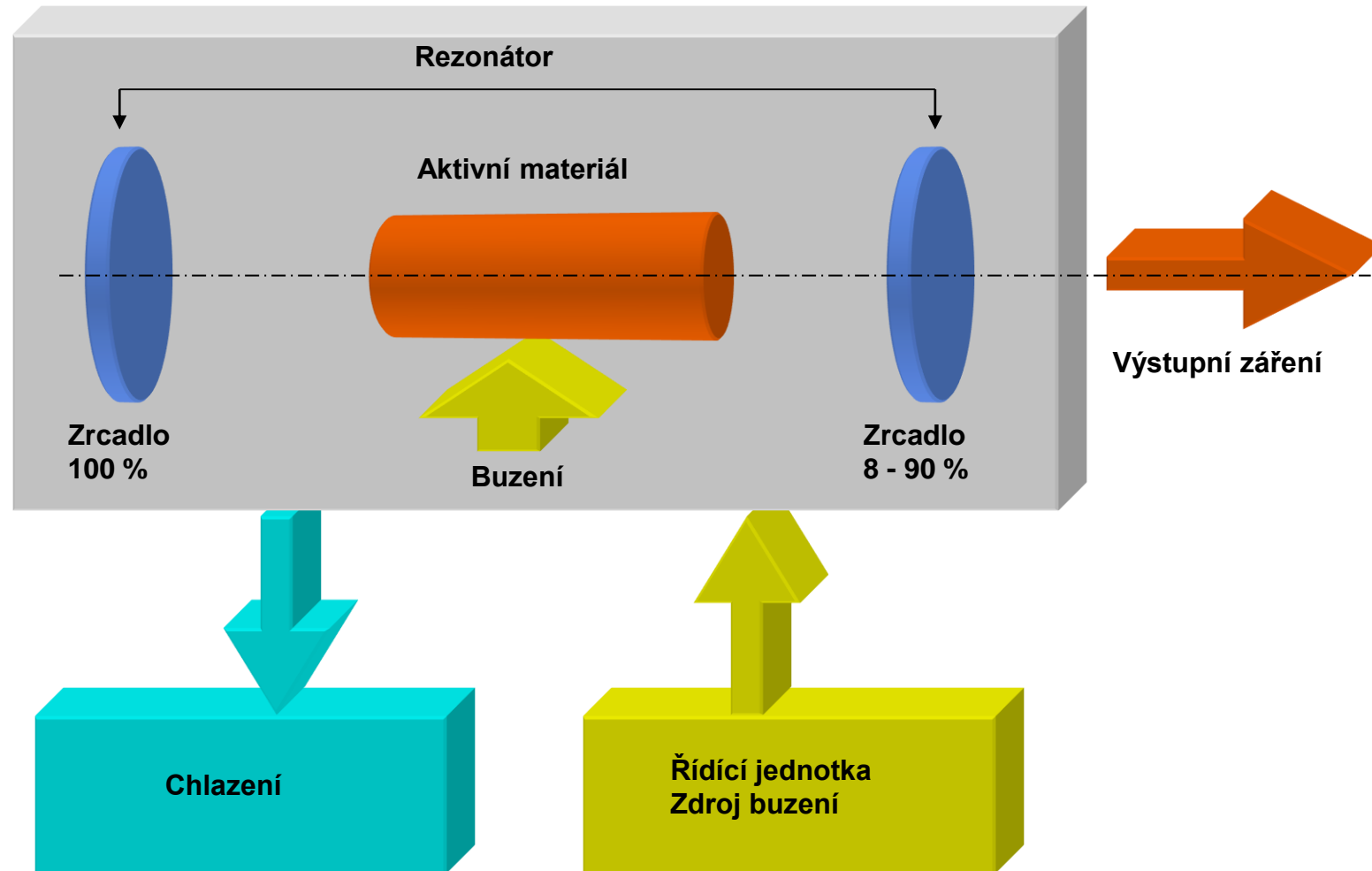


Lasery instrumentace

méně obvyklé předpony

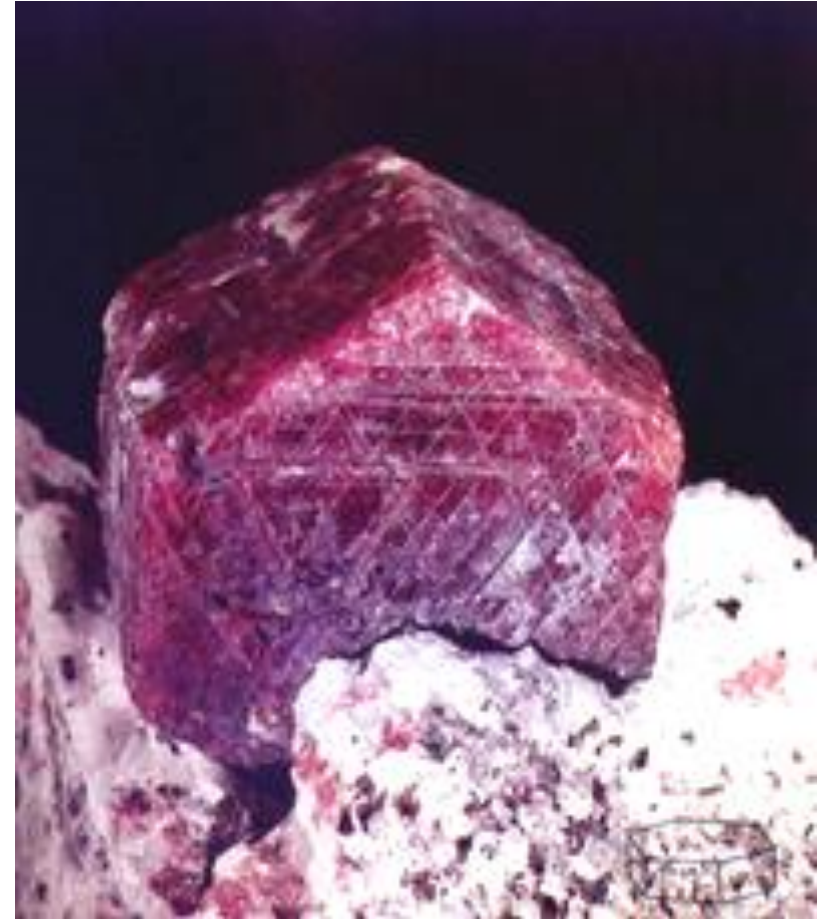
název	značka	poměr k výchozí jednotce
atto	a	10^{-18}
femto	f	10^{-15}
piko	p	10^{-12}
nano	n	10^{-9}
giga	G	10^9
tera	T	10^{12}
peta	P	10^{15}
exa	E	10^{18}

Pevnolátkový laser

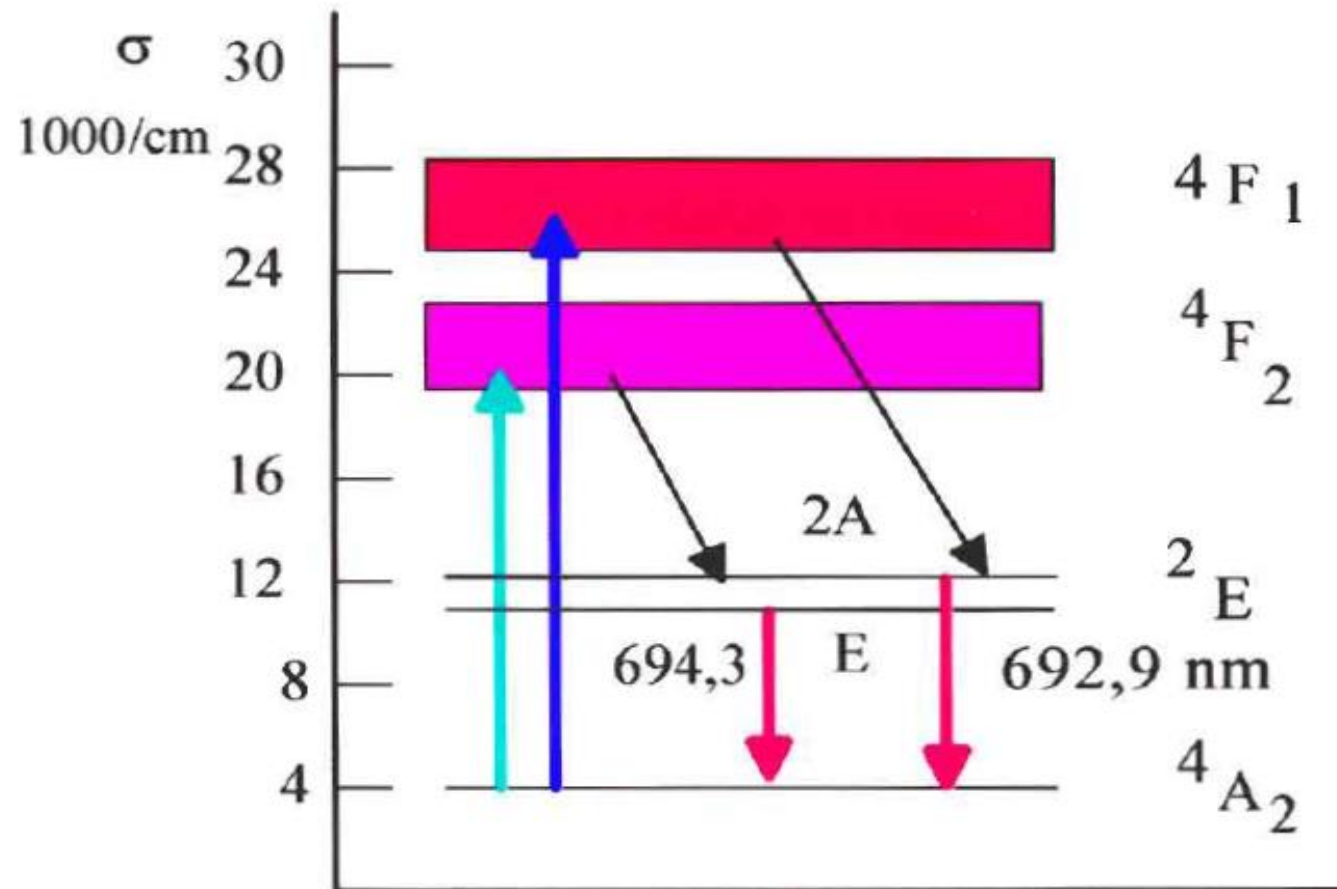


Rubínový laser ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$)

- První laser zkonstruovaný T. Maimanem v r. 1960.
- Používá se v impulsním režimu, výkon ve volně běžícím režimu do 10J (1ms), Q-spínaném režimu pak do 5J (1 – 10 ns)
- Pracuje jako tříhladinový systém

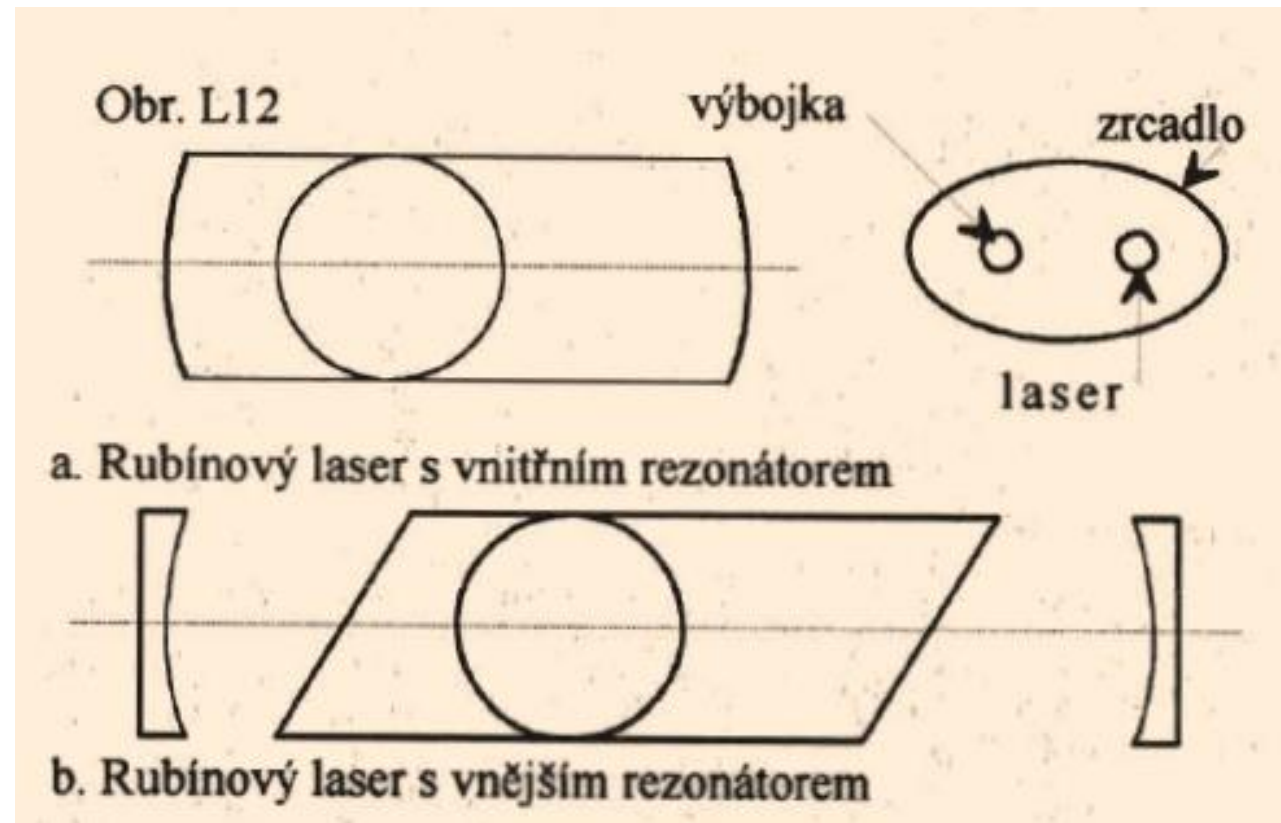


Energetický diagram chromu v rubínovém laseru



Rubínový laser

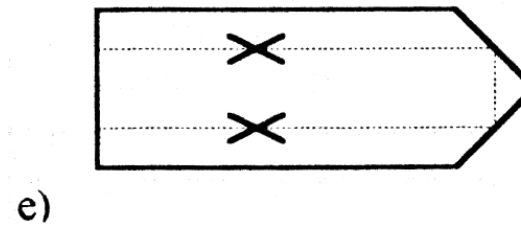
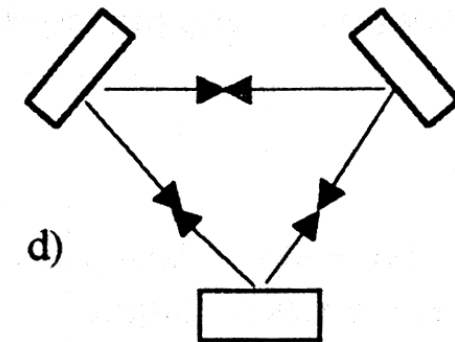
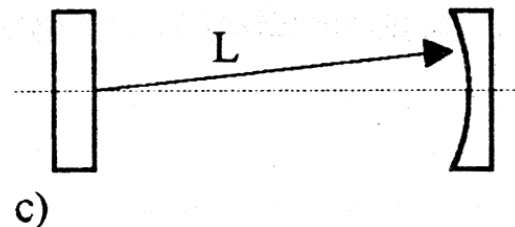
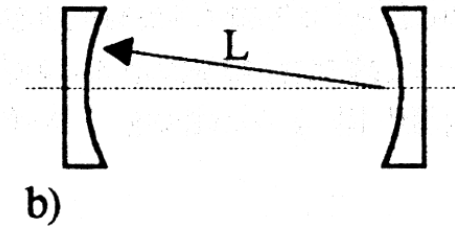
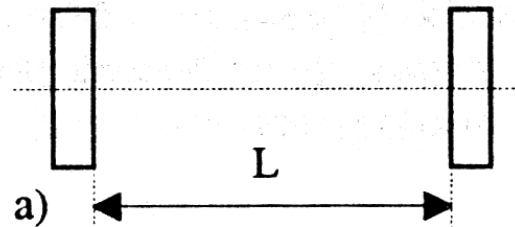
- Konstrukční uspořádání rubínového laseru



Rezonátory

- Fabry-Perot etalon

- ❖ rovinný
- ❖ konfokální
- ❖ kruhový
- ❖ střechový



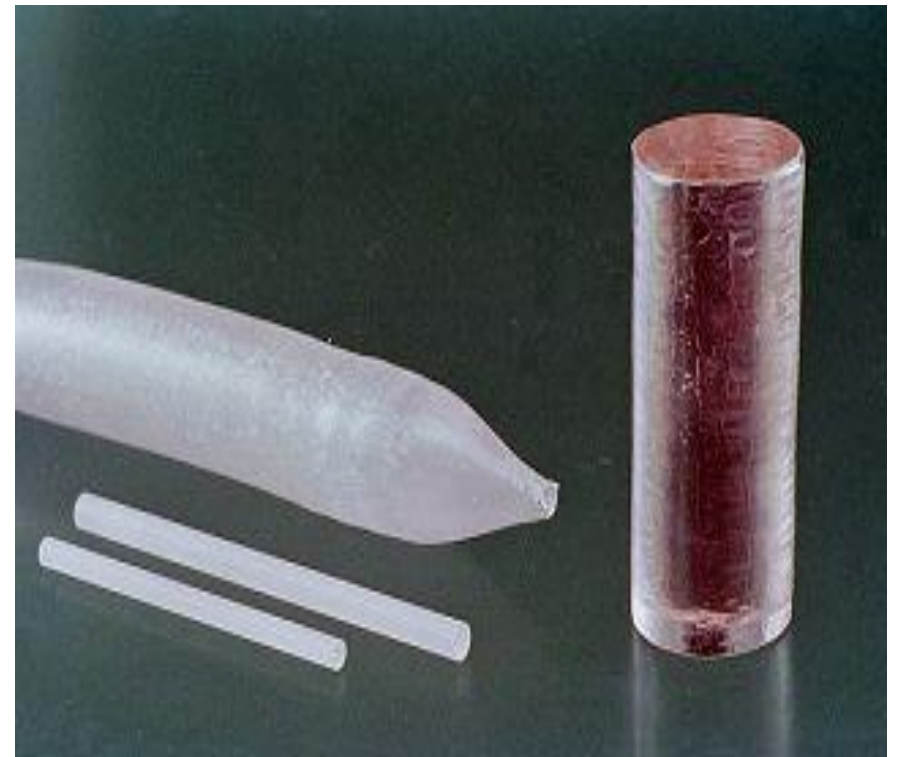
Pasivní Q-modulace

- Příklad použití saturačního absorbéru pro generaci krátkých (nanosekundových) výkonových impulsů (GW) u rubínového laseru



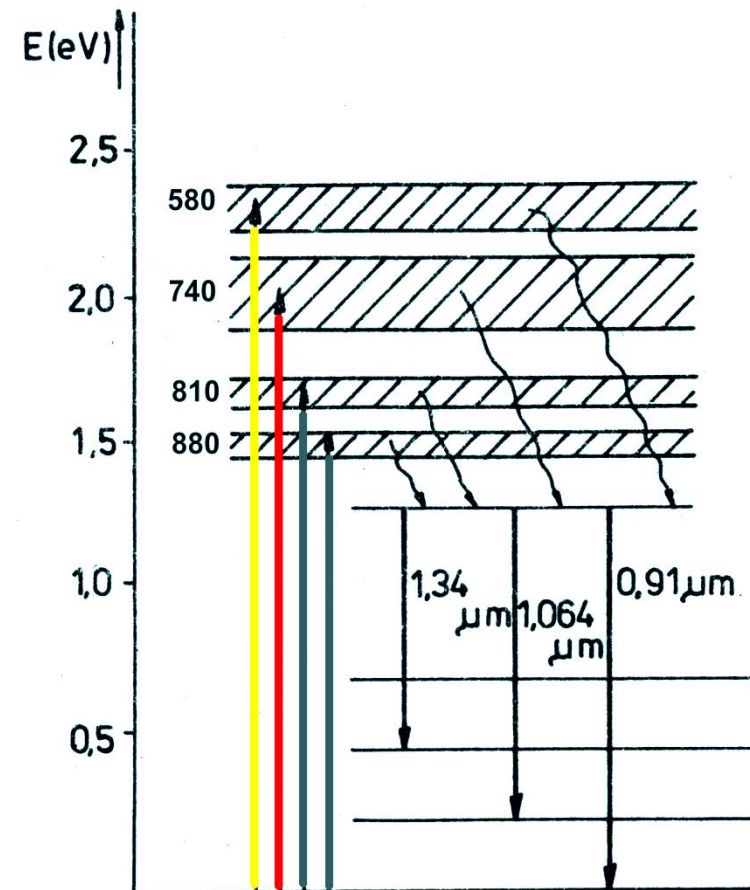
Neodymový laser

- Je nerozšířenější pevnolátkový laser (cca 1% Nd v $Y_3Al_5O_{12}$) .
- Pracuje na 1,064 nm, v kontinuálním režimu výkony do 1 kW, pulzní do 10 J a opakovací frekvence až několik kHz.
- V Q-spínaném módu pulzy 1 – 10 ns, při synchronizaci módů až 10 ps.

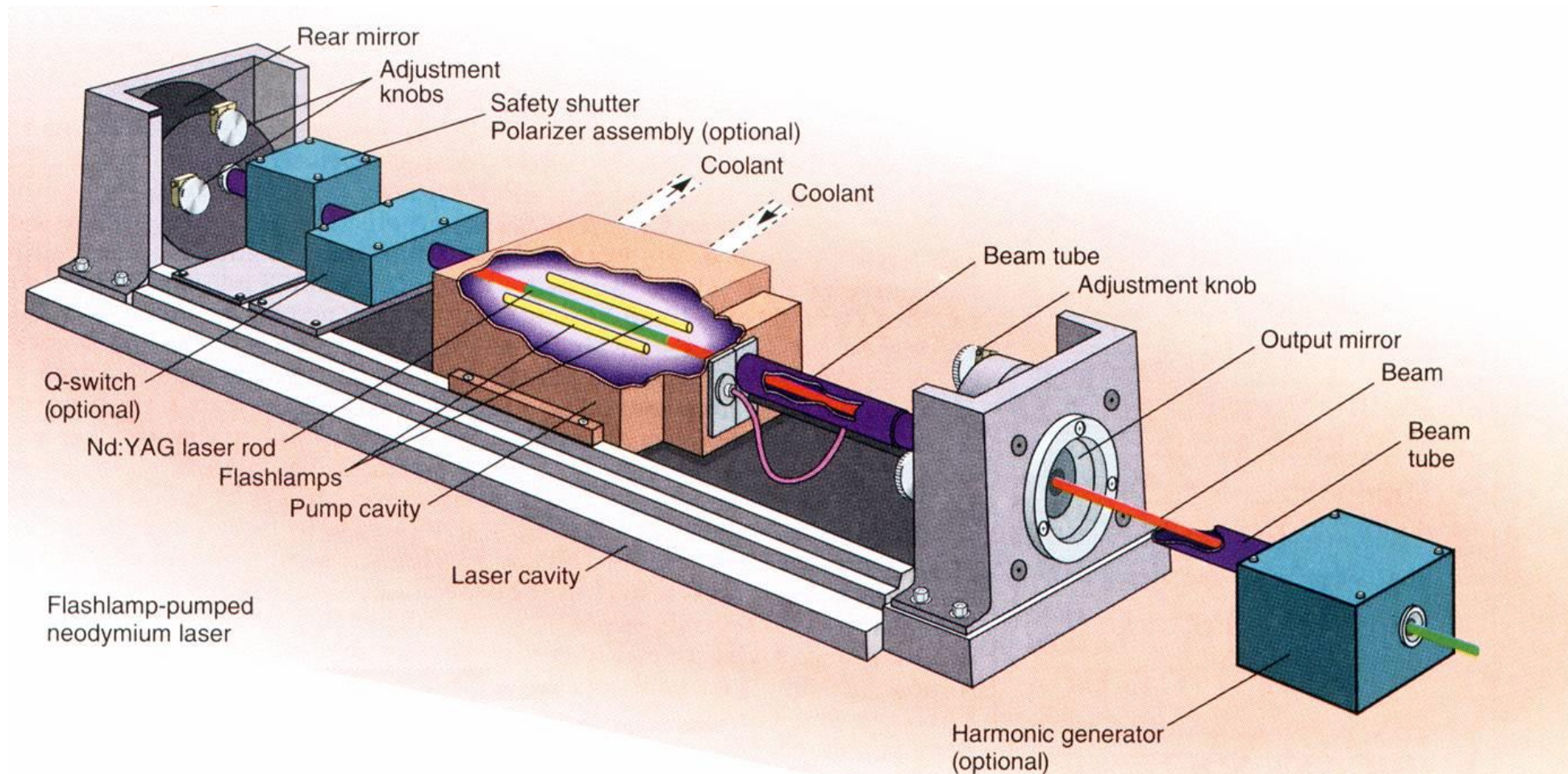


Energetický diagram neodymu v Nd:YAG laseru

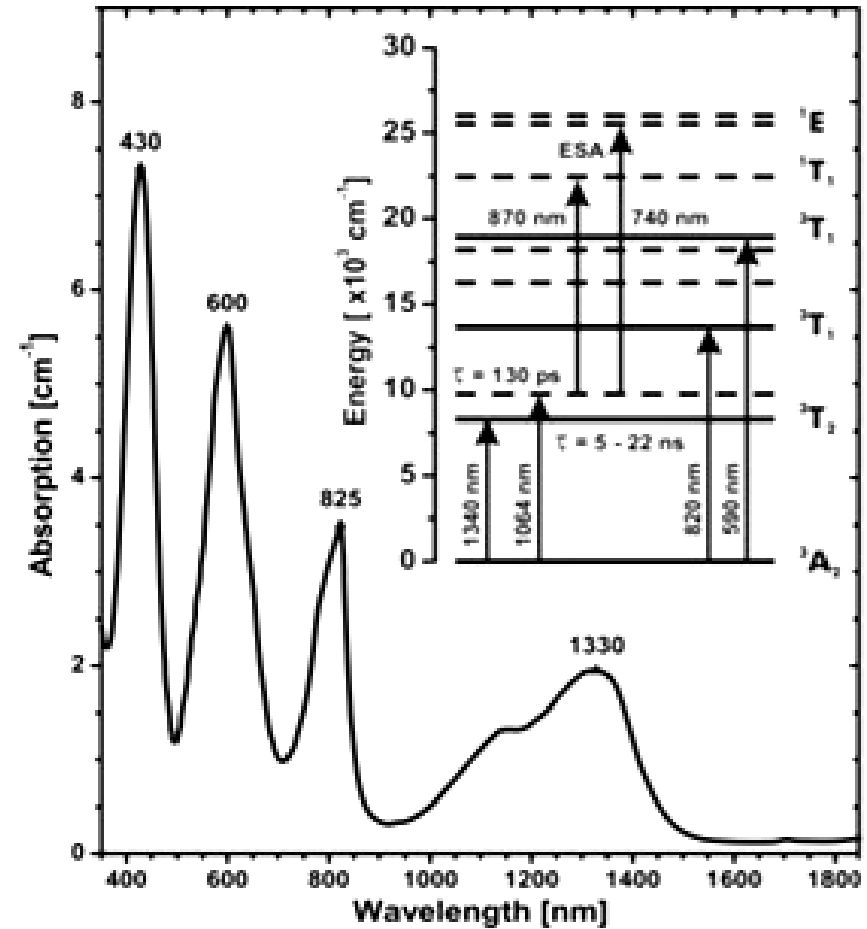
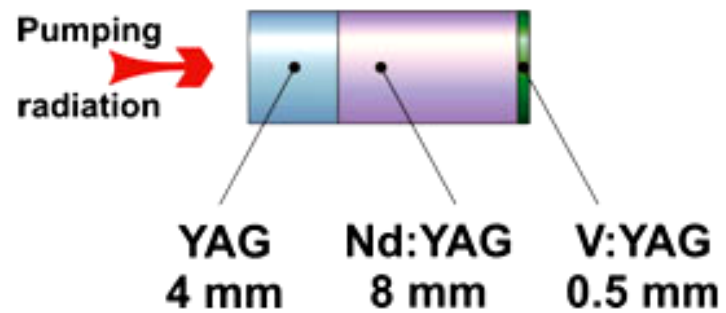
- Nd^{3+} v ytrito-hlinitém granátu ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) zastupuje ionty Y^{3+} . Monokrystaly jsou mechanicky pevné, tepelně stálé s minimem optických vad na rozdíl od neodymových skel.
- Pro čerpání se používají xenonové výbojky nebo laserové či LED diody.



