



Lasery instrumentace

Vítězslav Otruba

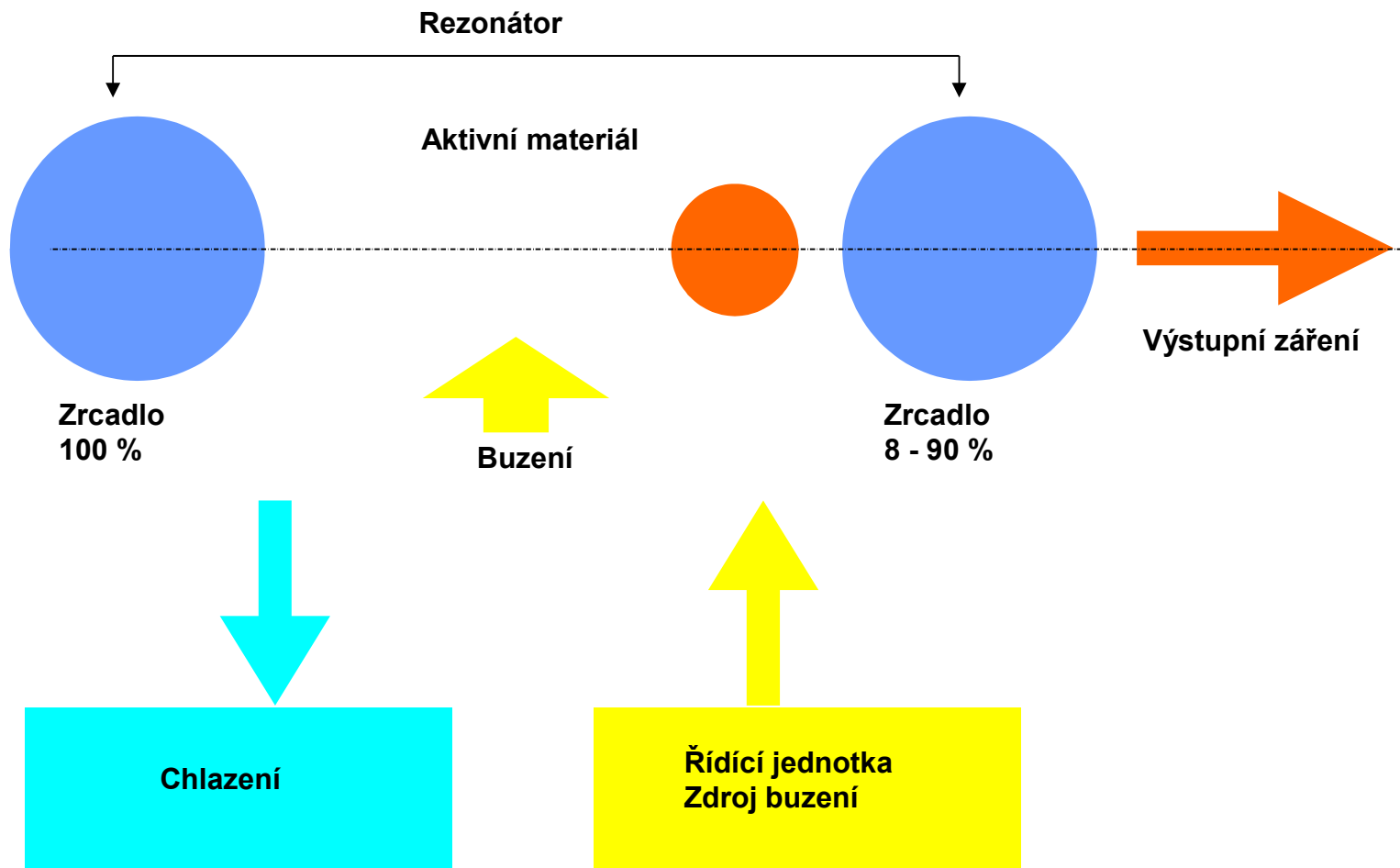
1

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}

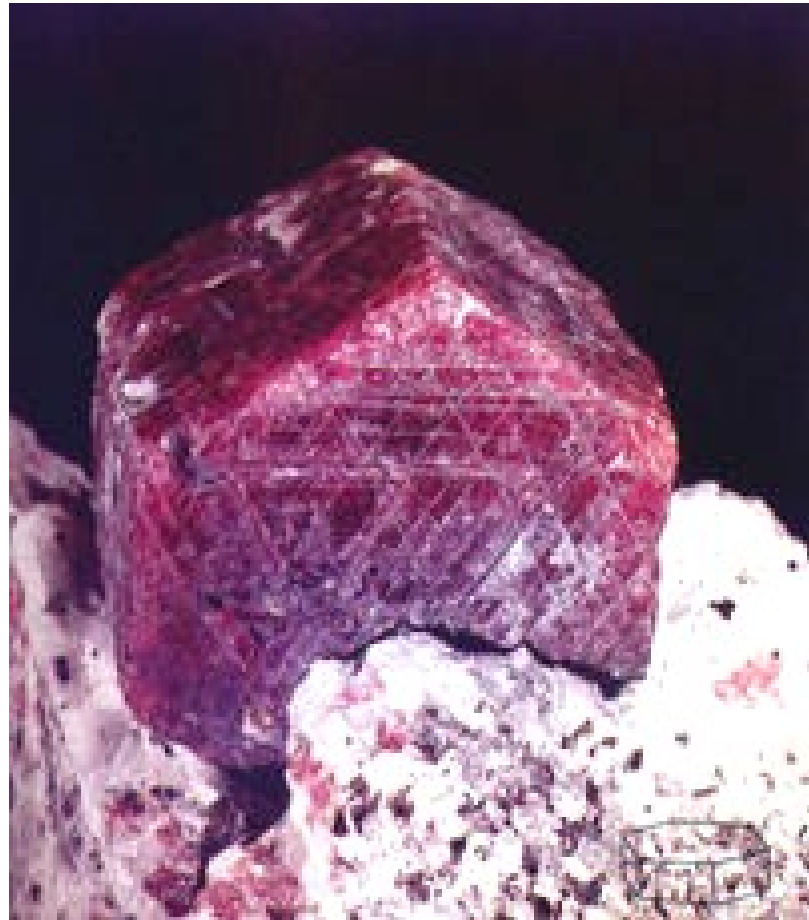


Pevnolátkový laser

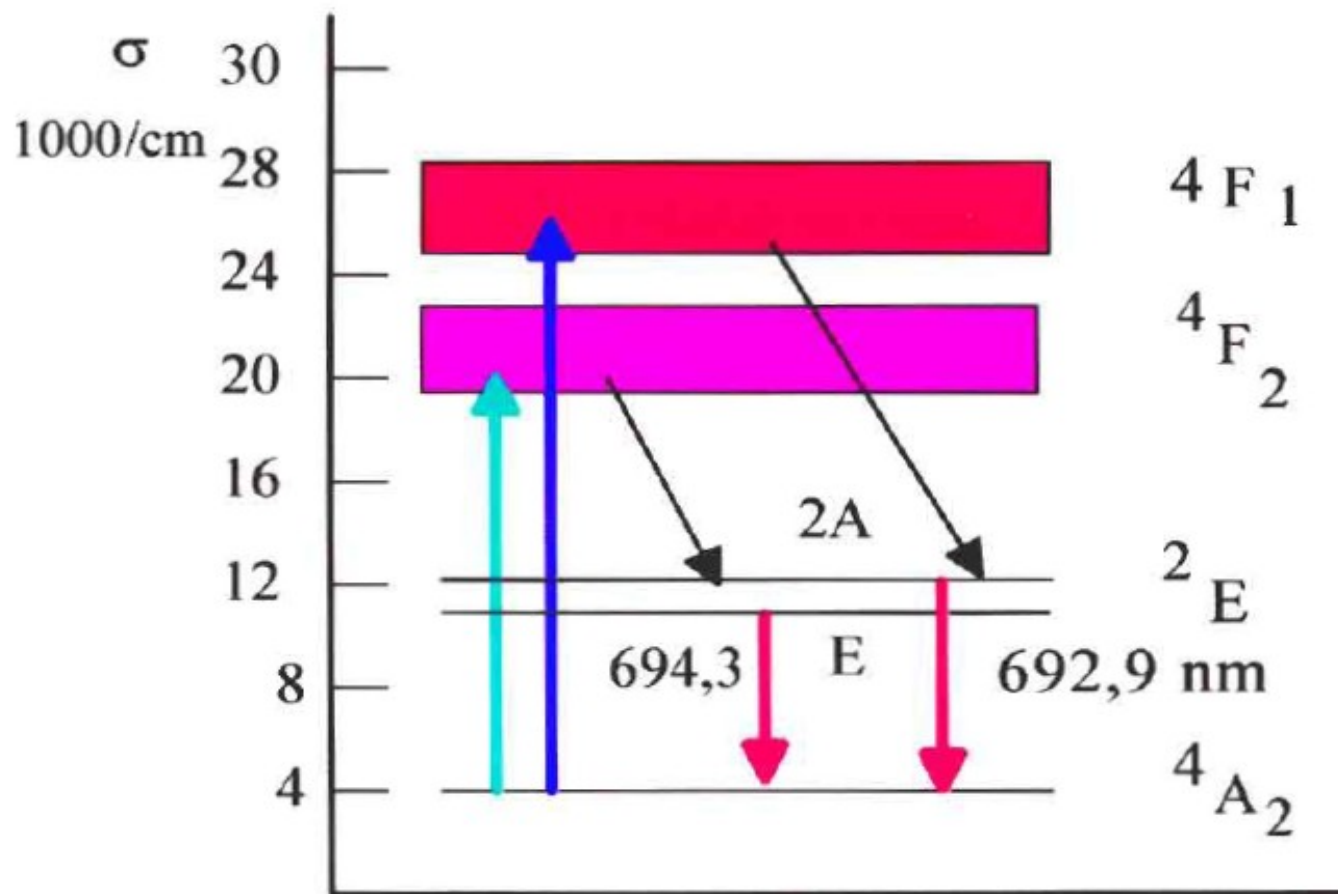


Rubínový laser ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$)

- 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

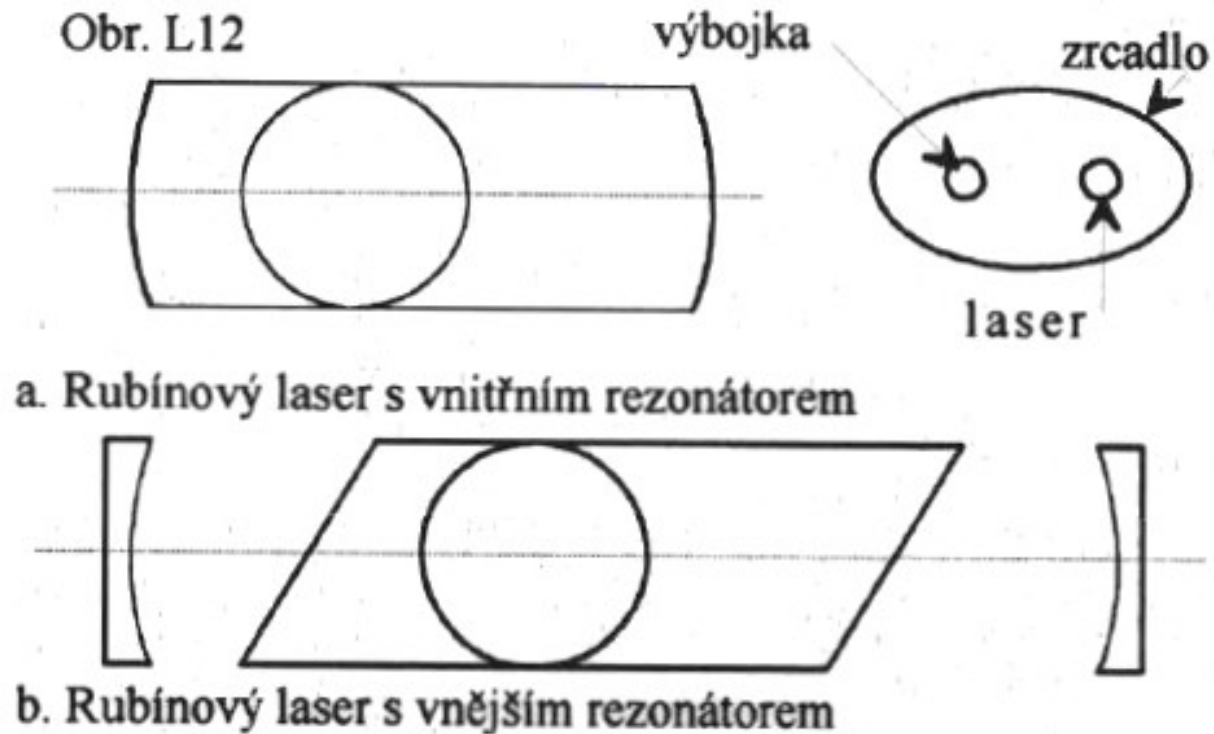


Energetický diagram chromu v rubínovém laseru



Rubínový laser

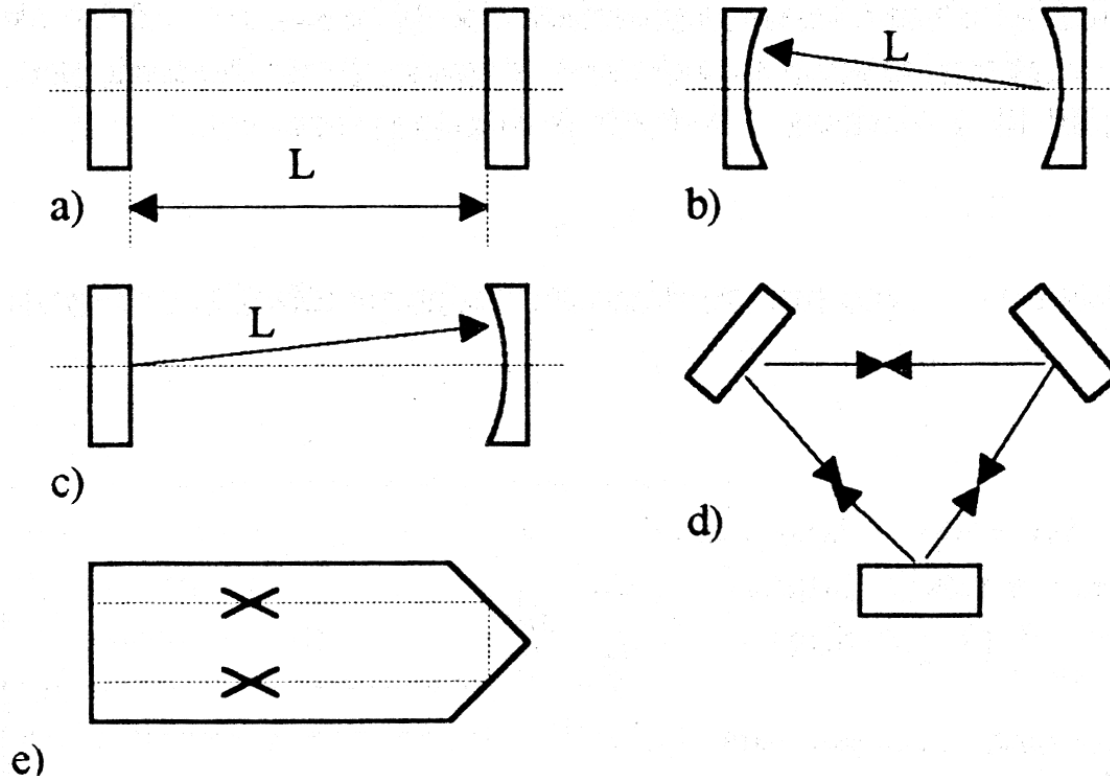
- Konstrukční uspořádání rubínového laseru



Rezonátory

○ Fabry-Perot etalon

- ❖ rovinný
- ❖ konfokální
- ❖ Kruhový
- ❖ střechový



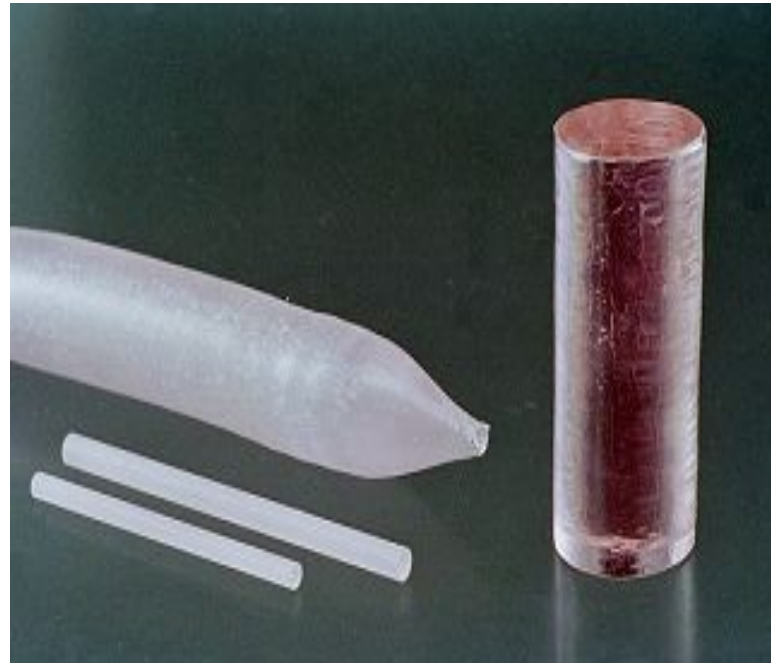
Pasivní Q-modulace

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



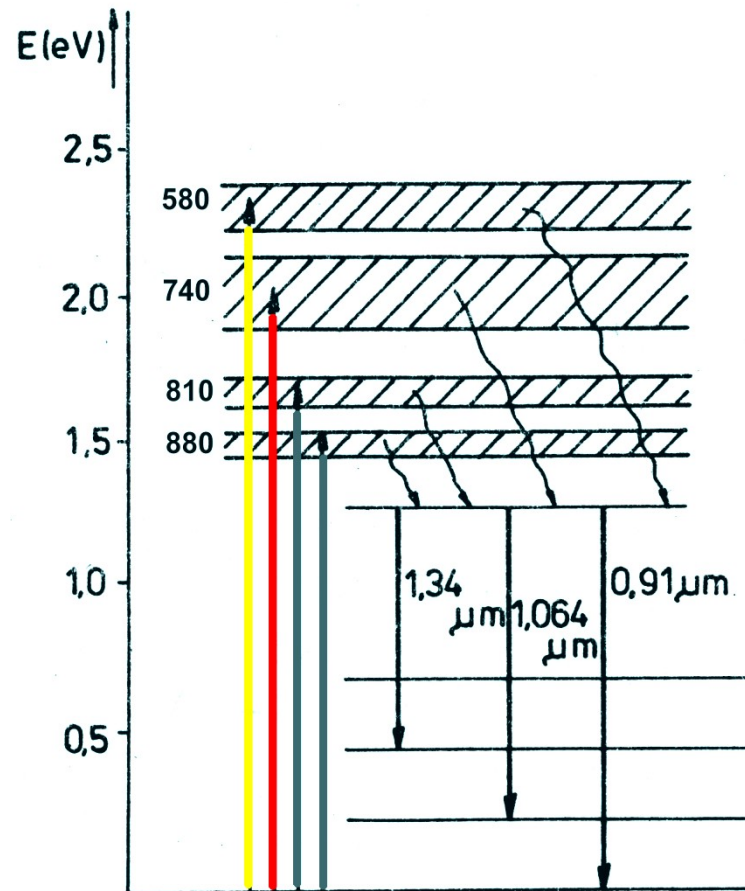
Neodymový laser

- 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.

