



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE,
FISICHE E NATURALI

Amplificatori ottici



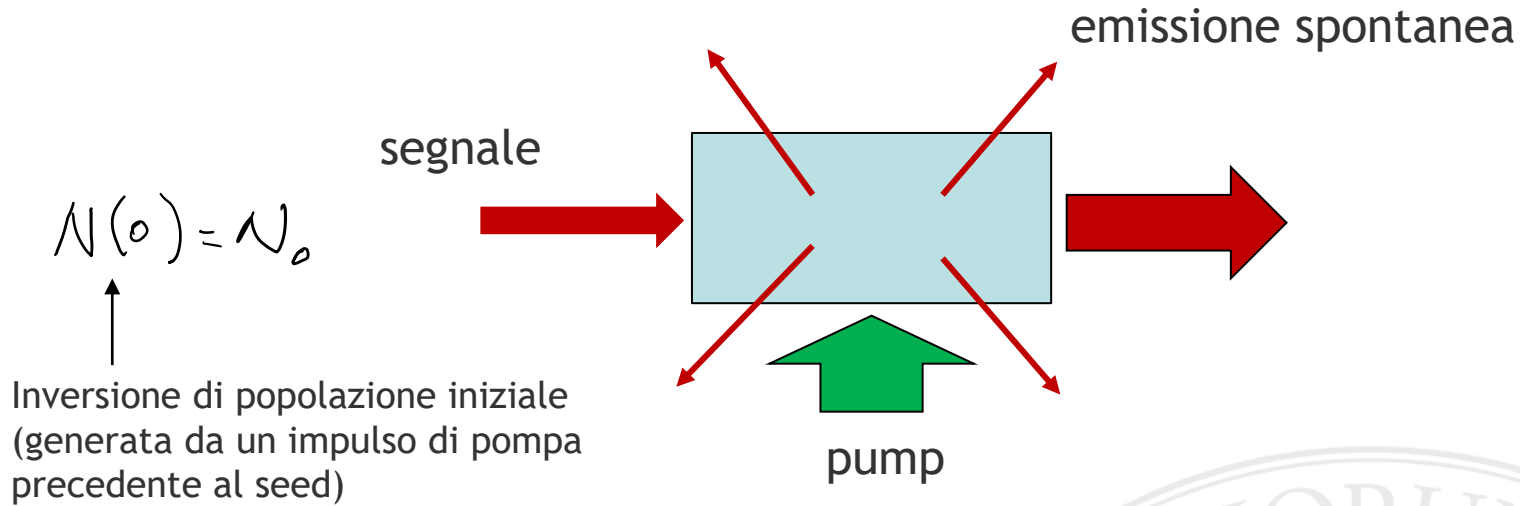
Simone Cialdi

Outline

- Equazioni fondamentali per gli amplificatori
- **Amplificatori rigenerativi**
 - Equazioni per i rigenerativi
 - Esempi di apparati commerciali
 - Mezzi attivi a disco sottile
- **Amplificatori Multipasso**
 - Equazioni per i multipasso
 - Esempi lab internazionali
- **Amplificatori in Fibra**
 - Livelli del mezzo attivo
 - Equazioni per gli amplificatori in fibra
 - Simulazioni ed esempi



Equazioni fondamentali per gli amplificatori:



$$\frac{dN}{dt} = - \frac{I}{\tau_s} N - \frac{I}{\tau} N$$

Emissione stimolata
Emissione spontanea

$$\frac{1}{\tau_s} = \nu \frac{\rho}{h\nu} \sigma$$

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

$$\rho = \frac{I}{\nu}$$

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{\sigma}{h\nu} I N - \frac{I}{\tau} N$$

$$I_{SAT} = \frac{h\nu}{\sigma \tau}$$

Il rate dell'emissione stimolata deve essere maggiore di quello relativo all'emissione spontanea. Quindi $I > I_{sat}$



Equazioni fondamentali per gli amplificatori:

numero di fotoni per unità di volume

$$\frac{dX}{dt} = \frac{1}{\tau_s} N$$

densità di energia

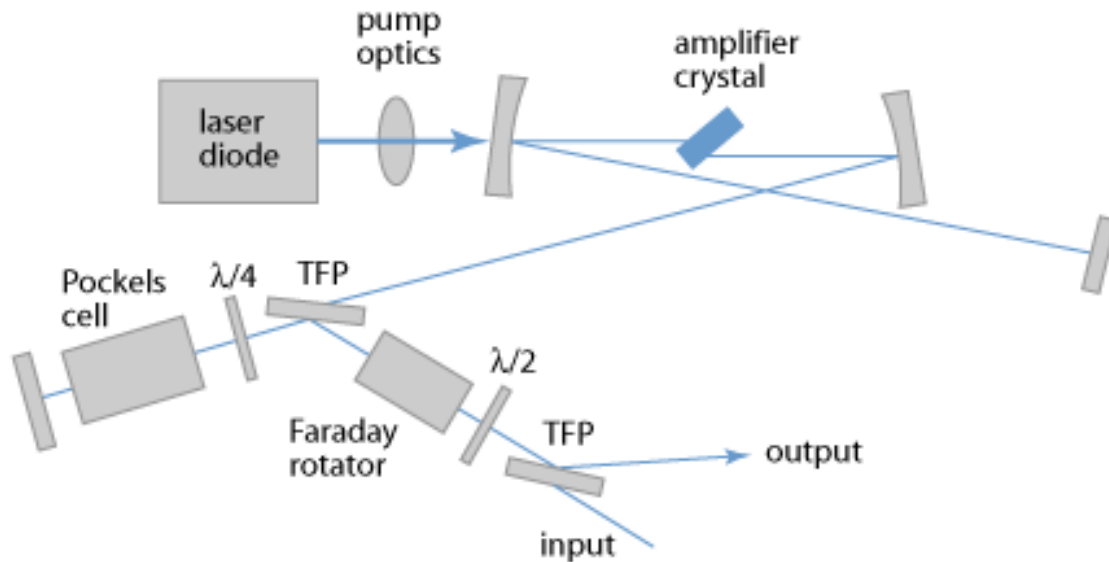
$$X = \frac{\rho}{h\nu} = \frac{I}{\nu h\nu} \quad dt = \frac{dz}{v}$$

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

Qui abbiamo trascurato l'apporto dell'emissione spontanea (che nel caso di un cristallo bulk sta su tutto l'angolo solido). Per un'analisi completa è però necessario considerare anche l'amplificazione dell'emissione spontanea (ASE).