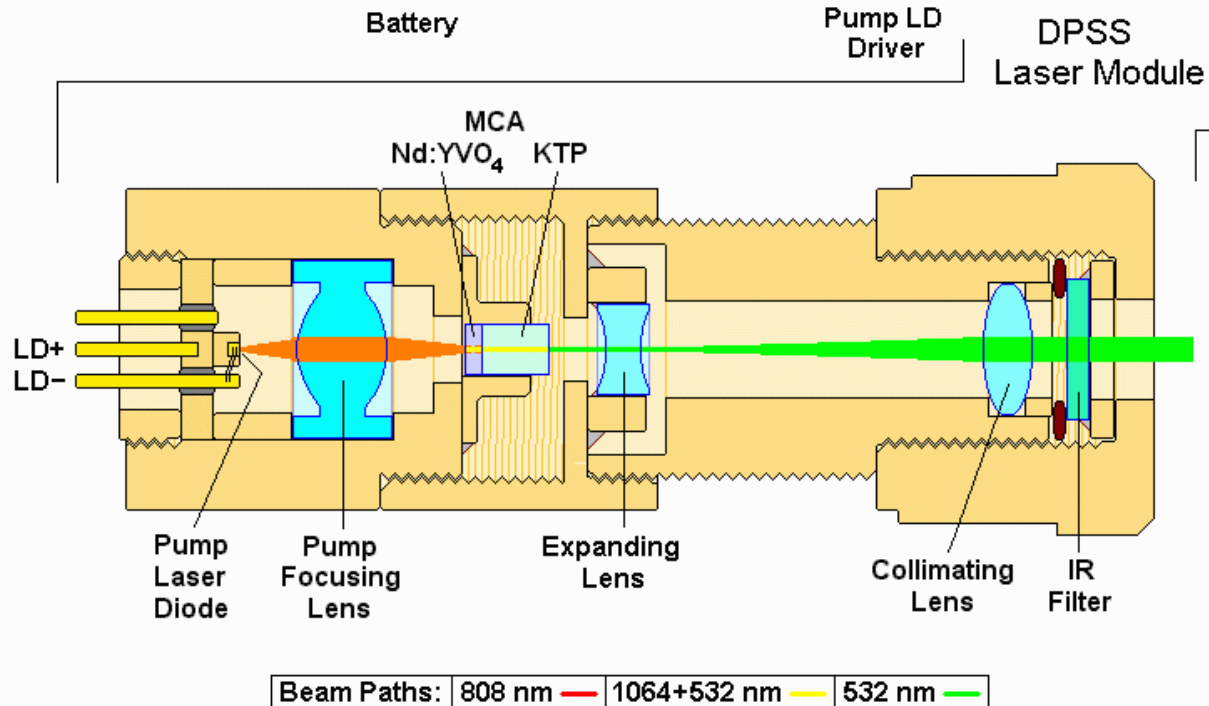
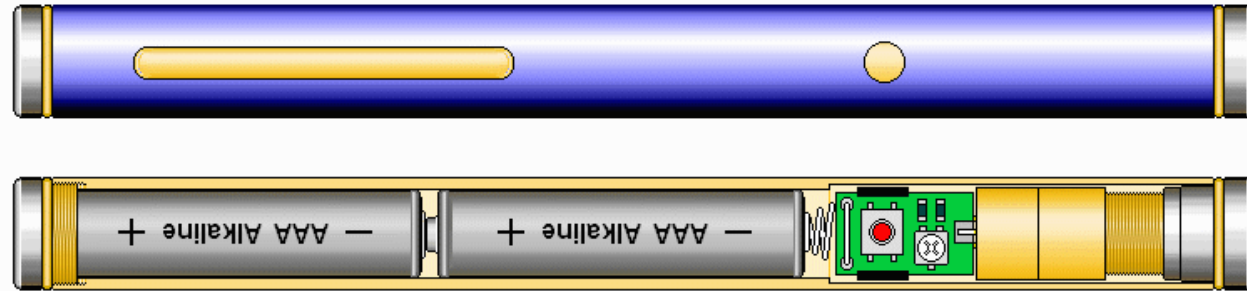
Neodymový laser



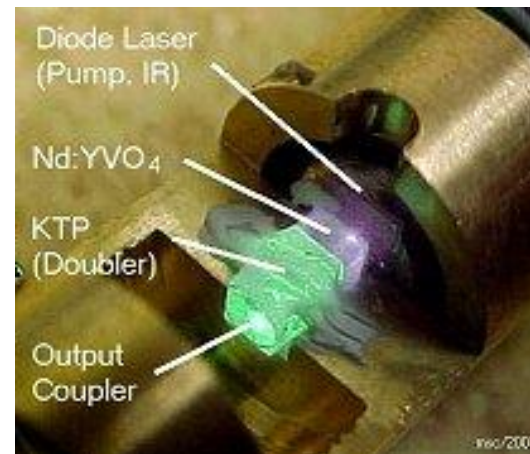
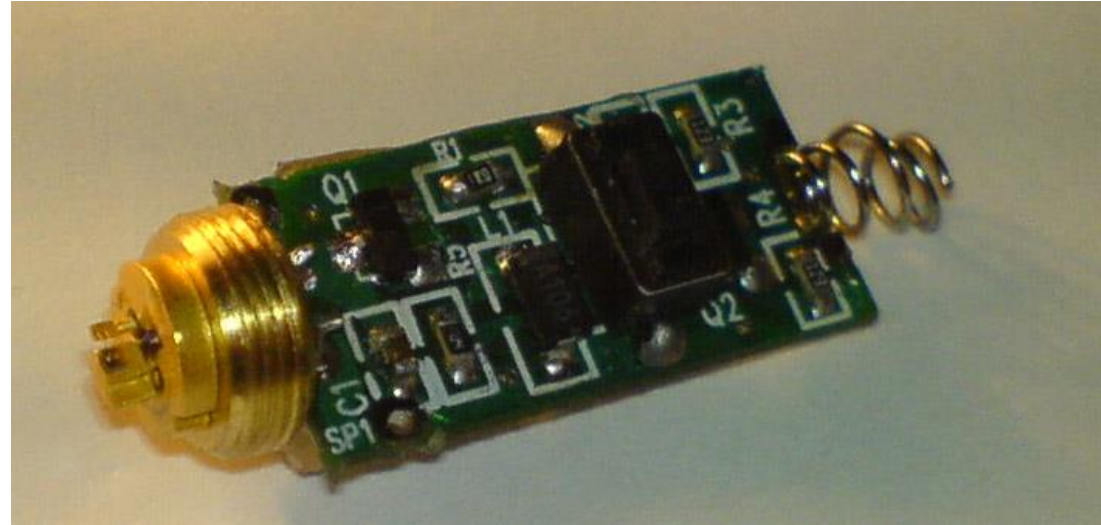
Pasivní Q-modulace V³⁺:YAG



Zelené laserové ukazovátko

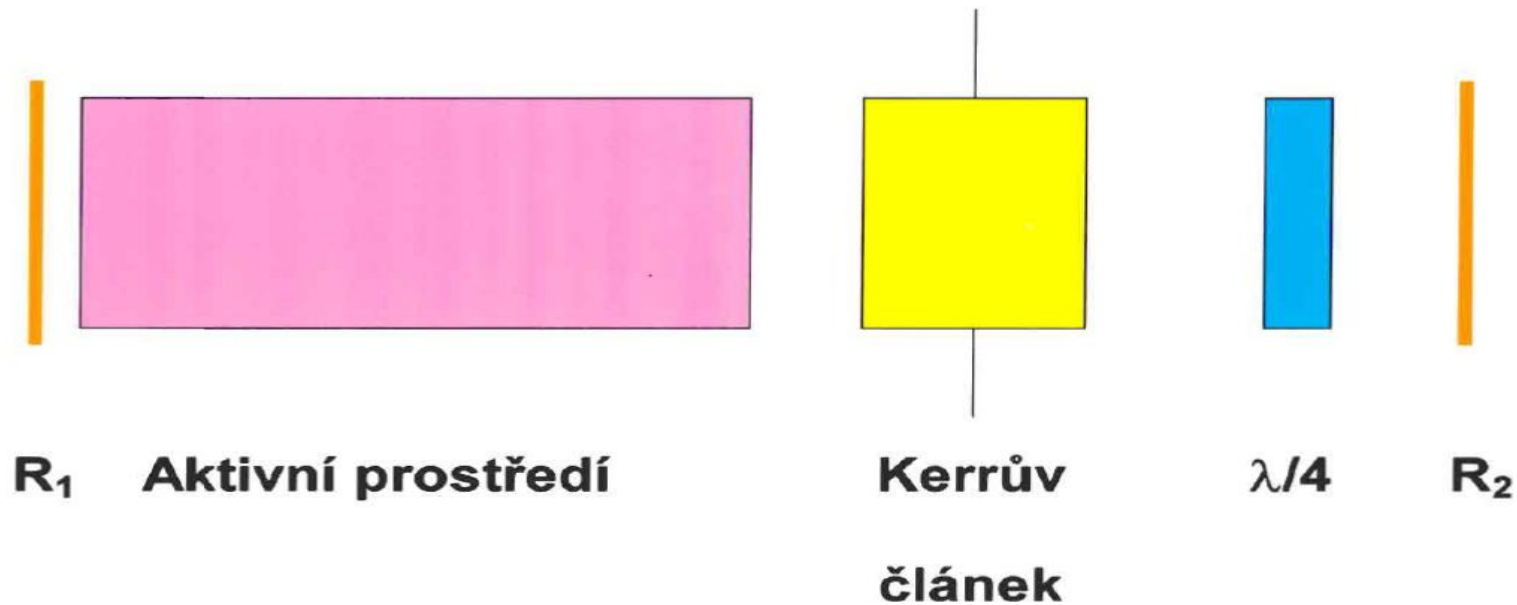


Zelené laserové ukazovátko



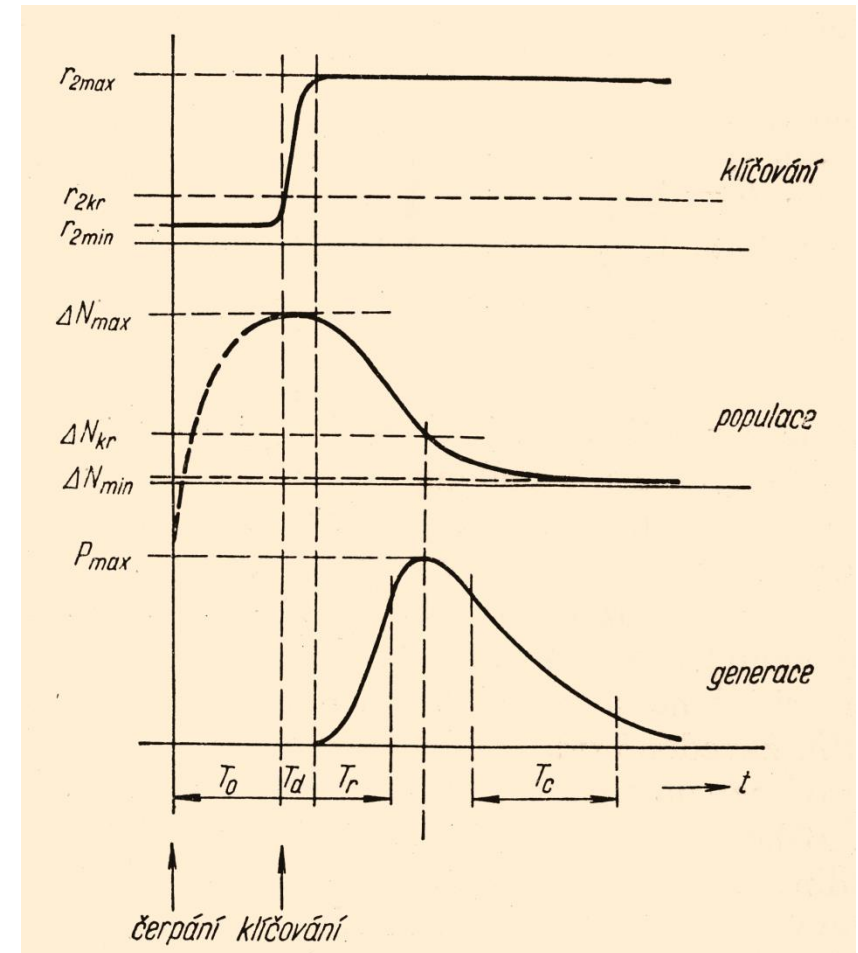
Aktivní Q-modulace

- V tomto případě je Q rezonátoru modulováno optickými závěrkami, např. elektrooptickým modulátorem na principu Kerrova jevu nebo akustooptickým modulem.



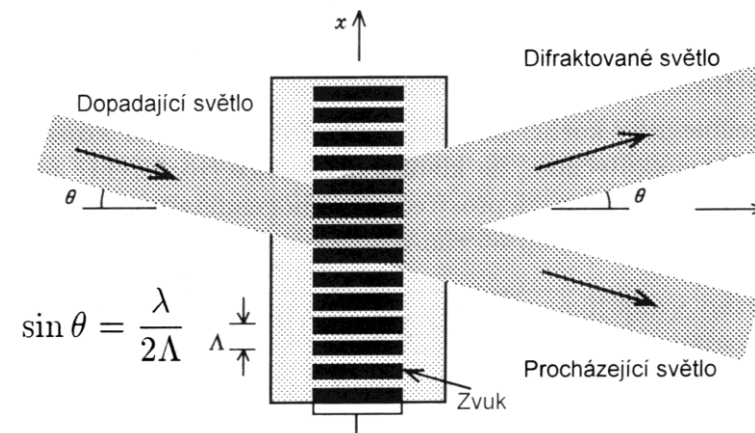
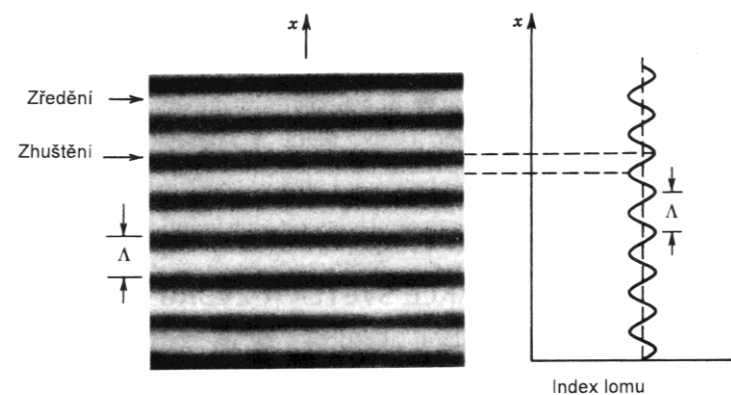
Časový průběh aktivní Q-modulace

- Typické časy u Nd:YAG laseru:
- Nárůst inverzní populace (T_0) **150 μ s**
- Klíčovací impuls (T_D) **1 ns**
- Generace záření **5 - 10ns**



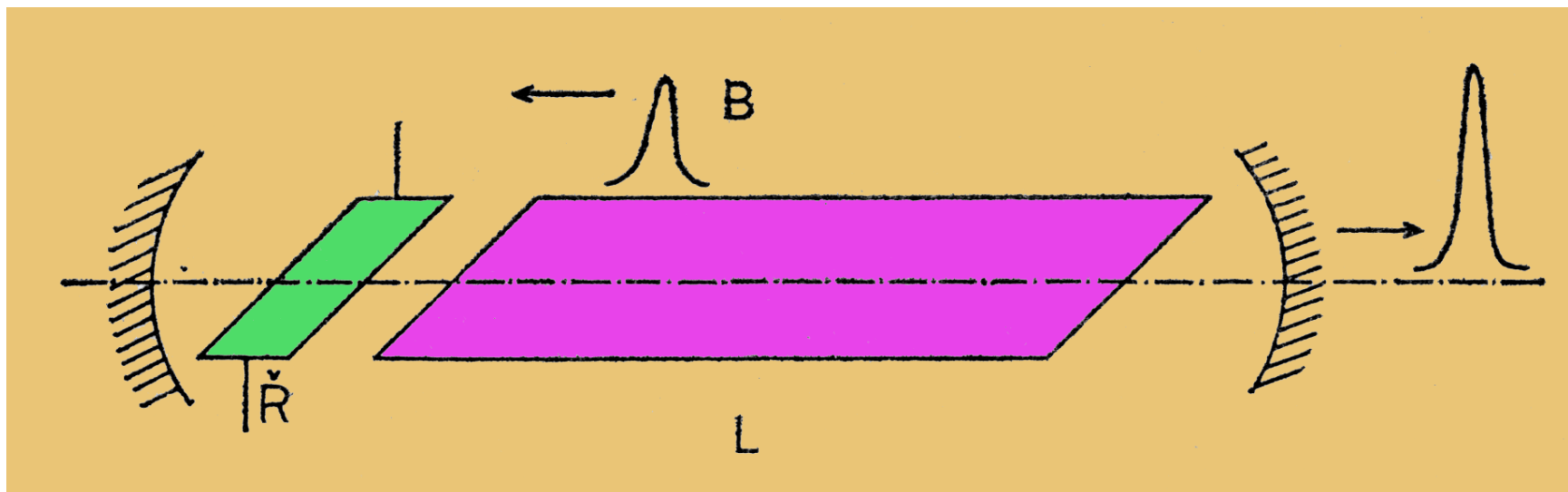
Optoakustický modulátor

- Šíří-li se zvuk optickým prostředím, dochází ke změně hustoty a tím indexu lomu.
- Nejjednodušší je Braggova difrakce: akustická rovinná vlna působí částečný odraz záření, vyhovuje-li úhel θ Braggově podmínce (Braggova cela)



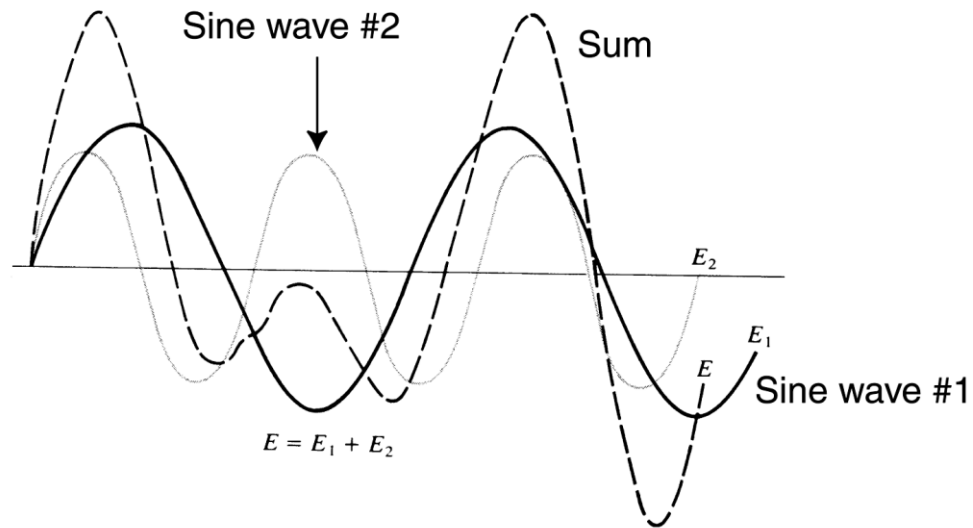
Synchronizace módů

- Při pasivní nebo aktivní modulaci rezonátoru frekvencí $f = c/2L$ získáme sled velmi krátkých impulzů, jejichž délka je určena Fourierovým obrazem spektrální čáry a opakovací frekvence dobou průletu oblaku fotonů rezonátorem tam i zpět.

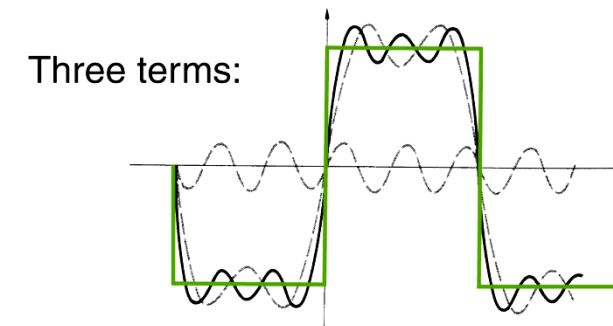
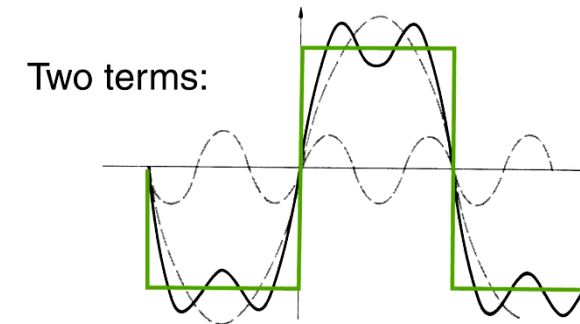
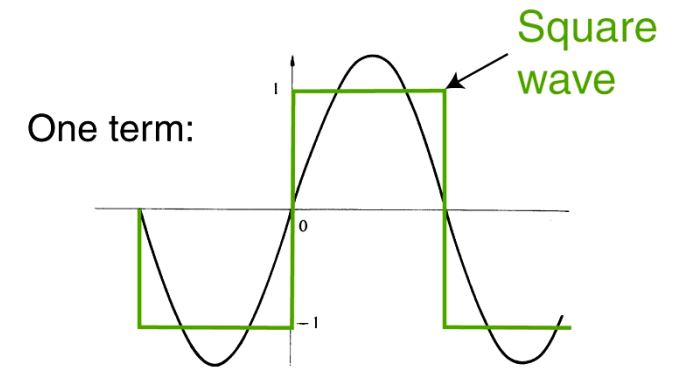


Fourier decomposing functions

ANHARMONIC WAVES ARE SUMS OF SINUSOIDS.

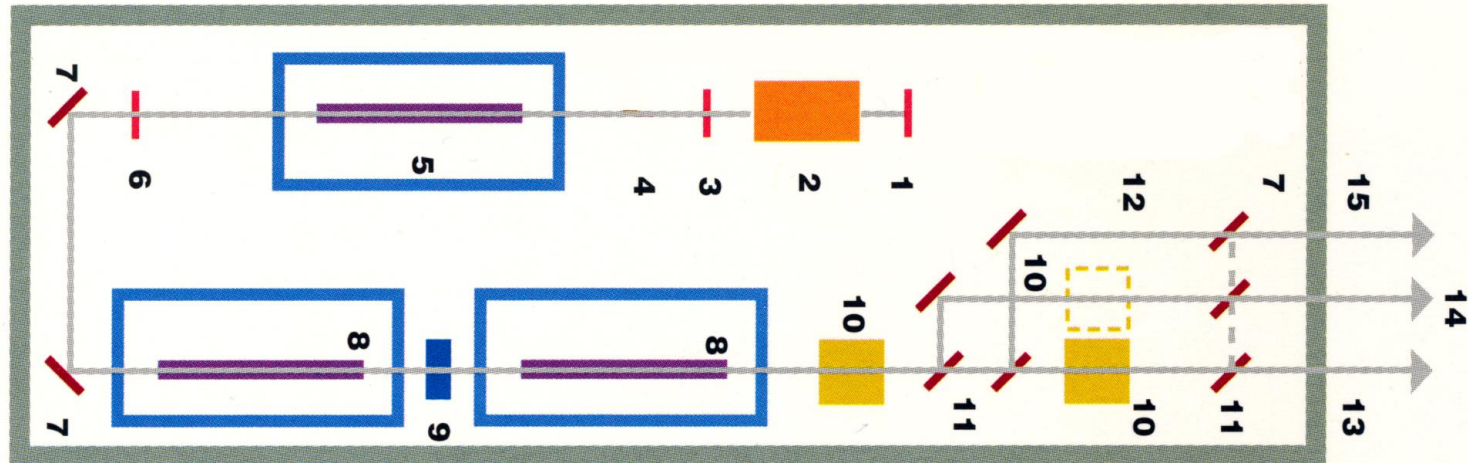


$$f(t) = \frac{1}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} F_m \cos(mt) + \frac{1}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} F'_m \sin(mt)$$

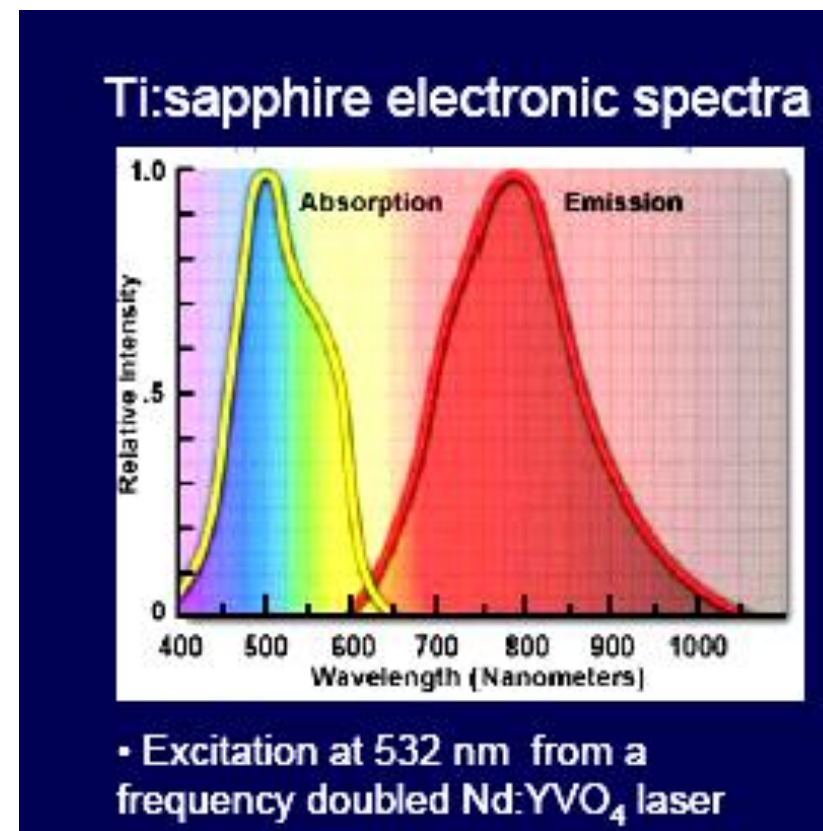


Nd:YAG laser

- Laser s Q-modulací (1-6), dvoustupňovým zesilovačem (8), kompenzátořem dvojlomu (9) a násobiči frekvence (10), výstup 1064 nm (13), 532/355 nm (14), 266/1064 nm zbytkový (15)



Ti-safír krystal $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$



Safír dopovaný titanem $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$

- Ti_2O_3 koncentrace 0.06-0.5 wt%

Tvrdot 9 Mohs

Tepelná vodivost 0.11 cal/(°C x sec x cm)

- **Optické vlastnosti**

Laserový přechod - Vibrační Hladiny

Fluorescence lifetime 3.2 μsec (T = 300 K)