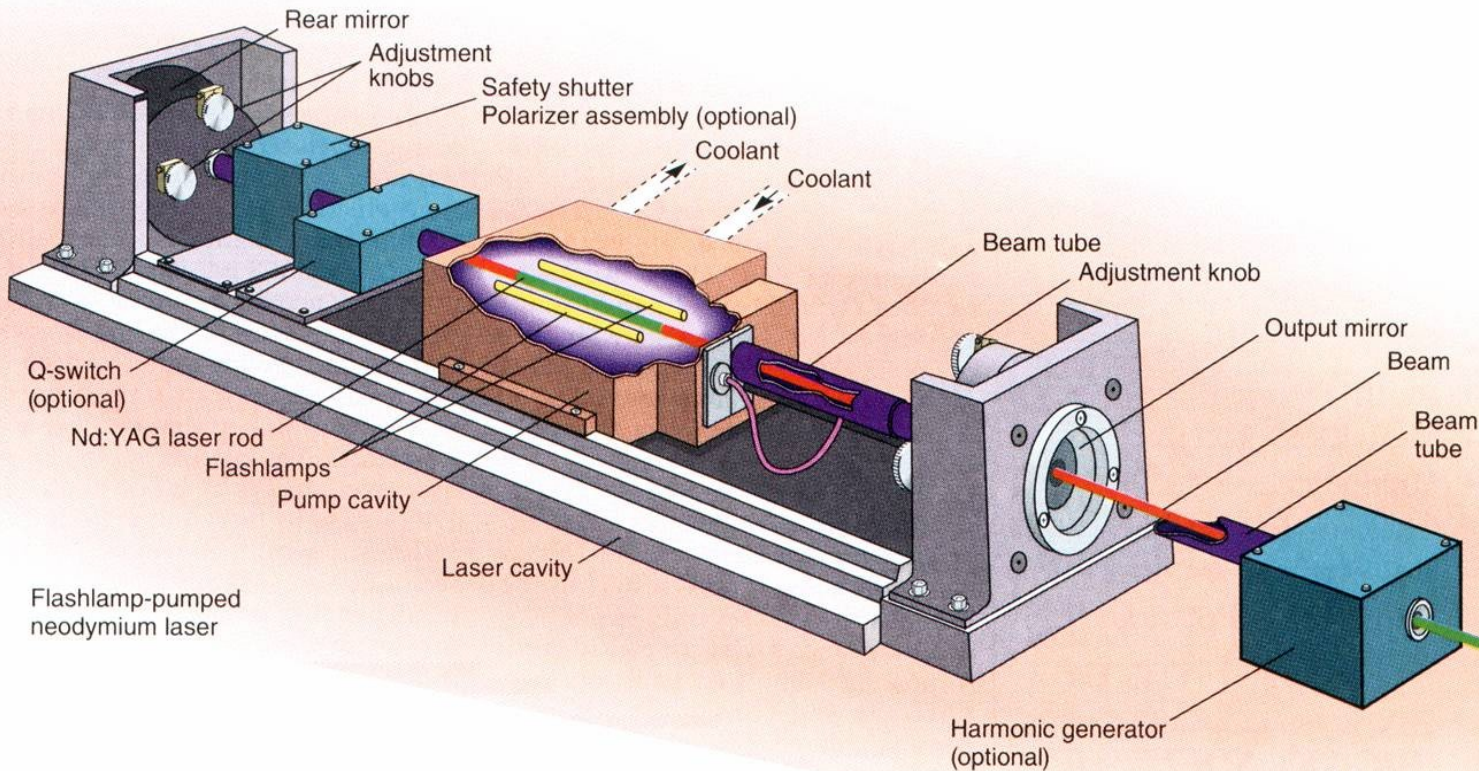


Energetický diagram neodymu v Nd:YAG laseru

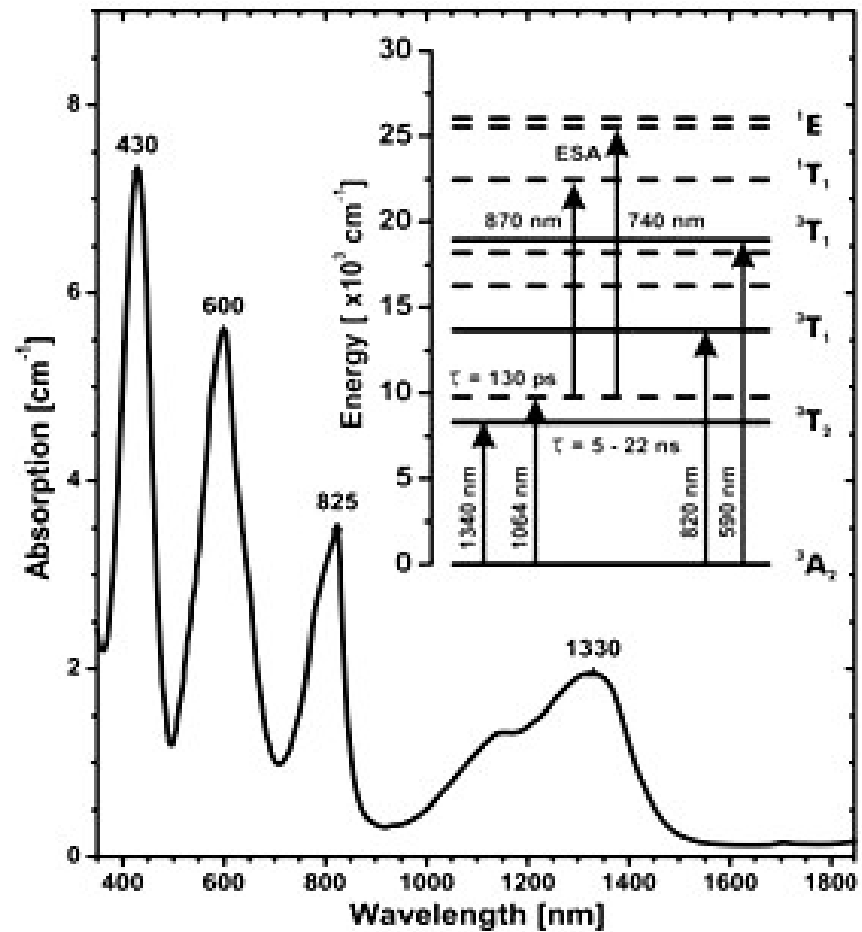
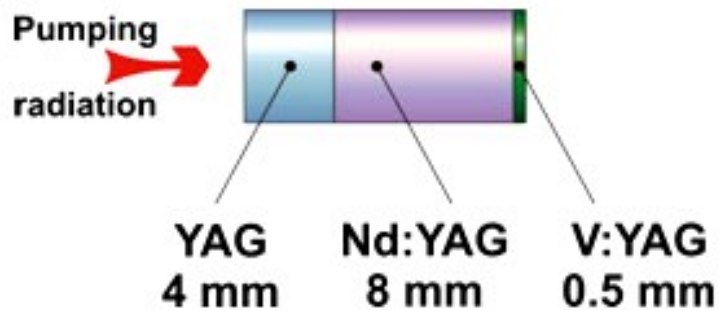
- Nd³⁺ v ytrito-hlinitém granátu (Y₃Al₅O₁₂) zastupuje ionty Y³⁺. Monokrystaly jsou mechanicky pevné, tepelně stálé s minimem optických vad na rozdíl od neodymových skel. Pro čerpání se používají xenonové výbojky nebo laserové či LED diody.



Neodymový laser



Pasivní Q-modulace V³⁺:YAG



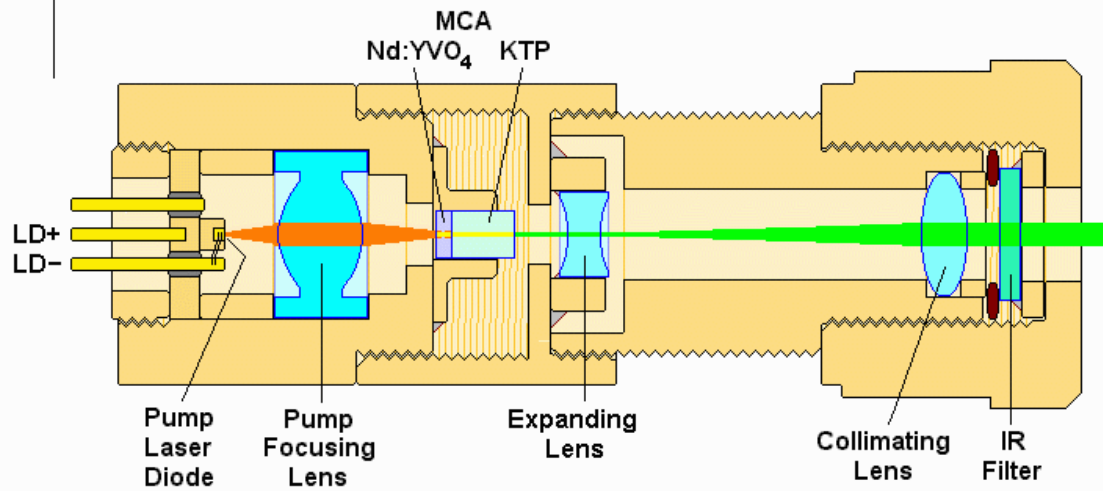
Zelené laserové ukazovátko



Battery

Pump LD Driver

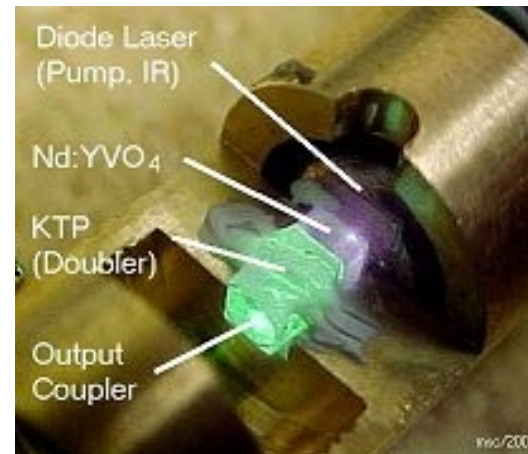
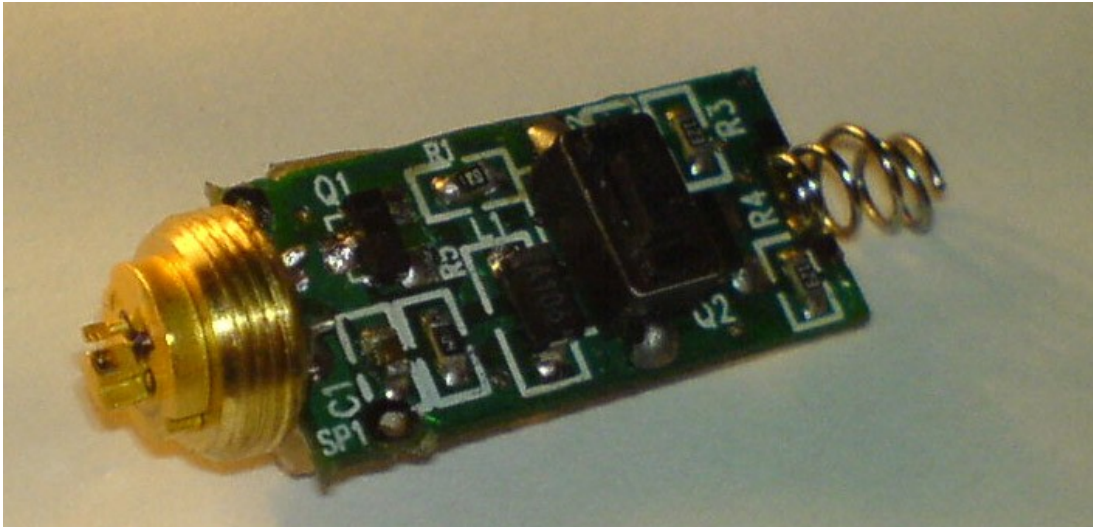
DPSS Laser Module



Beam Paths: 808 nm — 1064+532 nm — 532 nm —

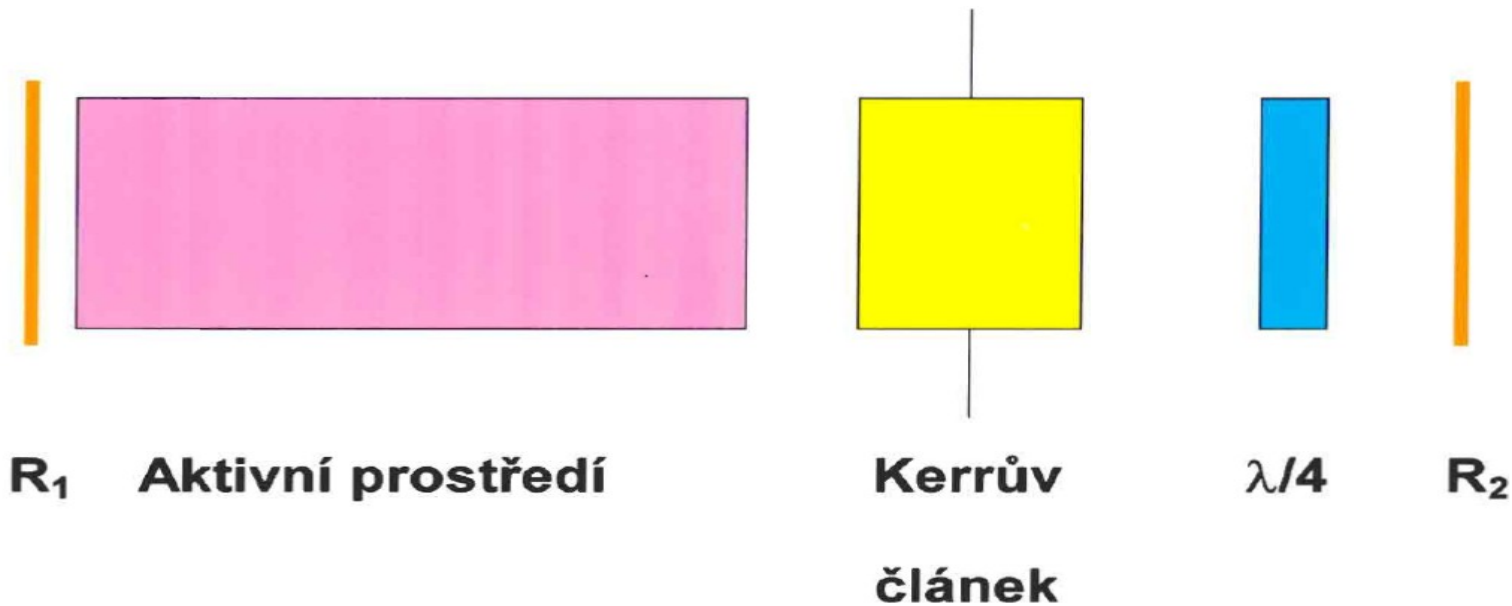


Zelené laserové ukazovátko



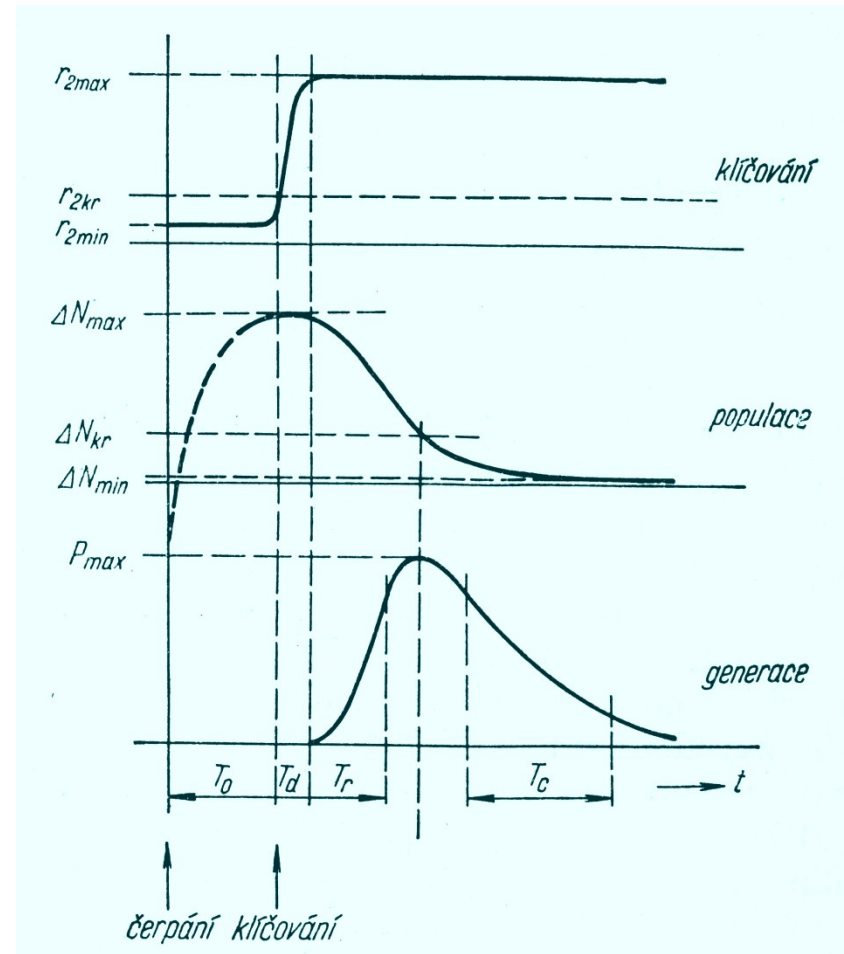
Aktivní Q-modulace

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



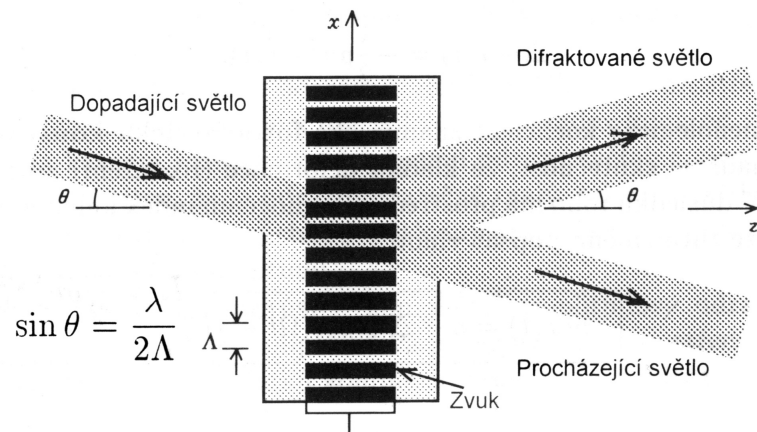
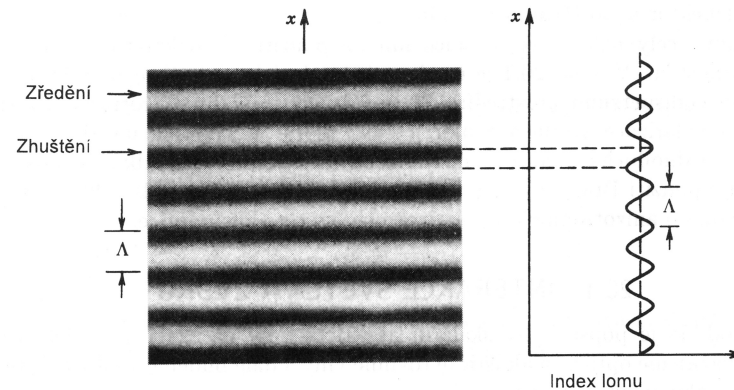
Časový průběh aktivní Q-modulace