In queste equazioni abbiamo considerato solo l'emissione stimolata indotta dal segnale. In generale sarà necessario considerare i processi di assorbimento ed emissione stimolati indotti sia dal segnale che dalla pompa (vedere il caso dell'amplificatore in fibra). Ma formalmente le equazioni rimangono queste dopo aver inserito le opportune σ relative ai vari processi..





La dimensione dello spot sul cristallo è quella del modo della cavità. Quindi la dimensione è piccola, ovvero, le energie in gioco sono piccole.

Con questo tipo di amplificatore è possibile ottenere grandi guadagni (fattore 1000 circa) a bassa energia finale (μJ circa)

Operating Principle of a Regenerative Amplifier

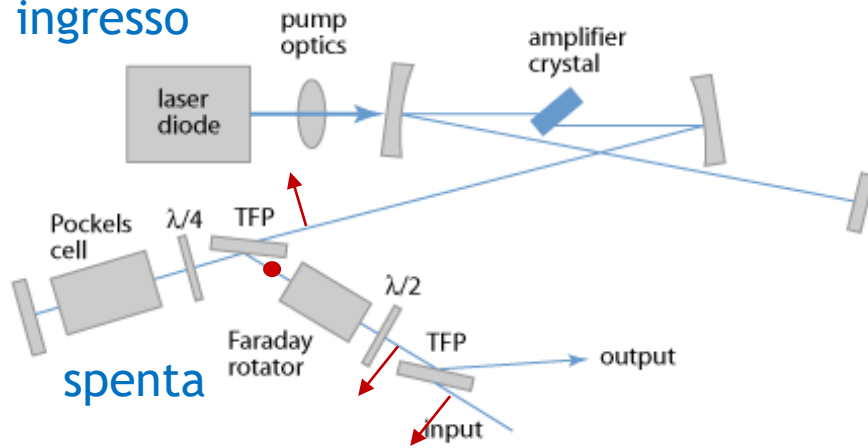
The principle of operation can be understood as follows:

- First, the gain medium is **pumped** for some time, so that it accumulates some energy.
- Then, the initial pulse is injected into the resonator through a port which is opened for a short time (shorter than the round-trip time) with an **electro-optic** (or sometimes **acousto-optic**) switch.
- After that, the pulse can undergo many (possibly hundreds) of resonator round trips, being amplified to a high energy level.
- Finally, the pulse is released from the resonator. This can be achieved either with a second electro-optic switch, or with the same one as used for coupling in.

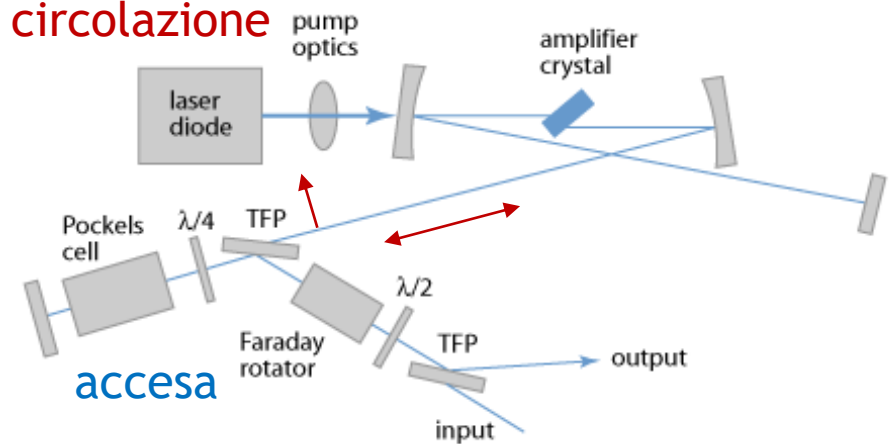
Amplificatori rigenerativi

descrizione delle fasi di ingresso, circolazione e uscita

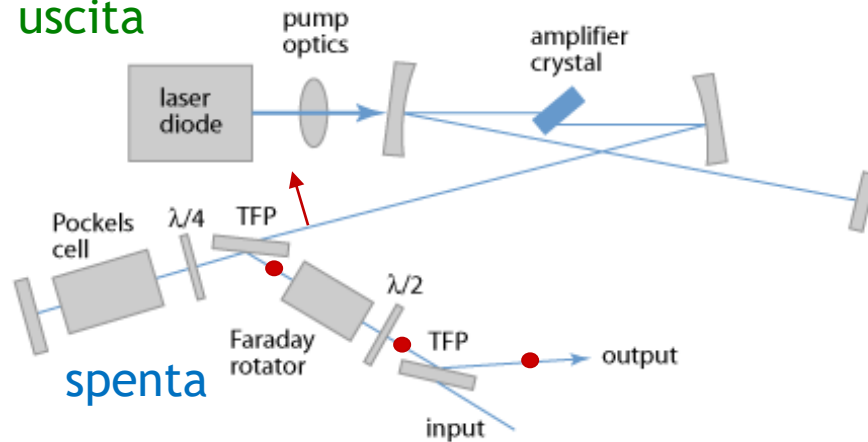
ingresso



circolazione



uscita



Pockels cell: se è spenta la polarizzazione dopo la $\lambda/4$ si inverte ($\lambda/4$ orientata a 45°)
Farady rotator: ruota di 45° in modo asimmetrico.
 $\lambda/2$: ruota di 45°



Equazioni di riferimento per l'amplificatore rigenerativo

L'impulso fa circa 100 round trip in cavità (circa $10\text{ns} \times 100 = 1\mu\text{s}$ da confrontare con il tempo di emissione spontanea)

Per ogni passaggio l'inversione di popolazione diminuisce in modo perturbativo. Quindi in prima approssimazione la considero costante per singolo passaggio. Partendo dalle equazioni fondamentali ottengo:

$$\frac{dI}{dt} = \sigma N I \quad \longrightarrow \quad I_{n+1} = I_n + \sigma N_n L \quad \Delta I_{n+1} = \sigma N_n L$$

$$\Delta N_{n+1} = - \frac{\Delta S_{n+1}}{h\nu} \frac{V_p}{V_c} = - \frac{\Delta I_{n+1}}{v h \nu} \frac{L_p}{L} = - \frac{\sigma L_p}{v h \nu} N_n - \frac{t_{rt}}{\tau} N_n$$