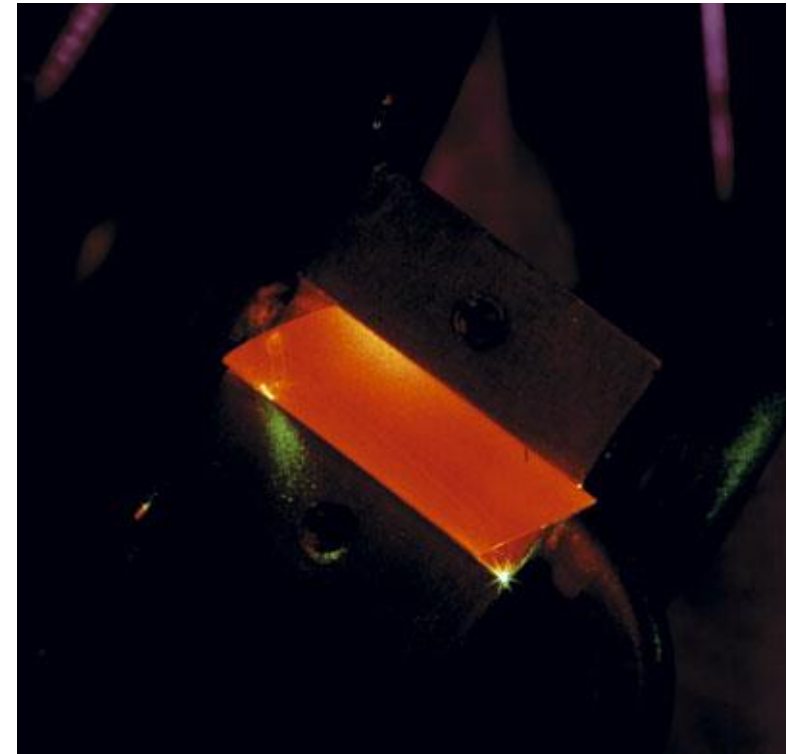
Laditelný rozsah 660-1050 nm

Absorpce rozsah 400-600 nm

Emisní maximum 795 nm

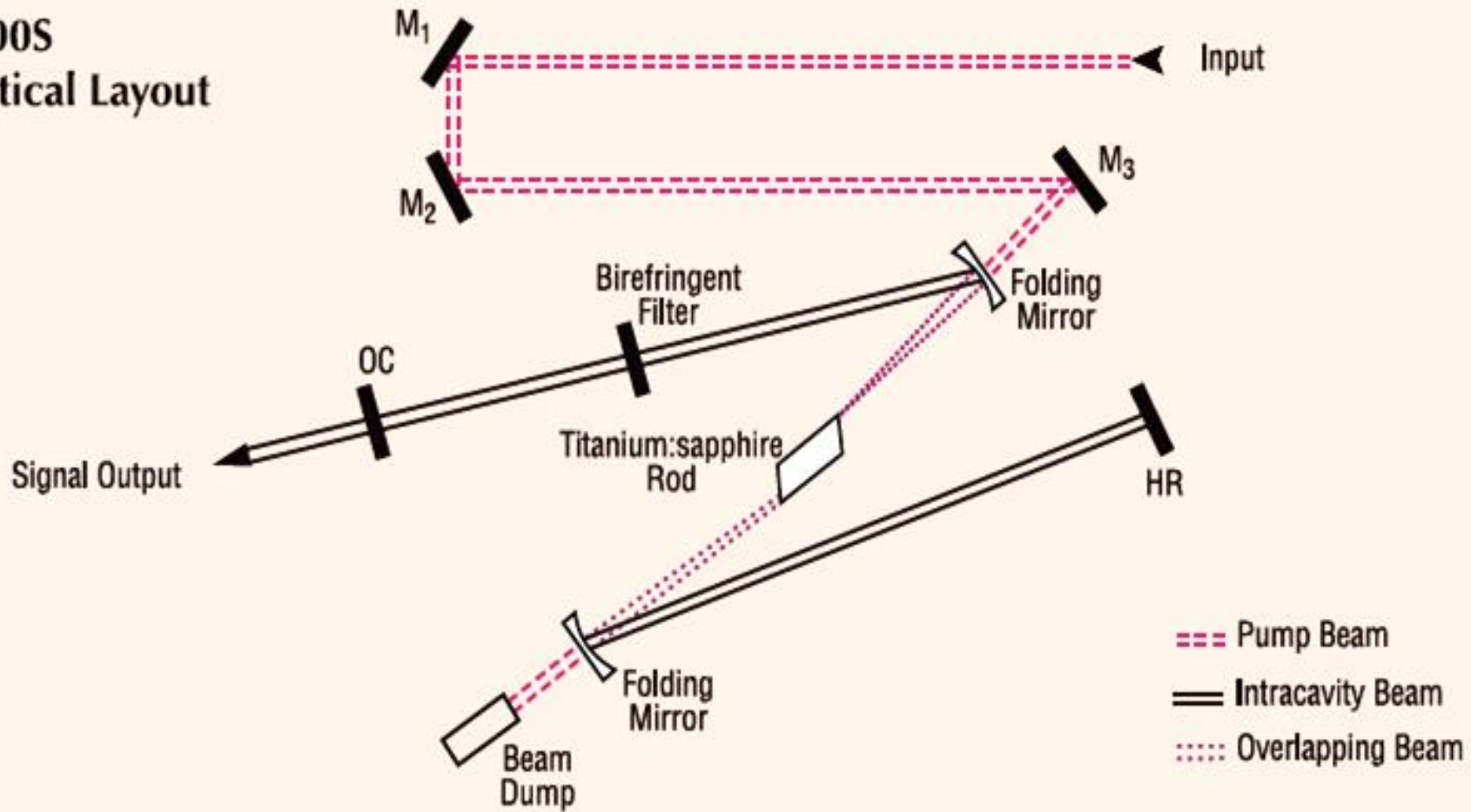
Absorpční maximum 488 nm

Index lomu 1.76 @ 800 nm



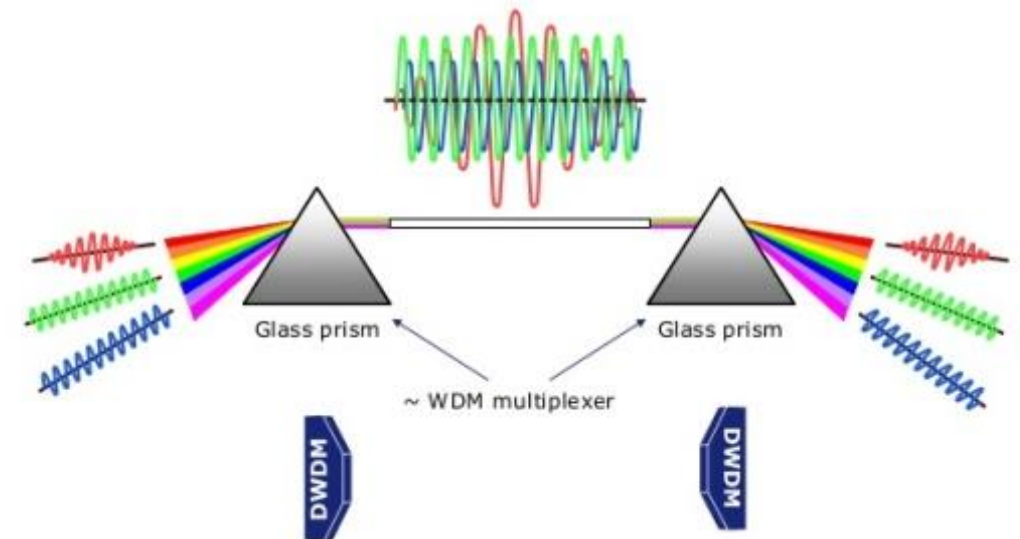
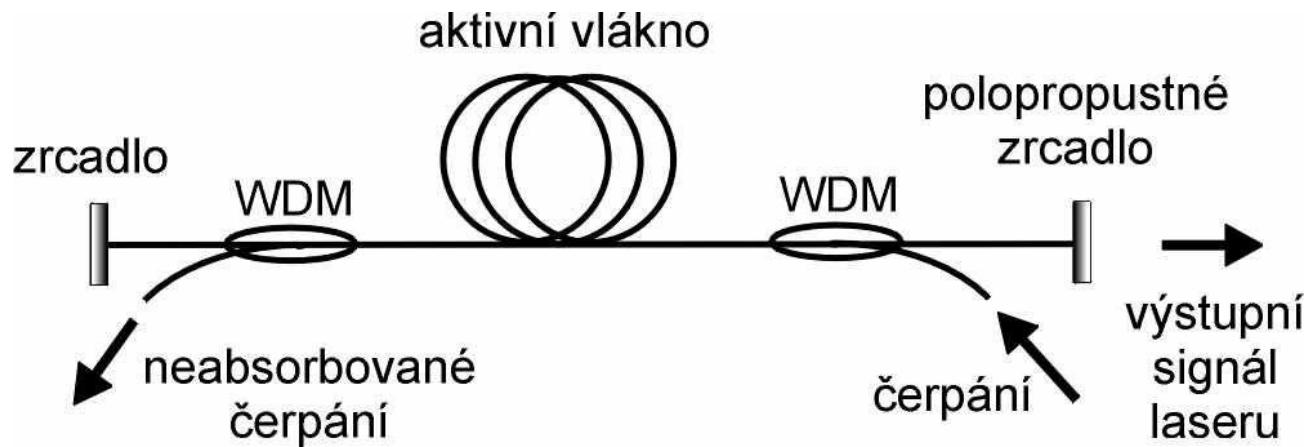
Ti:safír laser

3900S
Optical Layout



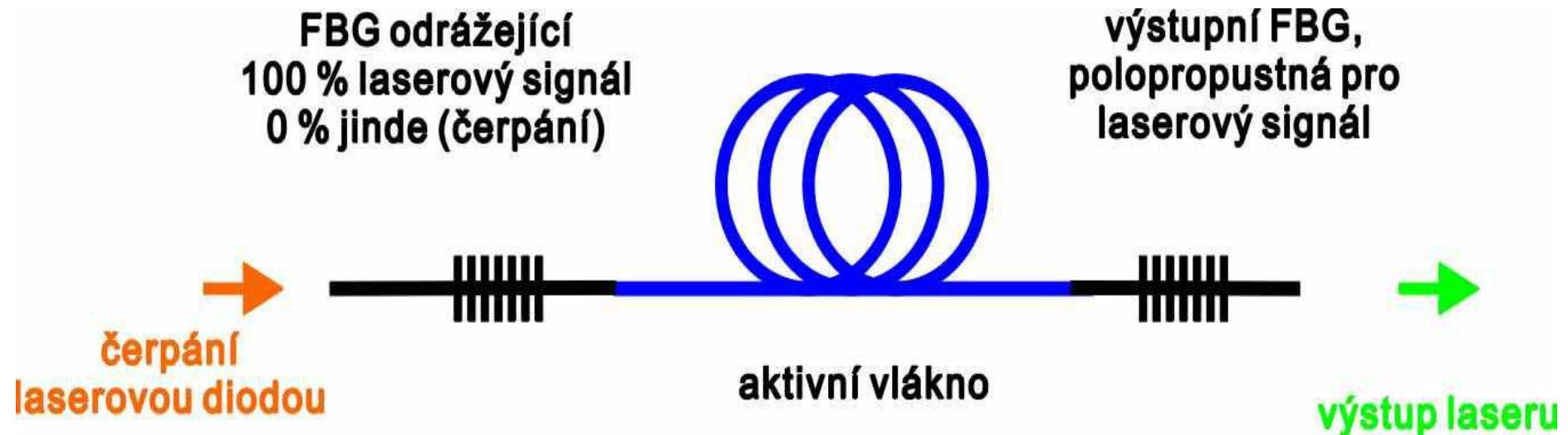
Vláknové lasery

- Uspořádání s lineárním Fabry Perotovým rezonátorem
- Vlnový multiplex *WDM* (Wavelength Division Multiplex)

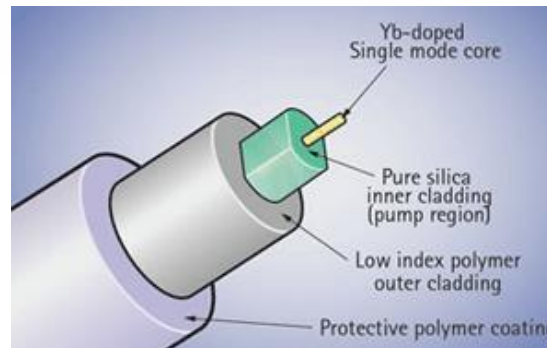
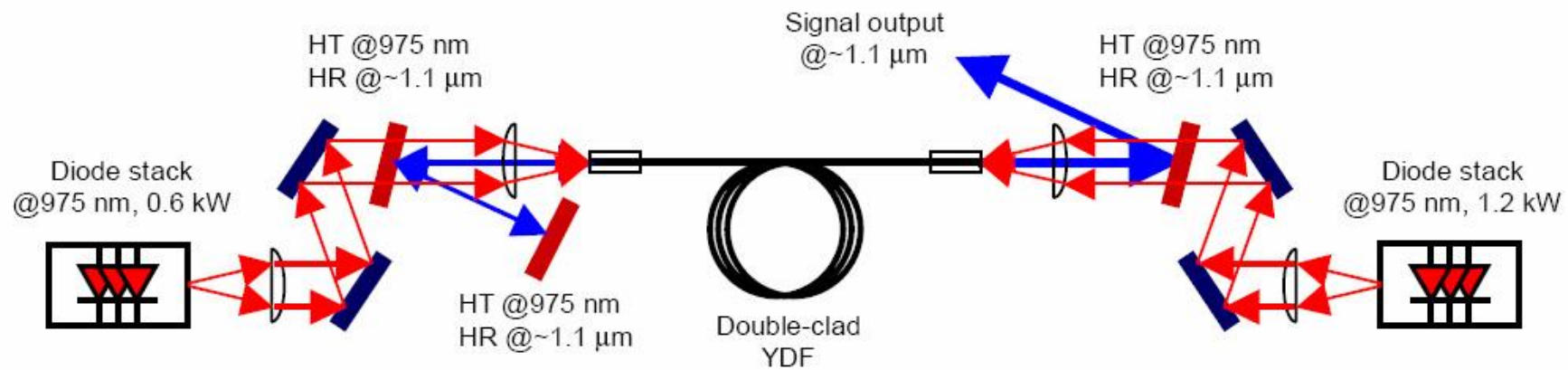


Vláknové lasery

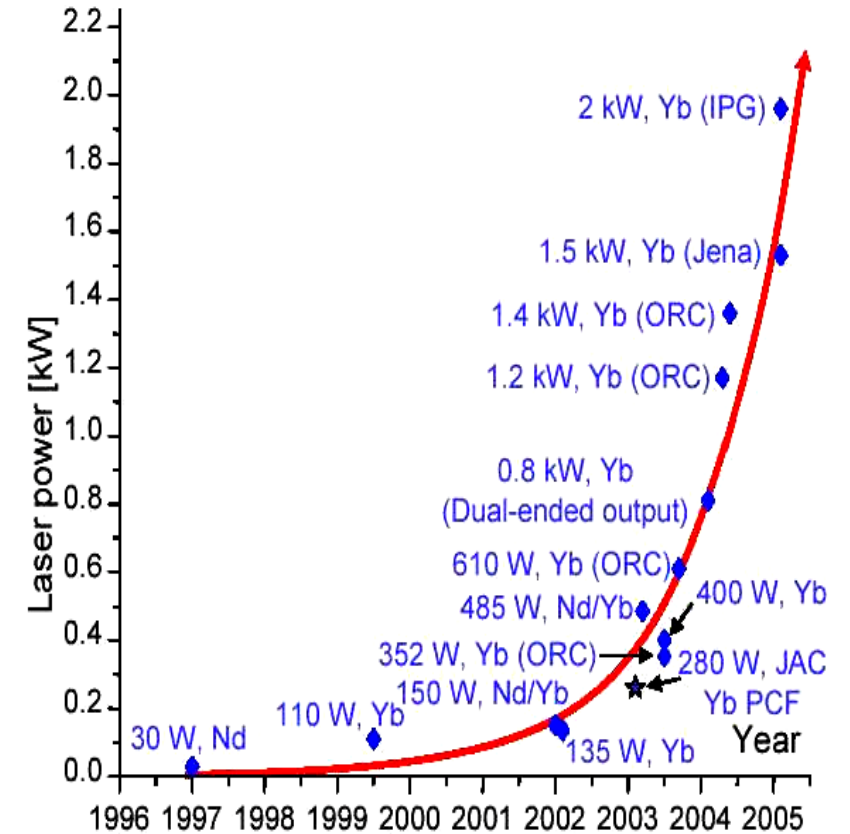
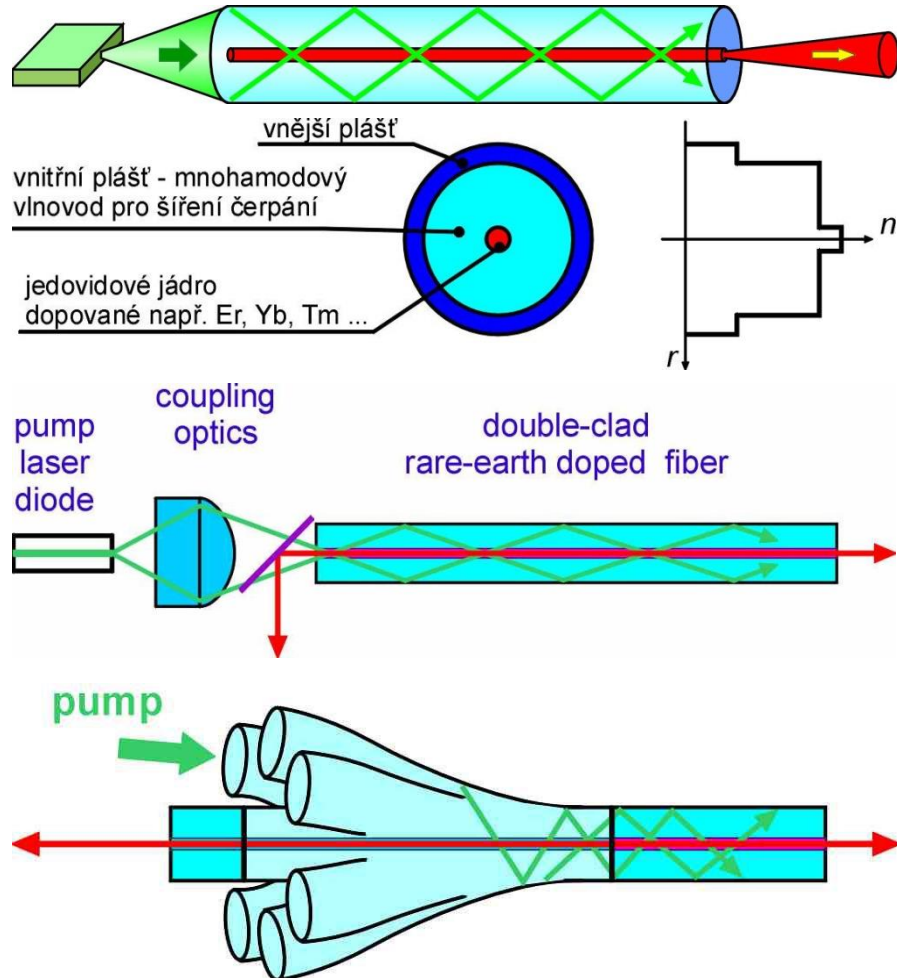
- FBG – Fiber Bragg Grating
 - Braggovské vláknové mřížky



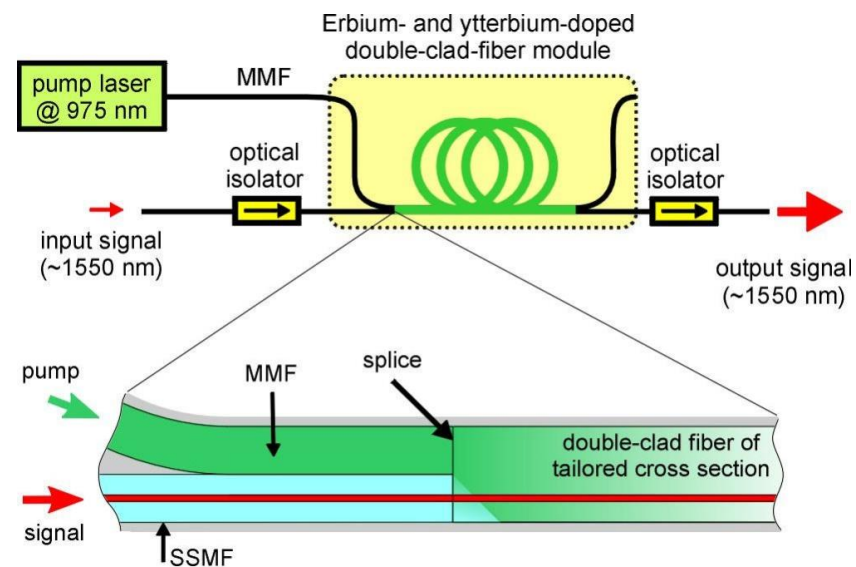
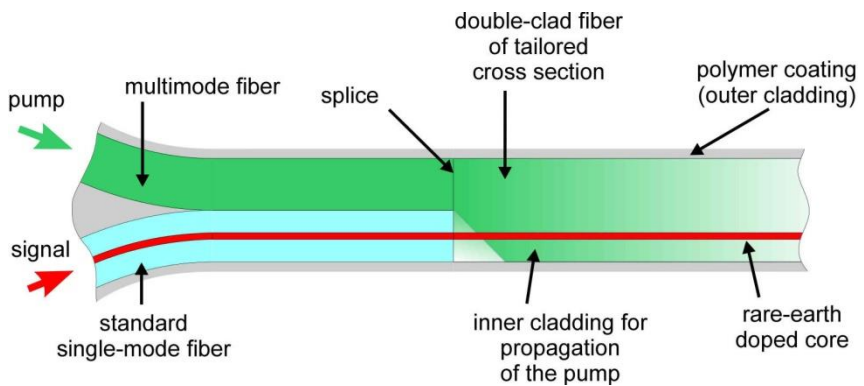
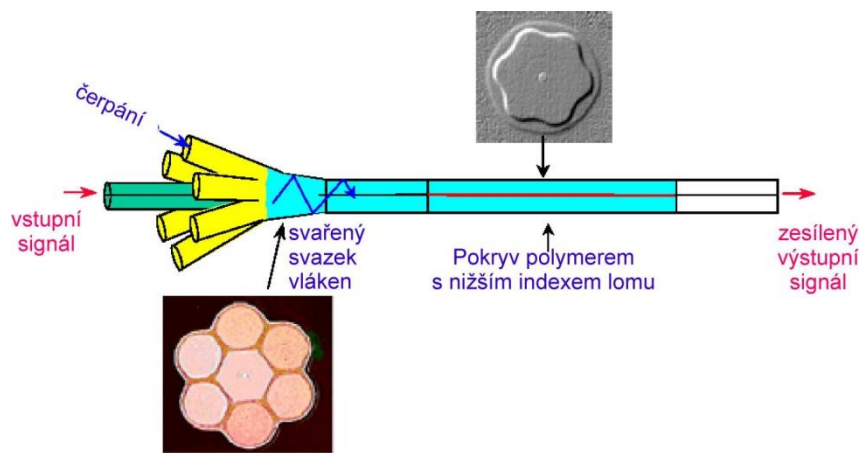
Yterbiem dopovaný vláknový laser



Optické systémy buzení

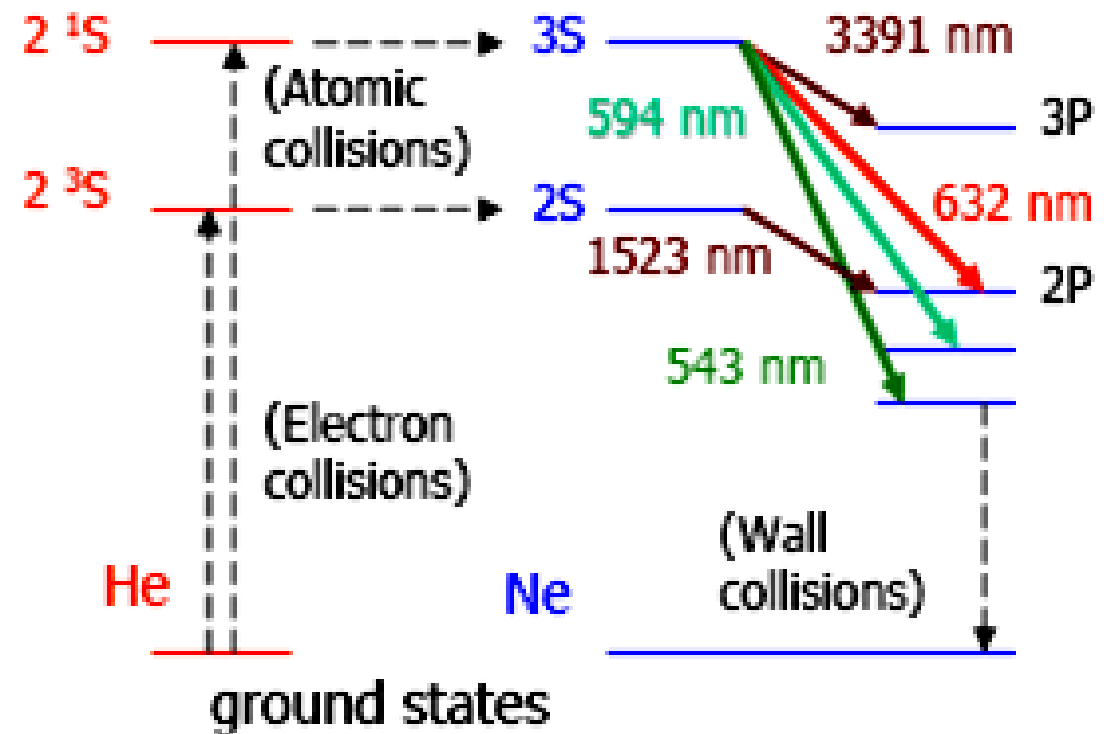


Vláknové laserové zesilovače



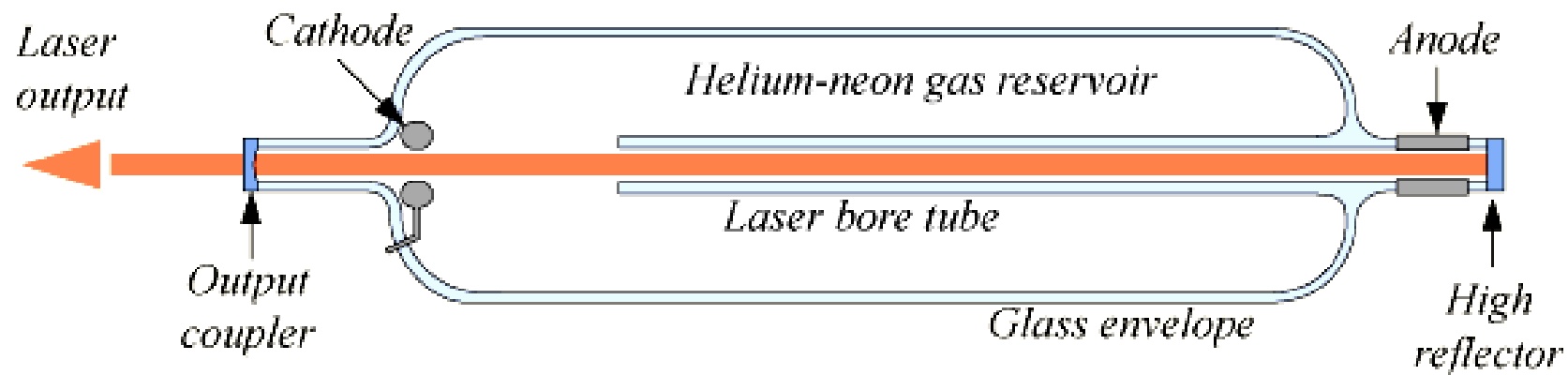
Plynový laser He-Ne

- Objeven v 1960 jako IR laser; emise čáry červené oblasti poprvé použita v 1962
- Elektrický výboj v plynu excituje He na 2S hladinu
- Existuje blízká paralelní energetická hladina Ne
- Atomic collisions transfer excitation

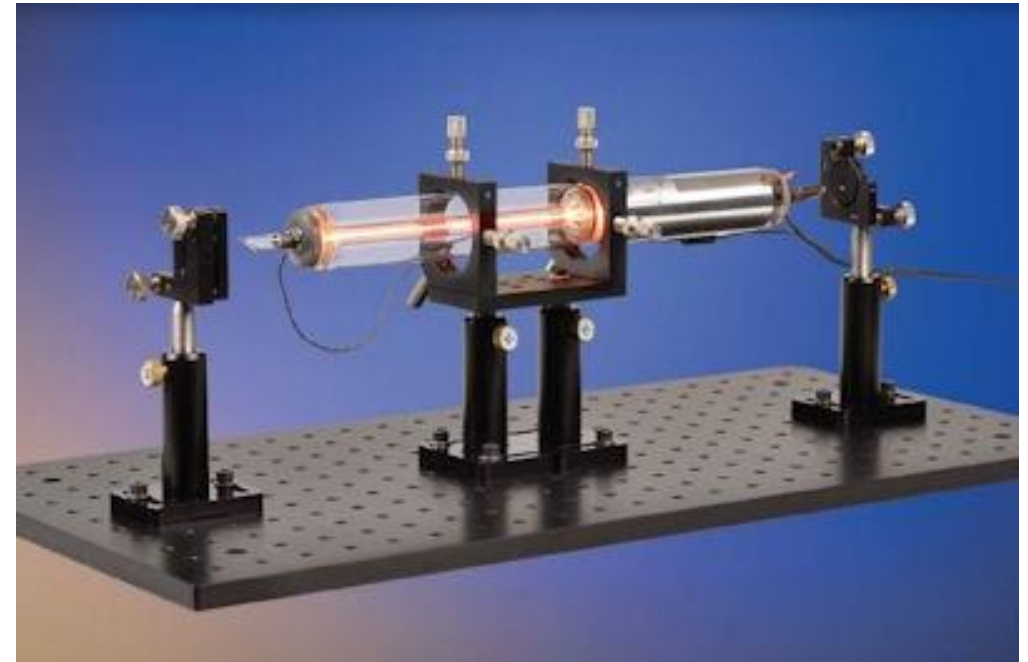
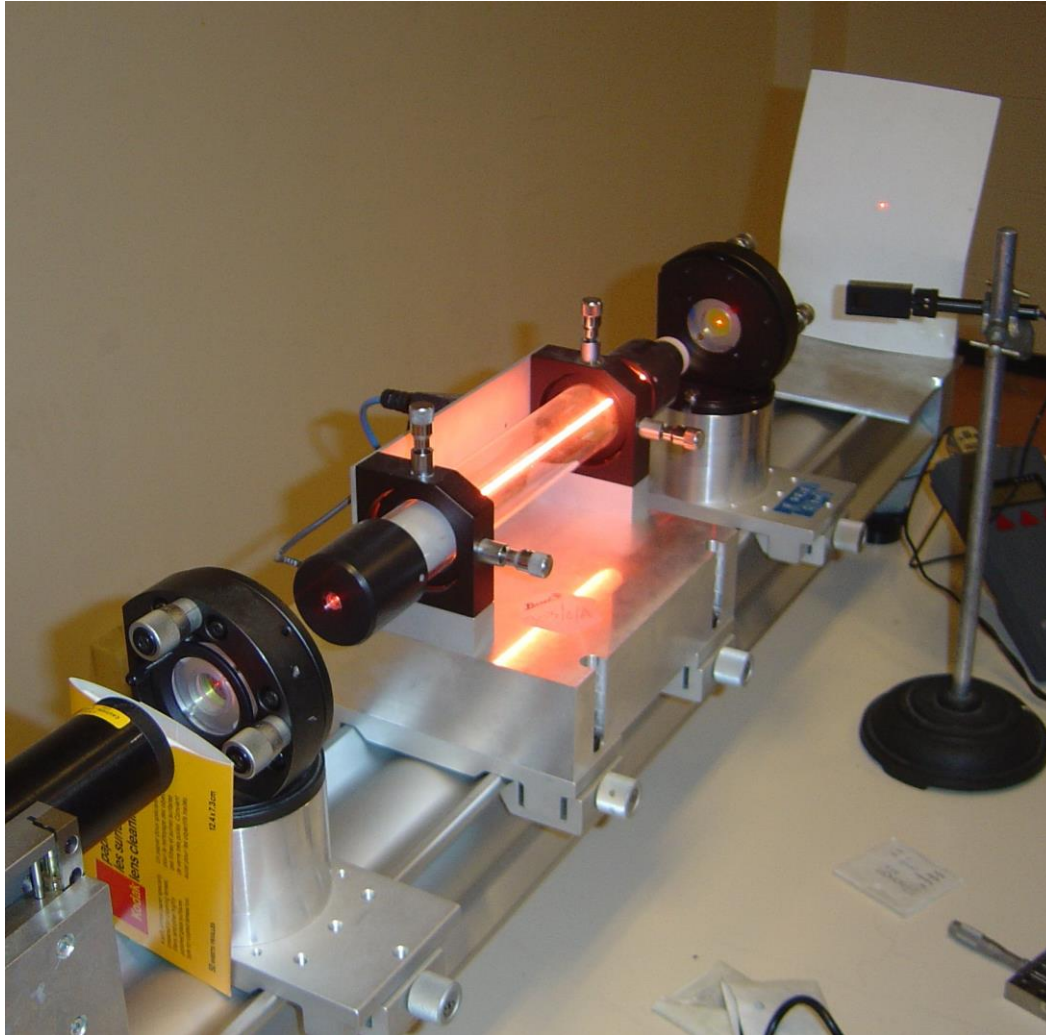


Plynový laser He-Ne

- Levný a snadno vyrobitelný - první lasery pod 100 \$
- Výbojová trubice s 85% He, 15% Ne



He-Ne laser



Sada HeNe Laser Project Kit

stavebnice obsahuje vše, co je potřeba k sestavení vlastního helium-neonového laseru, včetně laserové trubice, napájecí jednotky, hliníkové desky, držáků a také sadu vysoce kvalitních zrcadel HeNe Laser Cavity. Tato stavebnice je určena pro výuku nebo pro laboratorní práce.