- Typické časy u Nd:YAG laseru:
- Nárůst inverzní populace (T₀) 150μs
- Klíčovací impuls (T_d) 1 ns
- Generace záření 10ns



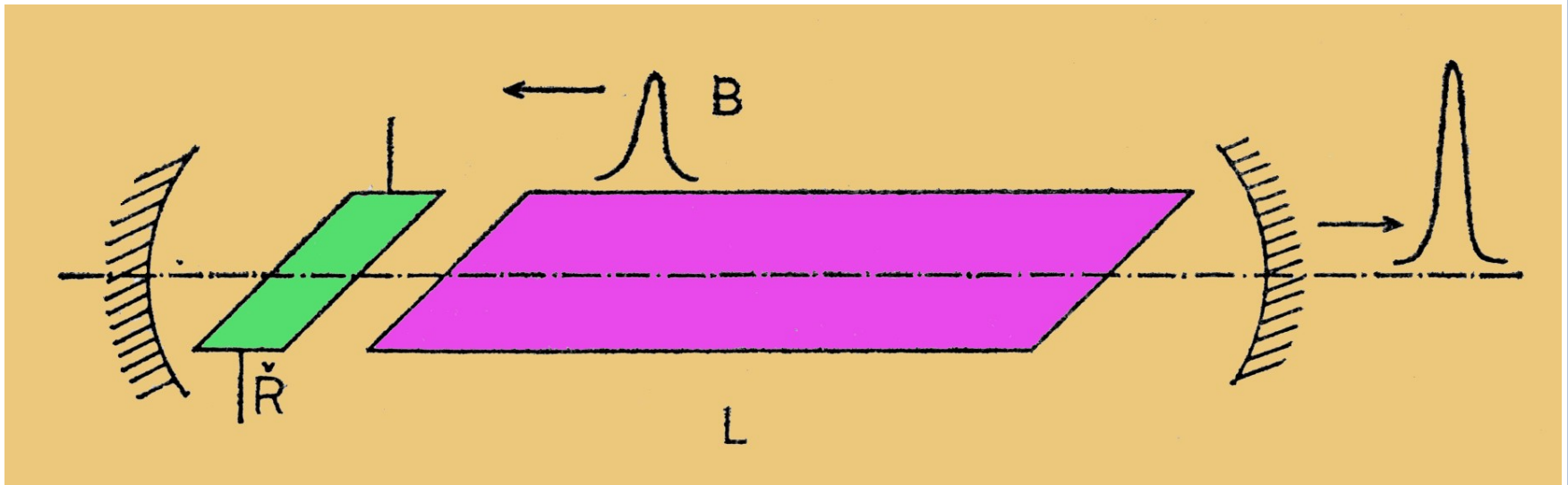
Optoakustický modulátor

- 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)



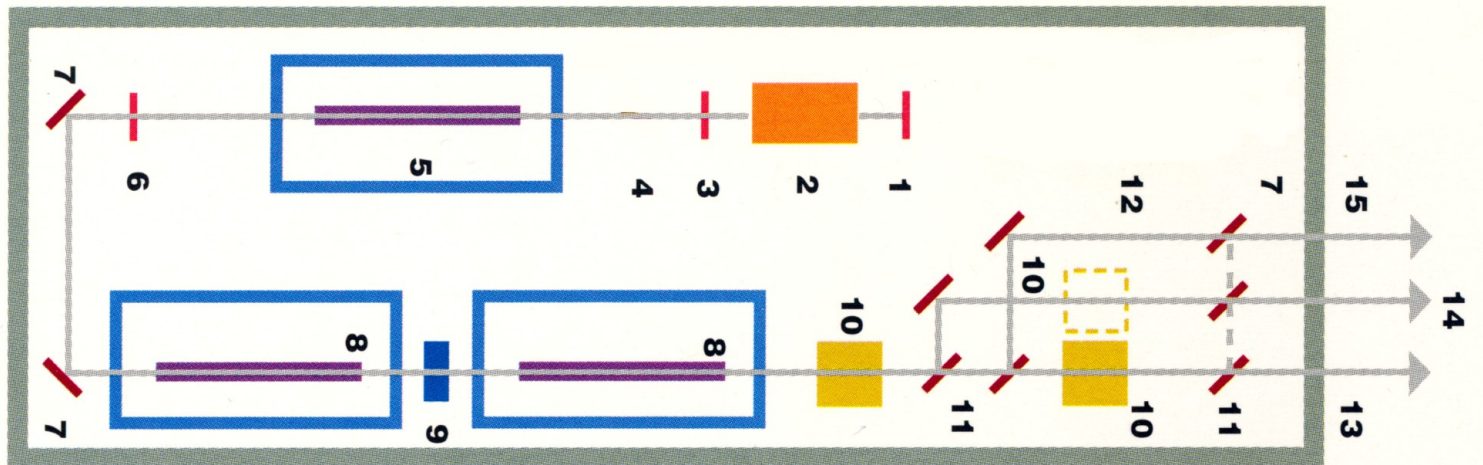
Synchronizace módů

- 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.



Nd:YAG laser

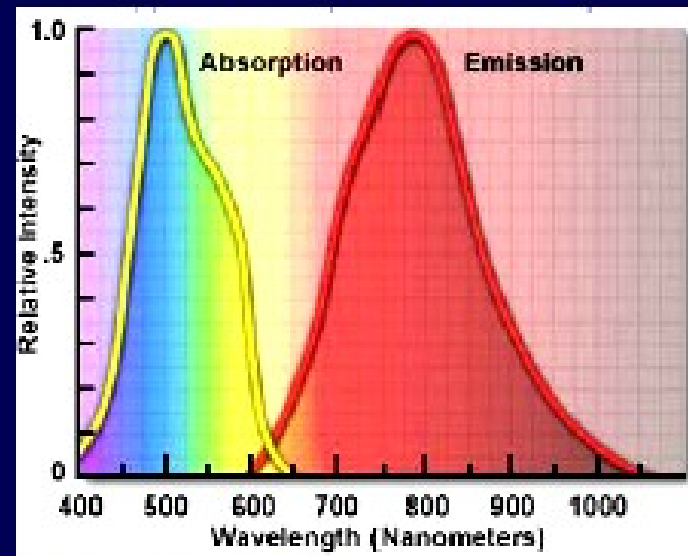
- Laser s Q-modulací (1-6), dvoustupňovým zesilovačem (8), kompenzátorem dvojlomu (9) a násobiči frekvence (10), výstup 1064 nm (13), 532/355 nm (14), 266/1064 nm zbytkový (15)



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



Ti:sapphire electronic spectra



- Excitation at 532 nm from a frequency doubled Nd:YVO₄ laser



Titanium Doped Sapphire $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$

- Ti_2O_3 concentration 0.06-0.5 wt%

Hardness 9 Mohs

Thermal conductivity 0.11 cal/
($^{\circ}\text{C} \times \text{sec} \times \text{cm}$)

- **Optical Properties**

Laser action 4-Level Vibronic

Fluorescence lifetime 3.2 μsec
($T = 300 \text{ K}$)