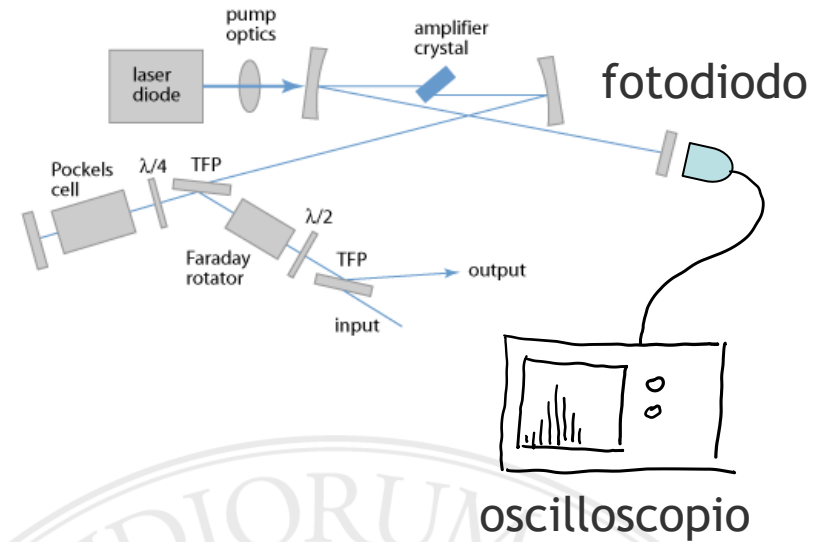
lunghezza impulso

Fotoni aggiunti per passaggio divisi per il volume del cristallo attraversato dal modo

Emissione spontanea (t_{rt} tempo di round trip in cavità)

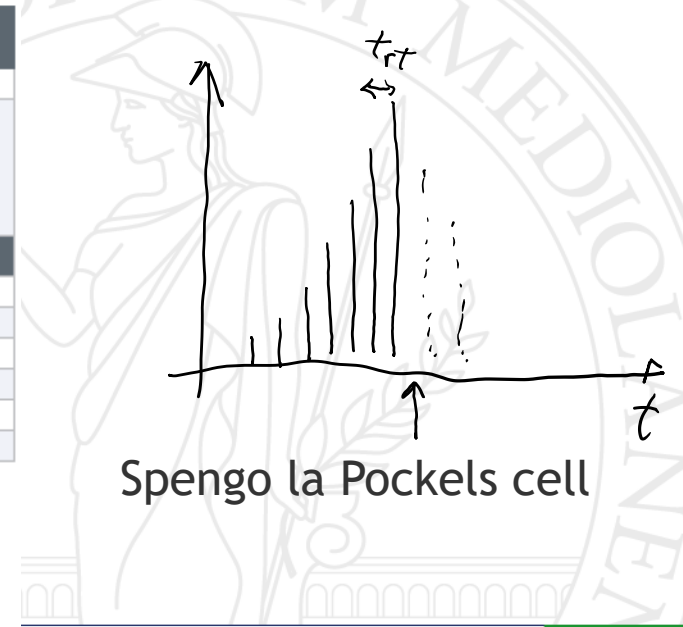


Esempio di amplificatore rigenerativo commerciale

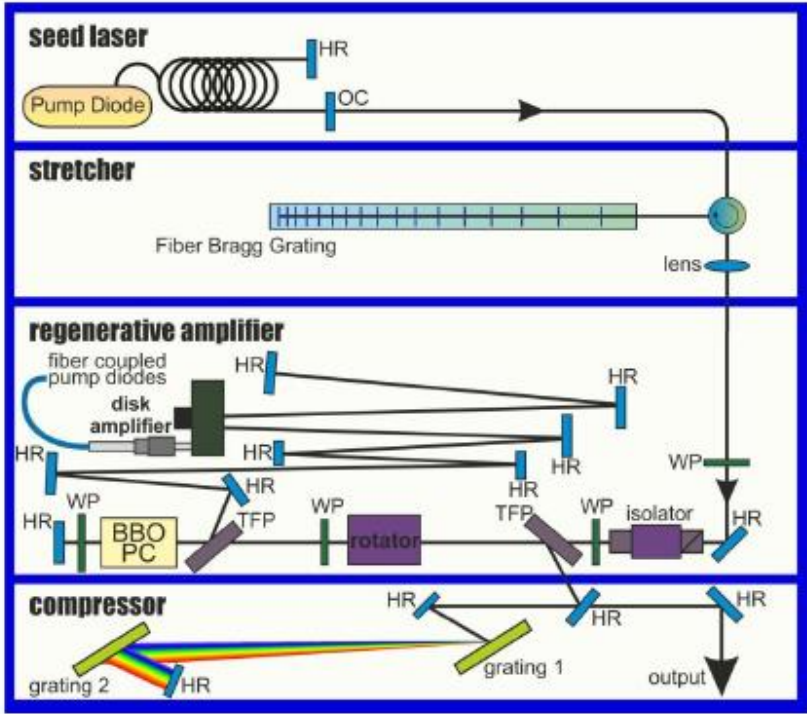


SPECIFICATIONS FOR SYSTEM CONFIGURATIONS	12W Pump ¹		10W Pump ²	
	100	250	100	250
Repetition-Rate ³ (kHz)				
Pulse Energy (μ J)				
RegA 9000 ⁴	5	4	4	3
RegA 9000 ⁵	6	6	4	3
RegA 9040 ⁶	6	6	4	3
RegA 9050 ⁶	6	6	4	3
OPTIONS	RegA 9000	RegA 9050	RegA 9040	
Pulse Width (fs) (FWHM)	<160	<60	<40	
Polarization	linear, horizontal, 500:1			
Energy Stability ⁷ (% rms)	<1			
Average Power Drift ⁸ (% peak-to-peak)	<4			
Contrast Ratio	>500:1 pre-pulse, >250:1 post pulse; other pulses >1000:1			
Beam Quality (M^2)	<2 ⁹	<1.5	<1.3	

¹ Assumes full 12W of Verdi power used to pump RegA.
² Assumes full 10W of Verdi power used to pump RegA.
³ Customer adjustable from 10 to 300 kHz typical. Available option for 500 kHz operation.
⁴ RegA 9000 seeded by Mira or Chameleon Vision-S.
⁵ RegA 9000 used with optional, external stretcher/compressor available at additional cost. Seeded with Mira or Chameleon Vision-S.
⁶ RegA 9040 and 9050 designs incorporate external stretcher/compressor and are seeded with Vitara.
⁷ Measured from 10 Hz to 10 MHz.
⁸ Power drift over two hours (after 30 min. warm-up); crystal temperature is controlled with supplied chiller, room temperature stable $\pm 1^\circ\text{C}$.
⁹ <1.3 with optional external stretcher/compressor.



Ultrafast Regenerative Amplifiers from TRUMPF



Per passare dai μJ ai mJ per impulso si possono usare i mezzi attivi a disco sottile ($100\text{-}200\mu\text{m}$) per minimizzare gli effetti termici.