Dusíkový laser

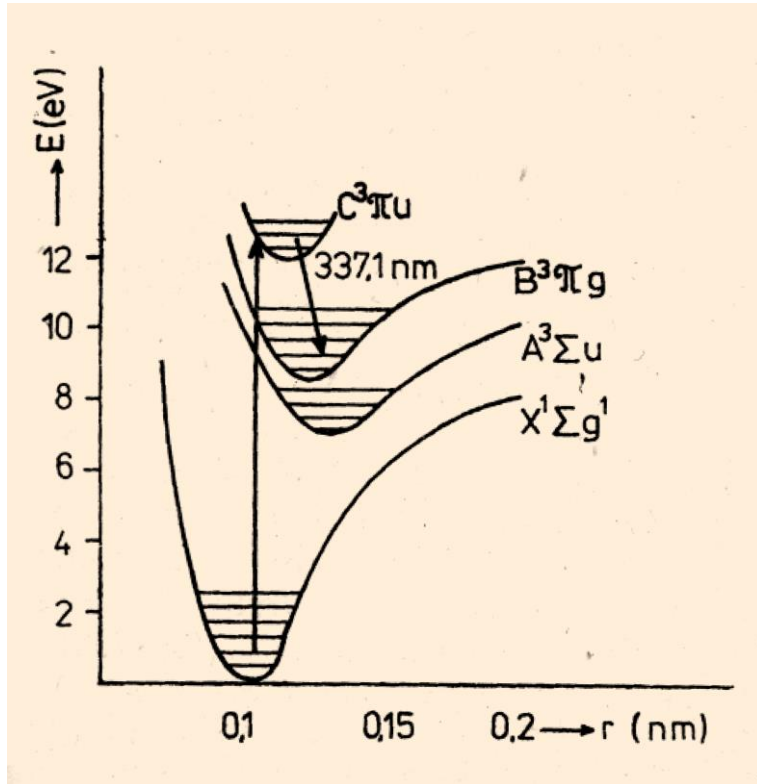
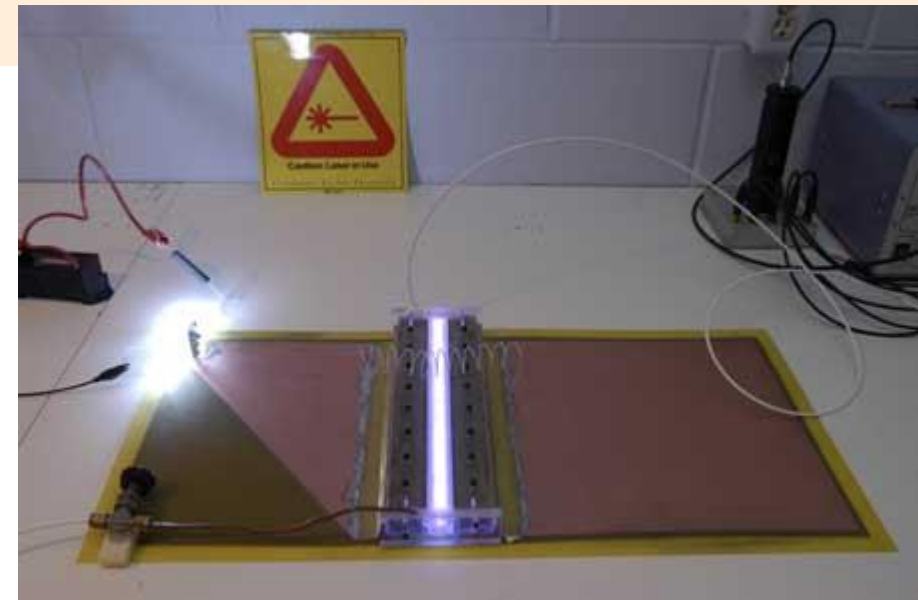
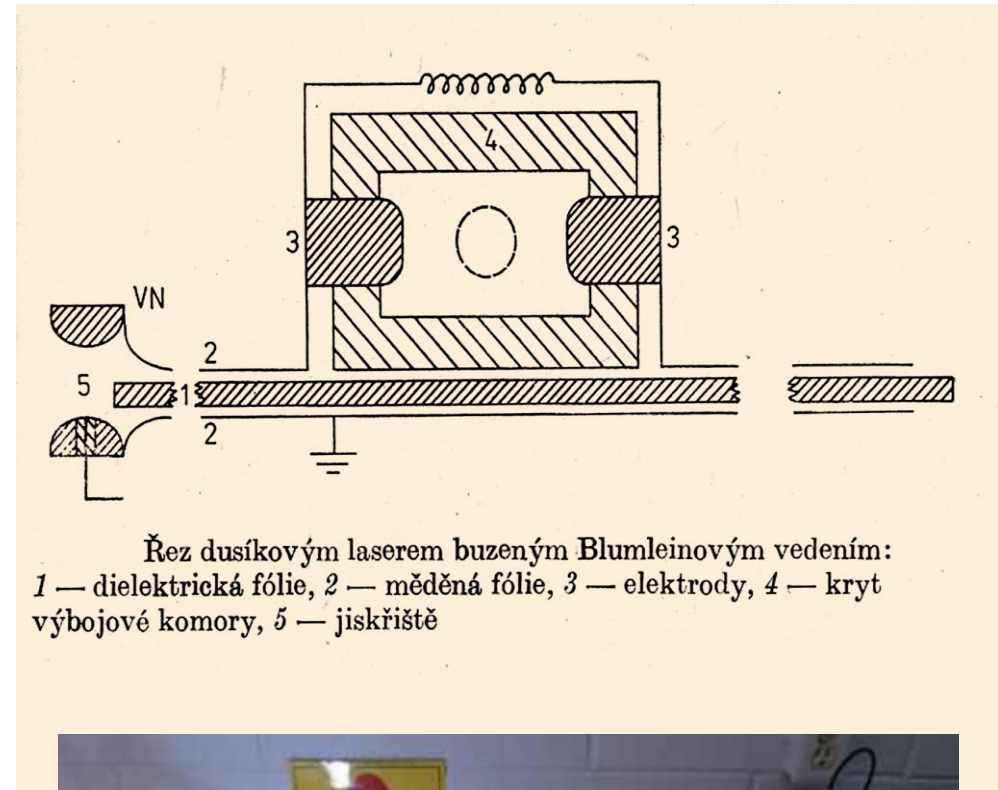
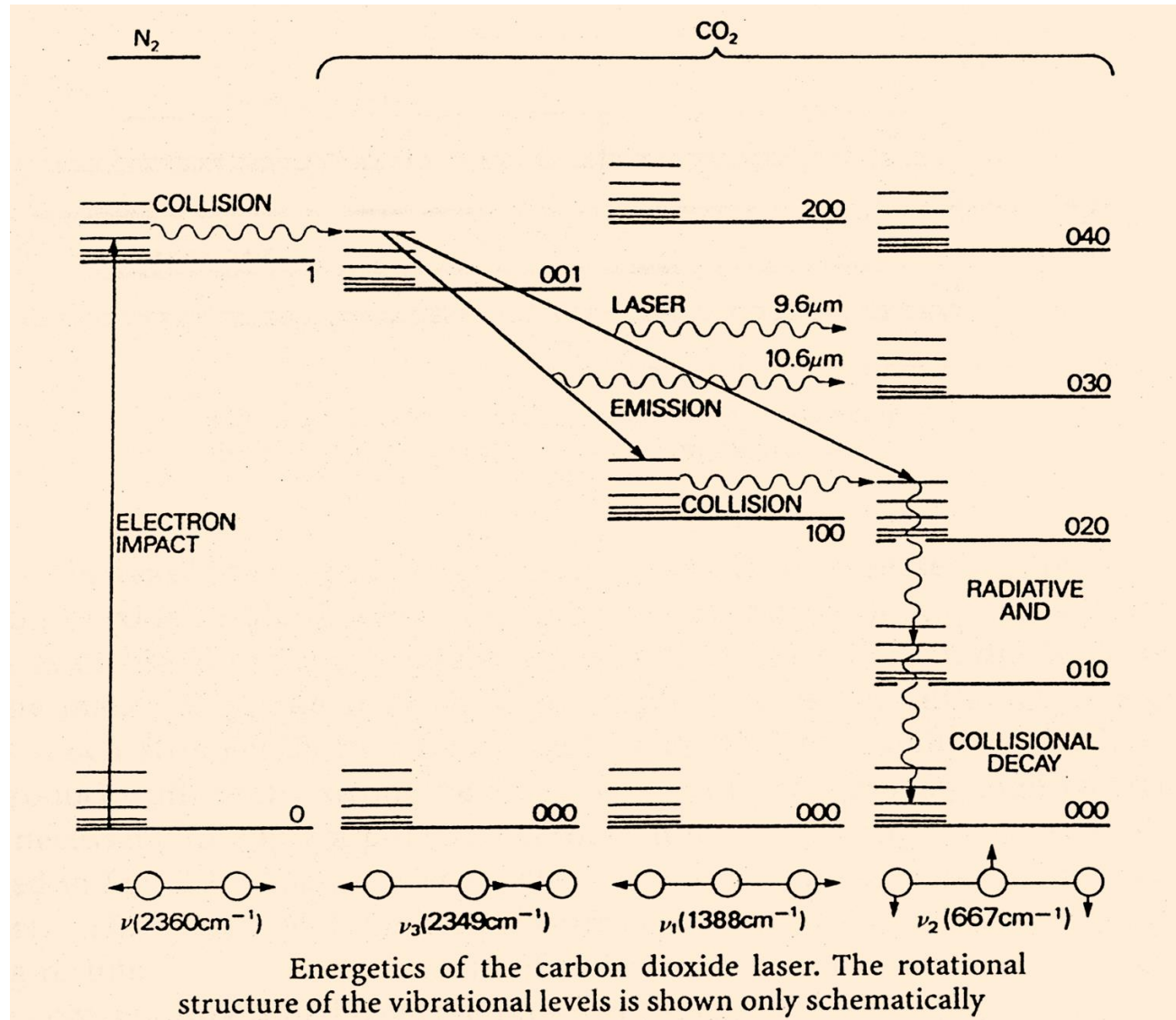


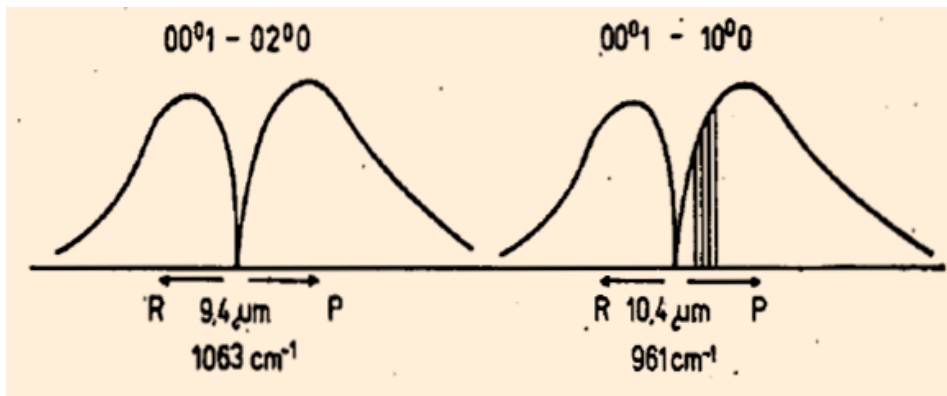
Schéma energetických hladin molekuly dusíku



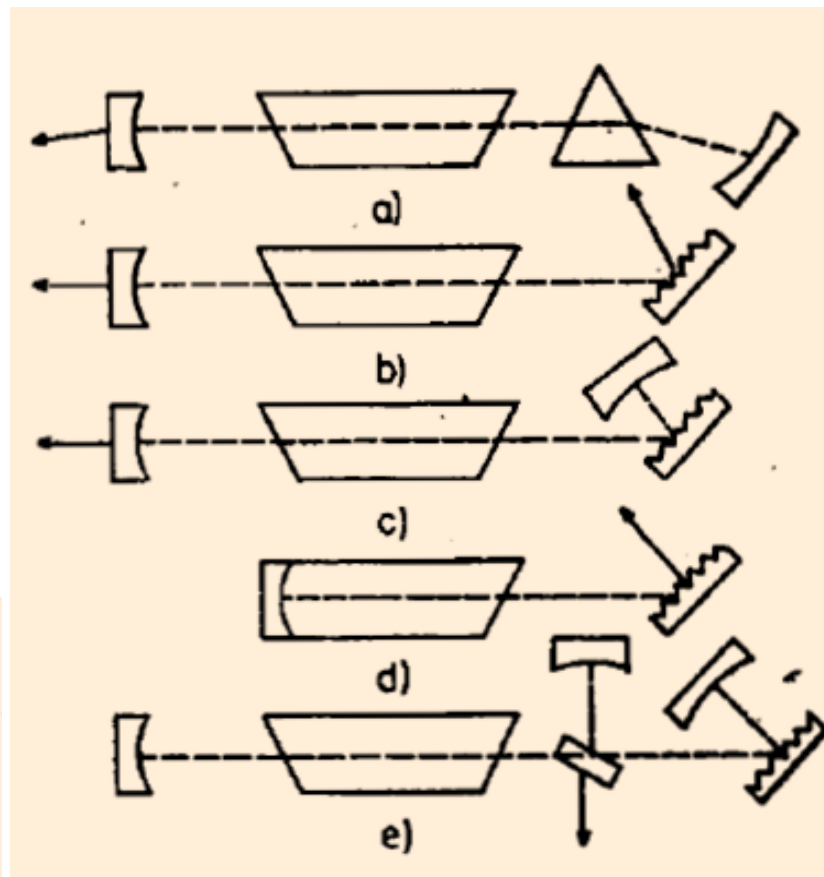
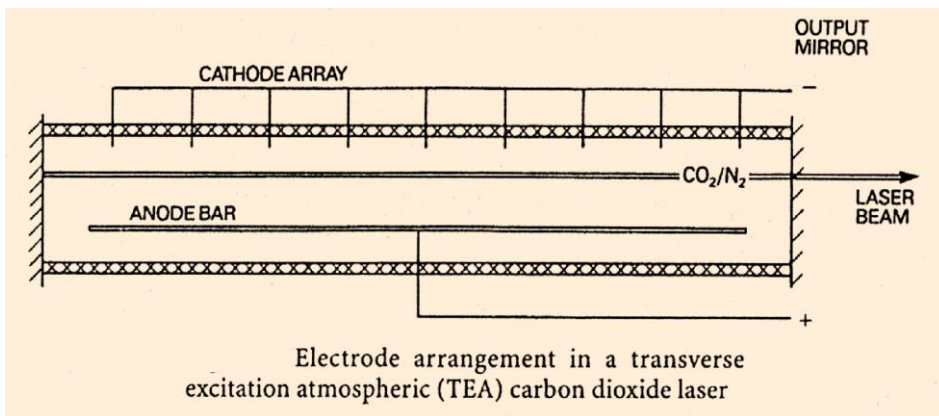
Energetické schéma CO₂ laseru



CO₂ laser



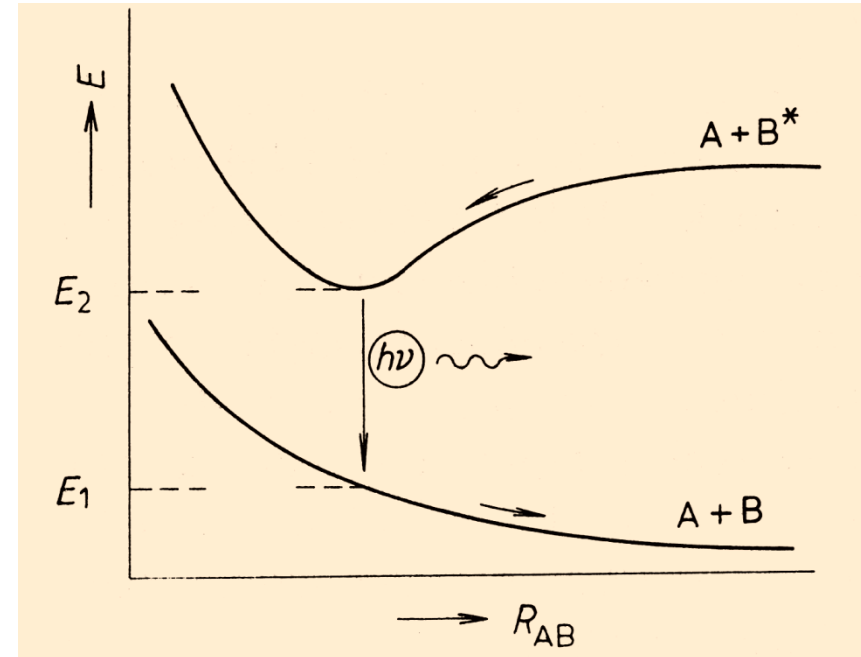
Průběh intenzity emisních čar CO₂ laseru



Selekce vlnových délek a
vyvazování svazku

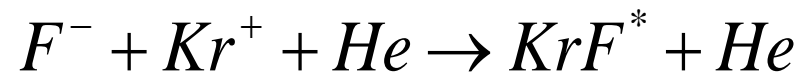
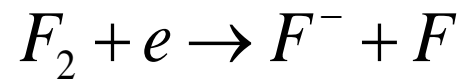
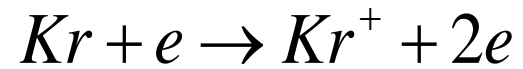
Excimer

- **Excimer** – nestabilní molekula vznikající na přechodnou dobu v důsledku působení excitovaného atomu (molekuly) s atomem (molekulou) v základním stavu.
- Po přechodu excimeru do základního stavu (vyzáření fotonu) **dojde během 10^{-14} s k disociaci**



Závislost potenciální energie E soustavy atomů (molekul) A, B, vytvářejících excimer, na jejich vzdálenosti R_{AB}

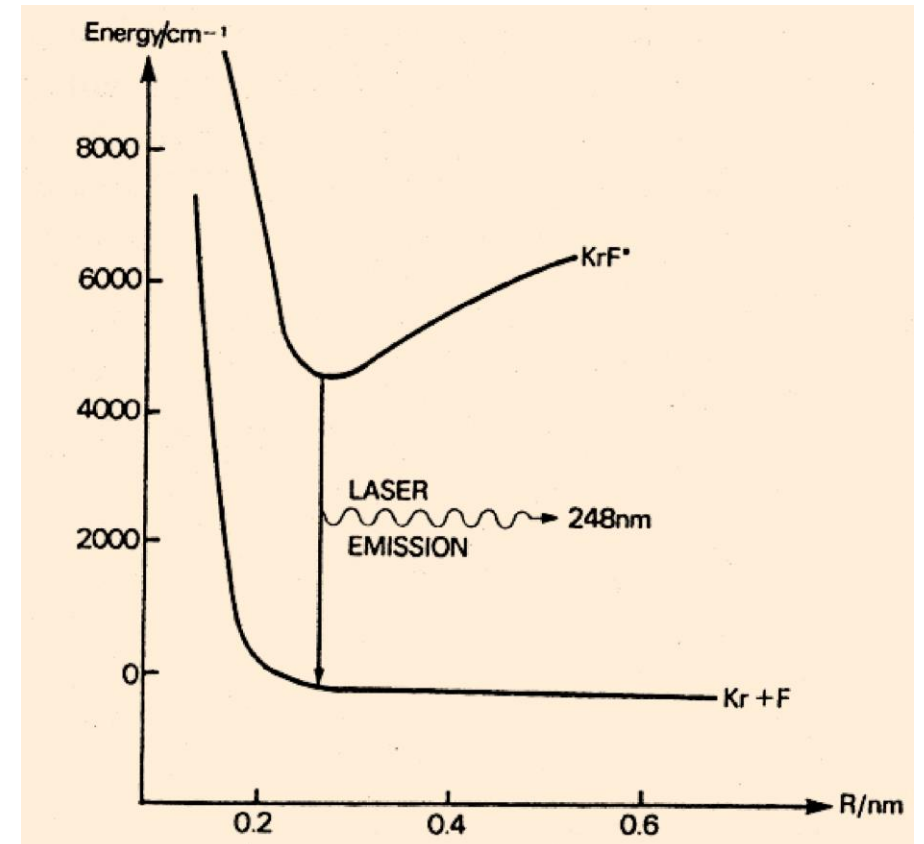
KrF exciplexový laser



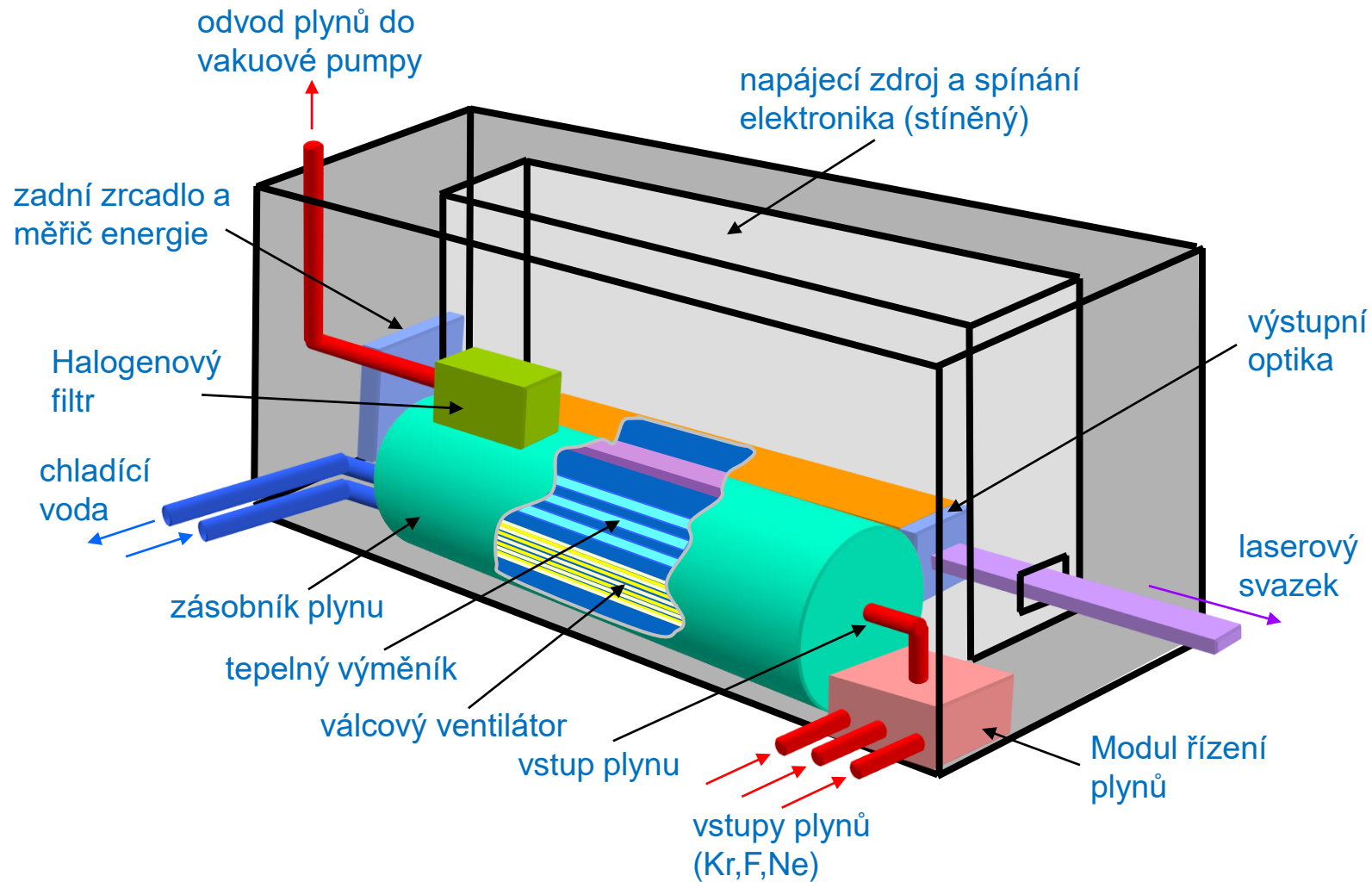
Exciplex - excitovaný komplex

Excimer – excitovaný dimer

Realizace: 1970 Basov, Xe_2^* buzené elektrony



Excimerový laser



Argonový iontový laser

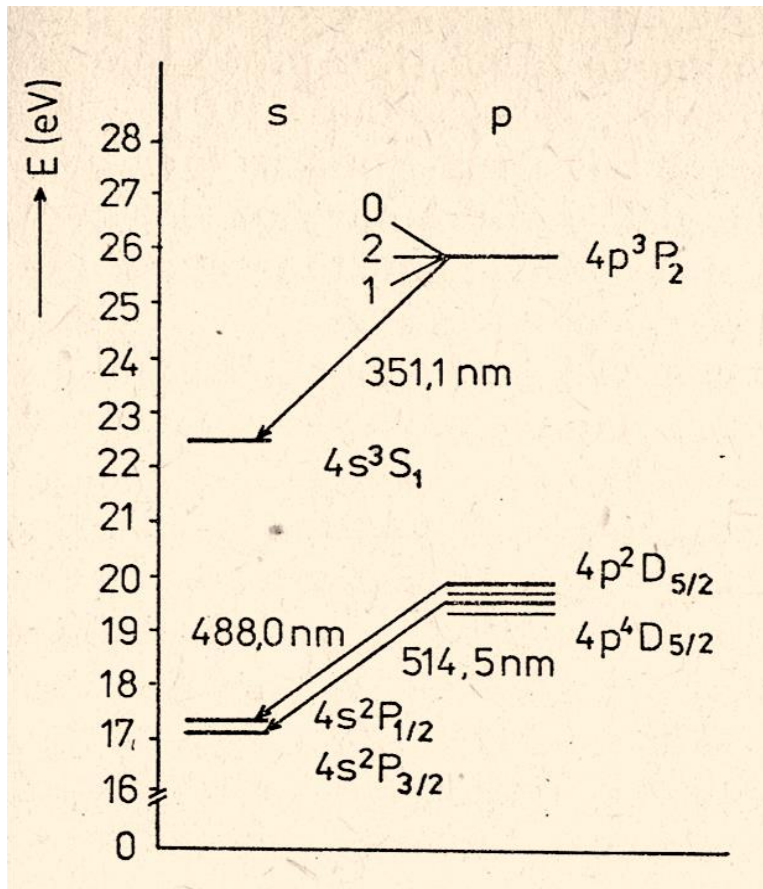


Schéma přechodů ArII a ArIII iontů

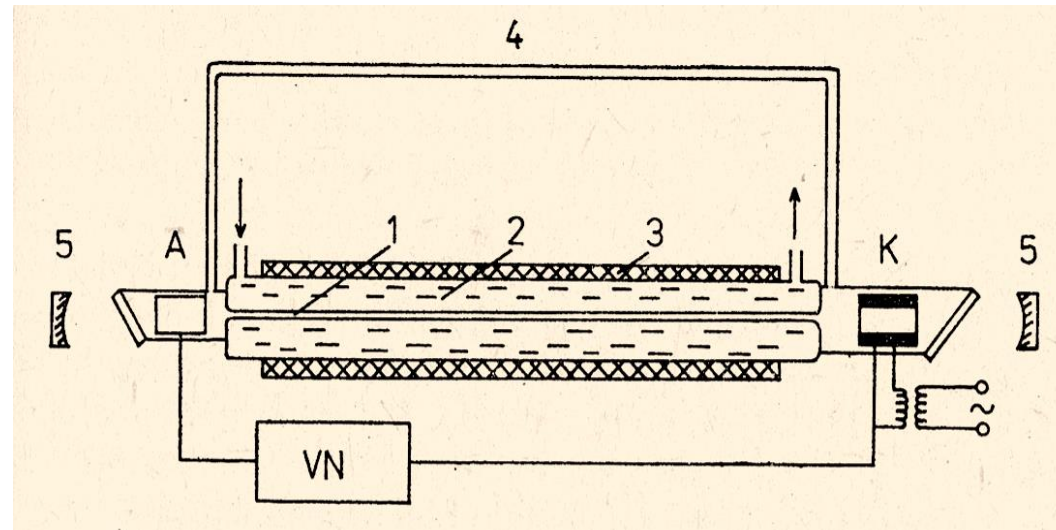
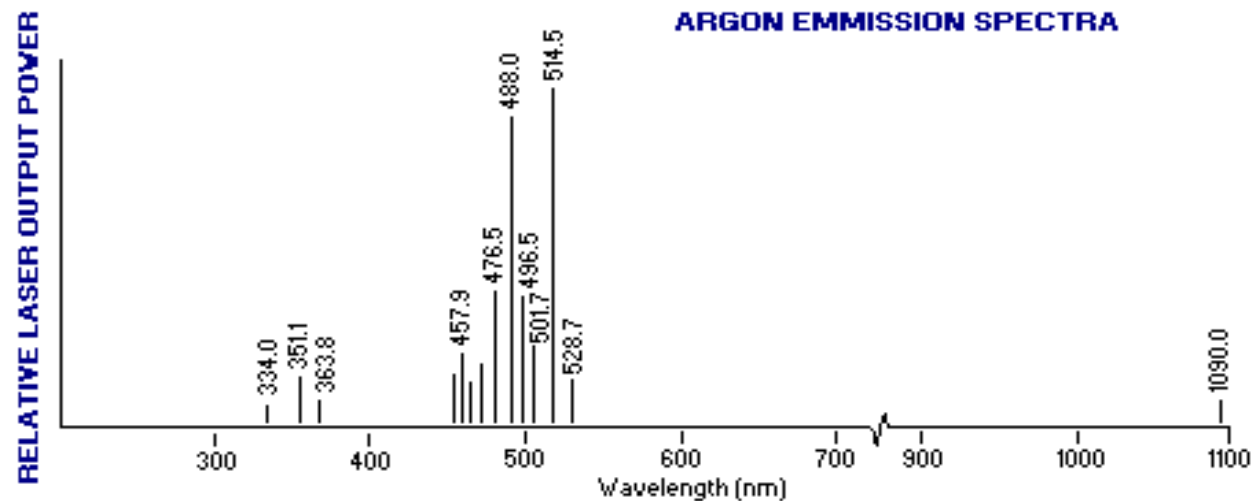
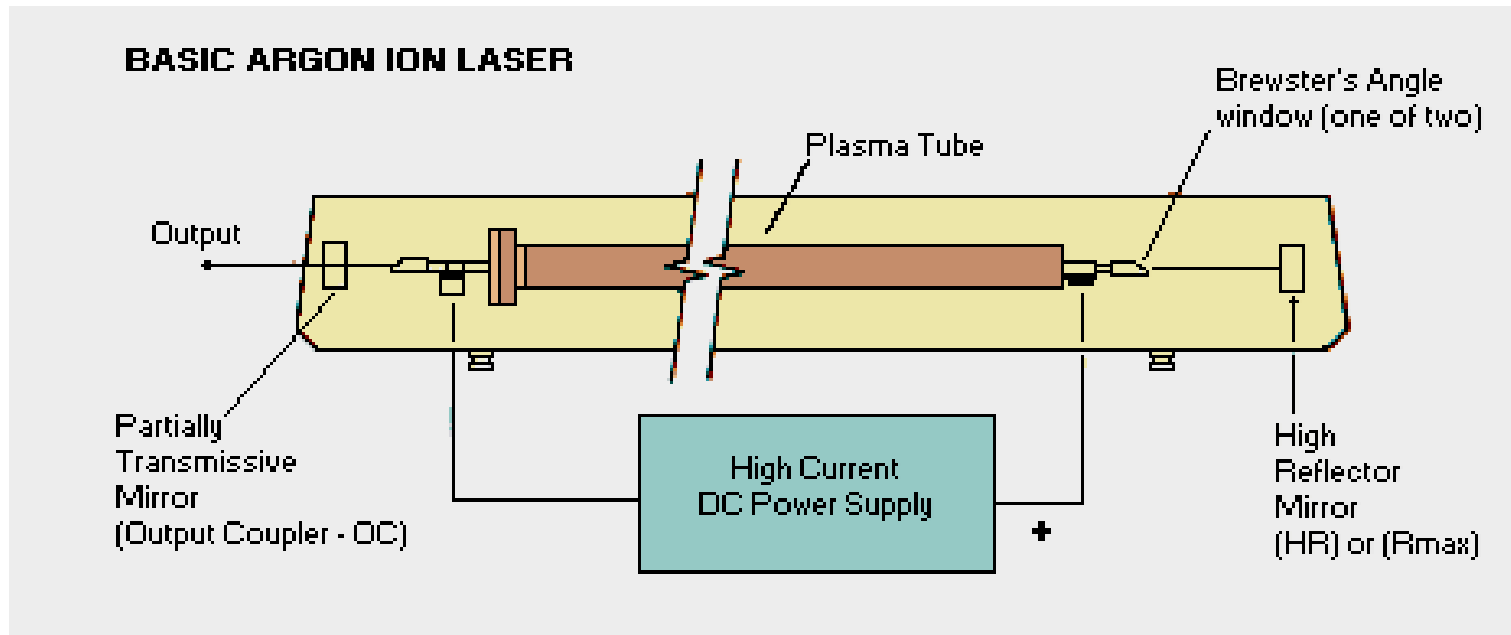