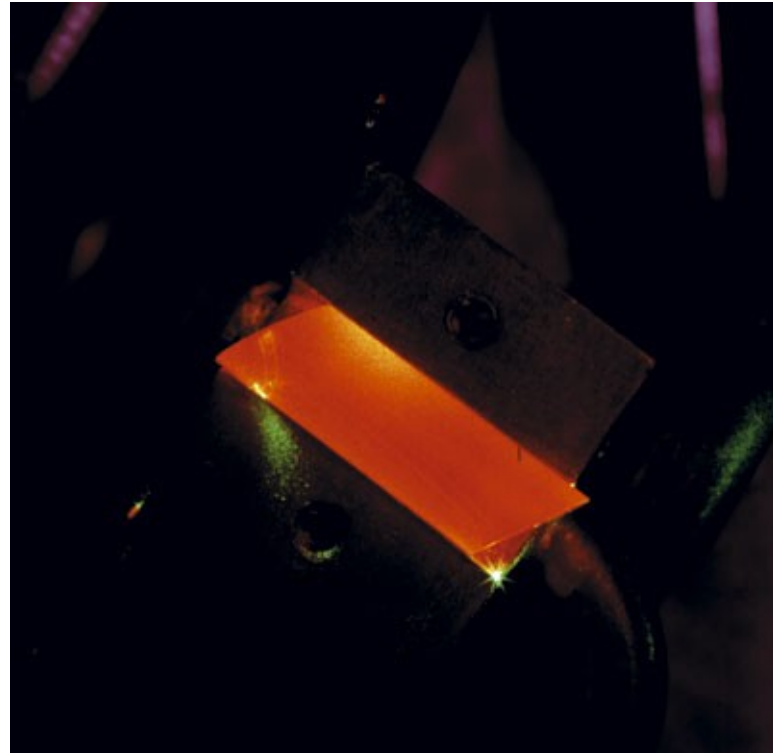
Tuning range 660-1050 nm

Absorption range 400-600 nm

Emission peak 795 nm

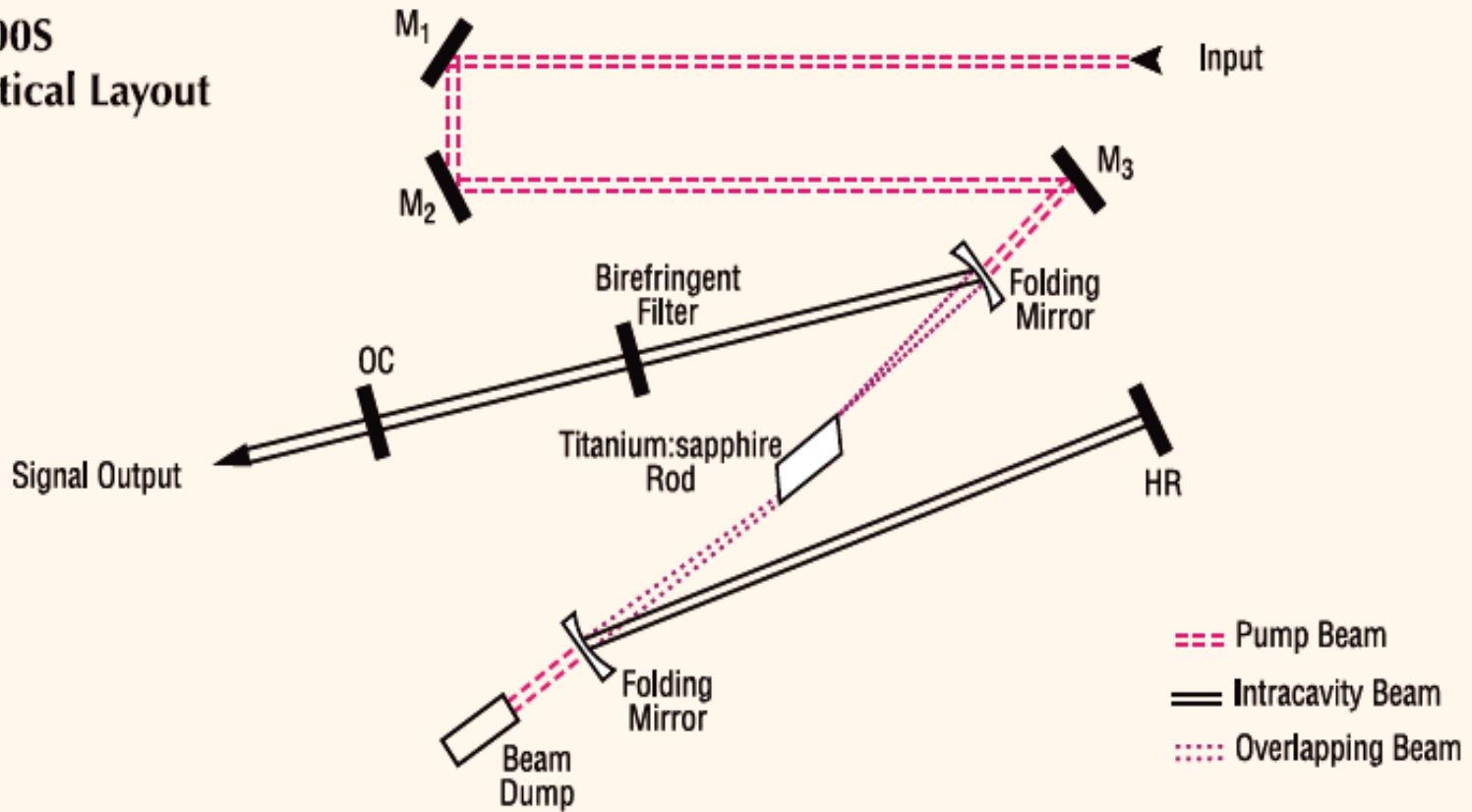
Absorption peak 488 nm

Refractive index 1.76 @ 800 nm



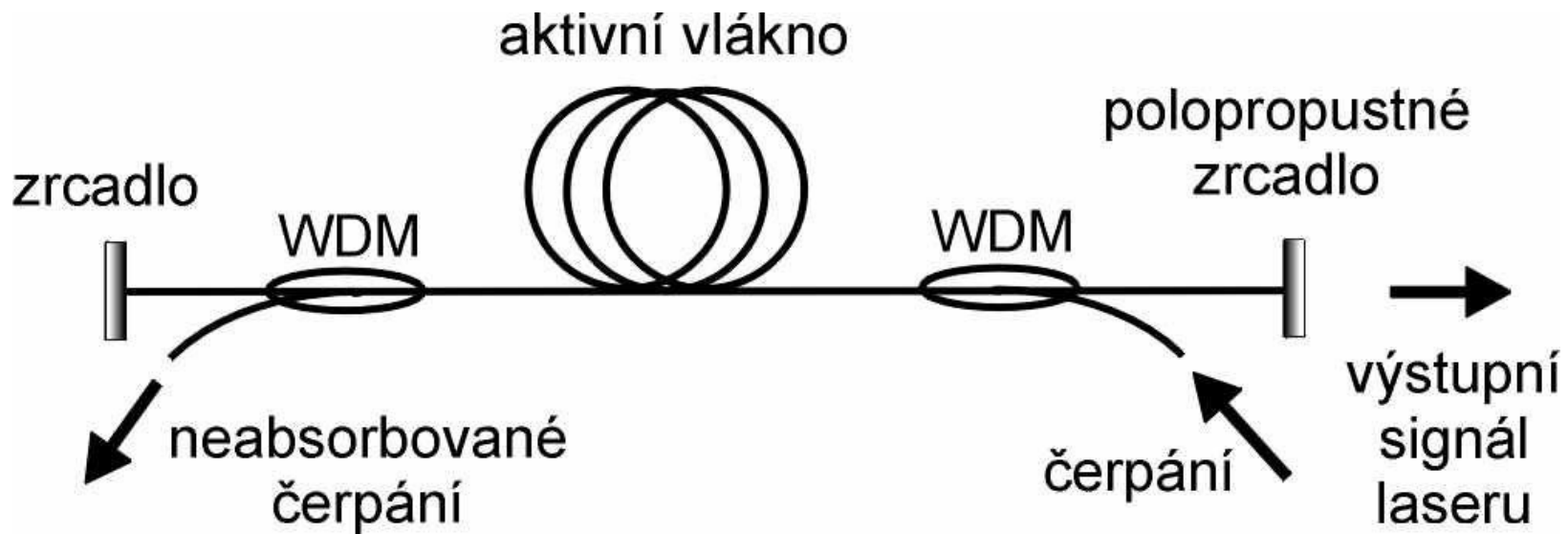
Ti:safír laser

3900S Optical Layout



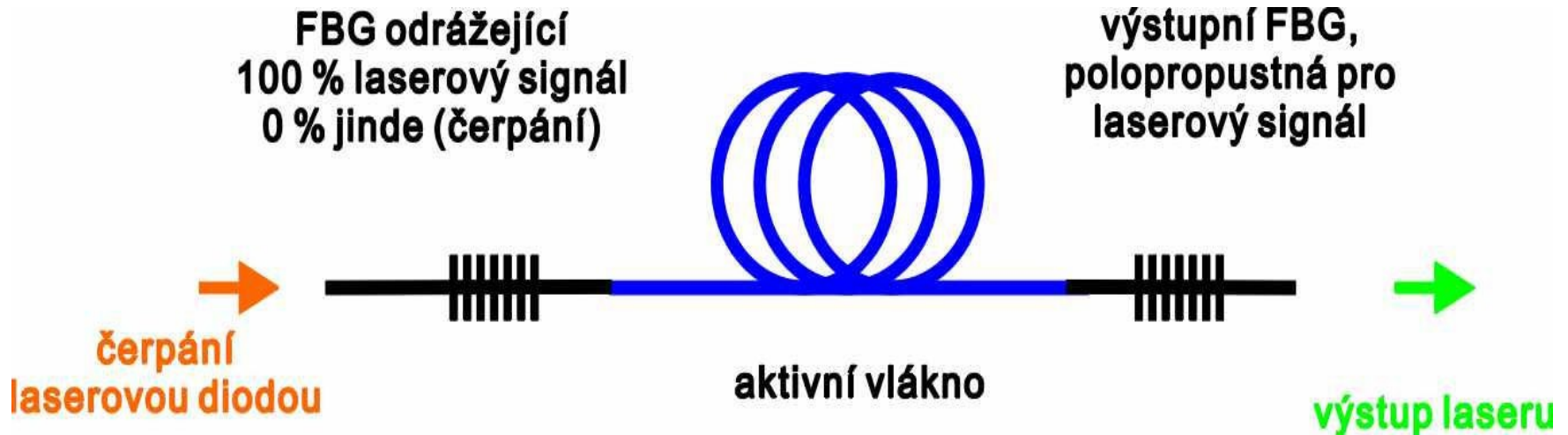
Vláknové lasery

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

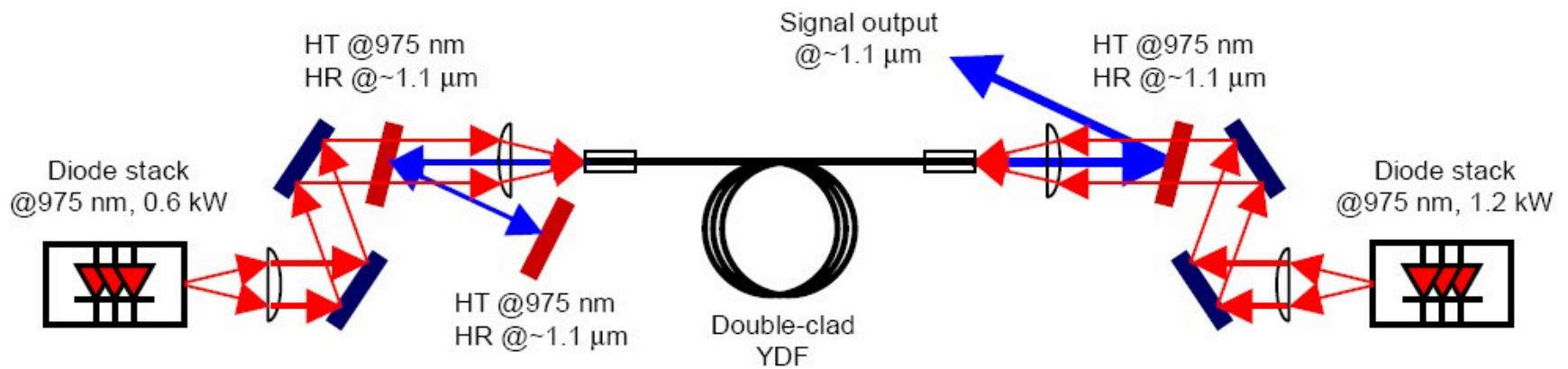


Vláknové lasery

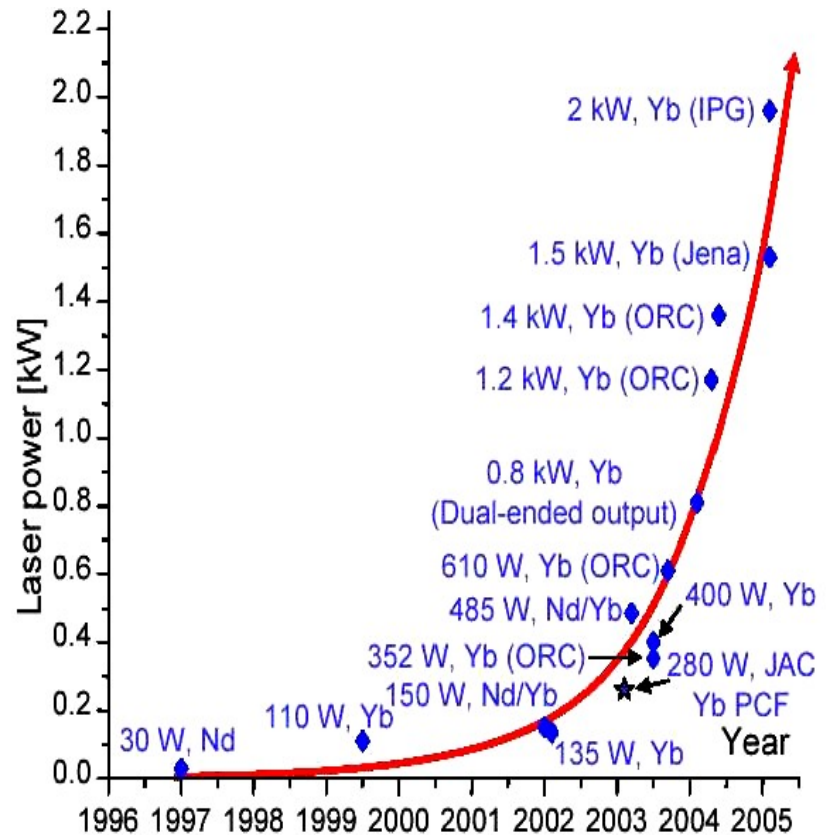
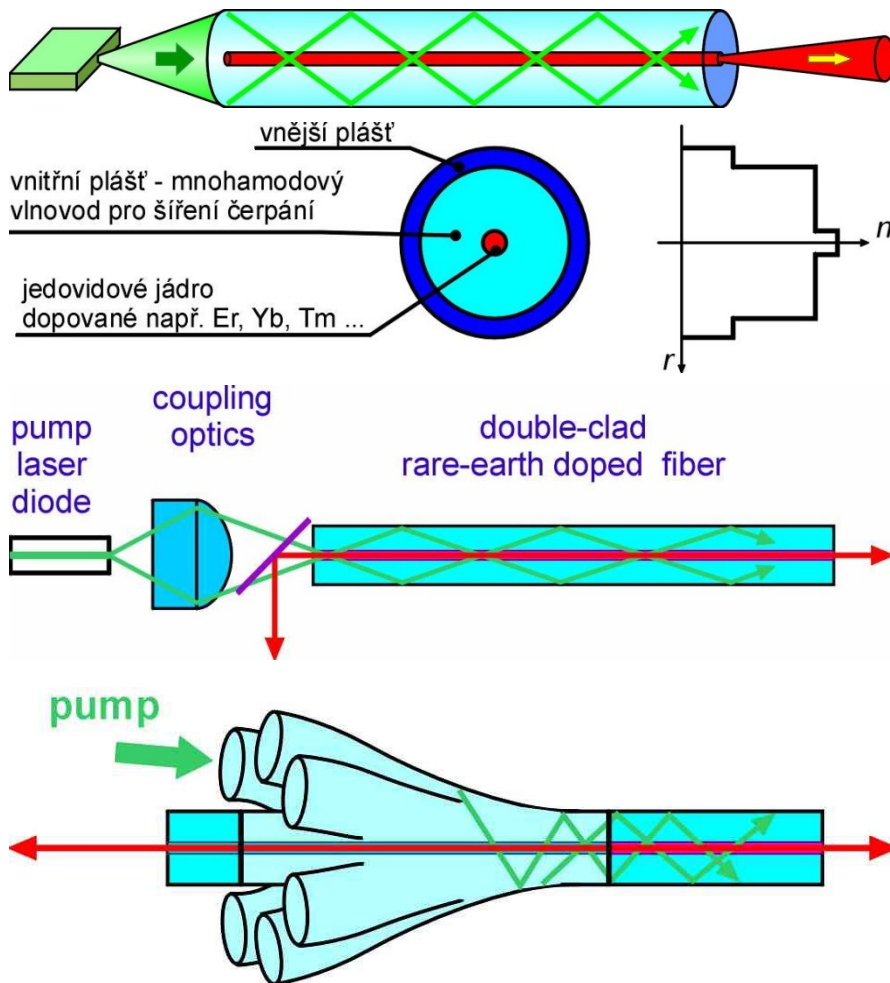
- FBG – Fiber Bragg Grating
 - Braggovské vláknové mřížky



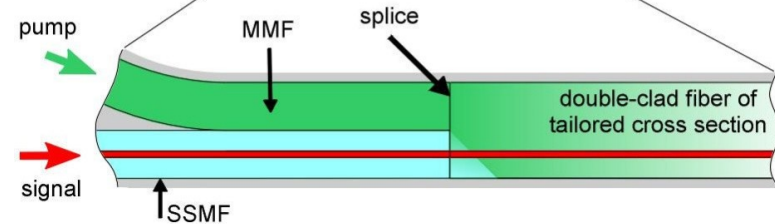
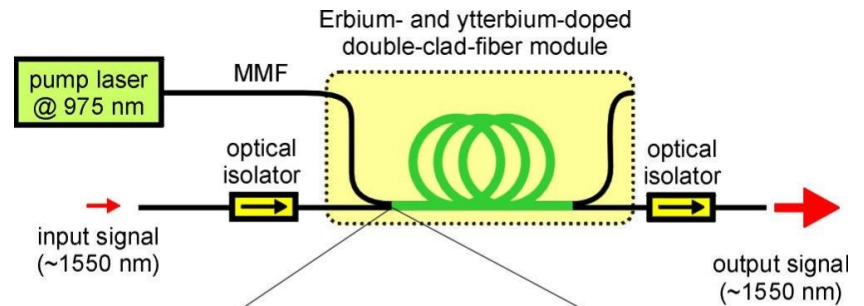
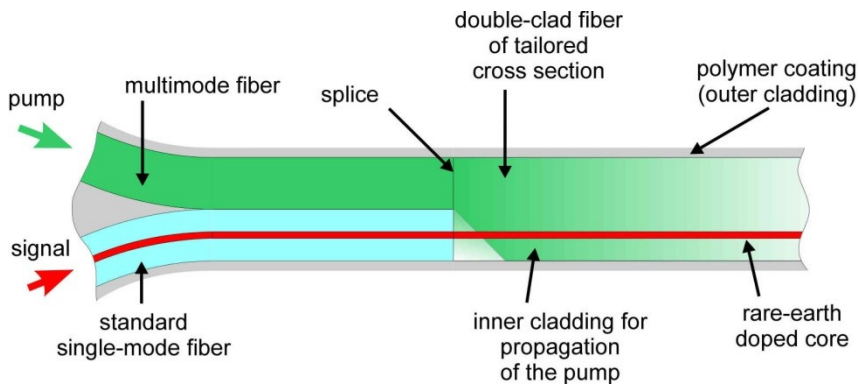
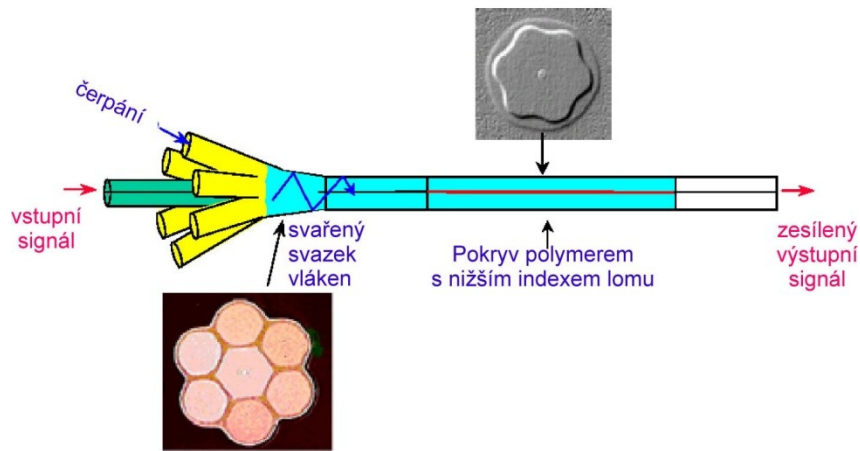
Yterbiem dopovaný vláknový laser



Optické systémy buzení

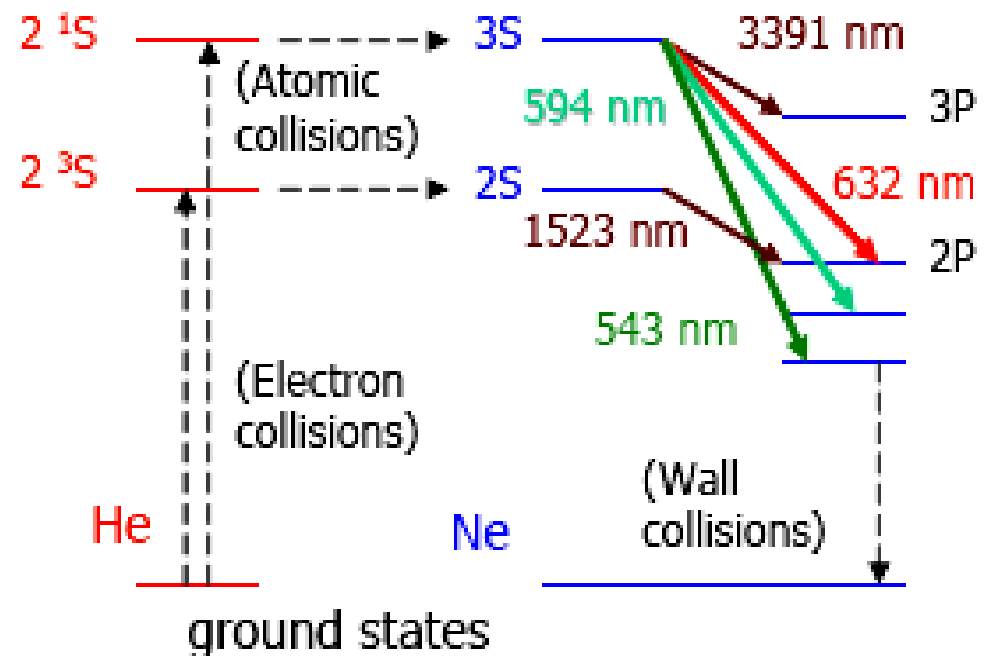


Vláknové laserové zesilovače



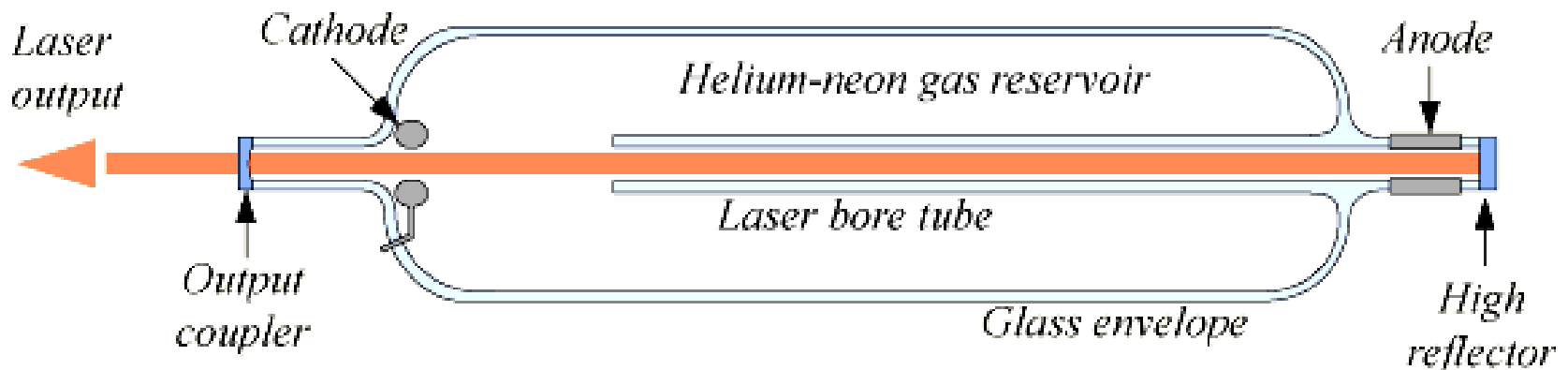
Plynový laser He-Ne

- Invented in 1960 as IR laser; red line used first in 1962
- Electric discharge in gas excites He to 2S levels
- Nearly parallel Ne levels exist
- Atomic collisions transfer excitation

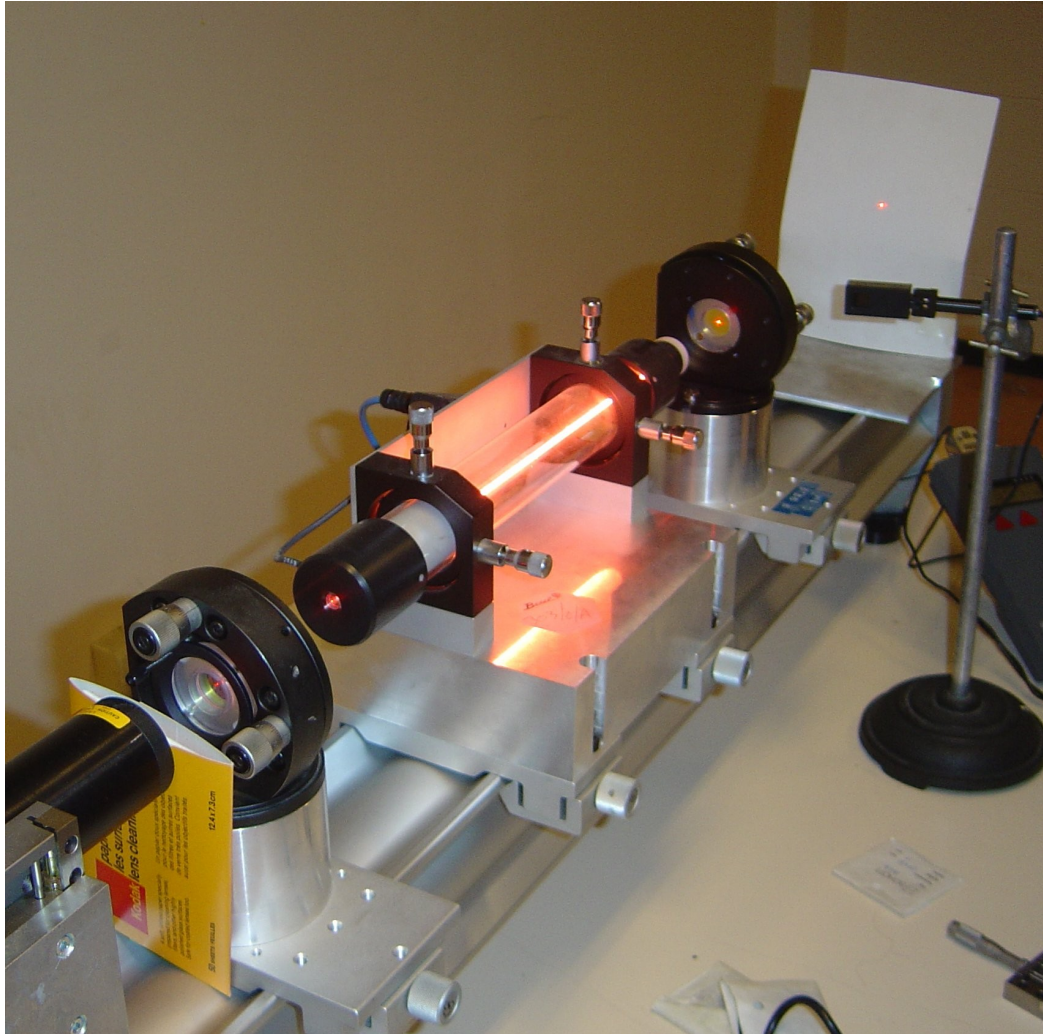


Plynový laser He-Ne

- Cheap and easy to manufacture – first lasers under \$100
- Gas tube has 85% He, 15% Ne



