetro]
- Efficienza differenziale 3÷5 % (lampade) e >20 % (diodi)

# Laser a Nd:YAG impulsato

$$\lambda \nu = c \Rightarrow \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = -\frac{\Delta \nu}{\nu}$$

$\lambda \sim 1 \mu\text{m}$  e  $\nu \sim 300 \text{ THz}$

$\Delta \lambda_{\text{YAG}} \sim 0.4 \text{ nm}$  e  $\Delta \lambda_{\text{glass}} \sim 40 \times \Delta \lambda_{\text{YAG}} \sim 16 \text{ nm}$

$$\Delta \nu_{\text{YAG}} = -\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \nu \approx \frac{0.4 \text{ nm}}{1064 \text{ nm}} \cdot 300 \text{ THz} \approx 120 \text{ GHz} \approx 125 \text{ GHz}$$

$$\Delta \nu_{\text{glass}} = -\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \nu \approx \frac{16 \text{ nm}}{1064 \text{ nm}} \cdot 300 \text{ THz} \approx 4800 \text{ GHz} \approx 5 \text{ THz}$$

Operando in regime di *mode-locking* si ha  $\Rightarrow$

$$\Delta \tau_{\text{p,YAG}} \approx \frac{1}{\Delta \nu_{\text{YAG}}} \approx 8 \text{ ps}$$

$$\Delta \tau_{\text{p,glass}} \approx \frac{1}{\Delta \nu_{\text{glass}}} \approx 200 \text{ fs}$$

# Caratteristiche dei Laser di impiego comune

Laser	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	P (W)	Dimensioni (m)	Efficienza $\eta$ (%)	Costo (€)
He-Ne	0.632 (rosso)	$10^{-3}$ - $10^{-2}$	0.1-1	0.1	100-2000
Nd:YAG	1.064	200 (CW) $10^7$ (peak)	1 <b>0.1</b>	1-10 <b>33</b>	50000 <b>10000</b>
CO <sub>2</sub>	10	$10^4$ (CW) $10^7$ (peak)	1	10-20	50000
Semiconduttore	0.45-1.6	<b><math>10^{-3}</math>- 1</b>	$10^{-3}$	50	10-10000

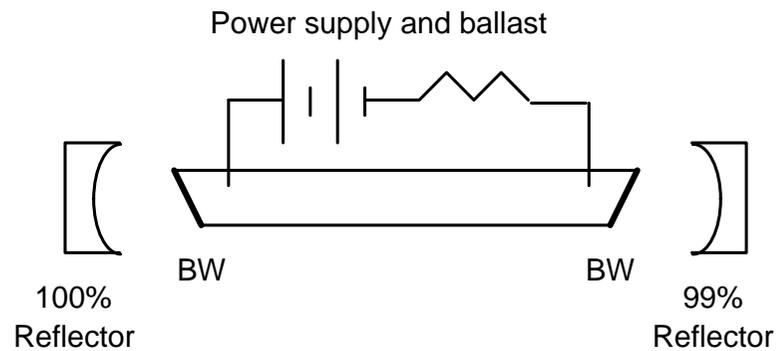
*$P_p = 10^9$  W in mode-locking*

*diode-pumped*

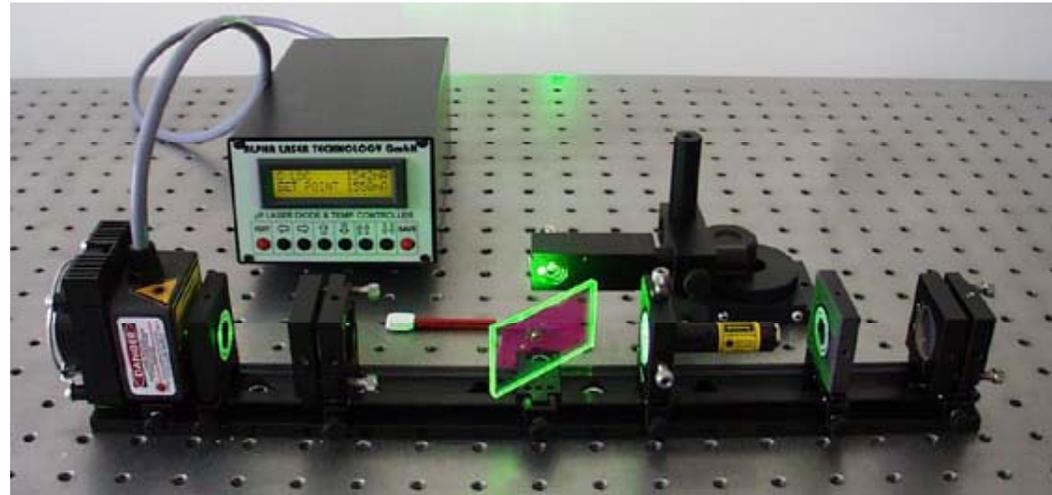
# Esempi di laser "comuni": He-Ne



He-Ne Laser System



# Esempi di laser “comuni”: Nd:YAG 2×



An ultra bright pointer is now on the market [class IIIA] (~5 mW at the green 532 nm wavelength): an intracavity frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser with blocked IR.