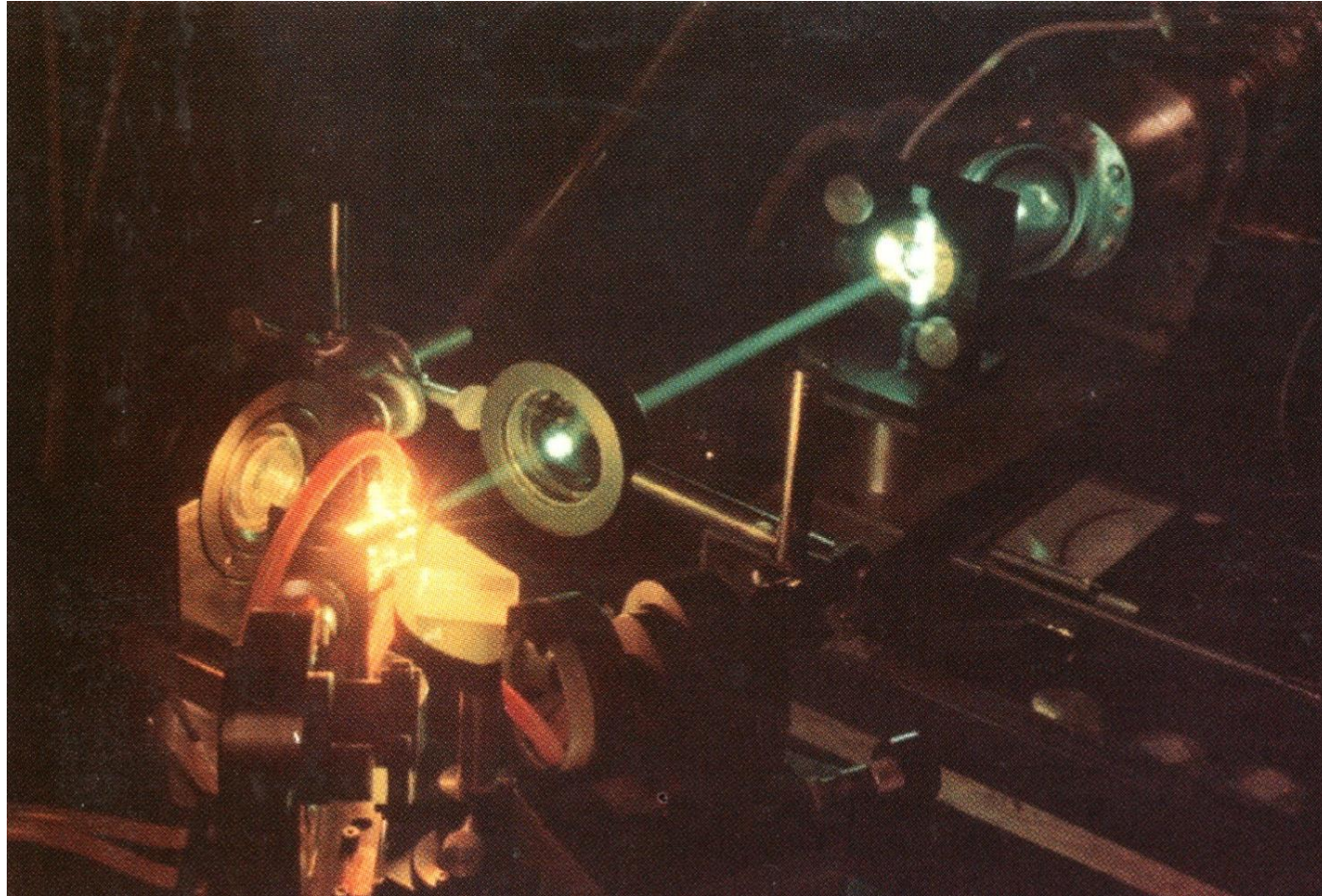
Schéma argonového laseru:

- 1-vysokoproudová kapilára
- 2-vodní chlazení
- 3-solenoid
- 4-vyrovnávací kapilára
- 5-zrcadla
- A-anoda, K-žhavená katoda,
- VN- vysoké napětí

Argonový iontový laser



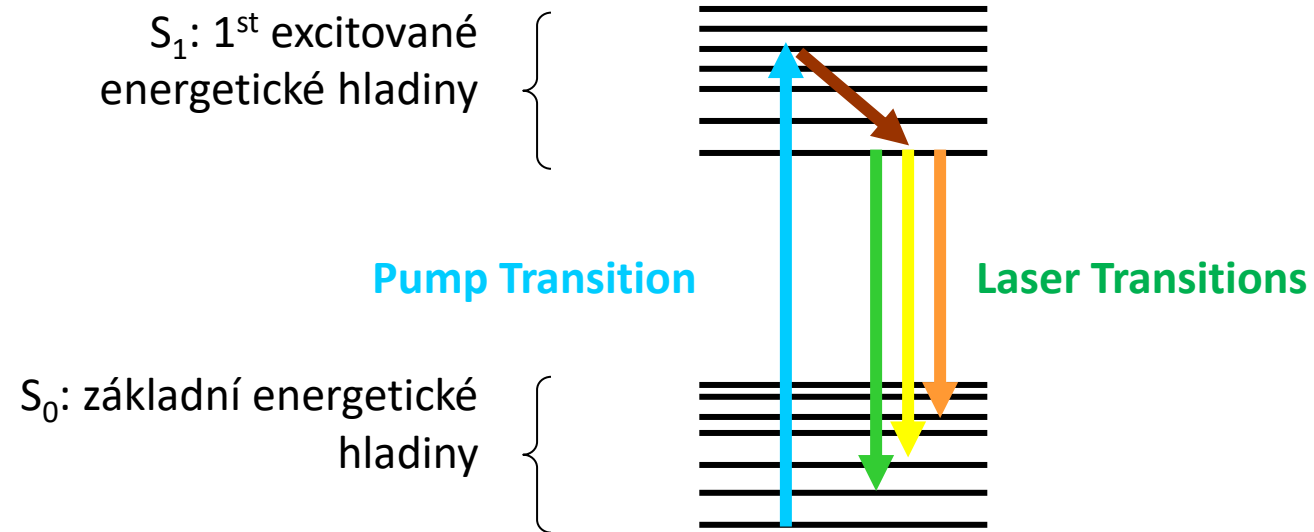
Barvivové lasery



Barvivové lasery (dye lasers) - ideální čtyřhladinový systém,
barvivo bude vyzařuje v rozsahu ~ 100 nm.

Energetické hladiny barviva

- Dolní laserová hladina může být téměř libovolná úroveň S_0

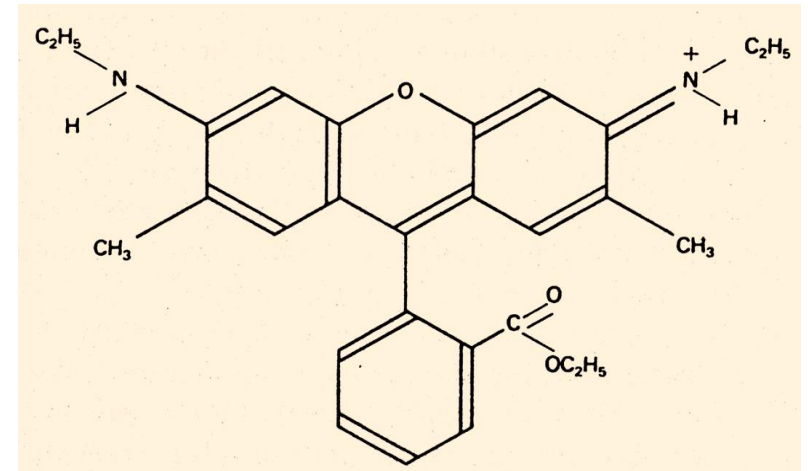


Barviva - ideální aktivní prostředí, často obtížné zastavit vyzařování ve všech směrech!

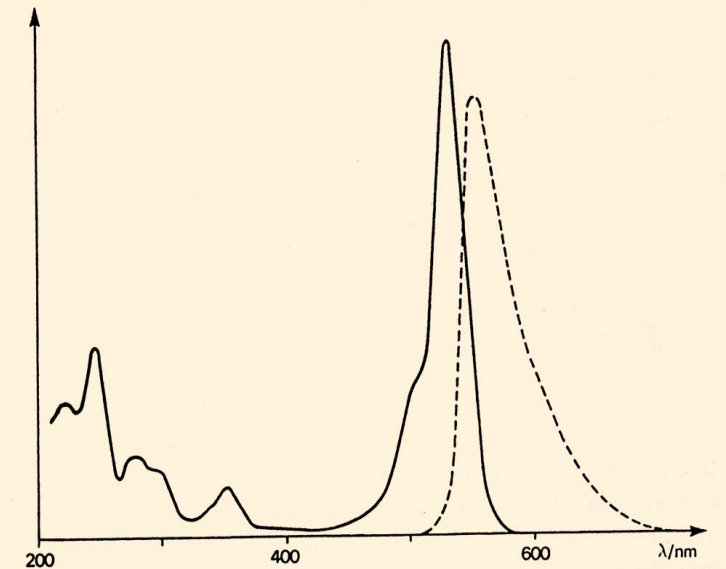
Barvivové lasery

- Vyznačují se velkou spektrální šířkou pásma zesílení (10 -100 nm) a z toho plyne

1. Možnost kontinuální změny vlnové délky laserového záření v rozsah dostatečného pásma zesílení
2. Možnost generace krátkých impulzů, až do 1 ps

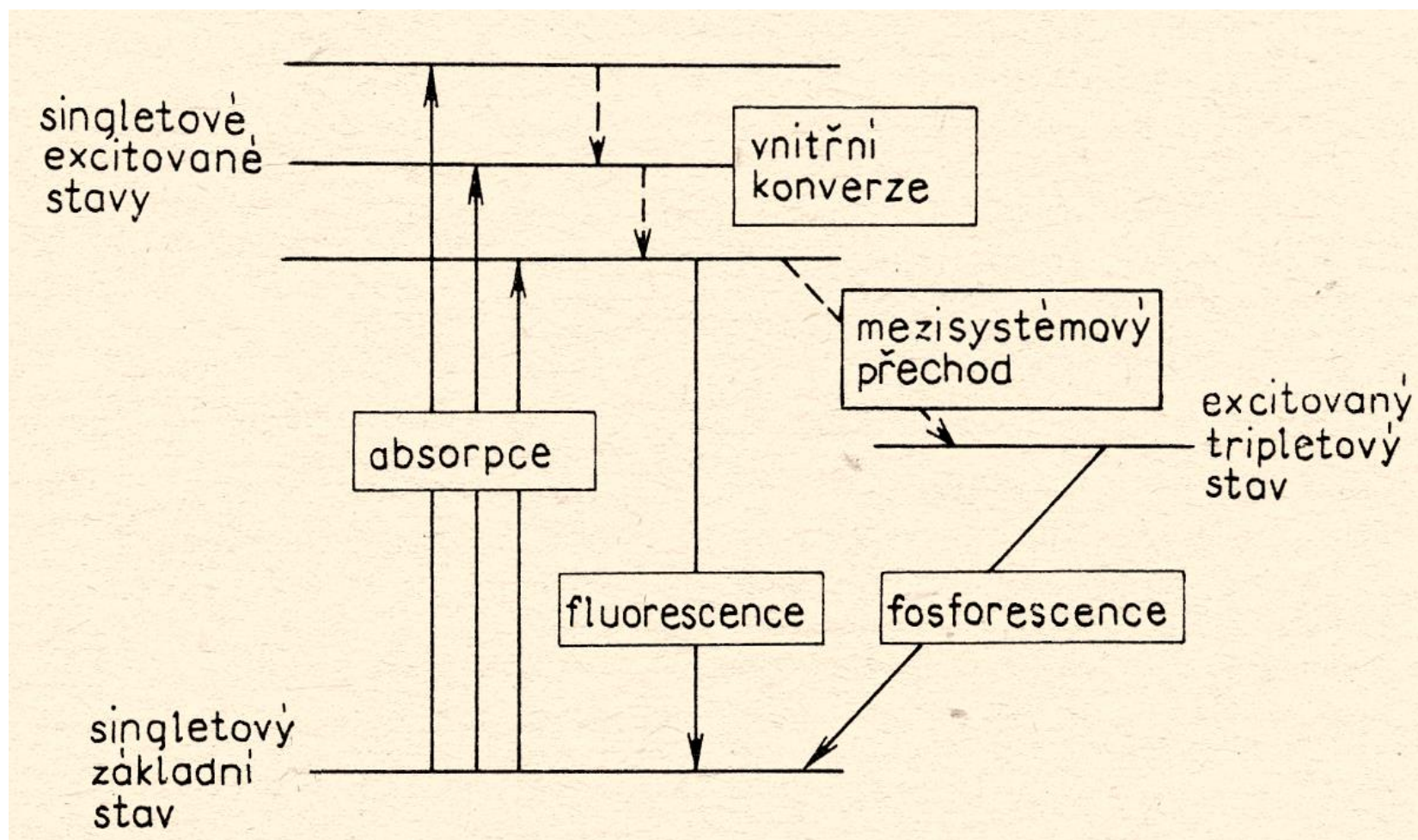


One of the resonance structures of the Rhodamine 6G cation



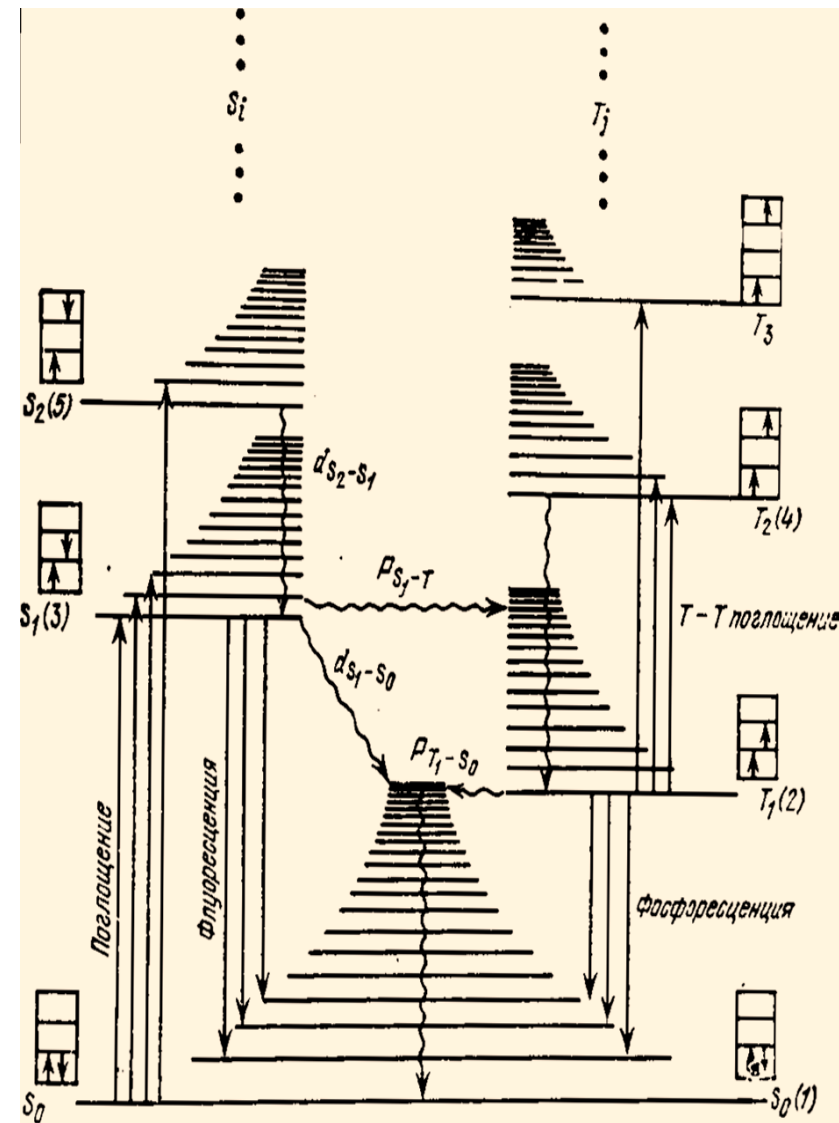
Solution spectra of Rhodamine 6G in ethanol. The solid curve shows the absorption, and the dotted curve the fluorescence at longer wavelength

Generalizovaný Jablonského diagram energetických hladin a přechodů v barvivu

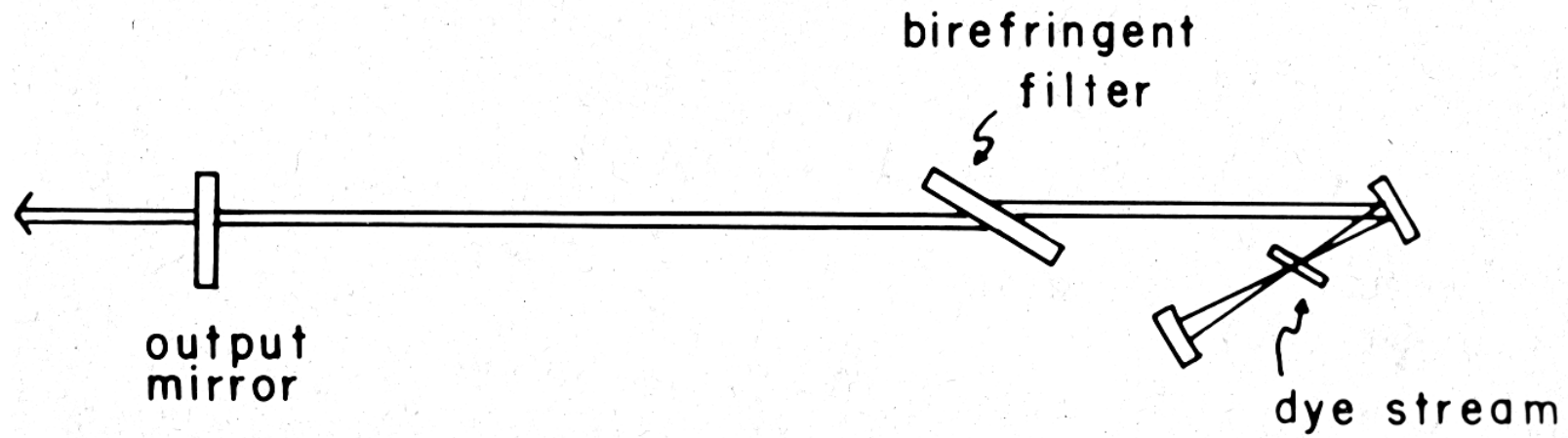


Energetický systém barviva

- Excitace absorpcí záření přechodem ze základního do prvního singletového stavu
- Fluorescenční přechod do základního stavu (možnost inverzní populace)
- Nezářivý přechod z S_1 do metastabilního tripletového T_1 stavu (parazitní proces)
- Absorpce fluorescenčního záření přechodem $T_1-T_2(T_3)$ – zhaší fluorescenci, snižuje zesílení aktivního prostředí



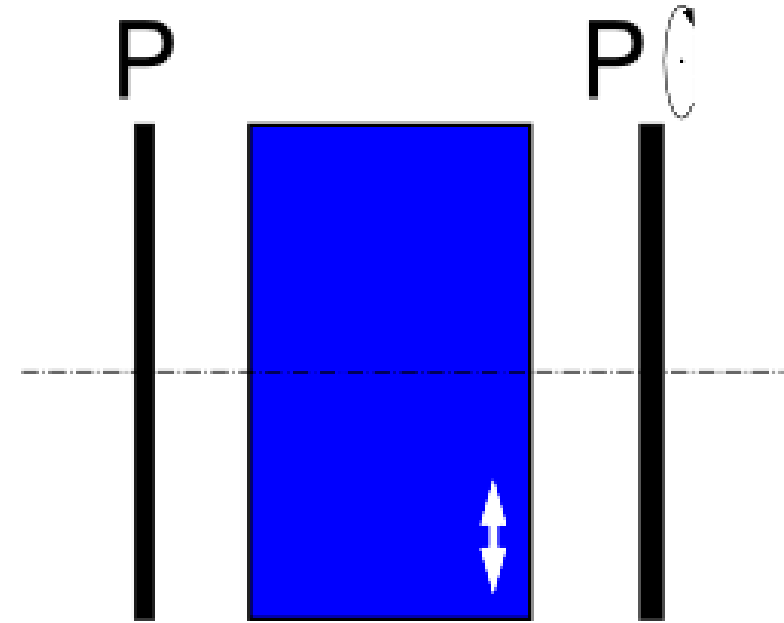
Barvivový laser - schema



Dvojlomné filtry

(Wood birefringent filters)

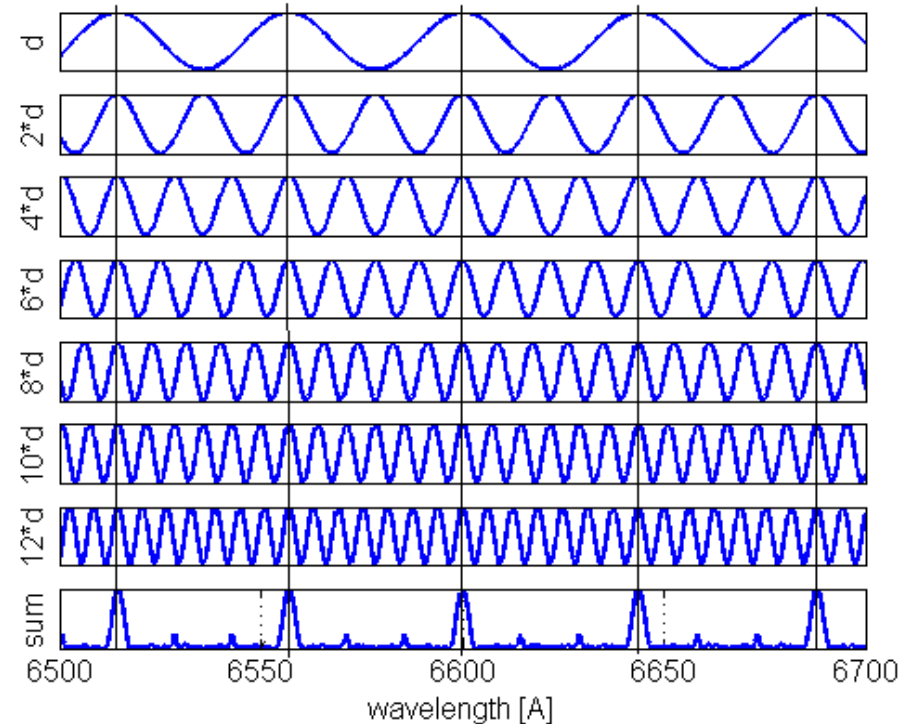
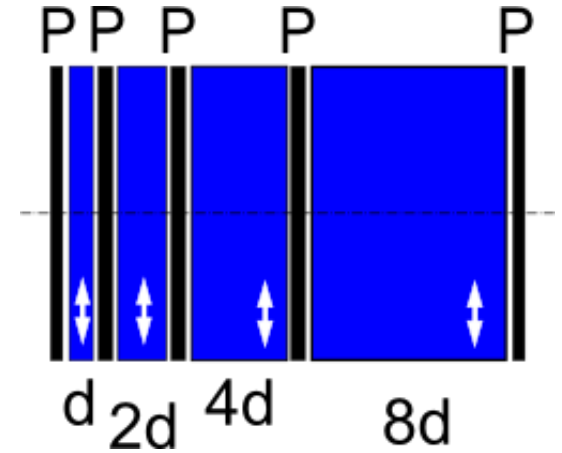
- Dvojlomný filtr se skládá ze dvou polarizátorů a krystalické křemenné desky řezané rovnoběžně s krystalovou osou.
- Tloušťka desky závisí na vlnových délkách, které chceme oddělit.
- Na příklad u dubletu sodíku je tloušťka asi 31,8 mm (záleží také na provozní teplotě).
- Tyto typy filtrů jsou velmi přesná optická zařízení a je nutné dodržovat velmi přesné tolerance tloušťky při výrobě.