He-Ne laser



Dusíkový laser

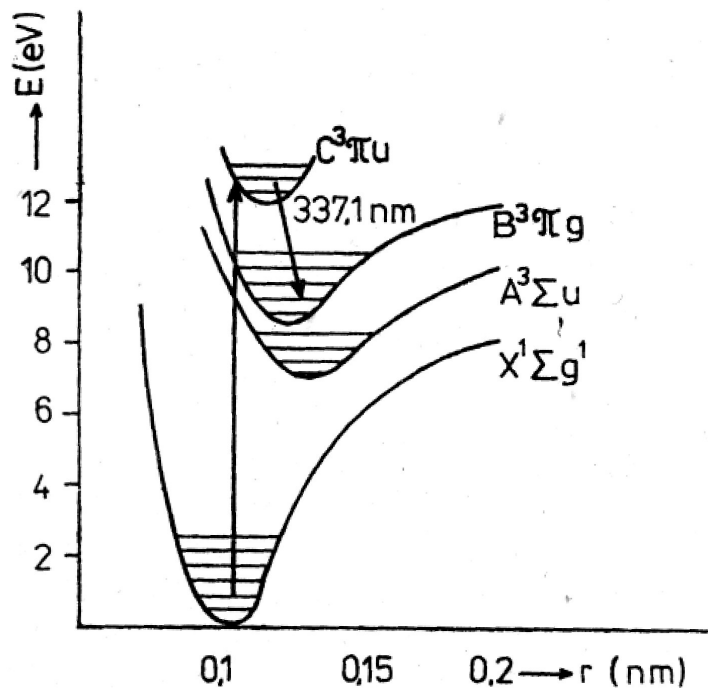
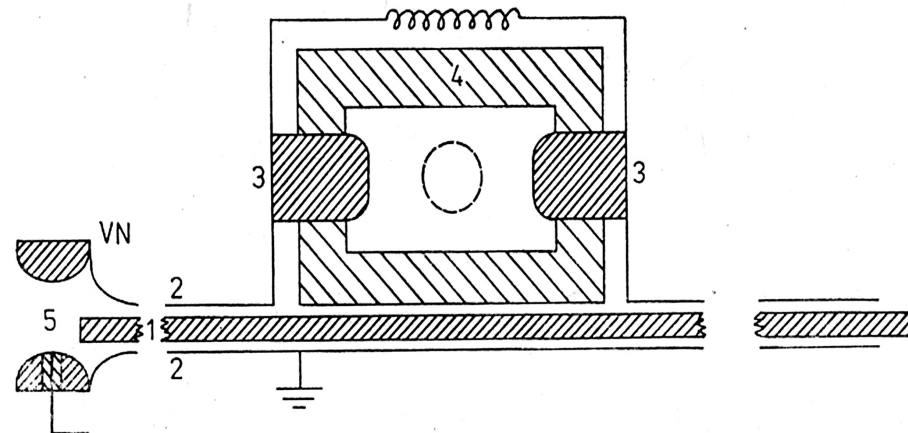


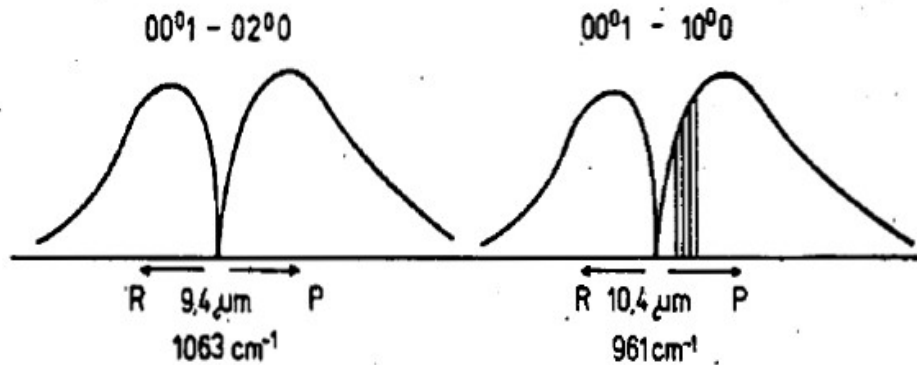
Schéma energetických hladin molekuly dusíku



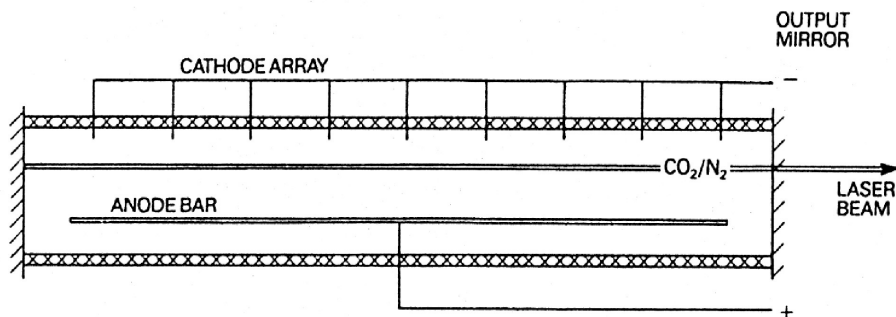
Řez dusíkovým laserem buzeným Blumleinovým vedením:
 1 — dielektrická fólie, 2 — měděná fólie, 3 — elektrody, 4 — kryt
 výbojové komory, 5 — jiskřiště



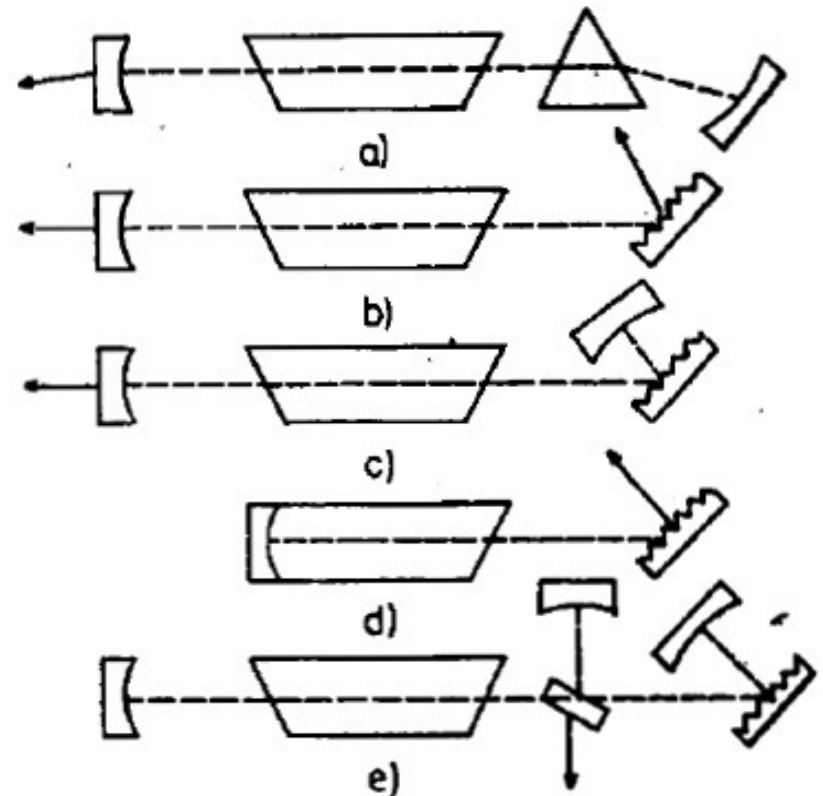
CO2 laser



Průběh intenzity emisních čar CO2 laseru



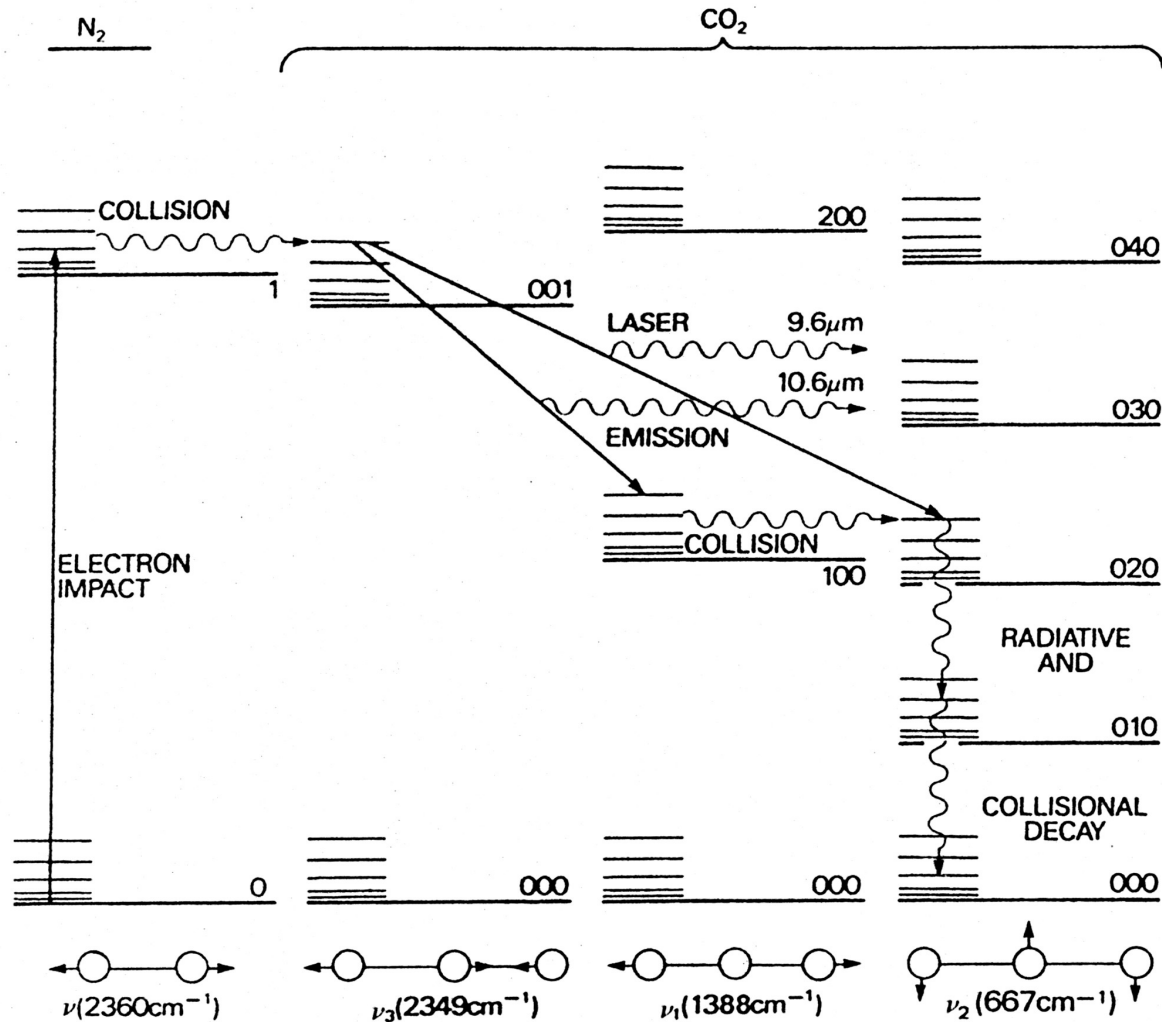
Electrode arrangement in a transverse excitation atmospheric (TEA) carbon dioxide laser



Selekce vlnových délek a
vyvazování svazku



Energetické schéma CO2 laseru

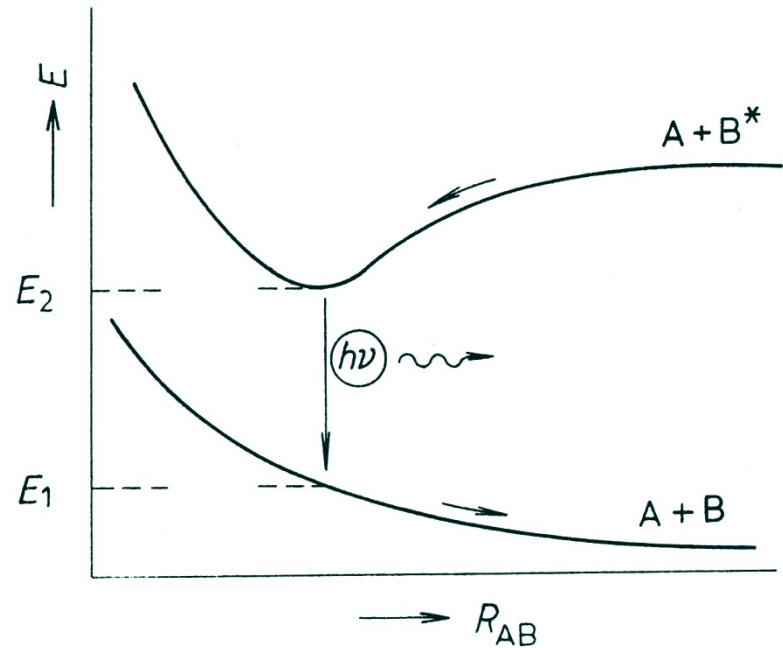


Energetics of the carbon dioxide laser. The rotational structure of the vibrational levels is shown only schematically



Excimer

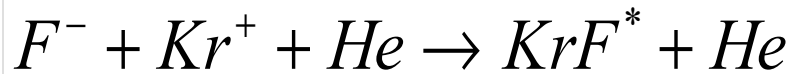
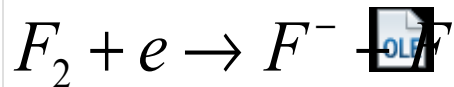
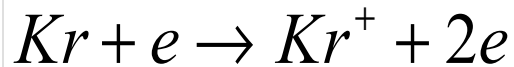
- Excimer – nestabilní molekula vznikající na přechodnou dobu v důsledku působení excitovaného atomu (molekuly) s atomem (molekulou) v základním stavu. Po přechodu excimeru do základního stavu (vyzáření fotonu) dojde během 10^{-14} s k disociaci