Metzger et al., Opt. Lett. 34, 2123-2125 (2009)
 Sutter et al., Photonics West 8235-27 (2012)

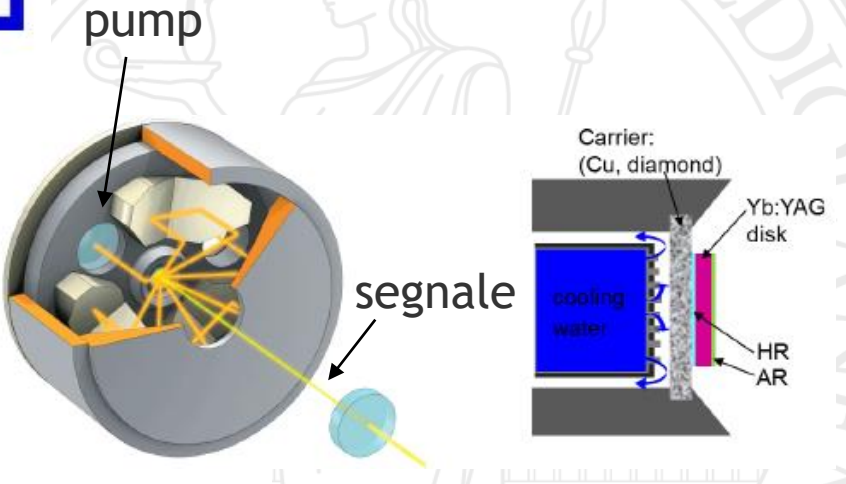
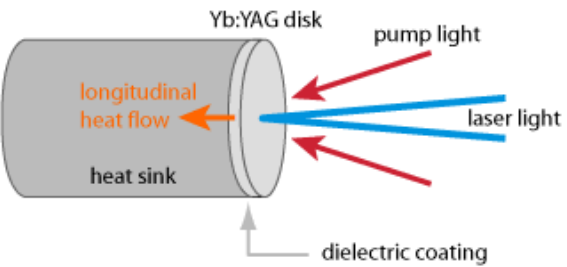


Figure 1: Schematic setup of a thin disk laser head. The pump optics (not shown) are arranged for multiple passes of the pump radiation. The heat is extracted in the longitudinal direction, which minimizes thermal lensing effects.

Amplificatore multipasso

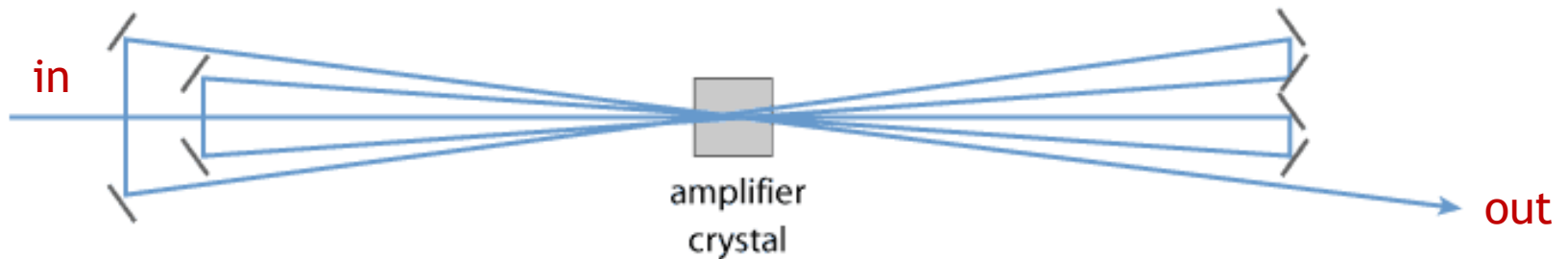


Figure 1: Setup of a multipass amplifier.

Questo tipo di amplificatore non è limitato dalla dimensione del modo di una cavità quindi è possibile usare spot e cristalli molto grandi. Tipicamente si ottengono guadagni medio-bassi ed energie molto elevate (anche 100J e in questo caso il cristallo dell'amplificatore deve essere raffreddato a temperature criogeniche)

Equazioni di riferimento per l'amplificatore multipasso

In questo caso la variazione di energia dell'impulso per singolo passaggio non è affatto perturbativa.

Inoltre è da considerare il fatto che tipicamente la lunghezza dell'impulso è maggiore della lunghezza del cristallo. Quindi l'ideale è un approccio numerico con un sistema di equazioni alle derivate parziali dove l'intensità dell'impulso dipende sia da z che da t :

$$\frac{dI}{dz} = \sigma N I \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial I}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial I}{\partial t} = \sigma N I$$

Se $N=0$ ho banalmente un impulso che propaga con velocità di gruppo v

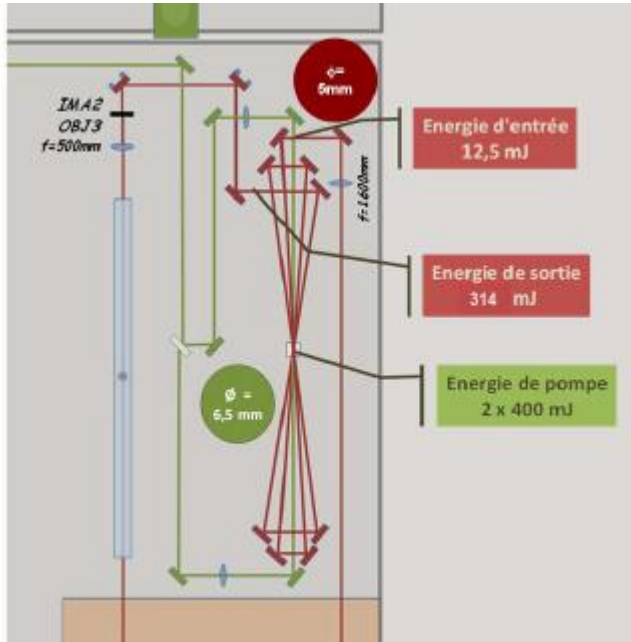
$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\sigma}{h\nu} I N - \frac{1}{\tau} N \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial N}{\partial t} + v \frac{\partial N}{\partial z} = -\frac{\sigma}{h\nu} I N - \frac{1}{\tau} N$$

Con la condizione che N è diverso da 0 solo per $0 \leq z \leq L$ e $N(0, z) = N_0$



Esempio: multipasso del laser APOLLON presso Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI) Parigi