Dvojlomný filtr Lyotova typu

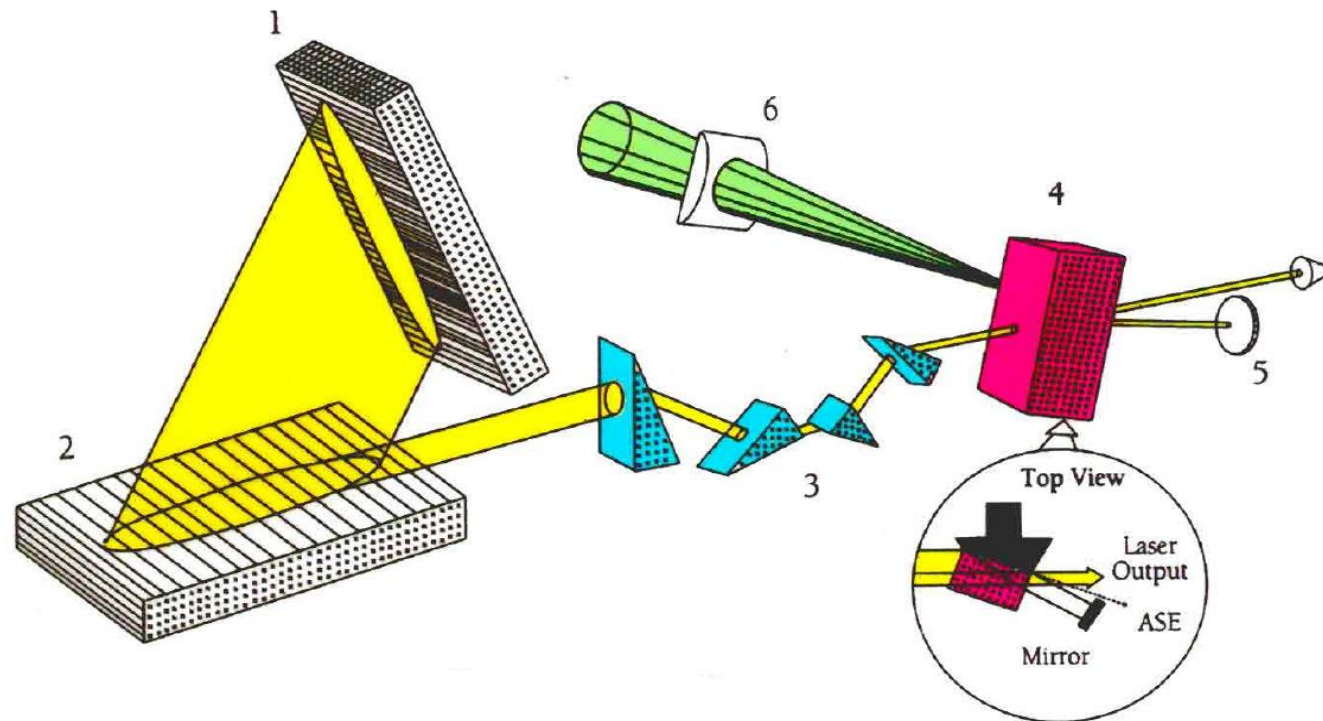
(Lyot birefringent filters)

- Tento filtr je ve skutečnosti sestaven z několika dvojlomných filtrů sériově seřazených za sebou. Tloušťka „ d “ první desky je taková, že propouští požadovanou vlnovou délku a zaručuje požadované vlastnosti filtru. Každá další dvojlomná deska má dvojnásobnou šířku než předchozí. Výsledkem toho je že požadovaná vlnová délka je dále propouštěna zatímco se nežádoucí vlnové délky propuštěné předchozí dvojlomnou deskou odfiltrují.
- Taková kaskáda dvojlomných desek vložených mezi polarizátory poskytuje vysoce účinný filtr s pološířkou řádově 1/100 nanometrů

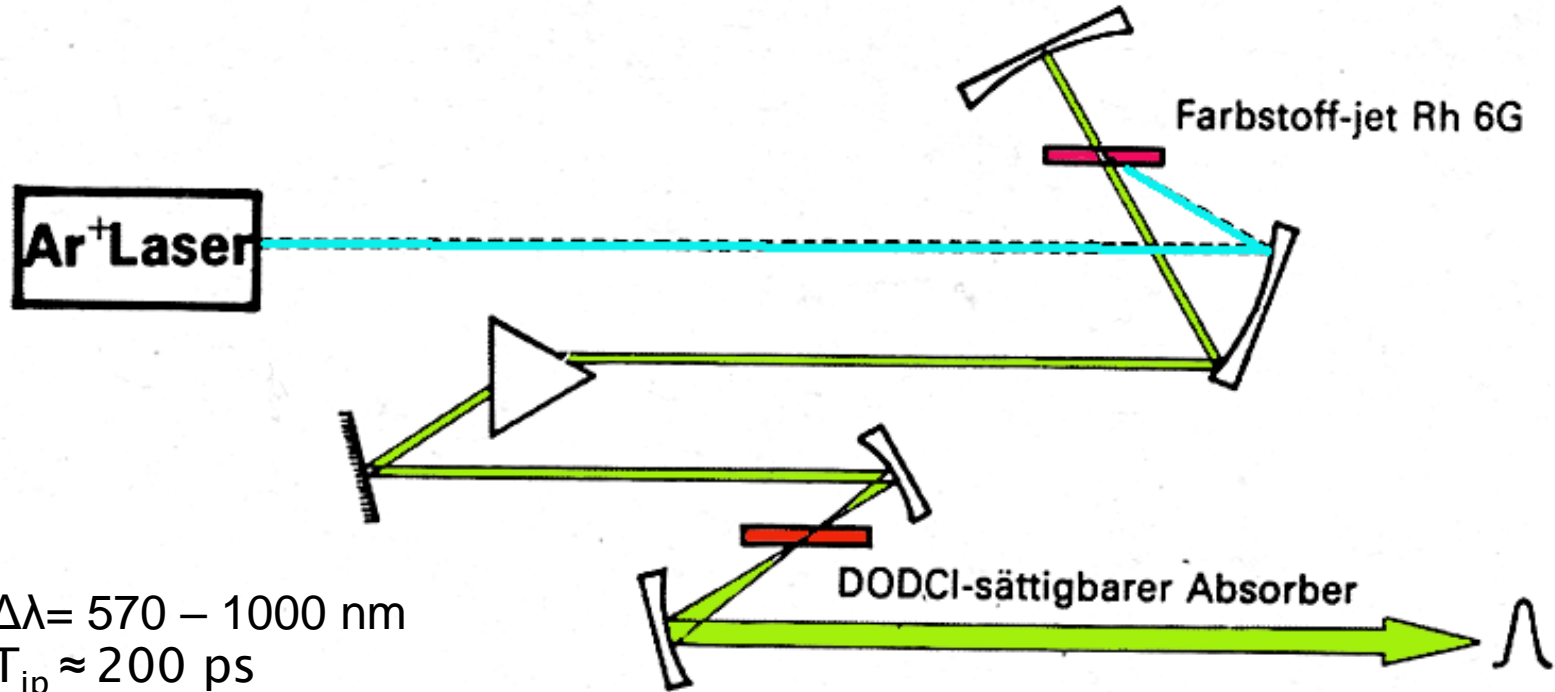


Barvivový laser

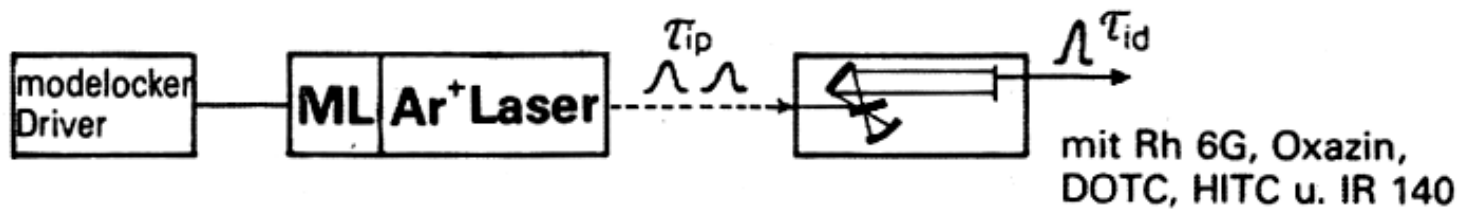
1. Zrcadlo (ladění)
2. Mřížka
3. Expandér paprsku
4. Kyveta s barvivem
5. Zrcadlo rezonátoru
6. Čerpání (laserem)



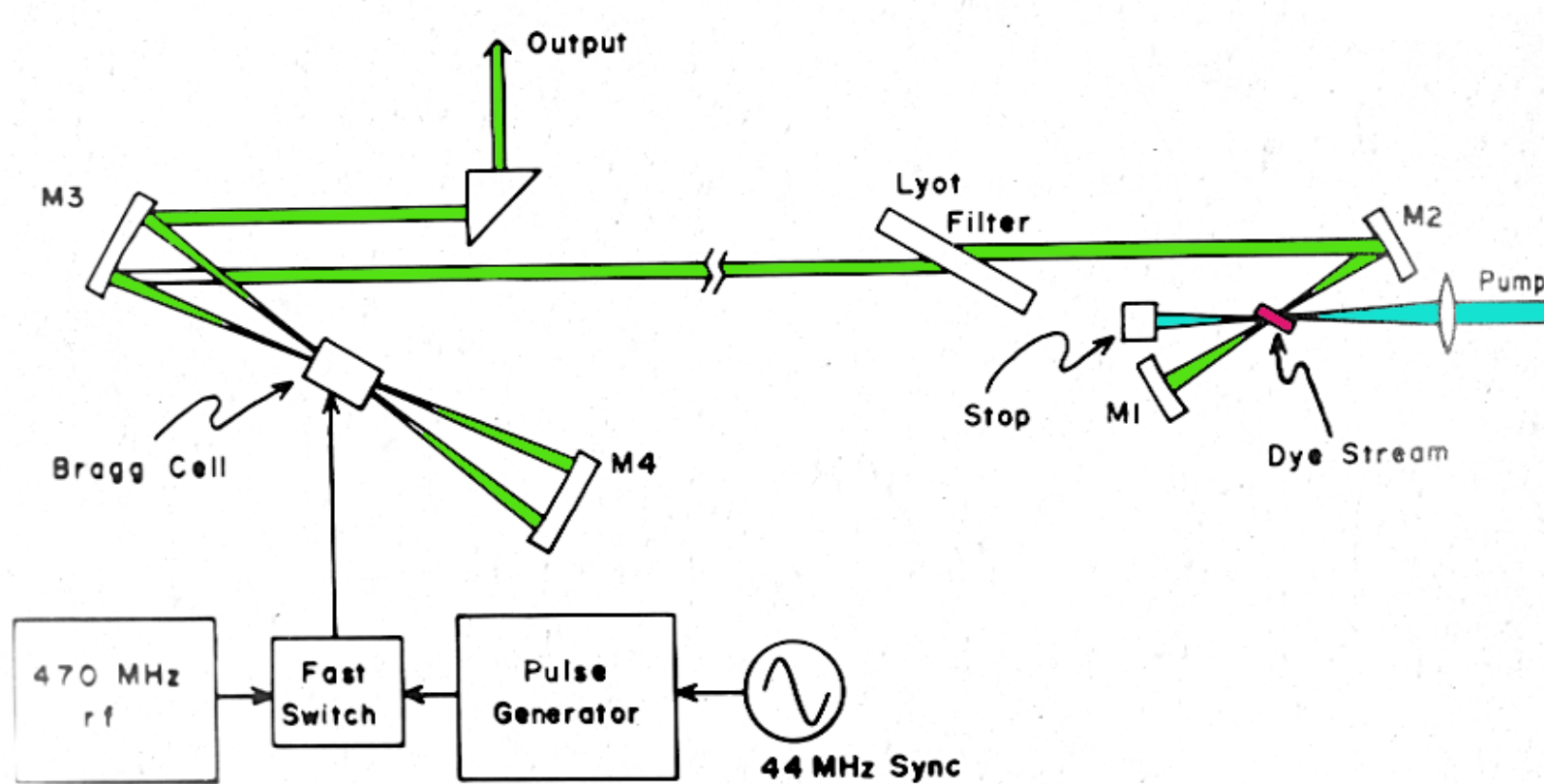
Pikosekundový laser



$\Delta\lambda = 570 - 1000 \text{ nm}$
 $T_{ip} \approx 200 \text{ ps}$
 $\tau_{id} \approx 0,8 - 50 \text{ ps}$
 $f = 50 - 150 \text{ MHz}$



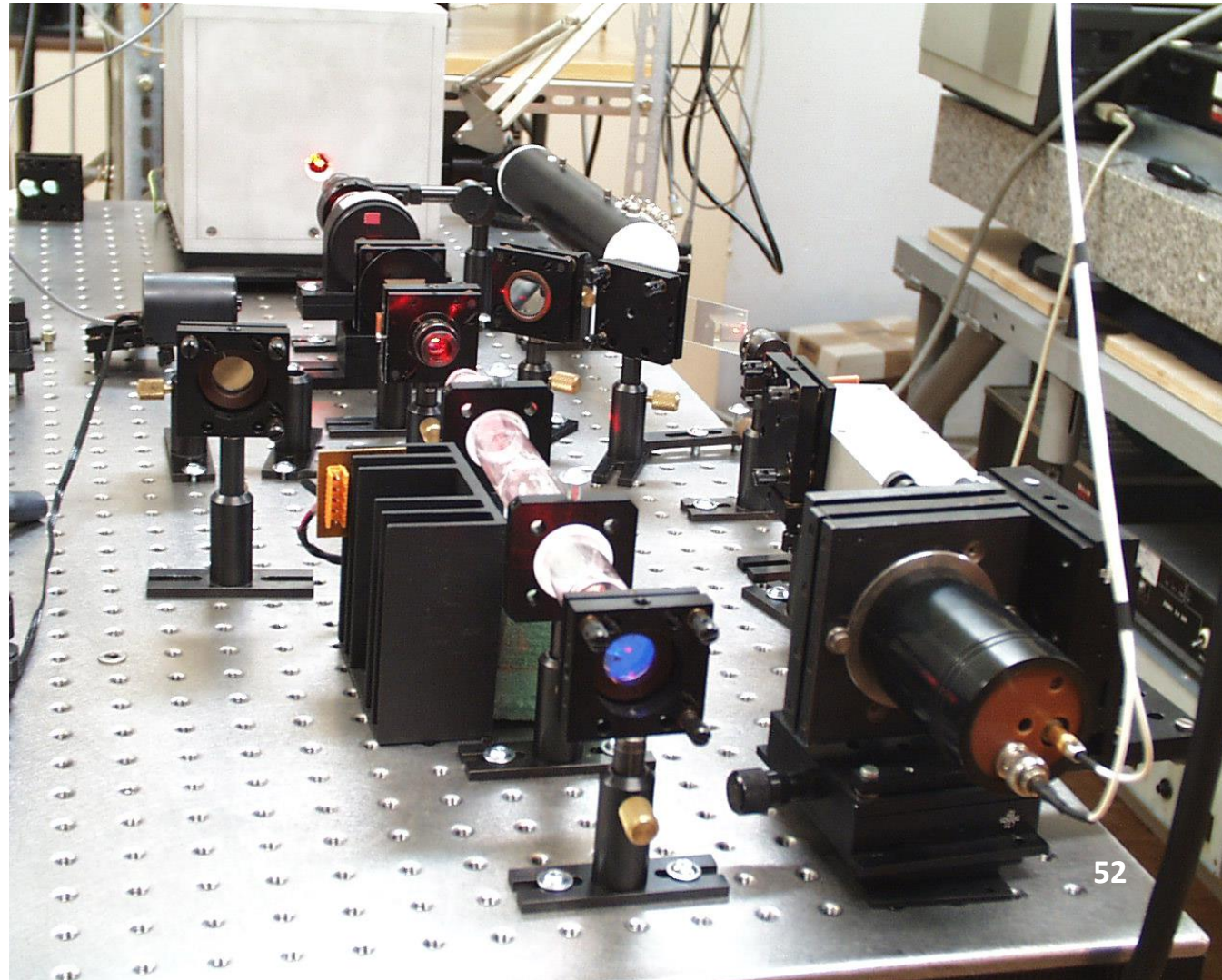
Barvivový laser se synchronizací módů



Typy barviv pro lasery

Rozsah emise(nm)	Strukturní typ
340 - 430	stilbeny
360 - 480	oxazoly
410 - 440	antraceny
440 - 520	akridiny
460 - 540	kumariny
510 - 700	xanteny
540 - 1200	cyaniny
630 – 720	oxaziny

Experimentální laserové pracoviště



Prague Asterix Laser System

- Páteří Badatelského centra PALS je obří jódový laserový systém. Ve stávající konfiguraci a na základní vlnové délce 1315 nm je schopen poskytovat v hlavním laserovém svazku pulzy o energii až 1 kJ, a k tomu až 100 J ve dvou menších přídatných svazcích. Vlnová délka laserových svazků může být konvertována na vlnovou délku odpovídající druhé (658 nm, červená) nebo třetí (438 nm, modrá) harmonické základní frekvence.
- Vzhledem k velmi krátké délce laserového pulzu (cca 350 ps) je špičkový pulzní výkon laseru obrovský - až 3 TW, tj. 3 milióny megawattů. Laser je schopen dodat takovýto obří puls zhruba jednou za půl hodiny. Výstupní svazek laseru PALS je velmi kvalitní, tj. prostorově homogenní, a stabilní, tj. jeho energie se výstřel od výstřelu prakticky nemění.



Jódový laser Asterix

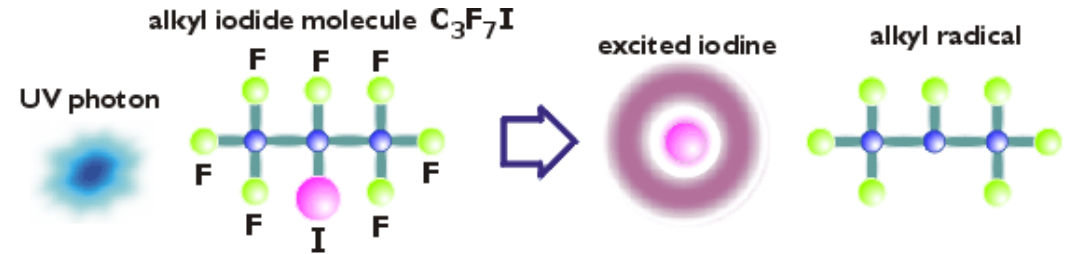
Asterix IV je plynový laser, v němž se využívá atomů jódu ke generaci záření v blízké infračervené oblasti, na vlnové délce 1,315 μm .

Jódový atom je přitom získáván z mateřské molekuly alkyljodidu $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$ fotodisociací.

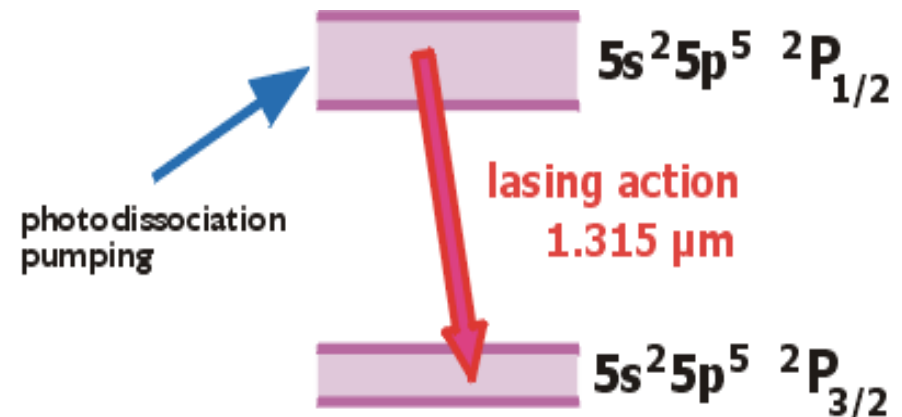
Atom se uvolňuje z chemické vazby prostřednictvím pulzního UV záření dodávaného výbojkami.

Elektronový obal jódu vystupujícího z fotodisociační reakce je excitován, čímž je automaticky zformována inverze populace vzhledem k níže ležícímu základnímu stavu.

Tím jsou vytvořeny podmínky pro laserovou akci.



The iodine laser is pumped with energy released via photochemical reaction



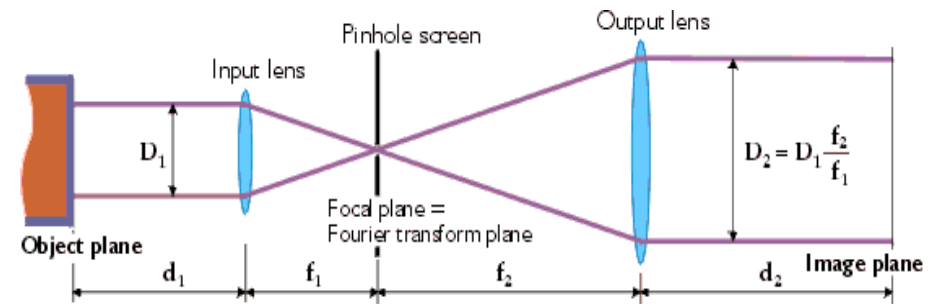
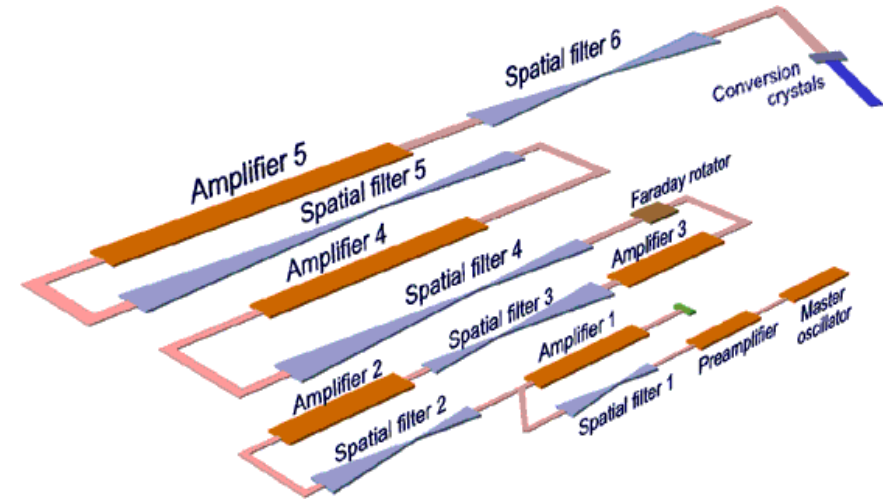
Celkové uspořádání PALS

PALS je jednosvazkový laserový systém, sestávající z oscilátorové sekce generující počáteční slabý světelný pulz a z řetězce pěti laserových zesilovačů, jež tento pulz postupně zesilují.

Takové schéma uspořádání se anglicky nazývá "master oscillator - power amplifiers" (MOPA), neboli řídicí oscilátor - výkonové zesilovače.

Rozměr zesilovačů se od jednoho zesilovacího stupně k druhému zvětšuje, takže průměr zesilovaného laserového svazku postupně roste, od počátečních 8 mm až na koncových 290 mm.

Tím se udržuje plošná hustota výkonu laserového svazku na hodnotě, při které ještě nemůže dojít k poškození povrchu jednotlivých optických prvků vlivem přílišné světelné zátěže.



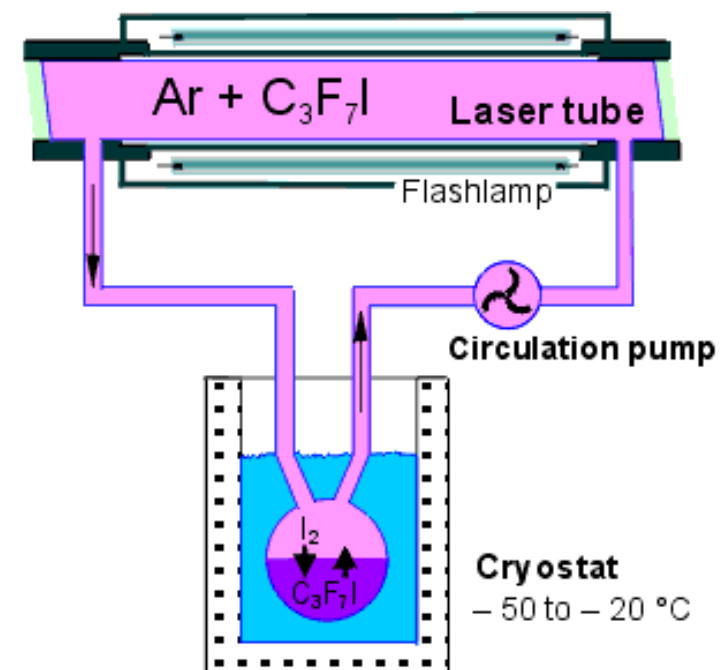
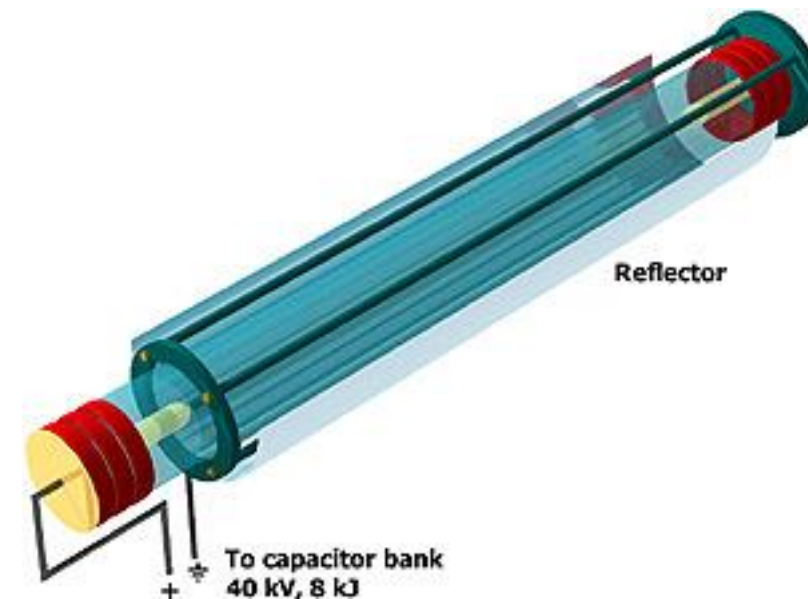
Optický zesilovač

Laserový řetězec Asterix IV/PALS zahrnuje celkem pět výkonových zesilovačů. Jejich úkolem je zesílit pulsy přicházející z oscilátorové části na energii až jeden kilojoule.

Velikost jednotlivých zesilovačů postupně narůstá směrem ke konci řetězce - finální pátý zesilovač je dlouhý přes 13 m (viz obrázek) a poskytuje laserový svazek o průměru 29 cm.

Zlomek sekundy před vlastním laserovým výstřelem jsou zesilovače "aktivovány" vybitím velkých baterií kondenzátorů do výbojek, které obklopují kyvety zesilovačů obsahující plynné pracovní prostředí.

Intenzivní záblesk nekoherentního ultrafialového záření produkovaného výbojkami dá v kyvetách vzniknout velkému množství excitovaných atomů jódu, které jsou "připraveny" odevzdat svoji přebytečnou energii laserovému pulsu přicházejícímu z oscilátorové části.



Centrum HiLASE

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.
Za Radnicí 828
252 41 Dolní Břežany

<https://www.hilase.cz/>



Vysokoenergetický nanosekundový laser BIVOJ (až 100 J)
Pikosekundový laser s vysokou opakovací frekvencí PERLA® B
Pikosekundový laser s vysokou opakovací frekvencí PERLA® C
Nanosekundový DG laser s vysokou opakovací frekvencí (1 kHz)

...

CENTRUM ELI BEAMLINES

The Extreme Light Infrastructure ERIC
ELI Beamlines Facility
Za Radnicí 835
Dolní Břežany

<https://www.eli-beams.eu/cs/>



LASER L4 ATON - extrémně vysoký špičkový výkon 10 PW (petawattů) při délce trvání pulzu asi 150 fs.

LASER L3 HAPLS

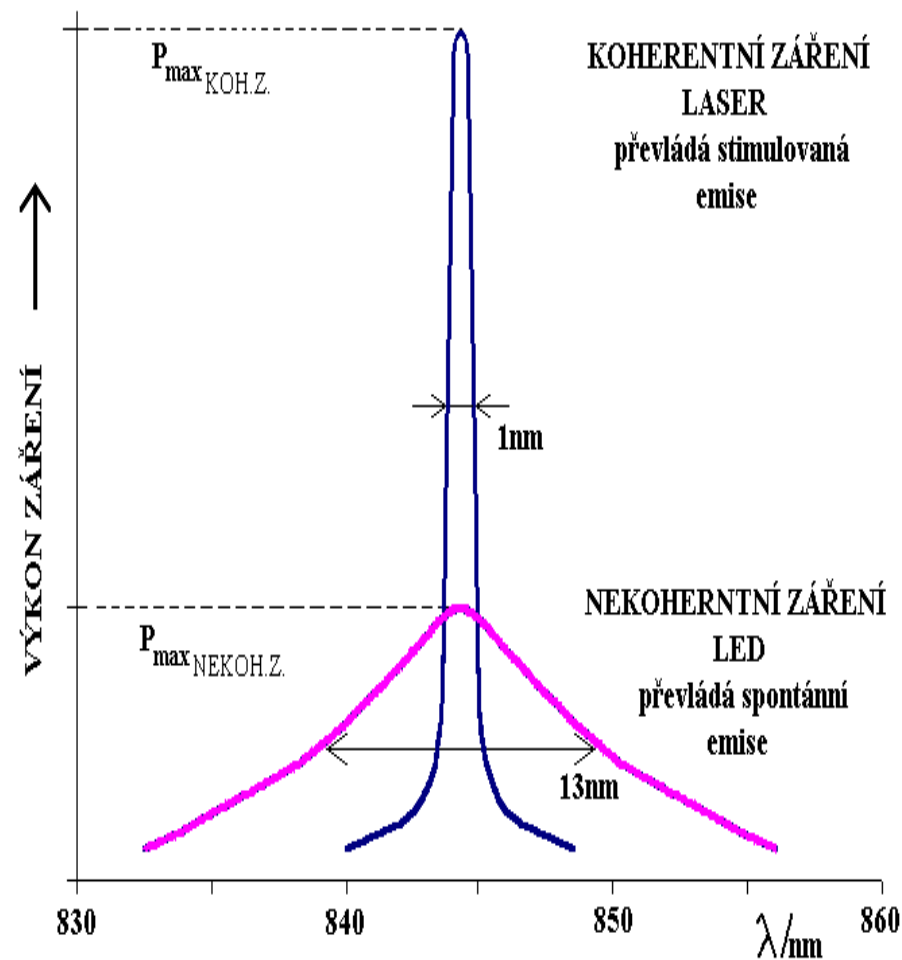
LASER L2 DUHA

LASER L1 ALLEGRA - generování sub 20fs pulzů s energií vyšší než 100 mJ při opakovací frekvenci (1 kHz).

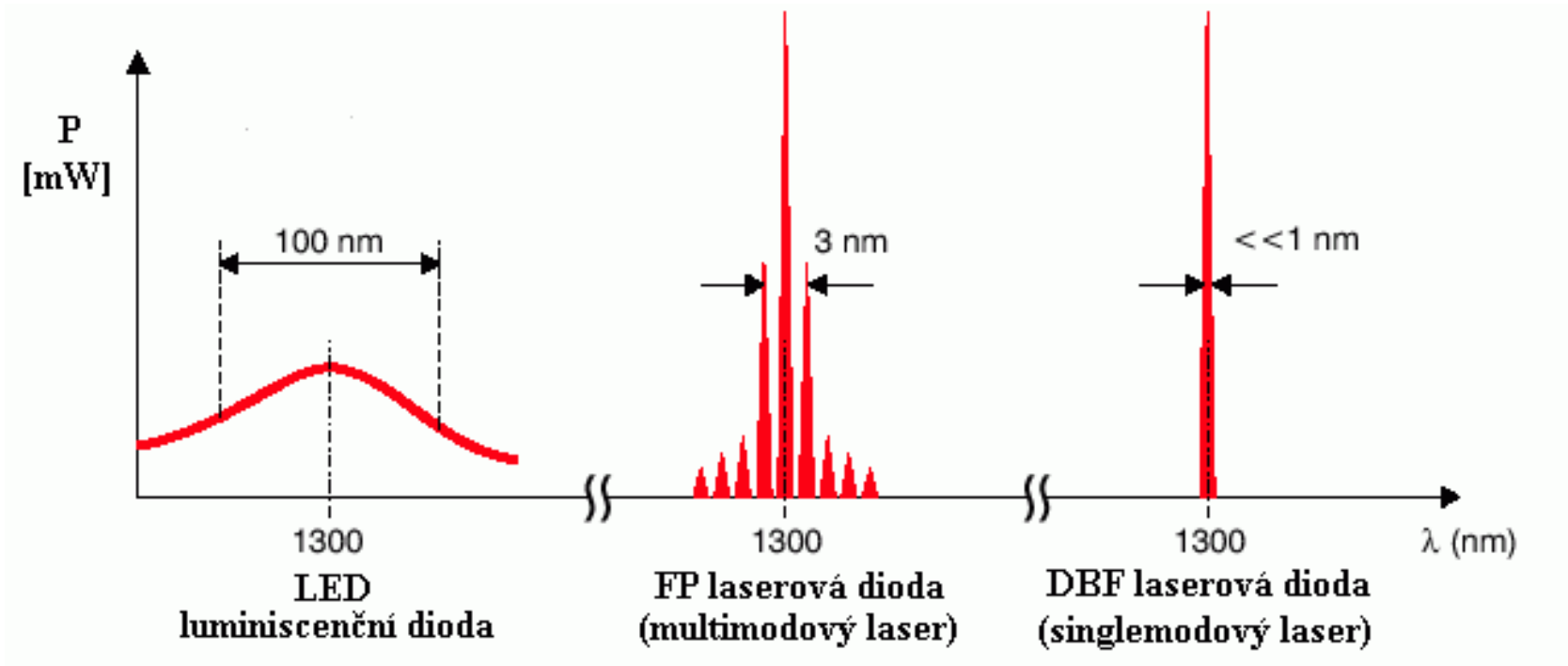
...