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



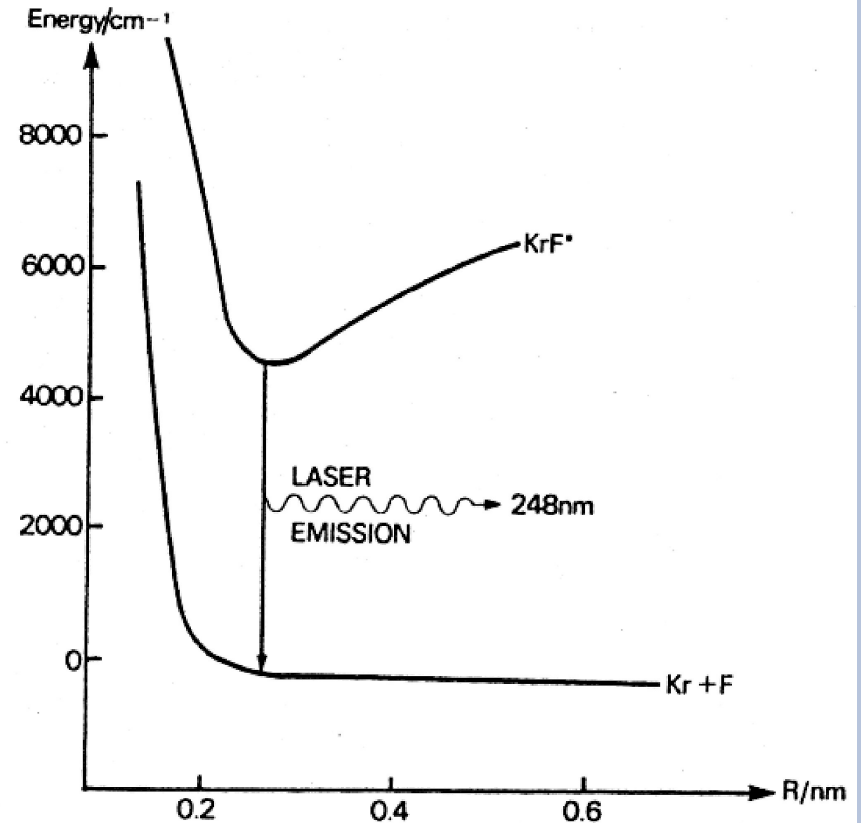
KrF exciplexový laser



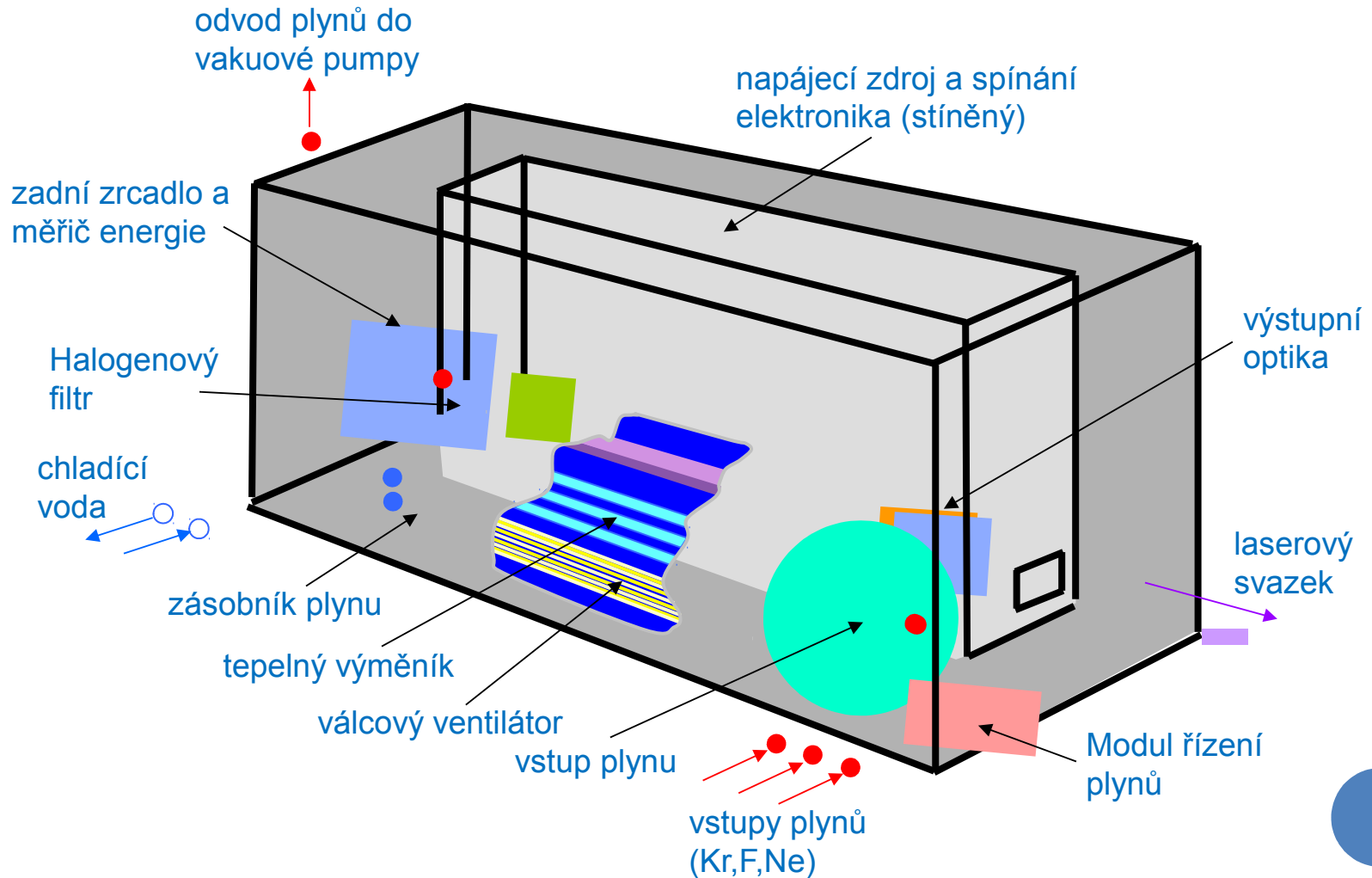
Exciplex - excitovaný komplex

Excimer – excitovaný dimer

Realizace: 1970 Basov, Xe^{2*}
buzené elektrony



Excimerový laser



Argonový iontový laser

Klepnutím lze upravit styly předlohy tex

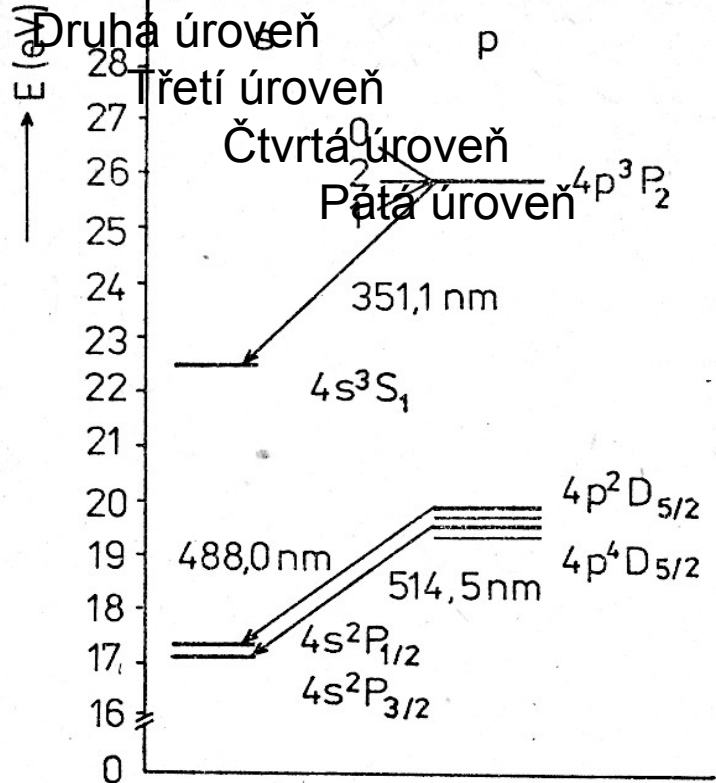


Schéma přechodů ArII a ArIII iontů

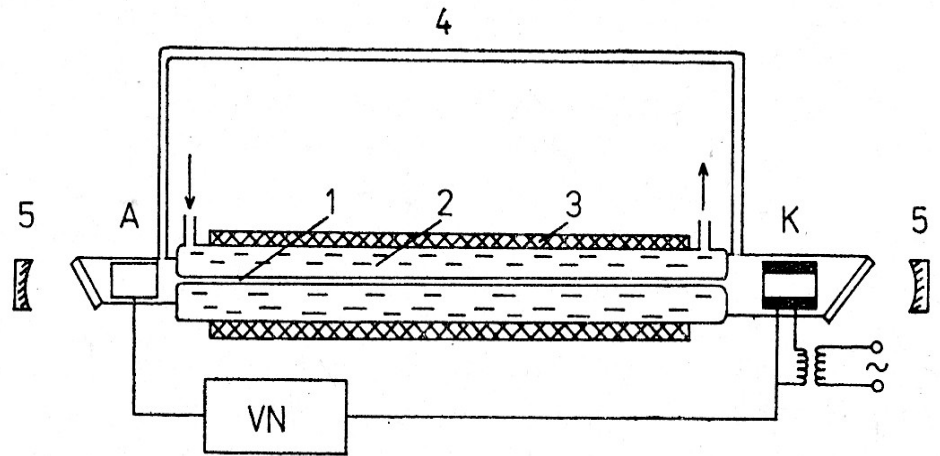


Schéma argonového laseru:

1-vysokoproudová kapilára

2-vodní chlazení

3-solenoid

4-vyrovnávací kapilára

5-zrcadla

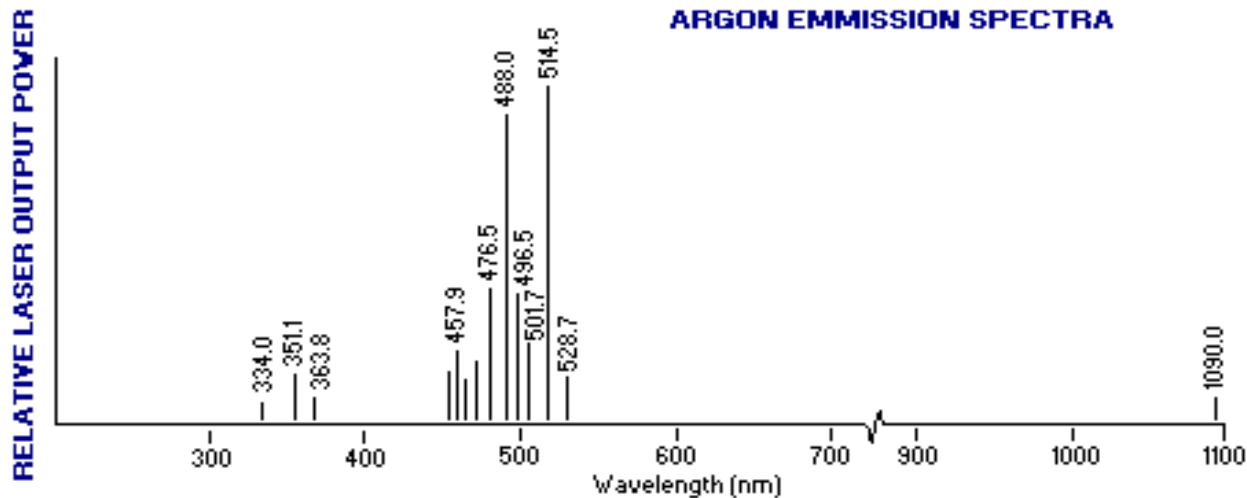
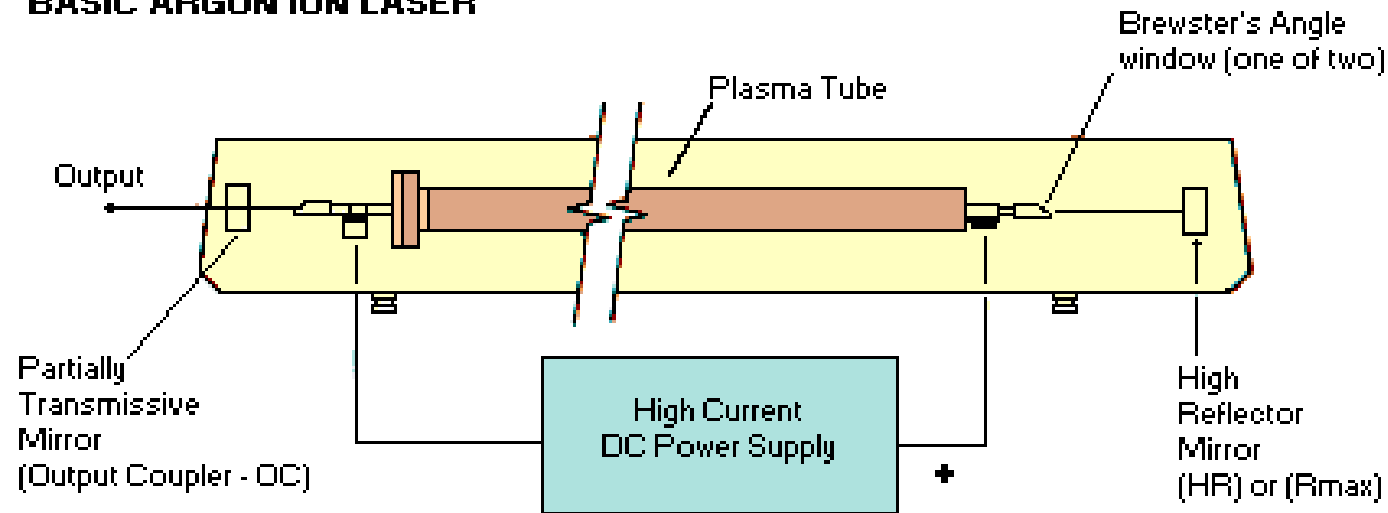
A-anoda, K-žhavená katoda,

VN- vysoké napětí

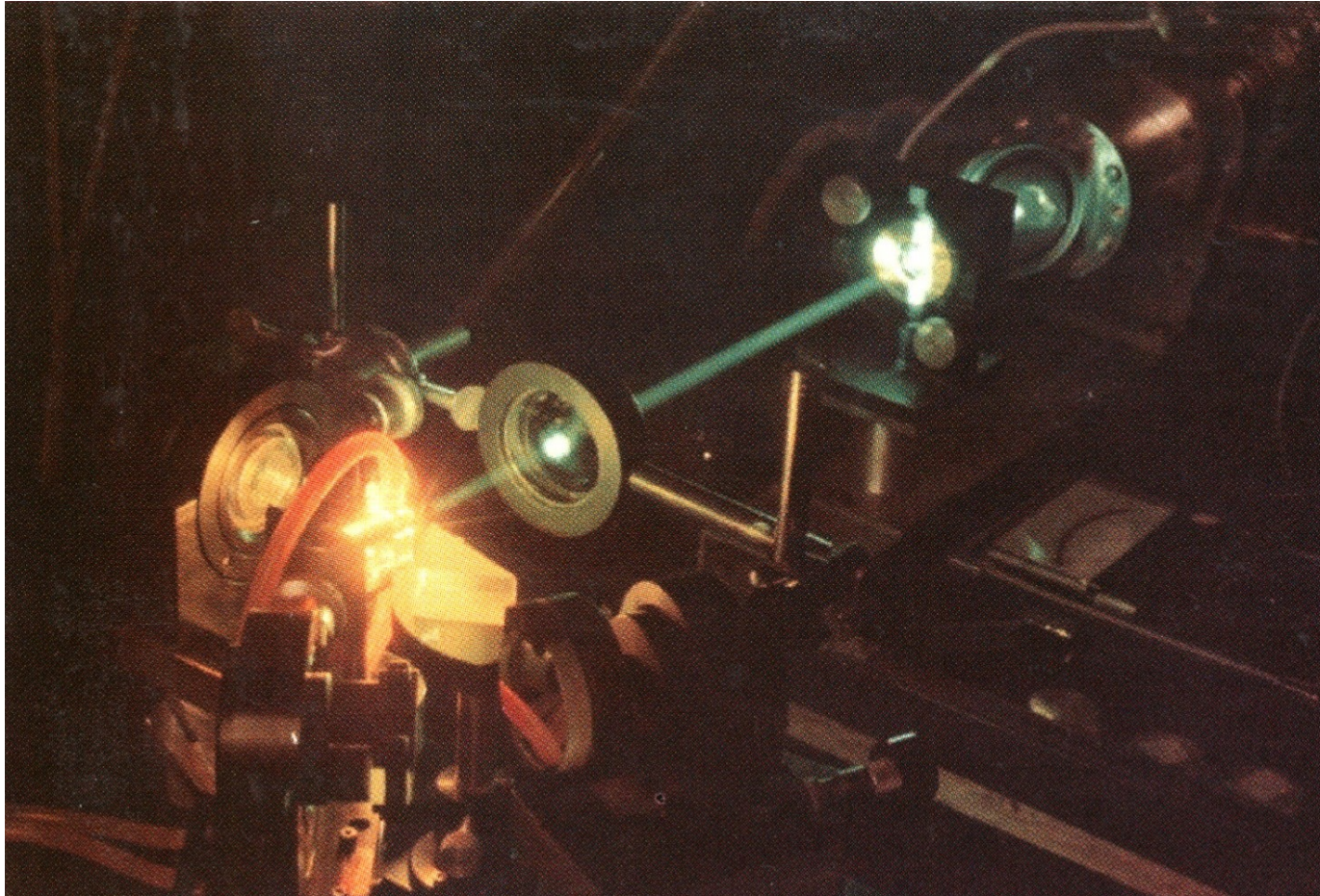


Argonový iontový laser

BASIC ARGON ION LASER



Dye lasers

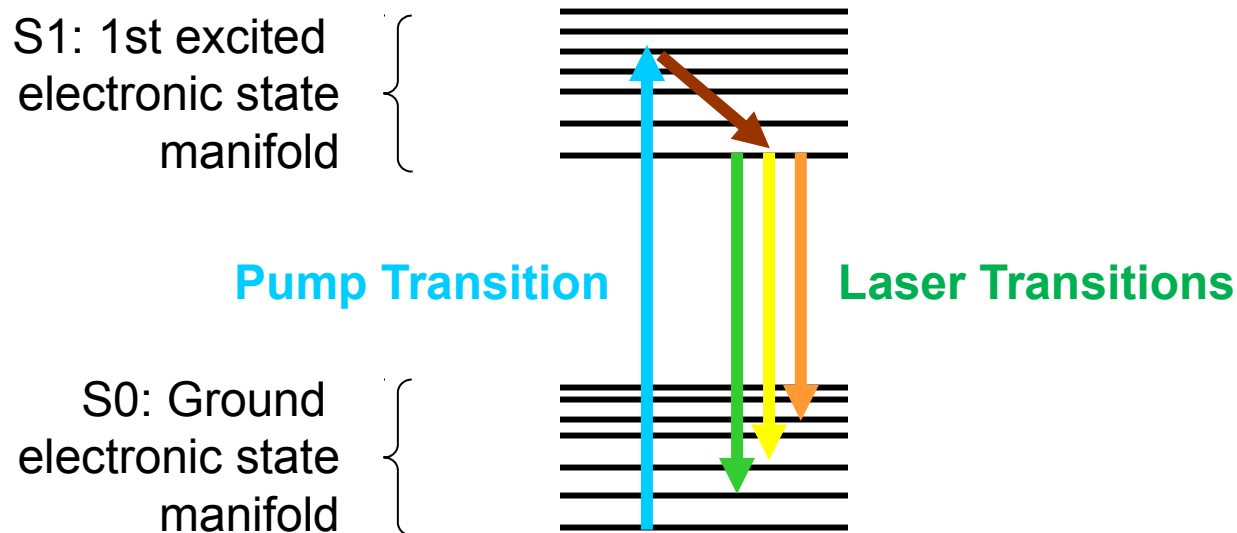


Dye lasers are an ideal four-level system, and a given dye will laser over a range of ~ 100 nm.



A dye's energy levels

- The lower laser level can be almost any level in the S0 manifold.



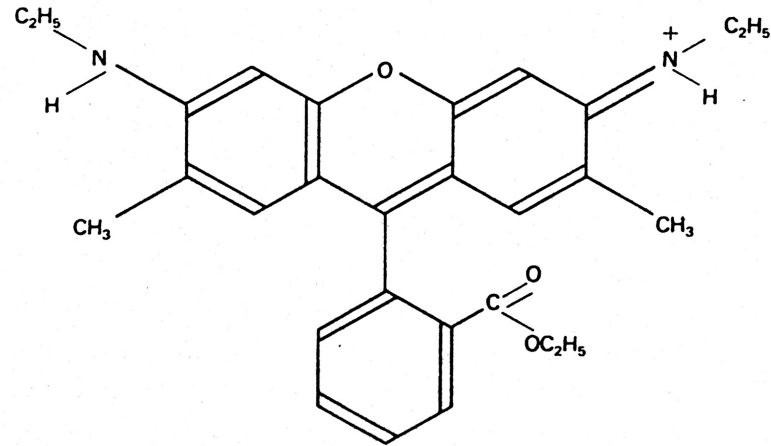
Dyes are so ideal that it's often difficult to stop them from lasing in all directions!



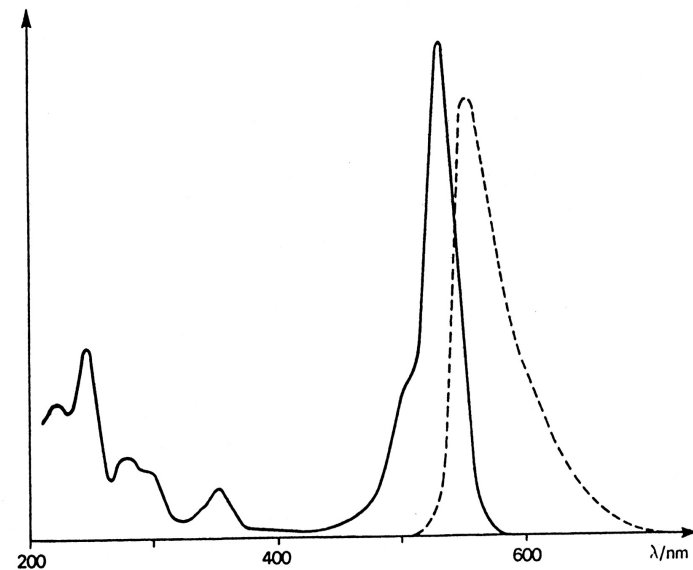
Barvivové lasery

- 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



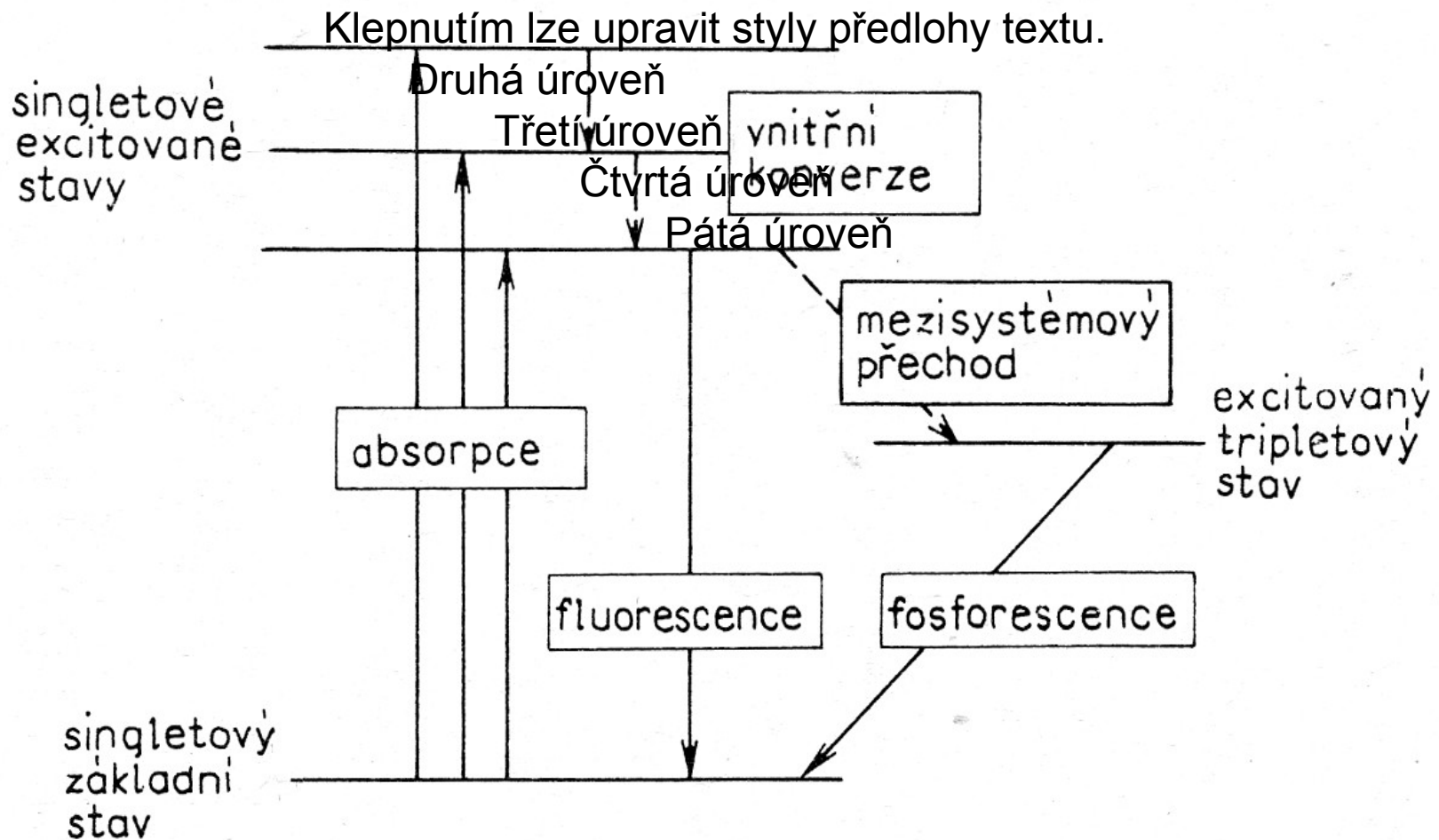
One of the resonance structures of the Rhodamine 6G cation