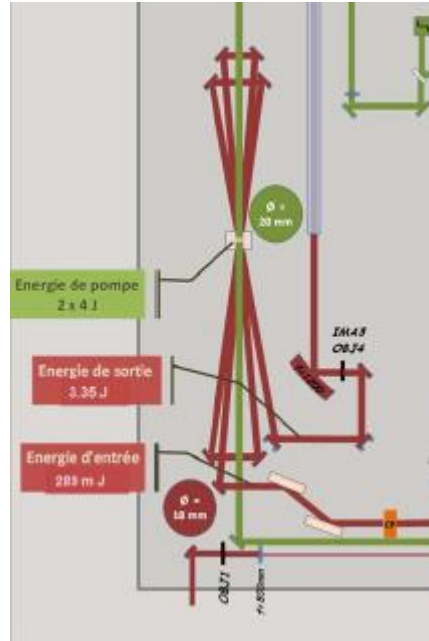
Stadio 1



The Ti:Sa crystal (15 mm long, 15 mm diameter, 92 % absorption and AR coated) is pumped by a Nd:Yag 532nm, 10Hz

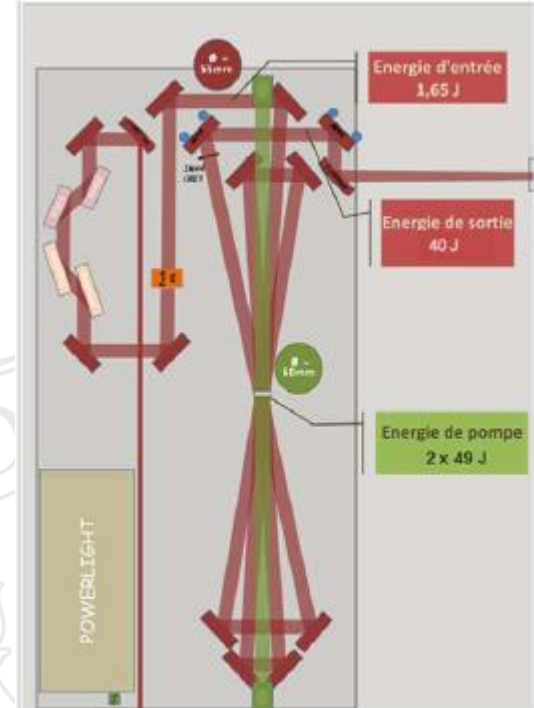
Sono necessari più stadi per garantire la saturazione ed evitare l'ASE

Stadio 2



The Ti:Sa crystal (20 mm long, 40 mm diameter) is pumped by a Nd:glass 527nm, 0.1Hz

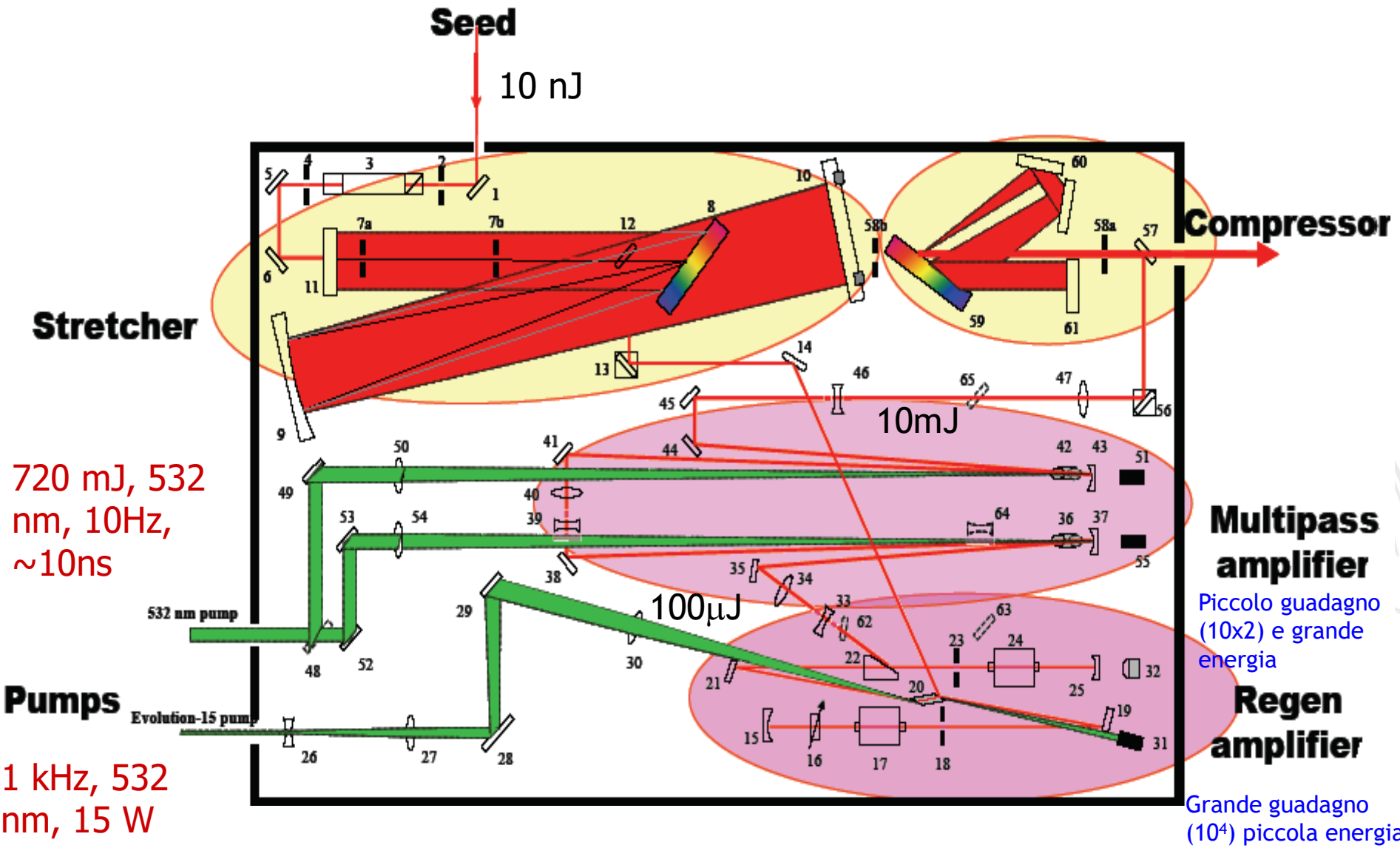
Stadio 3



The Ti:Sa crystal (25 mm long, 80 mm diameter) will be pumped by a Nd:glass. The Ti:Sa will be surrounded by an index matched liquid in contact with its edges. This ensures the cooling and at the same time avoids the transverse lasing effect.