Laserové diody

- Pro malé proudy má záření LED spontánní charakter a je lineární funkcí budícího proudu.
- Po dosažení **prahového proudu**, prudce narůstá výkon stimulovaného záření a ze zrcadel rezonátoru je emitováno **koherentní záření** opět lineárně závislé na velikosti budícího proudu.
- Zároveň také dochází ke kvalitativní změně tvaru vyzařovací charakteristiky laserové diody vyjádřené zmenšováním úhlu vyzařování v rovině kolmé a rovnoběžné s rovinou přechodu PN, rovněž ke zmenšení šířky pásma emitovaného záření



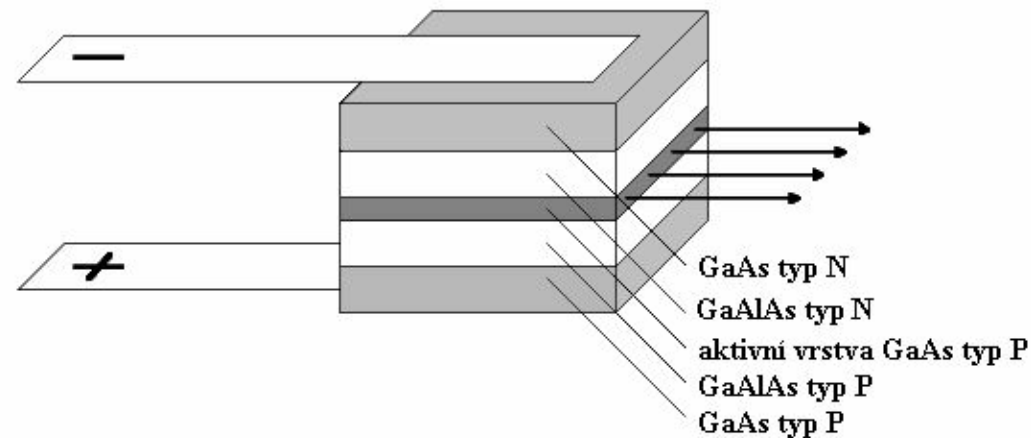
Spektrum LED a laserových diod



(distributed feedback)

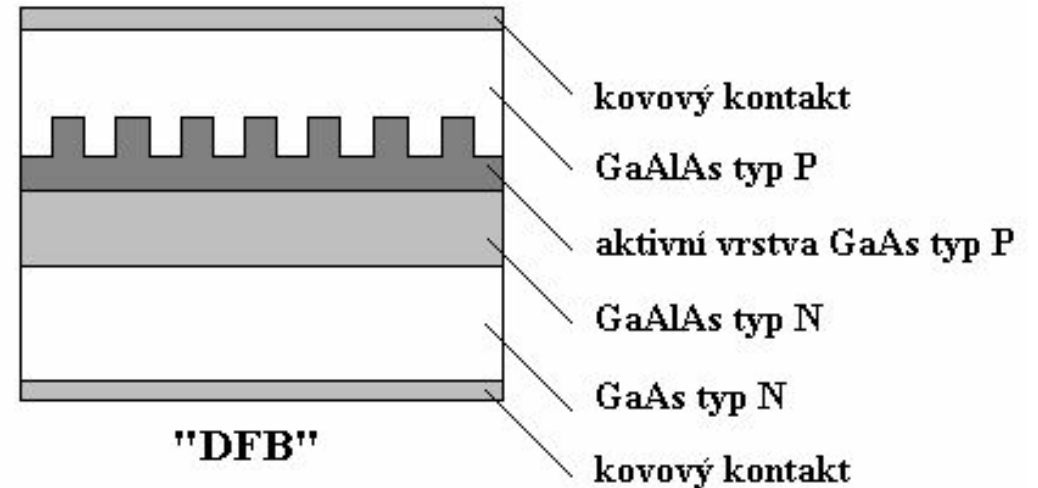
Heterostrukturální lasery

- V těchto typech laseru s *heteropřechody* je vymezení vlnovodu dáno skokovou změnou indexu lomu v oblasti heteropřechodu. Současně s účinným vedením světla zabezpečuje heterostruktura i podmínky k účinnému soustředění menšinových nosičů. Působením heteropřechodu se soustřeďuje záření a injektované nosiče do zvolených oblastí.



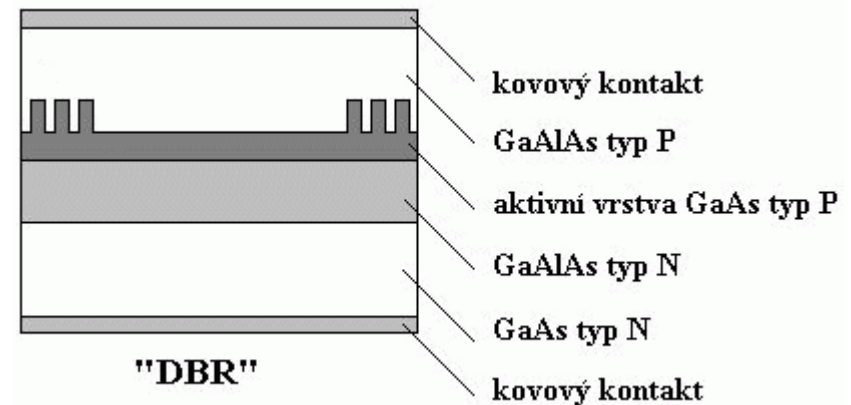
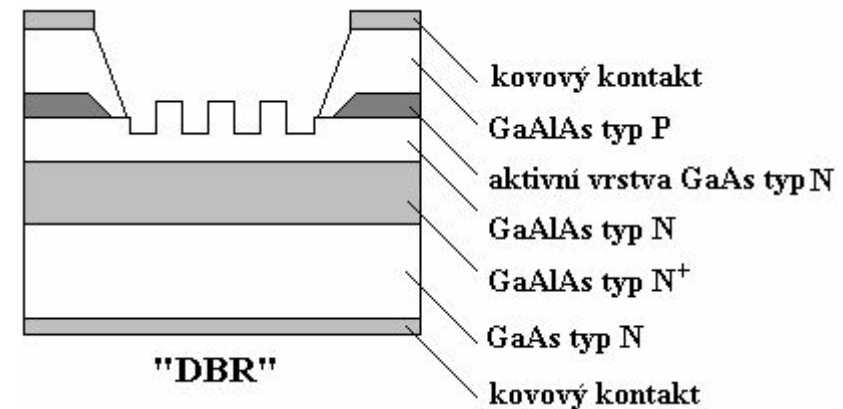
Lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou (Distributed Feed Back)

- U tohoto typu laseru je rezonátor realizován bez zrcadel pomocí prostorových periodických struktur (*difrakčních mřížek*).
- Funkce je založena na periodické změně indexu lomu ve směru šíření. Zpětná vazba vzniká trvalým navázáním šířící se vlny do opačného směru *Braggovským rozptylem*.
- Mřížka se vytváří leptáním přímo na povrchu aktivní vrstvy. Tyto lasery jsou označovány jako **DFB**

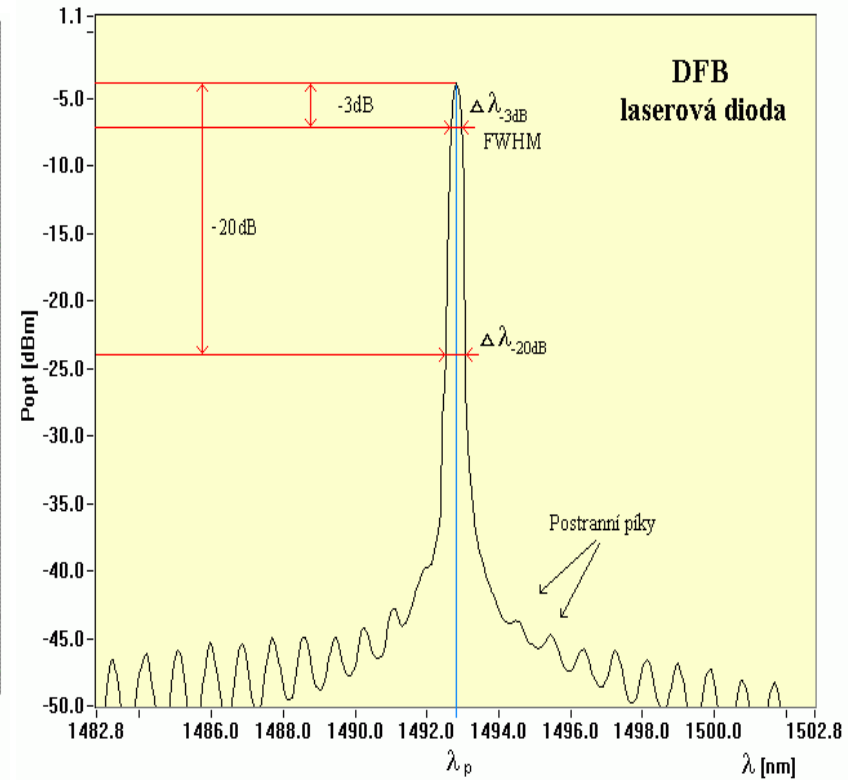
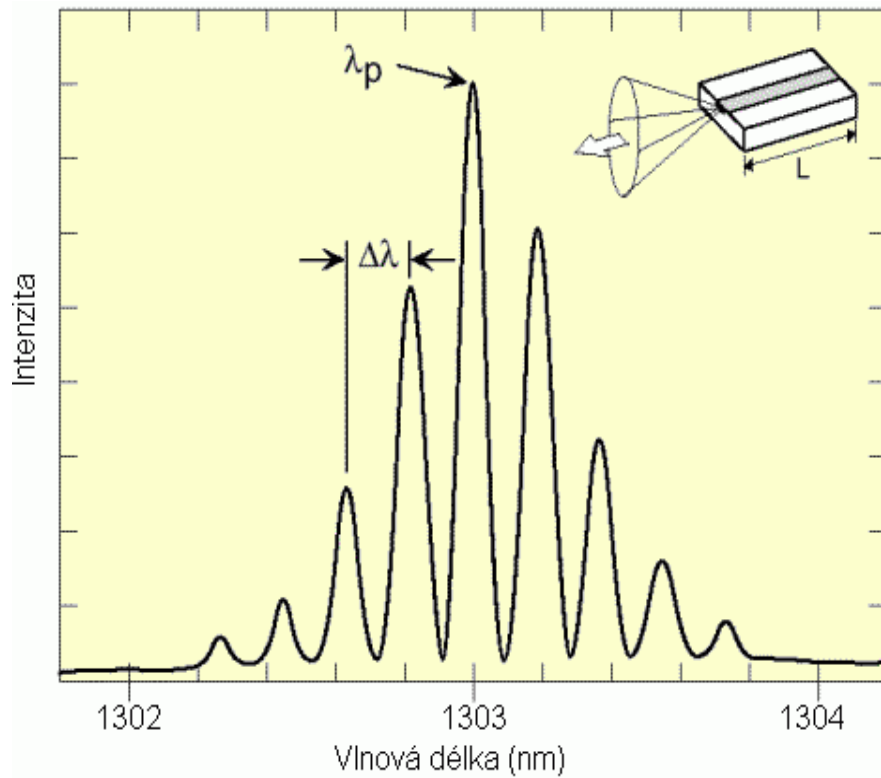


Lasery s rozloženým Braggovým zrcadlem (Distributed Bragg Reflector).

- Generace optického záření a zpětná vazba (opět pomocí optické mřížky) se uskutečňují v samostatných částech struktury.
- Užívají se dva typy konstrukce, s jedním nebo se dvěma Braggovými zrcadly.
- V běžné praxi se častěji užívá typ se dvěma Braggovými zrcadly na koncích vlnovodu

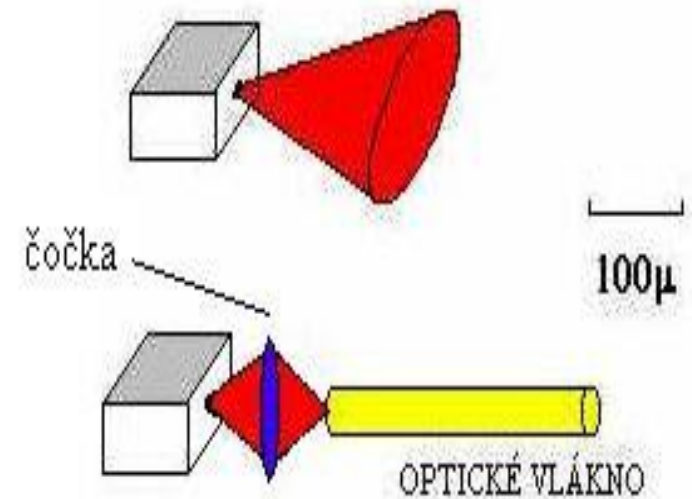


Spektrum laserových diod



Hranově vyzařující lasery

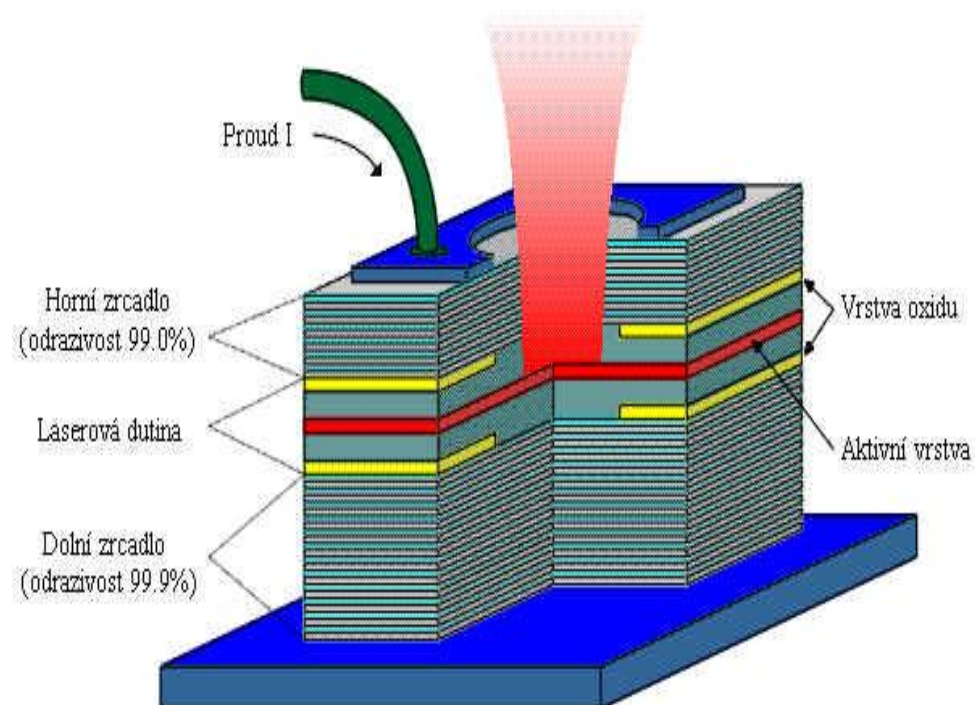
- Tento typ (Edge Emitting Lasers - EEL) vysílá záření z hrany přechodu.
- Ve výrobě i aplikacích laserových diod zatím převládá



Hranově vyzařující LD

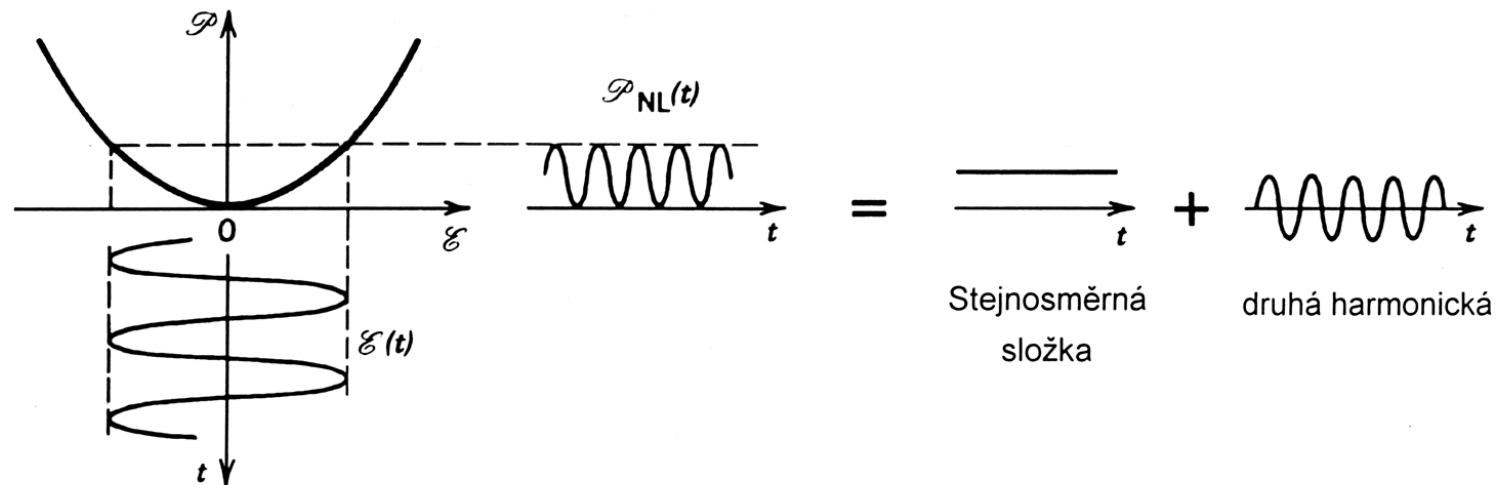
Plošně vyzařující lasery

- VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) emitují záření z plochy součástky rovnoběžné s rovinou přechodu.
- Záření emitované z plochy je pohlceno substrátem a ztraceno nebo, což je výhodnější, se odráží od kovového kontaktu



Frekvenční konverze

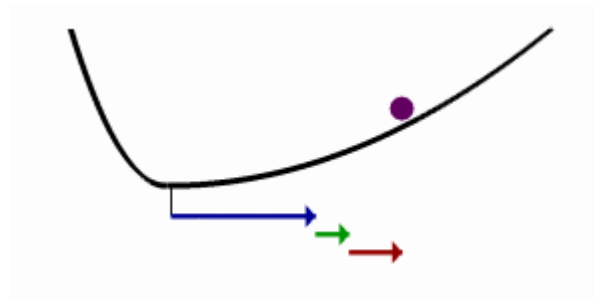
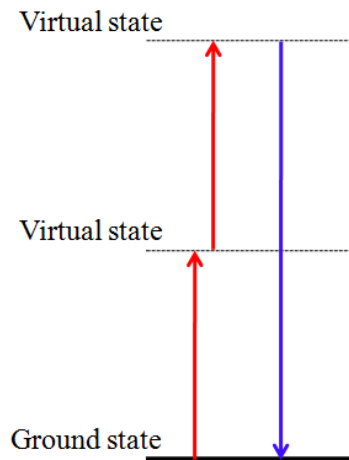
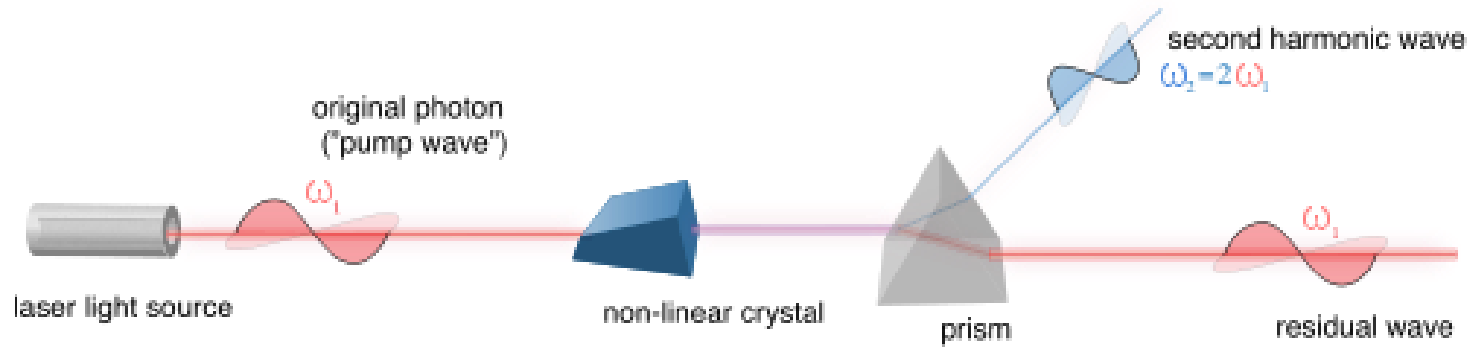
- První možností je využít nelineárních jevů druhého (třetího) řádu. Intenzita záření druhé harmonické je úměrná druhé mocnině koeficientu optické nelinearity a intenzity záření dopadající vlny, nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky.



Nelineární prostředí - krystaly

krystal	$\Delta\lambda$ (μm)	MW/cm ²
KDP (dihydrogenfosfát draselný)	0,2-1,35	400
KDDP (deuterovaný KDP)	0,2-1,8	500
ADP (dihydrogenfosfát amonný)	0,2-1,2	500
RDP (dihydrogenfosfát rubidný)	0,2-1,5	300
CDA (dihydrogenrsenát cesný)	0,26-1,6	500
LiIO ₃	0,3-4,5	60
LiNbO ₃	0,4-4,5	120
Ba ₂ NaNb ₅ O ₁₅	0,38-5	100
HIO ₃	0,4-1,3	100
BBO (β -BaB ₂ O ₄)	0,2-1,5	400

Frekvenční konverze



Modrá šipka odpovídá běžné (lineární) **susceptibilitě**, zelená šipka odpovídá druhému harmonickému generování a červená šipka odpovídá **optické rektifikaci**.

Optický parametrický oscilátor (OPO)

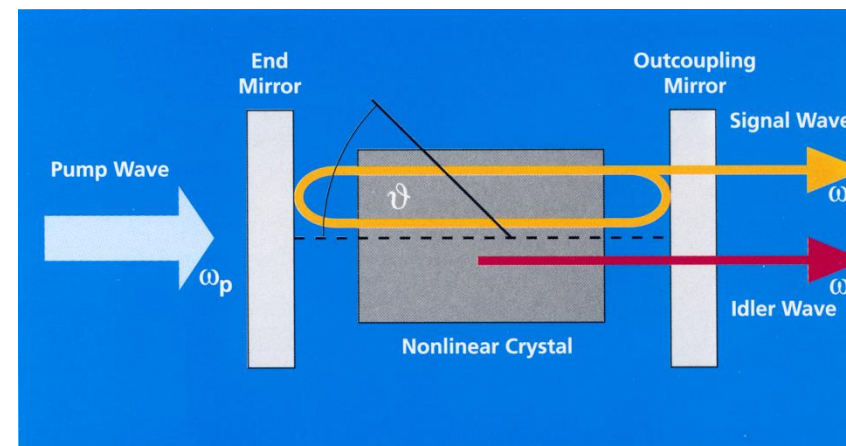
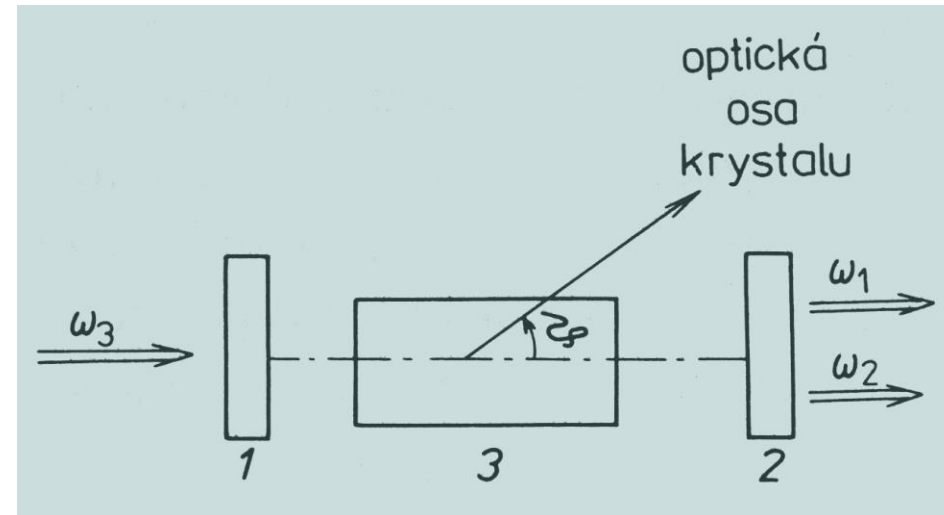
Optical Parametric Oscillator

- Založen na koherentním rozpadu fotonu o kruhové frekvenci ω_3 na dva fotony, jejichž kruhové frekvence ω_1 a ω_2 (signálová a jalová vlna), při čemž platí:

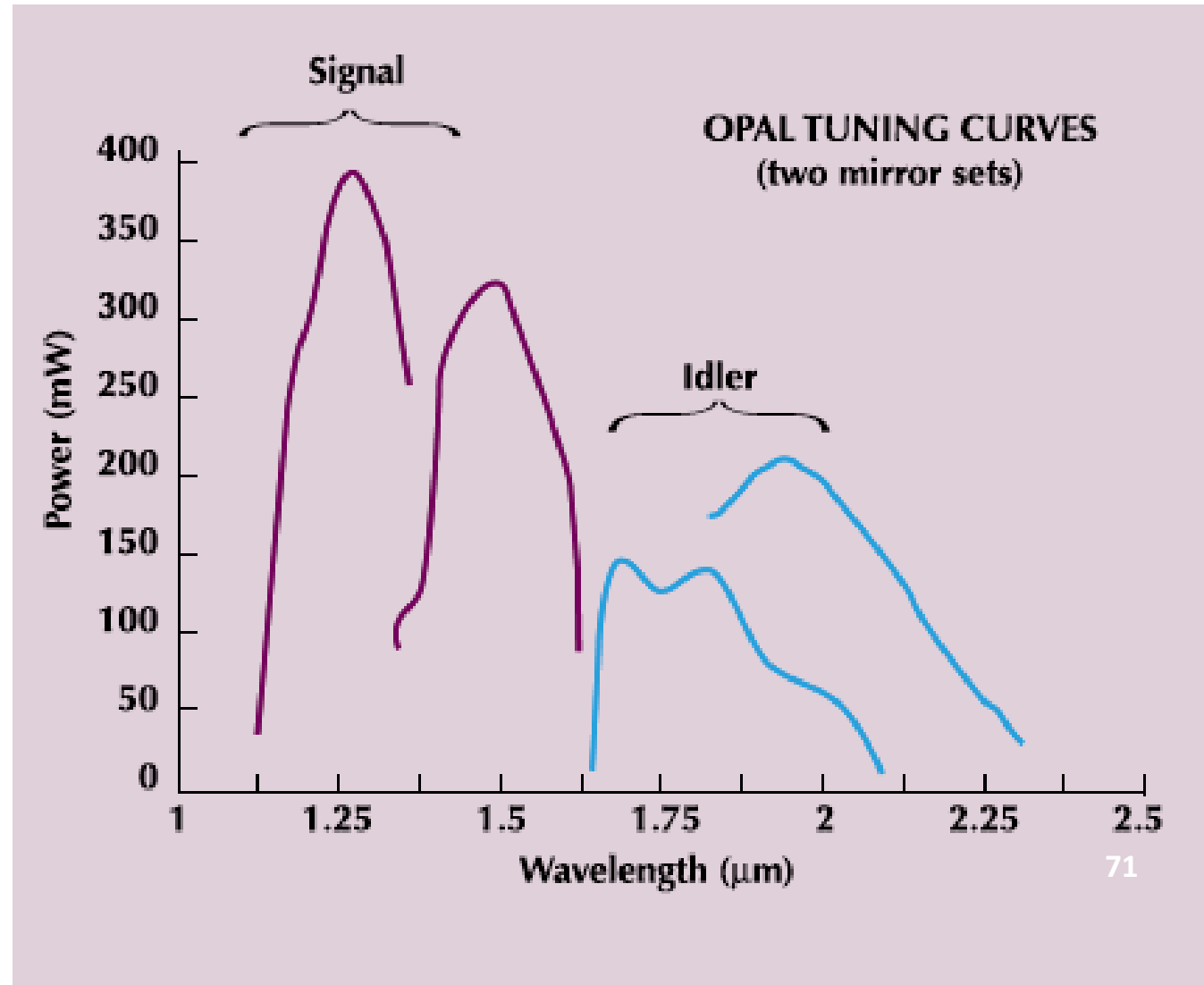
$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$$

a poměr

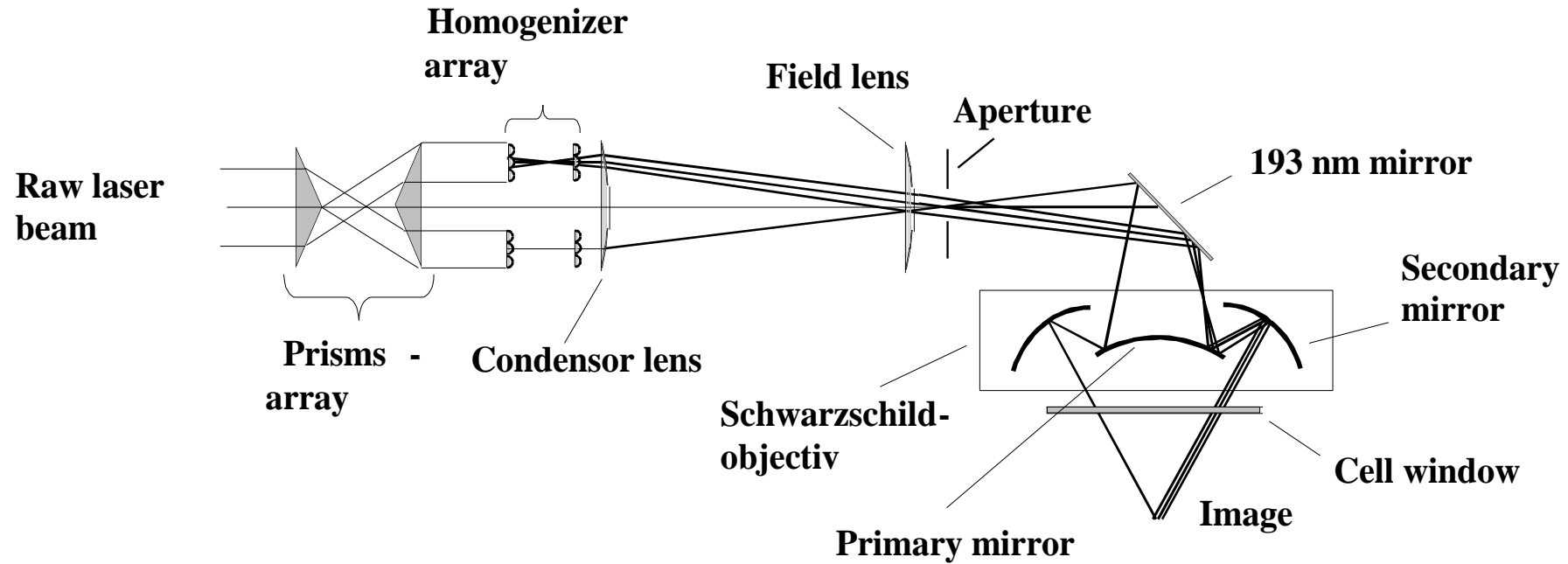
$$\omega_1 / \omega_2 = f(\nu)$$



OPO Spectra Physics



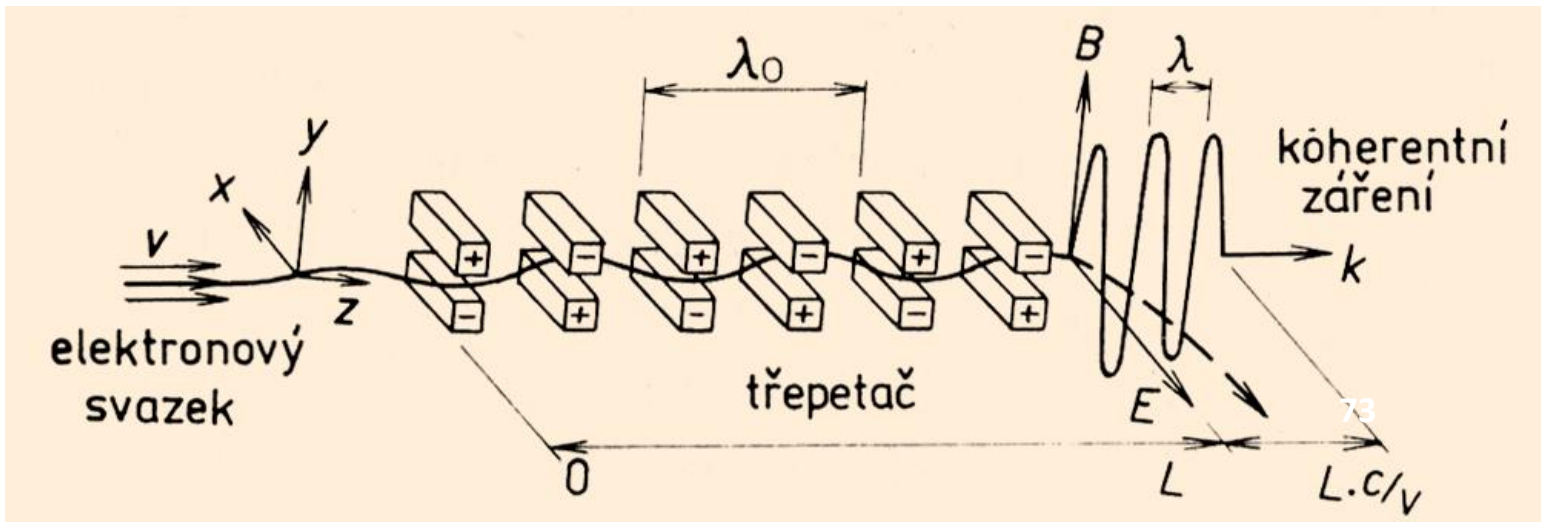
Homogenizace paprsku



Laser s volnými elektrony (FEL, free electron laser)