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

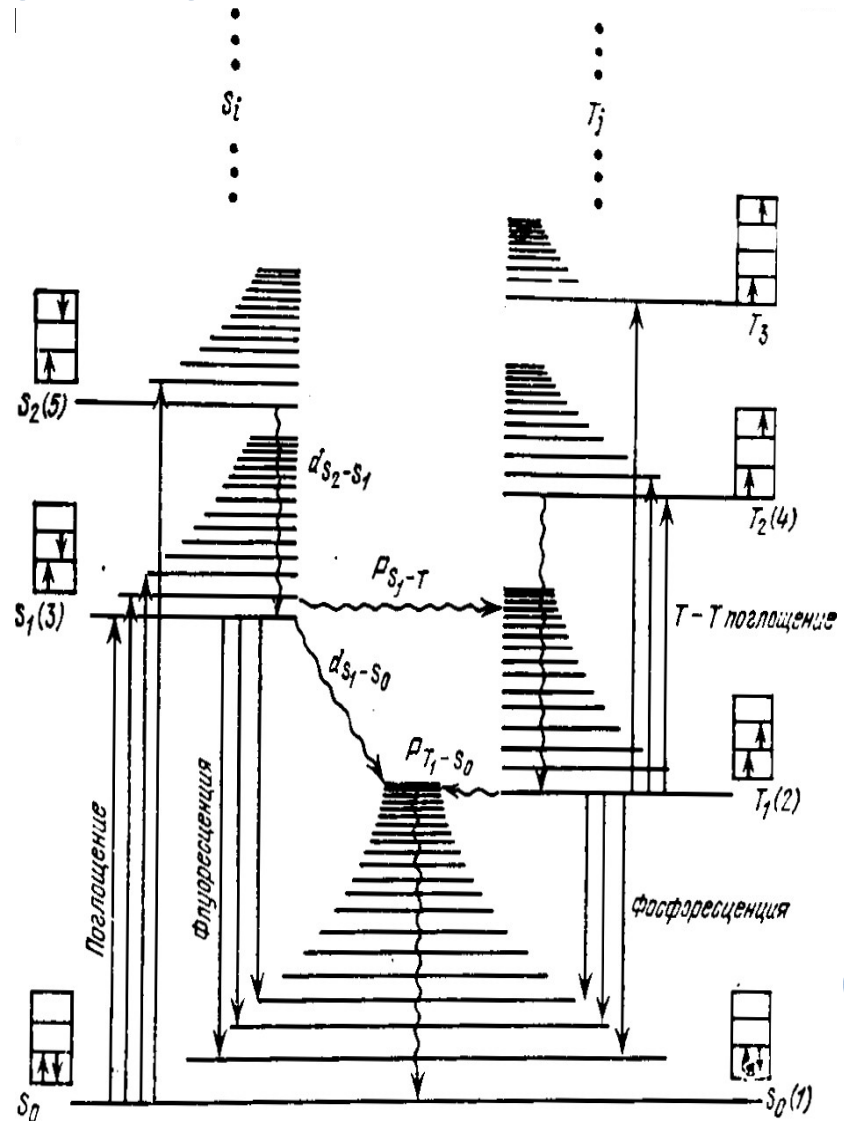


Generalizovaný Jablonskéhoho diagram energetických hladin a přechodů v barvivo

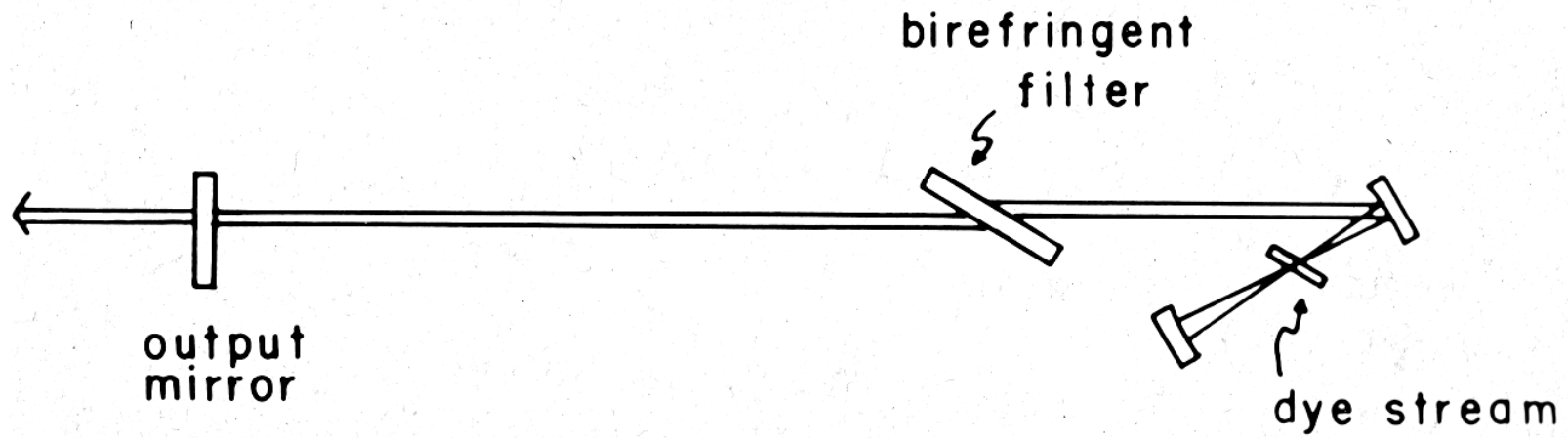


Energetický systém barviva

- Excitace absorpcí záření přechodem ze základního do prvního singletového stavu
- Fluorescenční přechod do základního stavu (možnost inverzní populace)
- Nezářivý přechod z S1 do metastabilního tripletového T1 stavu (parazitní proces)
- Absorpce fluorescenčního záření přechodem T1-T2(T3) – zhasí fluorescenci, snižuje zesílení aktivního prostředí

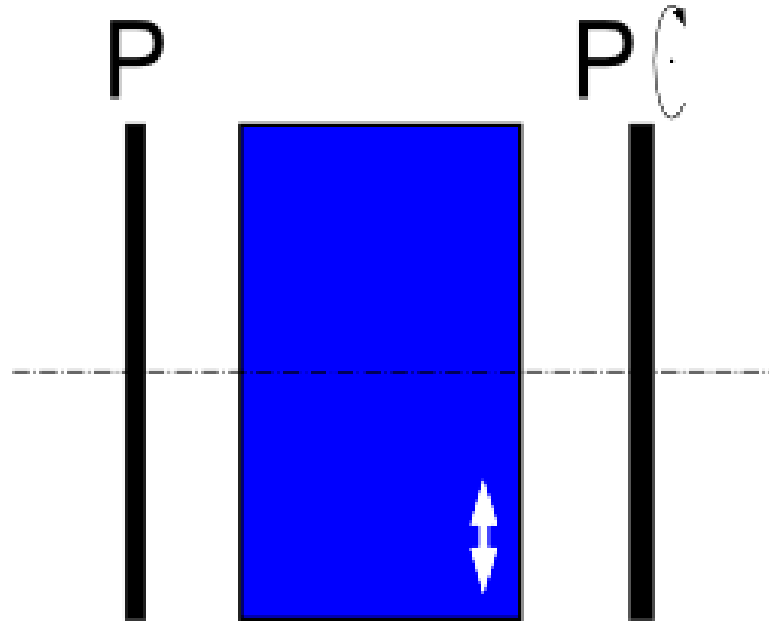


Barvivový laser - princip



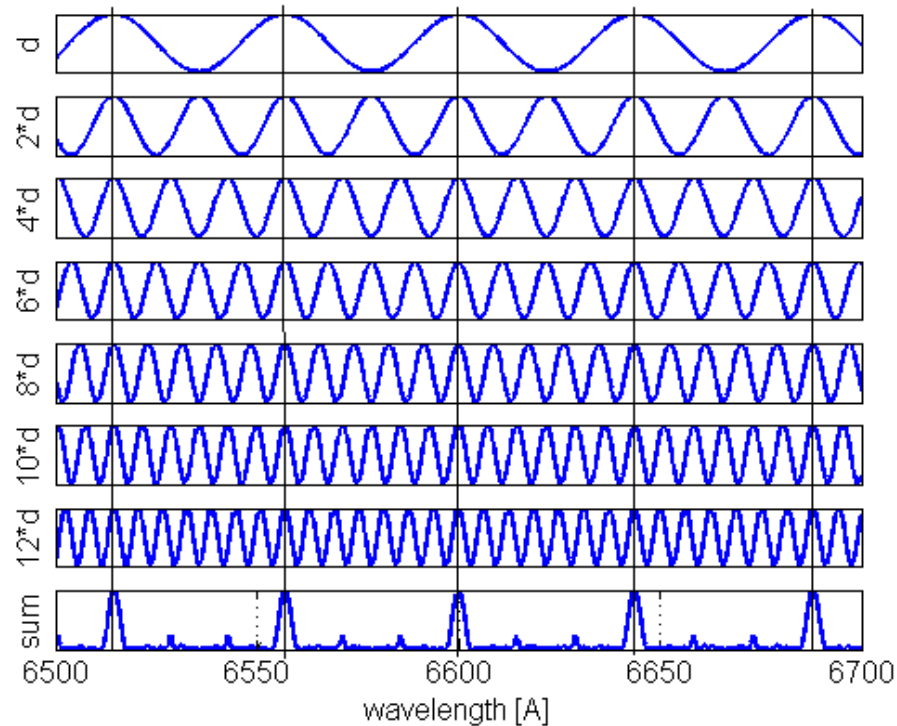
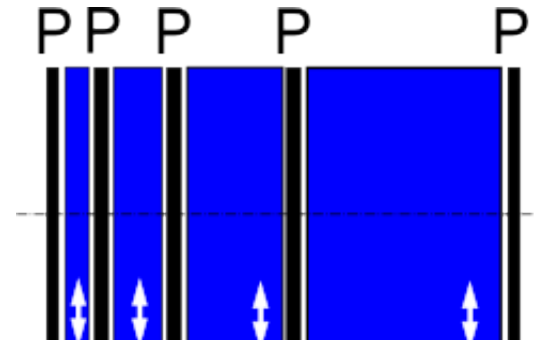
Wood birefringent filters

- Wood birefringent filter consists of two polarizers and a crystalline quartz plate cutted parallel with crystal axis. The thickness of the plate depends on wavelenghts we want to separate. For already given example of Sodium doublet it gives the thickness of approximately 31.8 mm (depends also on operated temperature). These types of filters are very exact optical devices and it is necessary to hold very exact manufacture thickness tolerances.



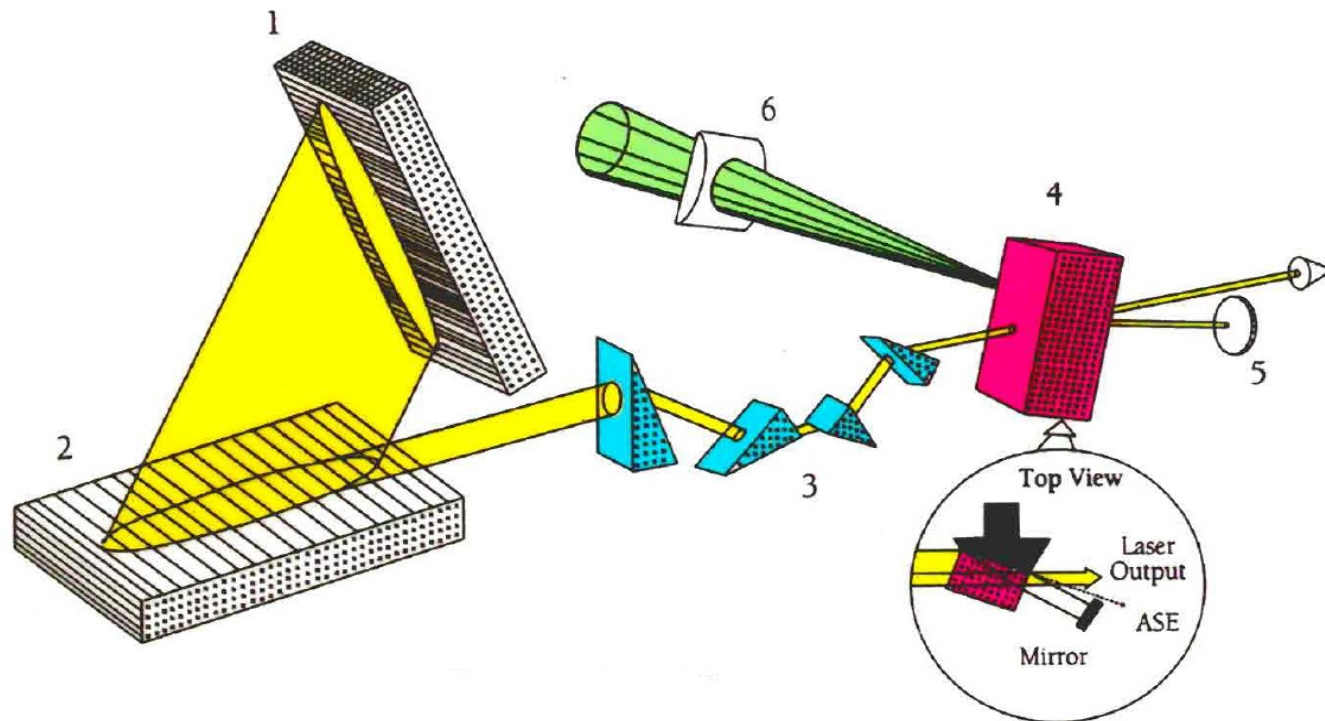
Lyot birefringent filters

- This filter is in fact constructed from several Wood filters serially lined up. The thickness 'd' of the first plate is such that transmits requested wavelength and provides requested performance of the filter. Each next birefringent plate has a double width of the previous one. That provides two facts; firstly, the requested wavelength is transmitted and secondly, the unwanted transmitted wavelengths of a previous birefringent plate are filtered out. Such a cascade of birefringent plates sandwiched between polarizers provides high performance filter with a half-width in order of $1/10$ nanometers