Esempio: sistema amplificazione CPA (rigenerativo + multipasso) dei LNF per l'RF-gun del progetto SPARC



Compressor



Experiments are centered around the state-of-the-art BELLA petawatt laser facility, which provides 40 J pulses of 40 fs duration at a repetition rate of 1 Hz, as well as 10-60 terawatt (0.5-2.5 joule) systems at 10 Hz.

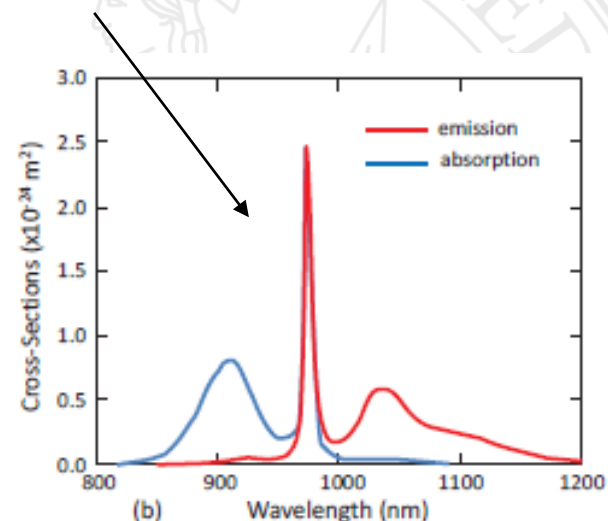
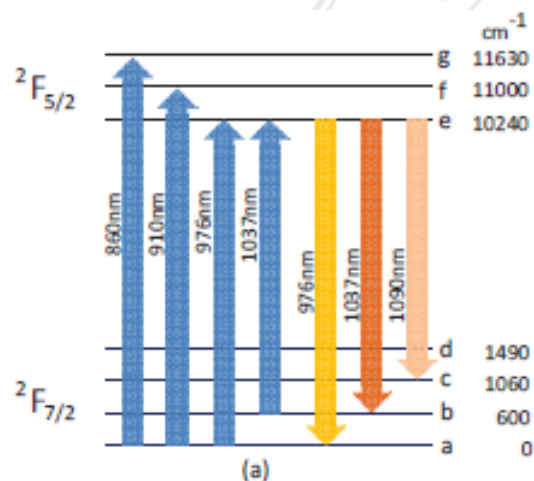
Amplificatore in fibra

Mezzo attivo: descriviamo il caso di una fibra di ossido di silicio drogata con Yb.

Il core della fibra è drogato con Al_2O_3 per aumentare l'indice di rifrazione e lo ione Yb^{3+} va a sostituire lo ione Al^{3+} .

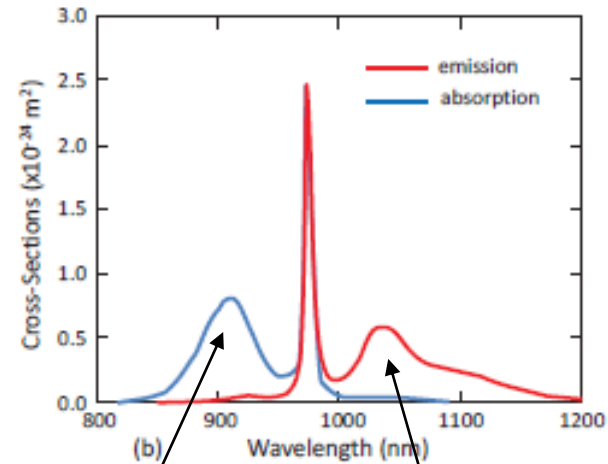
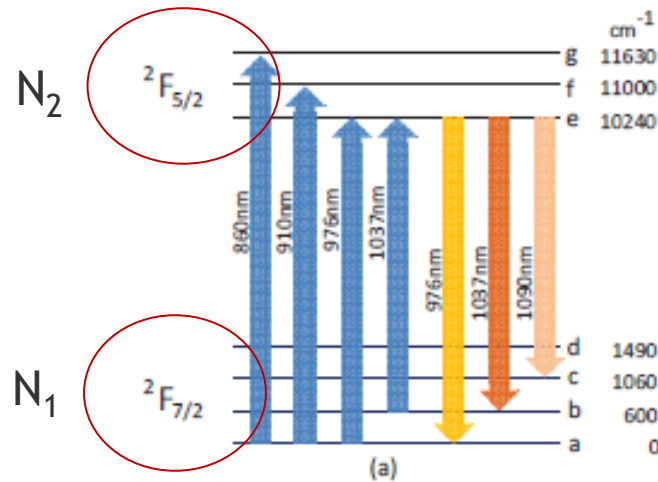
La configurazione elettronica dell'Yb è: $\text{Xe } 4f^{14} 6s^2$. Lo ione Yb^{3+} ha perso i due elettroni del livello 6s e un elettrone del livello 4f. Lo spin è 1/2 con degenerazione 2. Il momento angolare è 3 e quindi il livello fondamentale ha $J=3+1/2=7/2$. Nel livello eccitato un elettrone con $s_z -1/2$ passa da $m=3$ a $m=2$.

Nota: le sezioni d'urto di assorbimento e di emissione non sono uguali. Sono da considerare le transizioni non radiative che portano velocemente all'equilibrio termico. Quindi i livelli ad energia più alta vengono spopolati.



(a) Typical energy level diagram of ytterbium ion in silica, (b) typical emission and absorption cross-section in aluminosilicate fiber.

Equazioni dell'amplificatore in fibra



(a) Typical energy level diagram of ytterbium ion in silica, (b) typical emission and absorption cross-section in aluminosilicate fiber.

Ho solo assorbimento perchè il livello f è svuotato

Ho solo emissione perchè il livello b è svuotato

I sottolivelli dei livelli $2F_{5/2}$ e $2F_{7/2}$ vengono considerati come appartenenti allo stesso macrolivello (manifold) e si scrivono le equazioni in funzione delle popolazioni N_1 e N_2 considerando le sezioni d'urto per l'emissione e l'assorbimento come risulta dal grafico.