Aktivním prostředím jsou relativistické elektrony procházející periodickým magnetickým polem. Elektrony při svém pohybu po zakřivených drahách vyzařují elektromag. záření o vlnové délce ($\gamma \ll \lambda_0$, γ je tzv. relativistický faktor):

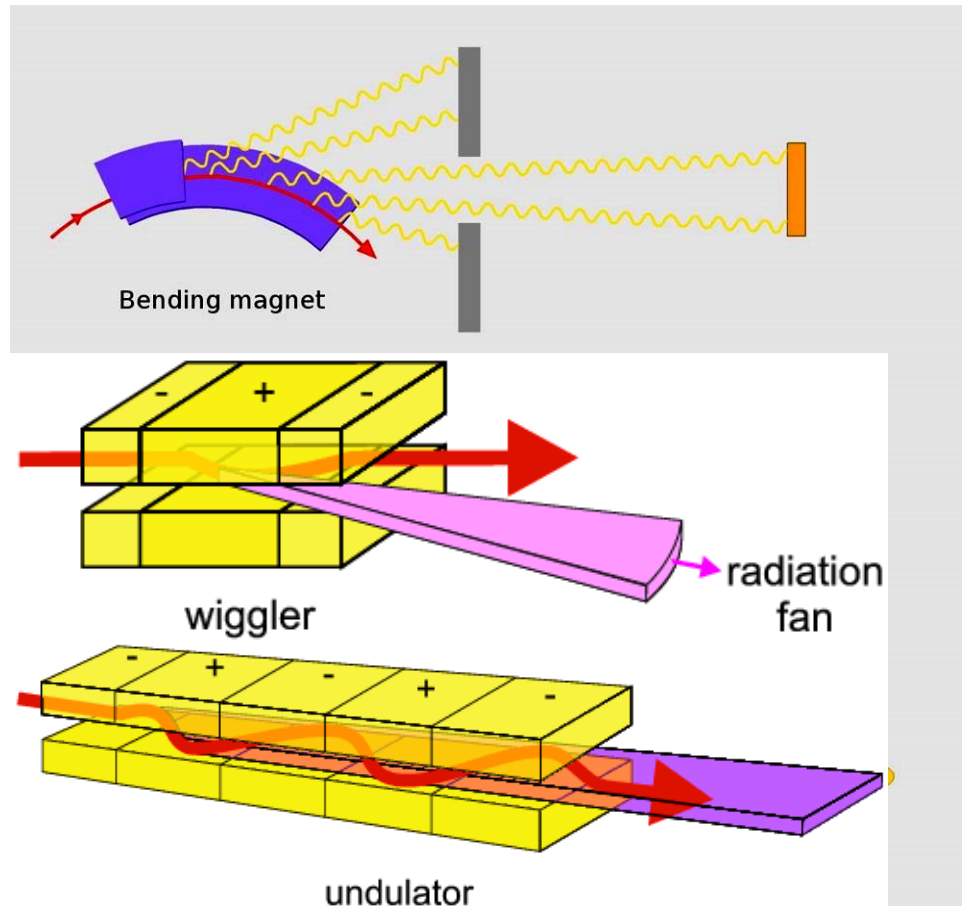
$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{c}{v} - 1 \right) = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Spektrální briliance

- Pro porovnání zdrojů vysoceintenzivního (především synchrotronového) záření se zavádí pojem **spektrální briliance (spectral brilliance)**, udávající počet vyzařovaných fotonů za sekundu na 1 mm^2 plochy zdroje záření, na divergenci 1 mrad^2 a na 10% šířky ($\Delta\lambda/\lambda=0,1$) vlnového oboru. Čím užší a paralelnější je svazek záření a čím více jsou fotony koncentrovány do co nejužšího vlnového oboru, tím je vyšší spektrální briliance.
- Ta je v nepřímém poměru k **emitanci (emittance)**, což je v podstatě součin rozměru zdroje záření a divergence záření.

Synchrotronové záření



Zdroje magnetického pole

- bending magnety

- undulatory

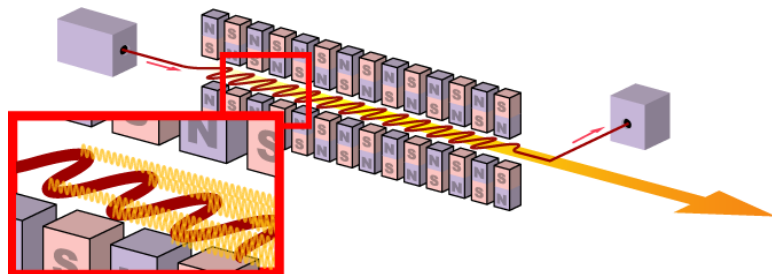
- wiggler

- free electron lasers

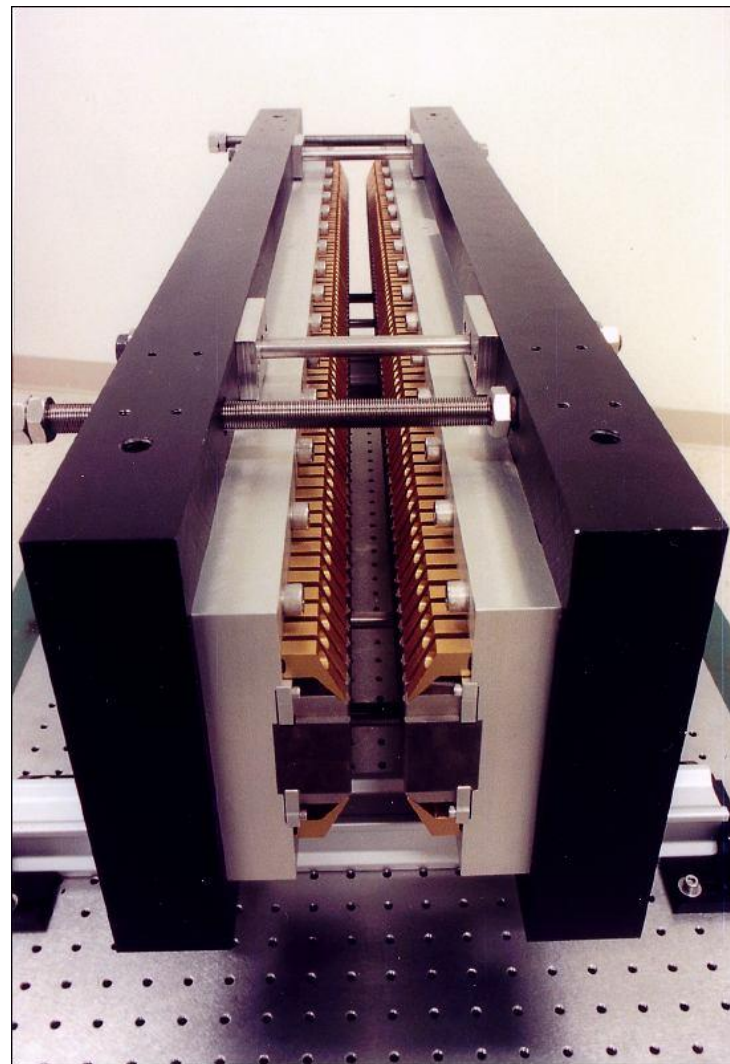
Laser na volných elektronech

- **Čtvrtá generace** zdrojů SZ je založena na využití lineárních urychlovačů, které umožňují snížit emitanci a zkrátit délku pulsů. Probíhá-li krátký elektronový shluk dostatečně dlouhým undulátorem, pak elektromagnetická vlna generovaná v každém místě undulátoru postupuje společně s elektronovým svazkem a interaguje s ním. Vzniká tak **laser na volných elektronech**, neboli **free electron laser – FEL**. Ten se vyznačuje vysokou briliancí, podstatně vyšší než u klasického undulátoru, koherencí a krátkostí pulsů, dosahujících desítek fs. K urychlení elektronů na hodnoty řádu GeV je zapotřebí velmi dlouhého lineárního urychlovače.

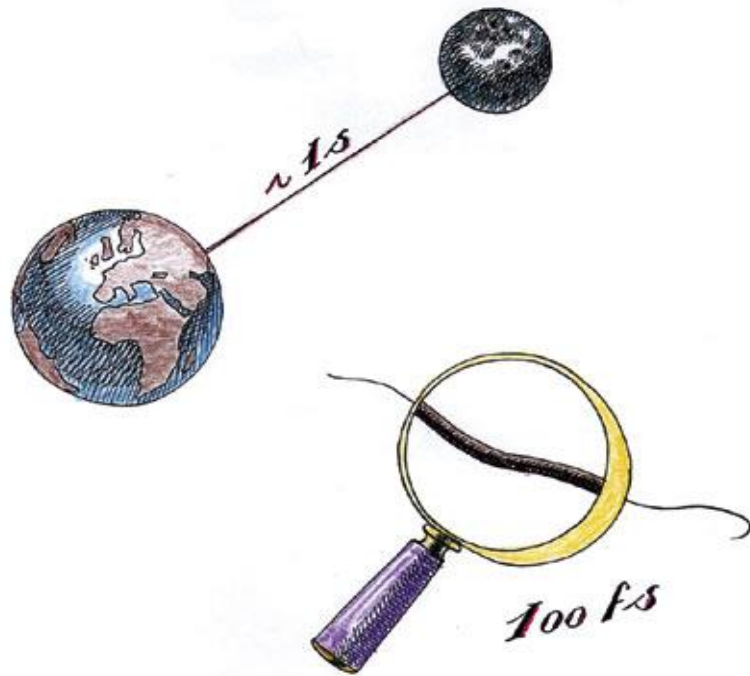
Laser na volných elektronech



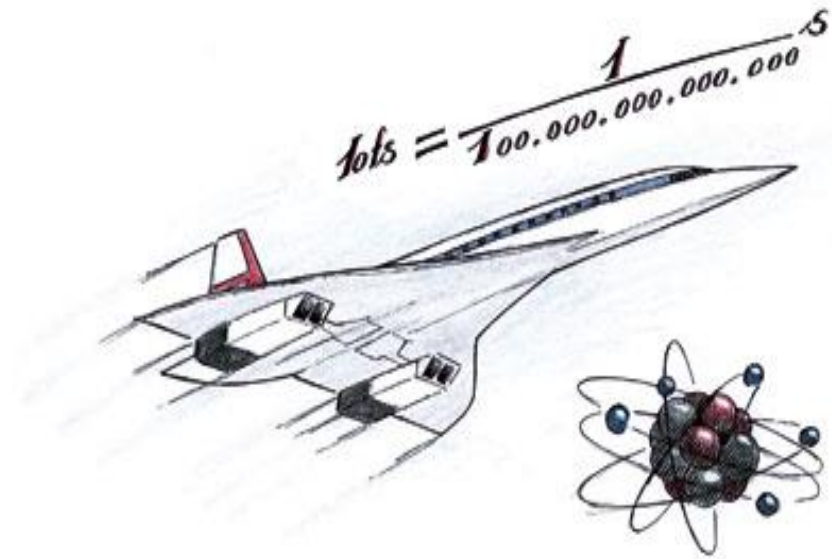
Shluky elektronů se pohybují po vlnkovité dráze. Nabité částice, které mění svou rychlost (postačí směr), září. Pro pochopení si představme, že se elektrony v shluku pohybují po sinusoidě podél undulátoru. Pokud se na ně díváme z konce této osy, nevidíme, že se pohybují směrem k nám, ale vidíme kmitat shluk nabitých částic. Shluky tak generují koherentní rentgenový paprsek. Za undulátorem jsou silným magnetickým polem elektrony odkloněny a vzniklý rentgenový laserový paprsek pokračuje do haly s experimenty



Femtosekundy



Průměrná vzdálenost Země a Měsíce je kolem 380 000 km. Světlo pohybující se rychlostí 300 000 km za sekundu urazí tuto vzdálenost za dobu o něco delší než 1 s. Během 100 fs však světlo uběhne pouze 30 μm , neboli méně, než je tloušťka vlasu

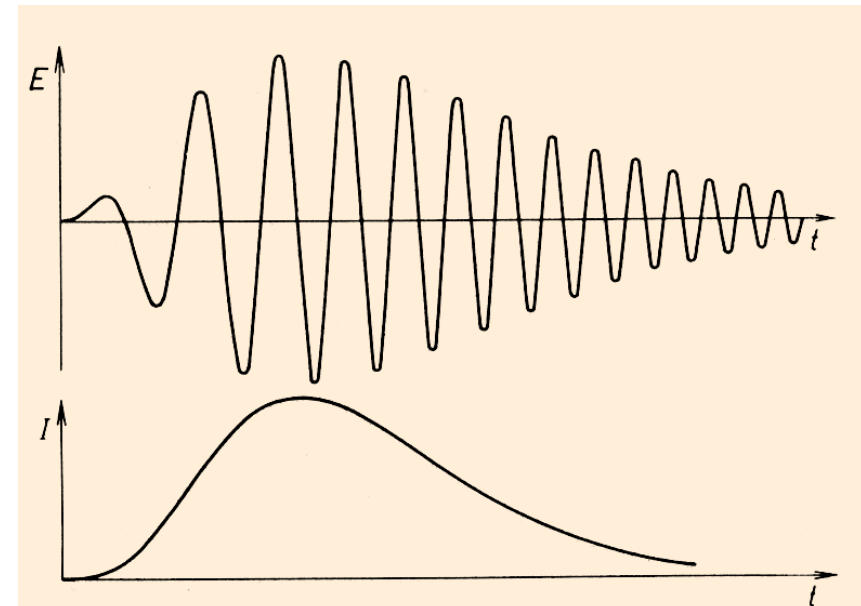


Nadzvukový Concorde létá přibližně rychlostí 2 machů (dvojnásobek rychlosti zvuku ve vzduchu), neboli 600 m/s (2 160 km/h). Za dobu 10 fs uletí jen 6 pikometrů ($6 \cdot 10^{12}$ m), to je 10krát méně, než je průměr atomu uhlíku

Čerp (chirp)

- U impulsů optického záření se čerpem rozumí postupná změna frekvence během impulsu (zvyšování nebo snižování). To znamená, že frekvence na náběžné hraně je jiná než v závěrné hraně. Šíří-li se takový impuls v disperzním prostředí, je rychlost šíření záření v náběžné hraně menší (nebo větší) než v závěrné části a tím se impuls zkracuje (nebo prodlužuje).

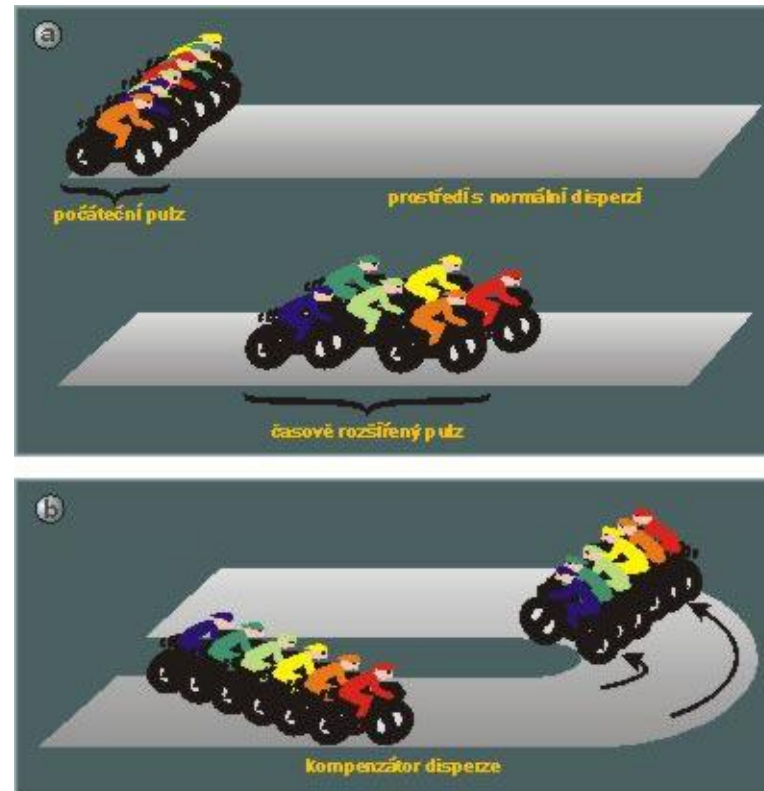
Díky relacím neurčitosti není možné mít krátký ($\sim fs$) světelný puls ve viditelné oblasti spektra, který by byl monochromatický



Čerp impulsu optického záření: a) závislost intenzity elektrického pole E optického záření na čase t , b) závislost intenzity I optického záření na čase t

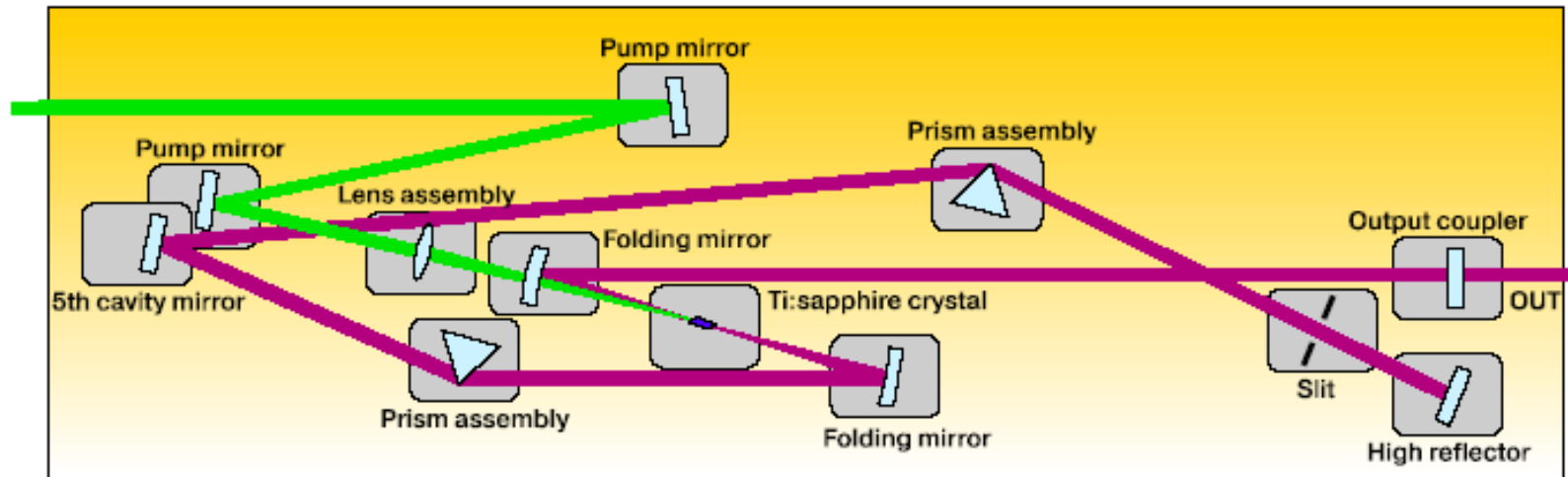
Chirp femtosekundového pulzu

- V disperzním prostředí femtosekundový pulz, který má velký frekvenční rozsah (velký rozsah vlnových délek), je rozšířen díky různé disperzi (indexu lomu, rychlosti světla) různých vlnových délek.
- Je proto nutné pro zachování časového profilu impulsu provést korekci kompenzátozem disperze.



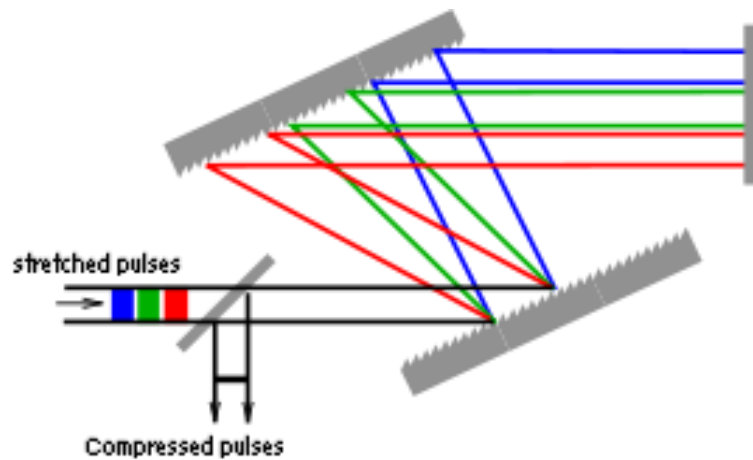
Model TISSA-20: < 20 fs

- Stable Kerr-lens mode-locking operation 5-mirror compact cavity design.
- Model TISSA-20: Seeding source of broadband femtosecond pulses for Ti:sapphire amplifiers

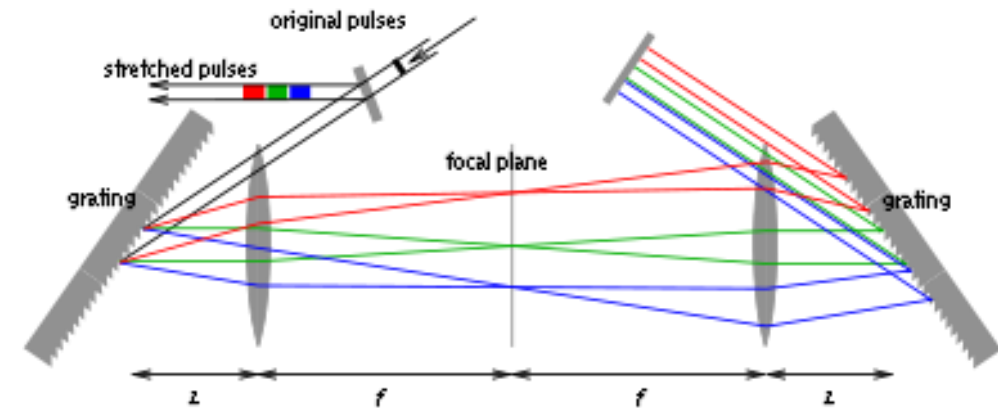


Stretcher and compressor design

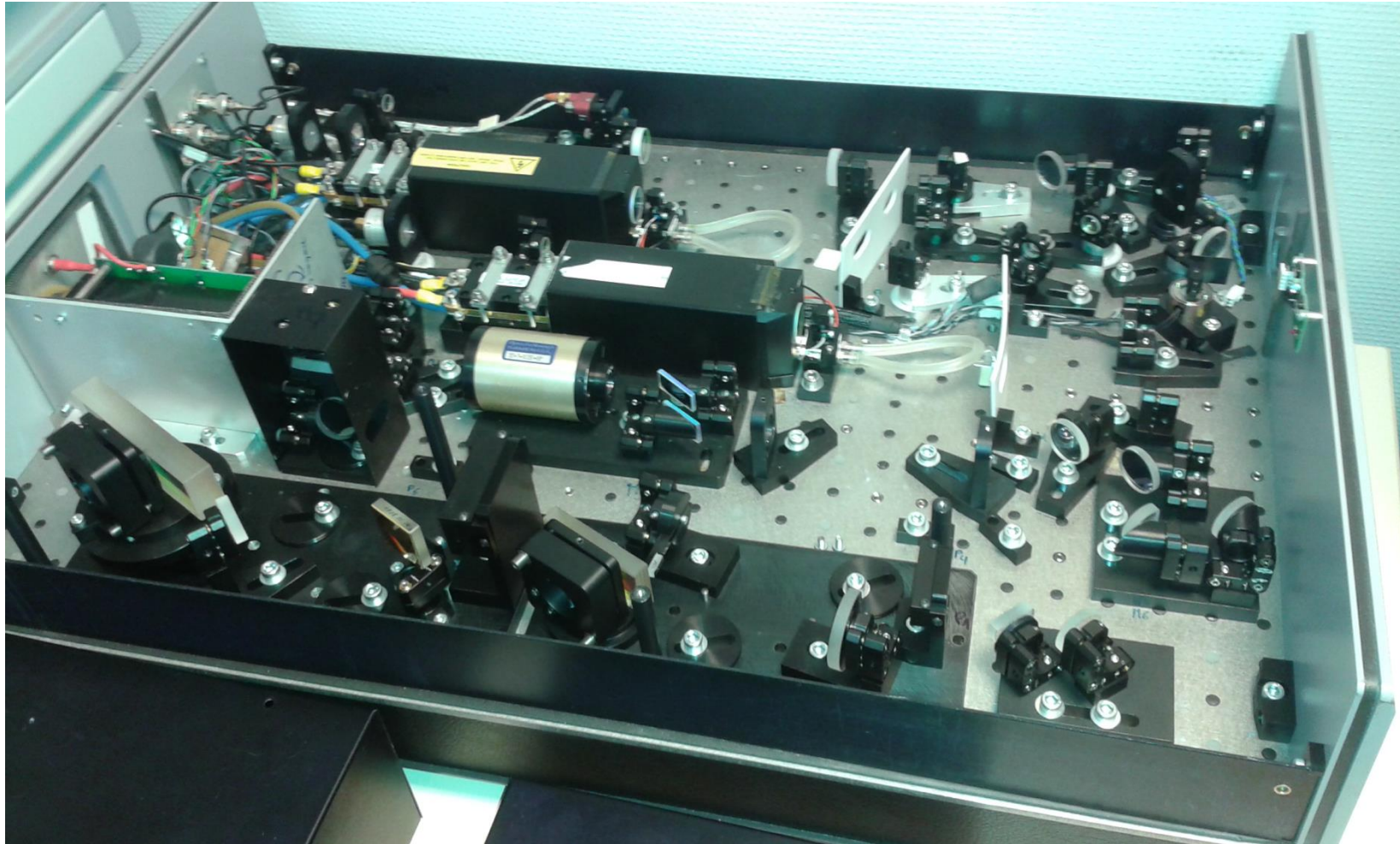
Mřížkový compressor



Mřížkový stretcher



Stretcher and compressor design



Zesílení femtosekundových pulsů s výkony do PW