Equazioni dell'amplificatore in fibra

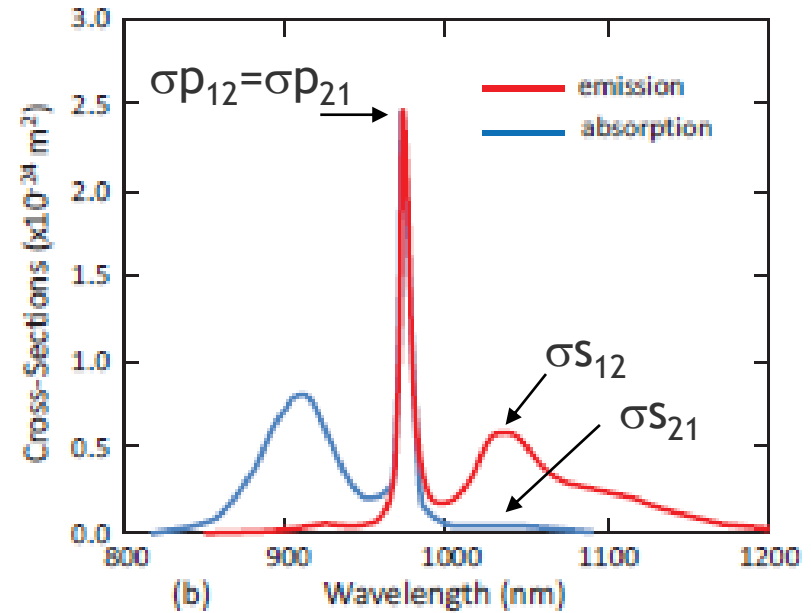
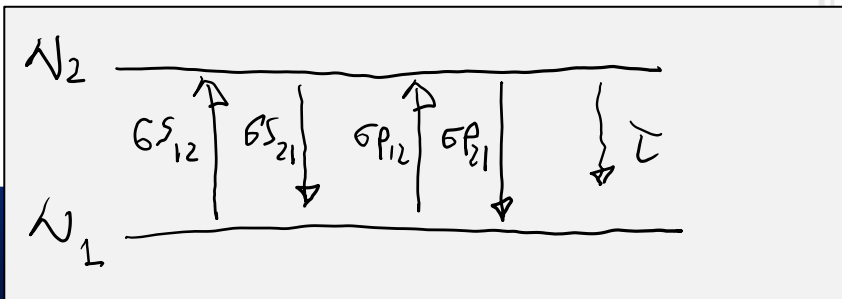
Per massimizzare l'efficienza quantica e quindi minimizzare i problemi termici consideriamo una pompa a 976nm e un segnale intorno a 1030nm

$$\frac{dI_S}{dz} = (\sigma_{S_{21}} N_2 - \sigma_{S_{12}} N_1) I_S$$

$$\frac{dI_P}{dz} = (\sigma_{P_{21}} N_2 - \sigma_{P_{12}} N_1) I_P$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{\sigma_{S_{21}} I_S}{h\nu_S} N_2 - \frac{\sigma_{P_{21}} I_P}{h\nu_P} N_2 + \frac{\sigma_{S_{12}} I_S}{h\nu_S} N_1 + \frac{\sigma_{P_{12}} I_P}{h\nu_P} N_1 - \frac{1}{\tau} N_2$$

$$N_{TOT} = N_1 + N_2$$

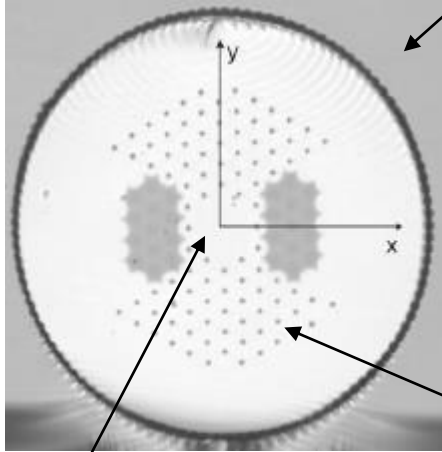


Notare che non è necessario che sia $N_2 > N_1$ per ottenere amplificazione

Adesso però è necessario capire meglio la geometria della fibra ed in particolare dove si trovano spazialmente segnale e pompa

Fibre double clad

esempio



cladding per la pompa



Core per la pompa ($200\mu\text{m}$) e cladding per il segnale

Core per il segnale ($40\mu\text{m}$)

Nota: per ottenere alte potenze medie (100W o più) e buona qualità spaziale (singolo modo) è necessario che il modo fondamentale del segnale sia molto grande (più di $10\mu\text{m}$). Quindi la differenza tra l'indice di rifrazione del core e del cladding deve essere molto piccola ma sotto controllo. Per fare questo esistono due tecnologie: fibre ottiche a cristalli fotonici (nella foto) e fibre drogata con nanoparticelle.

Nelle fibre double clad la pompa (che ha bassa qualità spaziale) viene focalizzata nel cladding del segnale. Il segnale che invece è di buona qualità spaziale viene focalizzato nel core. Il drogaggio con Yb (o altro) è solo nel core per il segnale.



Drogaggio della fibra double clad e sezione d'urto effettiva per la pompa

La pompa percorre il cladding ma viene assorbita solo nel core. Dobbiamo capire come si modificano le equazioni per considerare questo fatto.

Il primo step è trovare il drogaggio del core partendo dai dati della ditta

Specifications

Signal core	
Mode properties	Single mode
M ² @ 1064 nm (typical)	≤ 1.3
Mode field diameter @ 1064 nm	31 ± 2 μm
Mode field area (calculated)	760 ± 100 μm ²
NA @ 1064 nm	~ 0.03
Multimode pump core	
Numerical aperture @ 950 nm	0.60 ± 0.05
Pump absorption @ 915 nm	~ 3.5 dB/m
Pump absorption @ 976 nm (nominal)	~ 10 dB/m
Physical Properties	
Signal core diameter	~ 40 μm
Inner cladding diameter	200 ± 2 μm
Outer cladding diameter	450 ± 20 μm
Coating diameter	540 ± 30 μm
Outer and inner cladding material	Pure silica
Coating material, single layer	High temperature acrylate

Consideriamo l'assorbimento a 915nm: la pompa vede il drogaggio solo nel core quindi la sezione d'urto effettiva deve tenere conto del rapporto tra l'area del core e del cladding

$$\sigma_{eff} = \left(\frac{A_{core}}{A_{cladding}} \right)^2 \sigma_p(915nm)$$

$$3.5 = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

$$P_{out} = P_{in} e^{-\sigma_{eff} N_1 L}$$

← 1m

$$N_{tot} \sim N_1 = 2.5 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$$

Per quanto riguarda l'equazione per I_p va considerato che i fotoni generati per emissione stimolata nel core vengo distribuiti su tutta l'area della pompa. Inoltre, se consideriamo un treno di impulsi ad alto rep rate (per esempio 100MHz) il mezzo attivo lo vede come un fascio continuo ($\tau=0.8\text{ms}$), quindi ottengo:

$$\frac{dI_S}{dz} = (\sigma_{S_{21}} N_2 - \sigma_{S_{12}} N_1) I_S$$

$$\frac{dI_P}{dz} = (\sigma_{P_{21}} N_2 - \sigma_{P_{12}} N_1) I_P \left(\frac{\text{core}}{\text{clad}} \right)^2$$

$$-\frac{\sigma_{S_{21}}}{h\nu_S} I_S N_2 - \frac{\sigma_{P_{21}}}{h\nu_P} I_P N_2 + \frac{\sigma_{S_{12}}}{h\nu_S} I_S N_1 + \frac{\sigma_{P_{12}}}{h\nu_P} I_P N_1 - \frac{1}{\tau} N_2 = 0$$

$$N_{\text{TOT}} = N_1 + N_2$$

equilibrio



Soluzione numerica: amplificatore pompato forward

core: 10 μ m, cladding 125 μ m

Potenza di ingresso 10mW

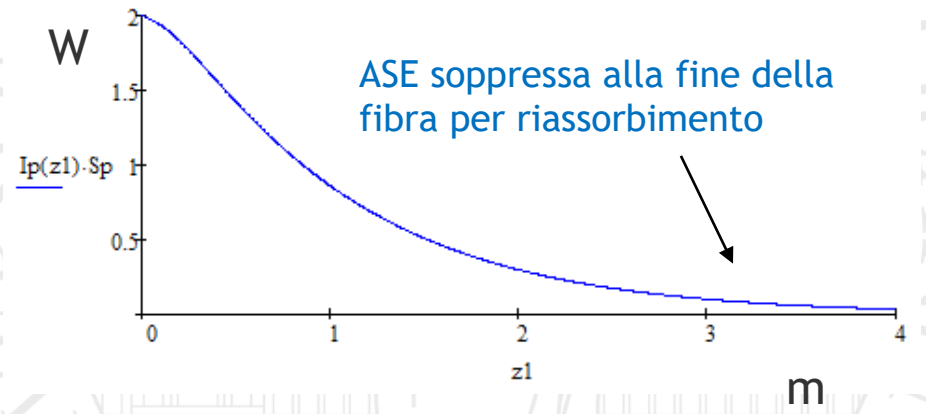
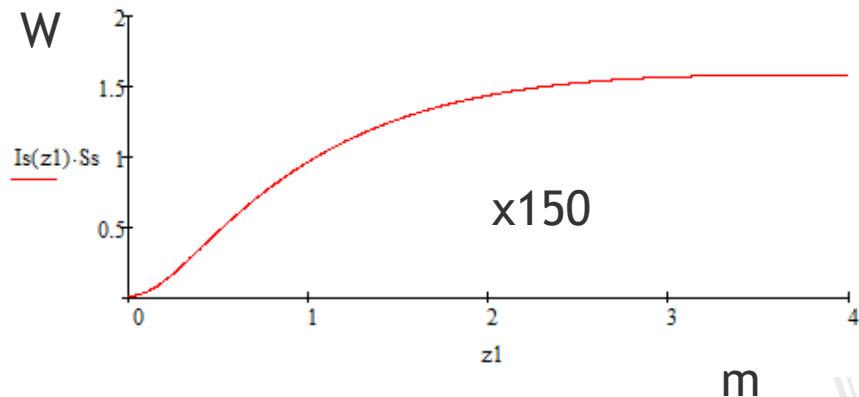
Potenza di pompa 2W



Item #	Cladding Geometry	Absorption @ 920 nm	Core Diameter	Cladding Diameter	Coating (Second Cladding) Diameter	Core NA	Cladding NA
YB1200-6/125DC-PM	Round	0.55 \pm 0.1 dB/m	7.0 \pm 0.5 μ m MFD	125 \pm 2 μ m	245 \pm 15 μ m	0.12 ^a	\geq 0.48
YB1200-10/125DC-PM		1.7 \pm 0.3 dB/m	10.0 \pm 1.0 μ m	125 \pm 2 μ m	245 \pm 15 μ m	0.080 \pm 0.005	\geq 0.48
YB1200-25/250DC-PM		2.4 \pm 0.5 dB/m	25.0 \pm 1.5 μ m	250 \pm 5 μ m	350 \pm 15 μ m	0.062 \pm 0.005	\geq 0.48

$$\frac{d}{du} y_s(u) = \left[\sigma_{21s} \left(\frac{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u)}{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u) + p_{21} \cdot y_p(u) + s_{21} \cdot y_s(u) + \frac{1}{\tau}} \right) - \sigma_{12s} \left(1 - \frac{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u)}{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u) + p_{21} \cdot y_p(u) + s_{21} \cdot y_s(u) + \frac{1}{\tau}} \right) \right] \cdot N_{tot} \cdot y_s(u)$$

$$\frac{d}{du} y_p(u) = \left[\sigma_{21p} \left(\frac{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u)}{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u) + p_{21} \cdot y_p(u) + s_{21} \cdot y_s(u) + \frac{1}{\tau}} \right) - \sigma_{12p} \left(1 - \frac{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u)}{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u) + p_{21} \cdot y_p(u) + s_{21} \cdot y_s(u) + \frac{1}{\tau}} \right) \right] \cdot N_{tot} \cdot y_p(u) \cdot \left(\frac{\text{core}}{\text{clad}} \right)^2$$



$$P = \frac{1}{2} \pi \omega^2 I$$

Soluzione numerica: amplificatore pompato backward

core: 40μm, cladding 200μm

Potenza di ingresso 2W

Potenza di pompa 100W

Fibra: pg. 19



$$\frac{d}{du} y_s(u) = \left[\sigma_{21s} \cdot \left(\frac{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u)}{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u) + p_{21} \cdot y_p(u) + s_{21} \cdot y_s(u) + \frac{1}{\tau}} \right) - \sigma_{12s} \cdot \left(1 - \frac{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u)}{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u) + p_{21} \cdot y_p(u) + s_{21} \cdot y_s(u) + \frac{1}{\tau}} \right) \right] \cdot N_{tot} \cdot y_s(u)$$

$$\frac{d}{du} y_p(u) = \left[\text{back} \cdot \sigma_{21p} \cdot \left(\frac{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u)}{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u) + p_{21} \cdot y_p(u) + s_{21} \cdot y_s(u) + \frac{1}{\tau}} \right) - \text{back} \cdot \sigma_{12p} \cdot \left(1 - \frac{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u)}{p_{12} \cdot y_p(u) + s_{12} \cdot y_s(u) + p_{21} \cdot y_p(u) + s_{21} \cdot y_s(u) + \frac{1}{\tau}} \right) \right] \cdot N_{tot} \cdot y_p(u) \cdot \left(\frac{\text{core}}{\text{clad}} \right)^2$$

back=-1