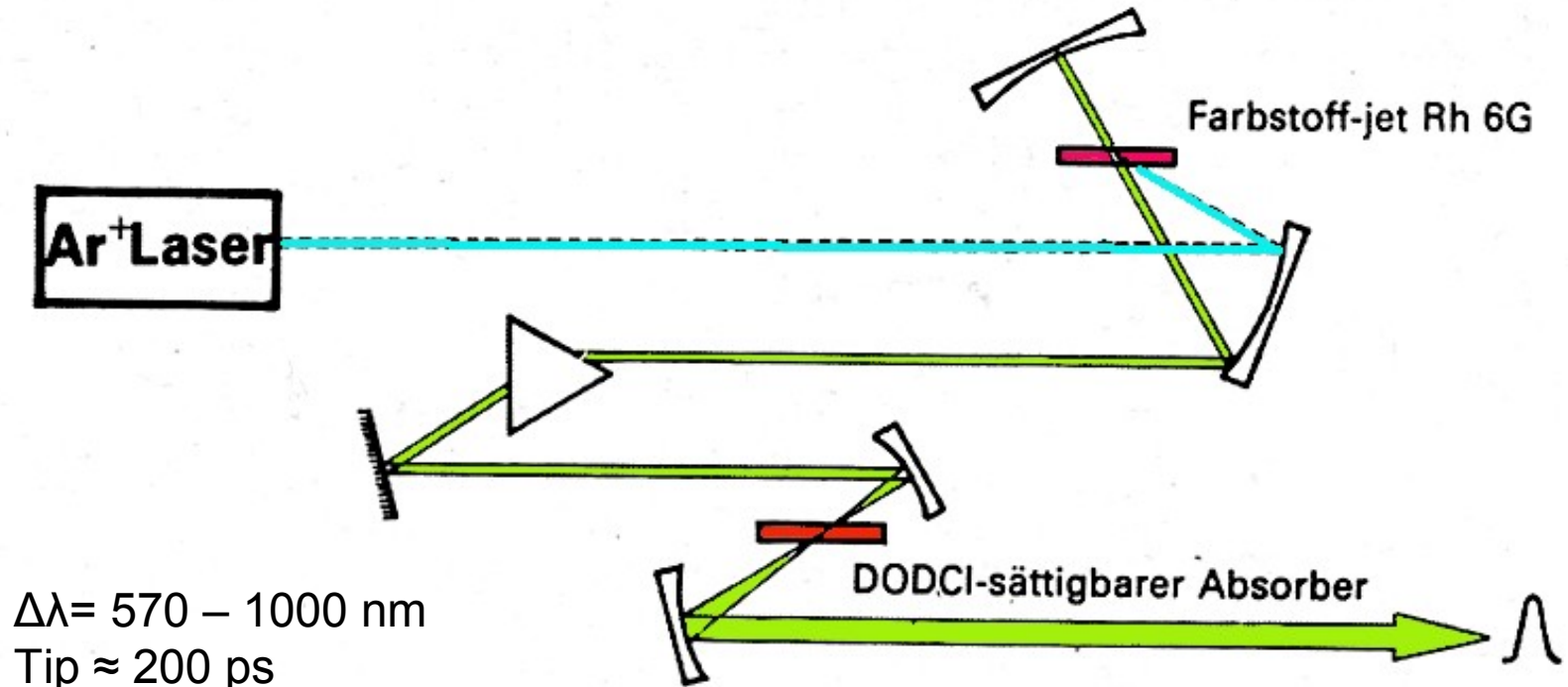


Barvivý laser

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



Pikosekundový laser

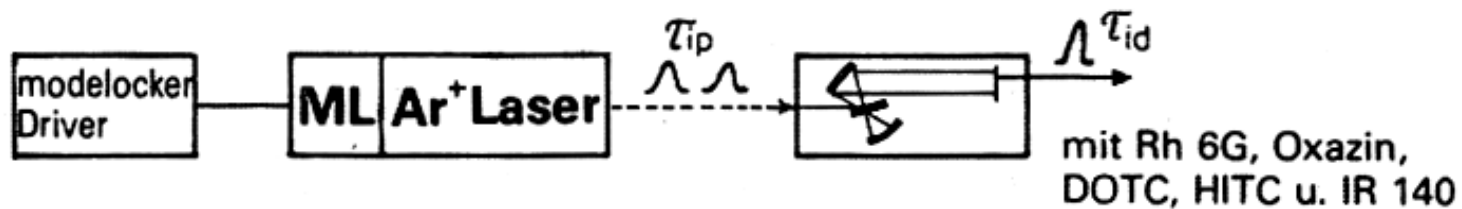


$\Delta\lambda = 570 - 1000 \text{ nm}$

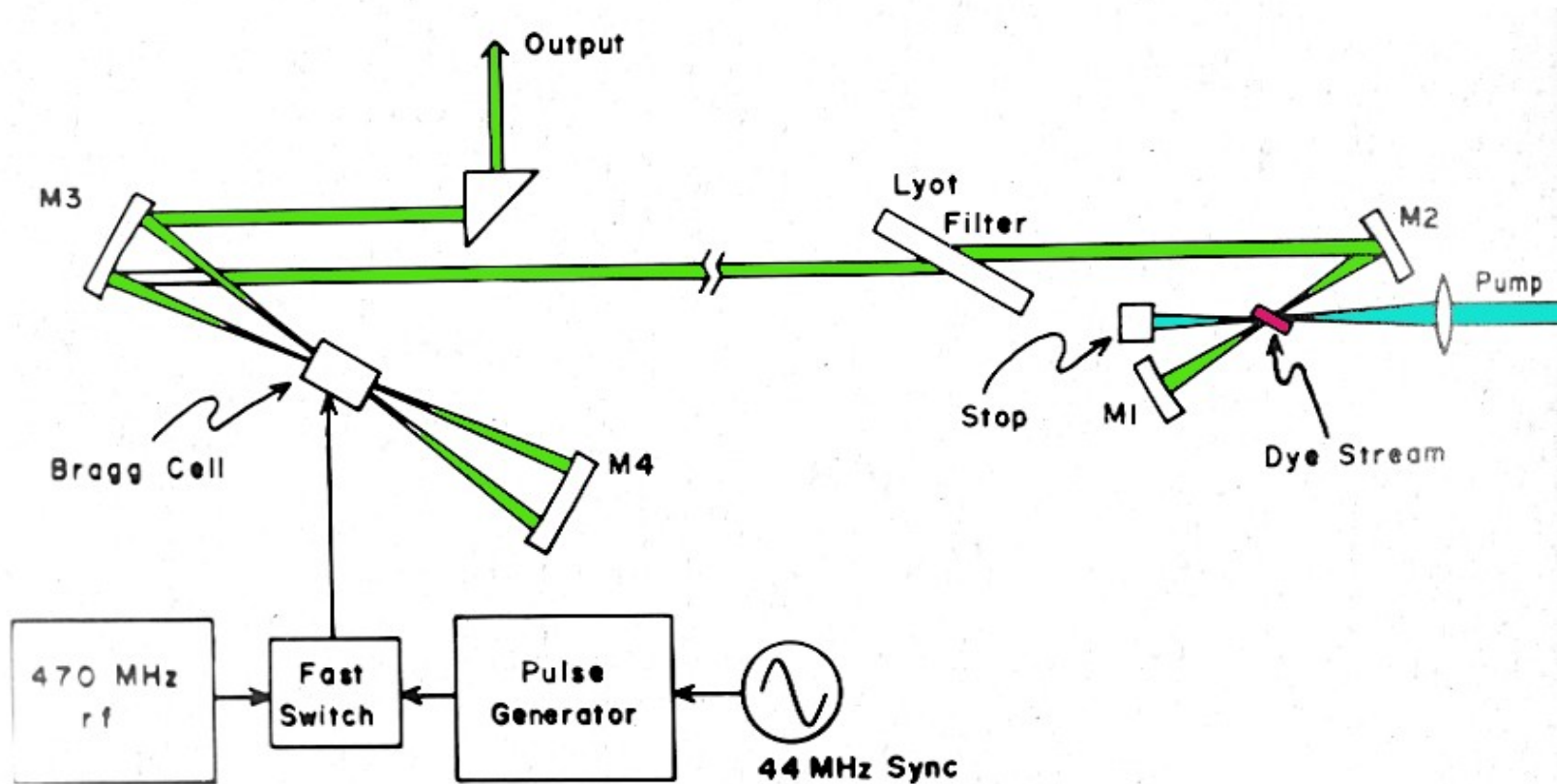
Tip $\approx 200 \text{ ps}$

$\tau_{id} \approx 0,8 - 50 \text{ ps}$

$f = 50 - 150 \text{ MHz}$



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

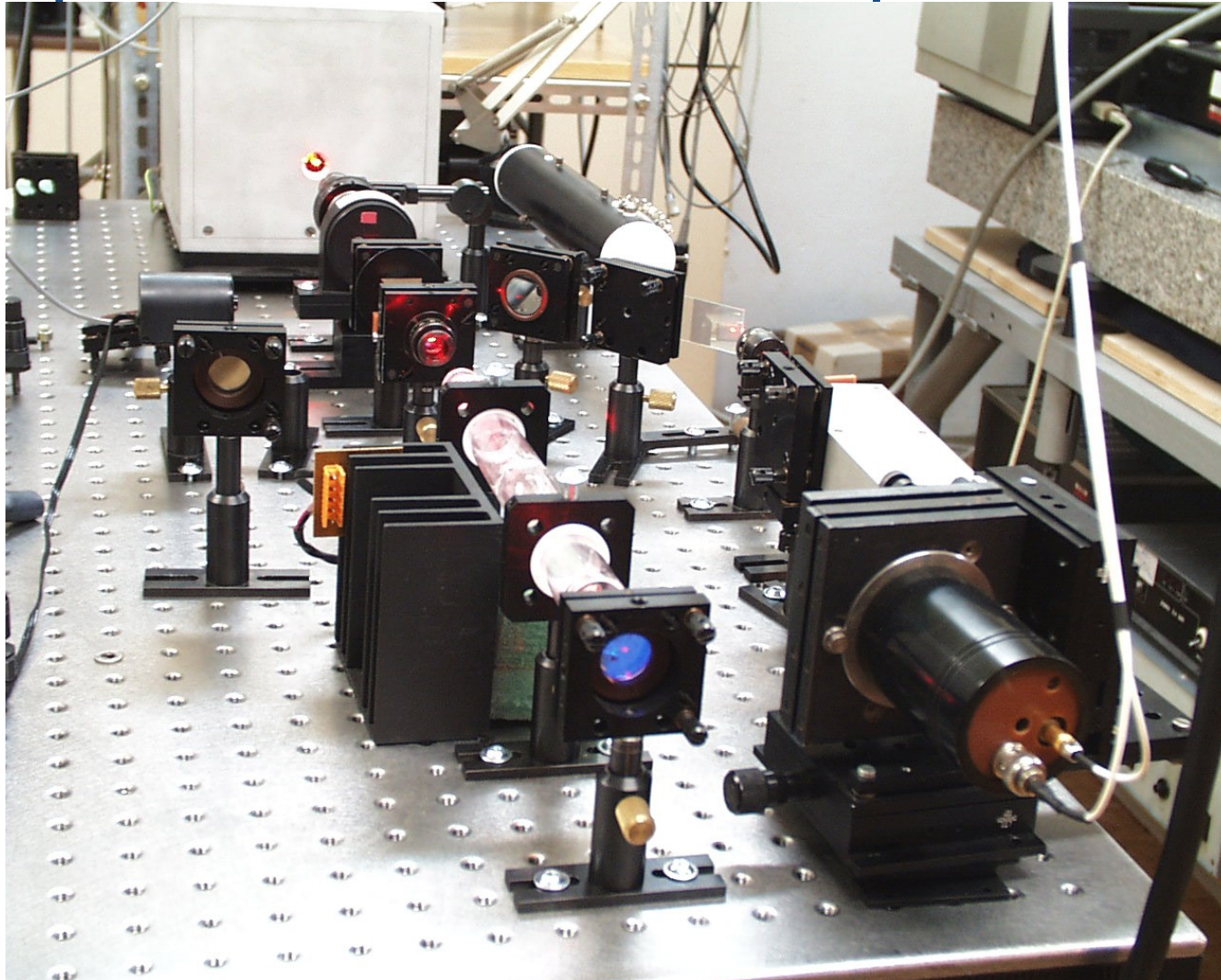
cyaniny

630 – 720

oxaziny



Experimentální laserové pracoviště



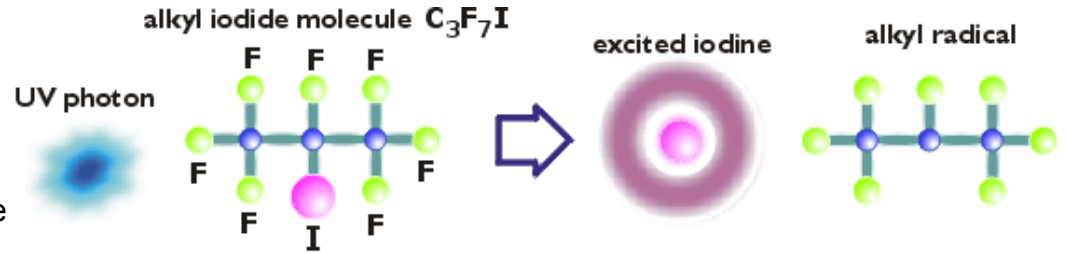
Prague Asterix Laser System

- 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.

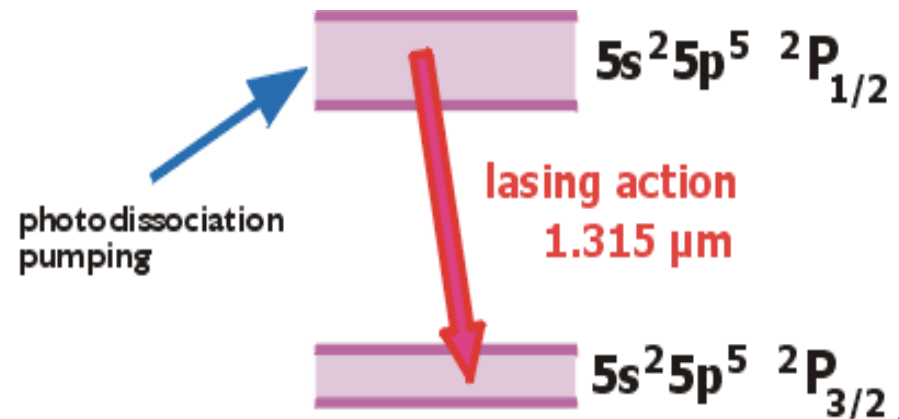


Jódový laser Asterix

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.

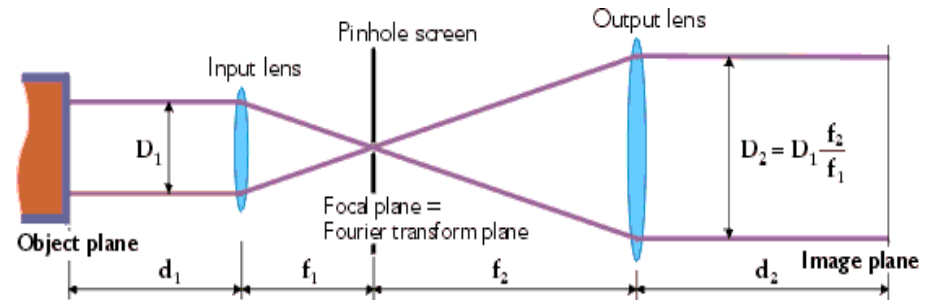
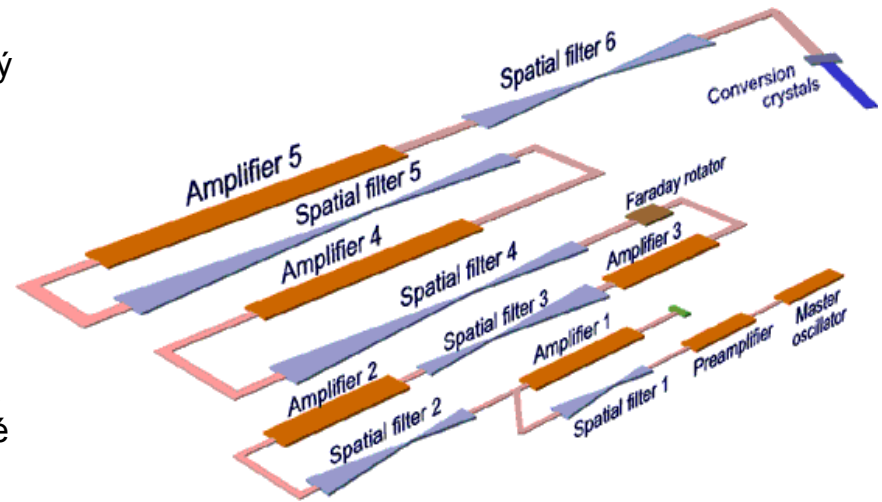


The iodine laser is pumped with energy released via photochemical reaction



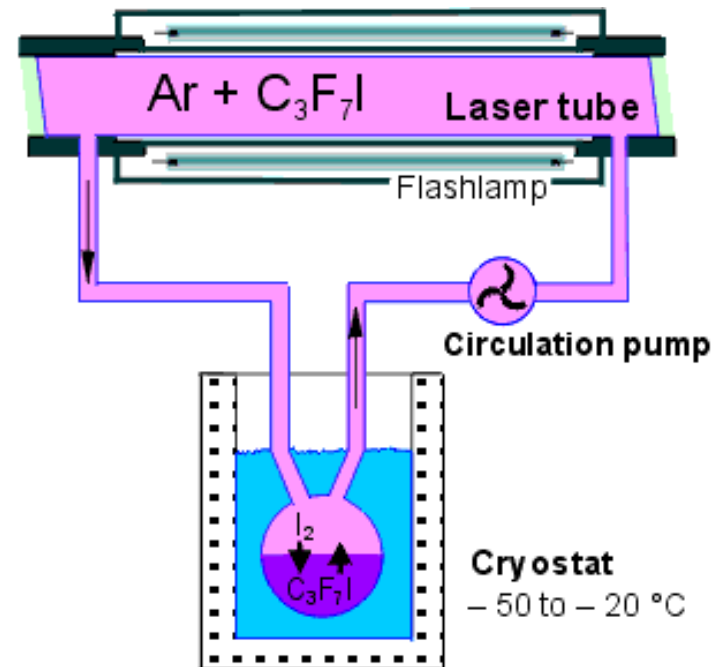
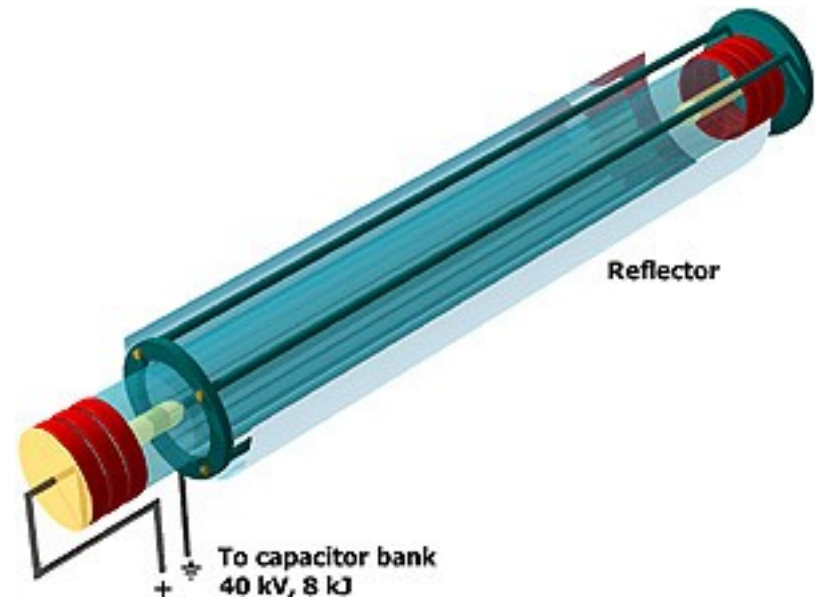
Celkové uspořádání PALS

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.



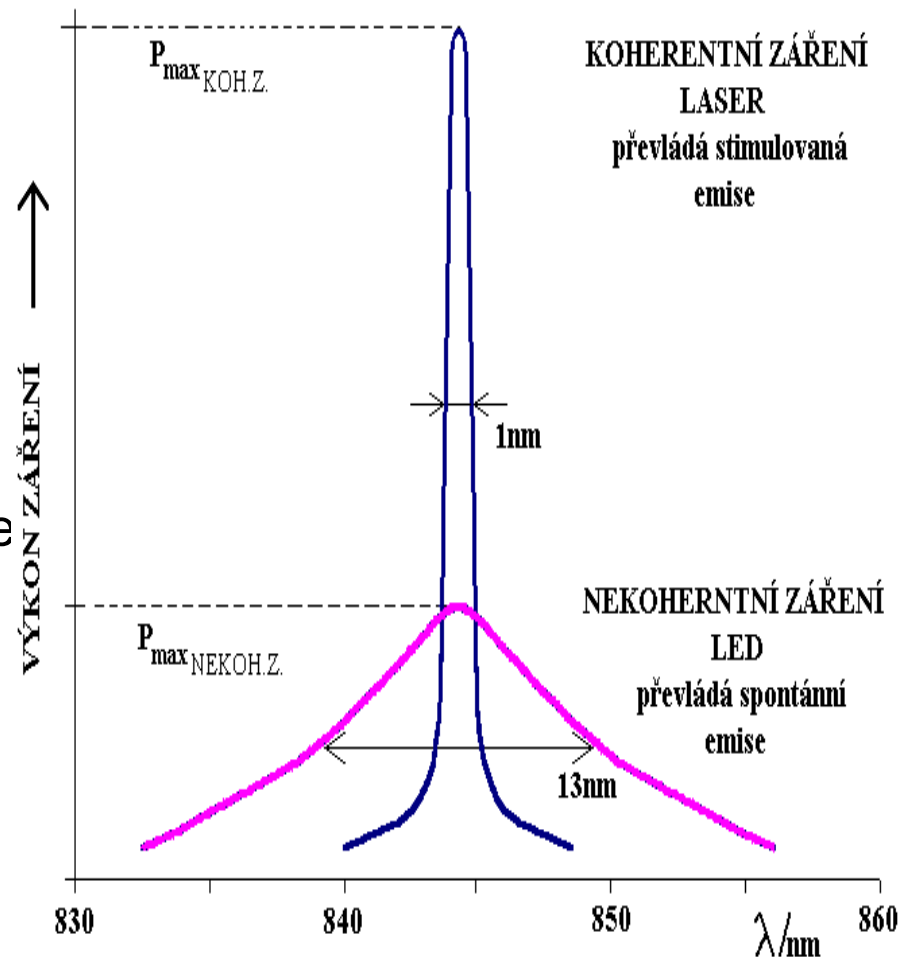
Optický zesilovač

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.

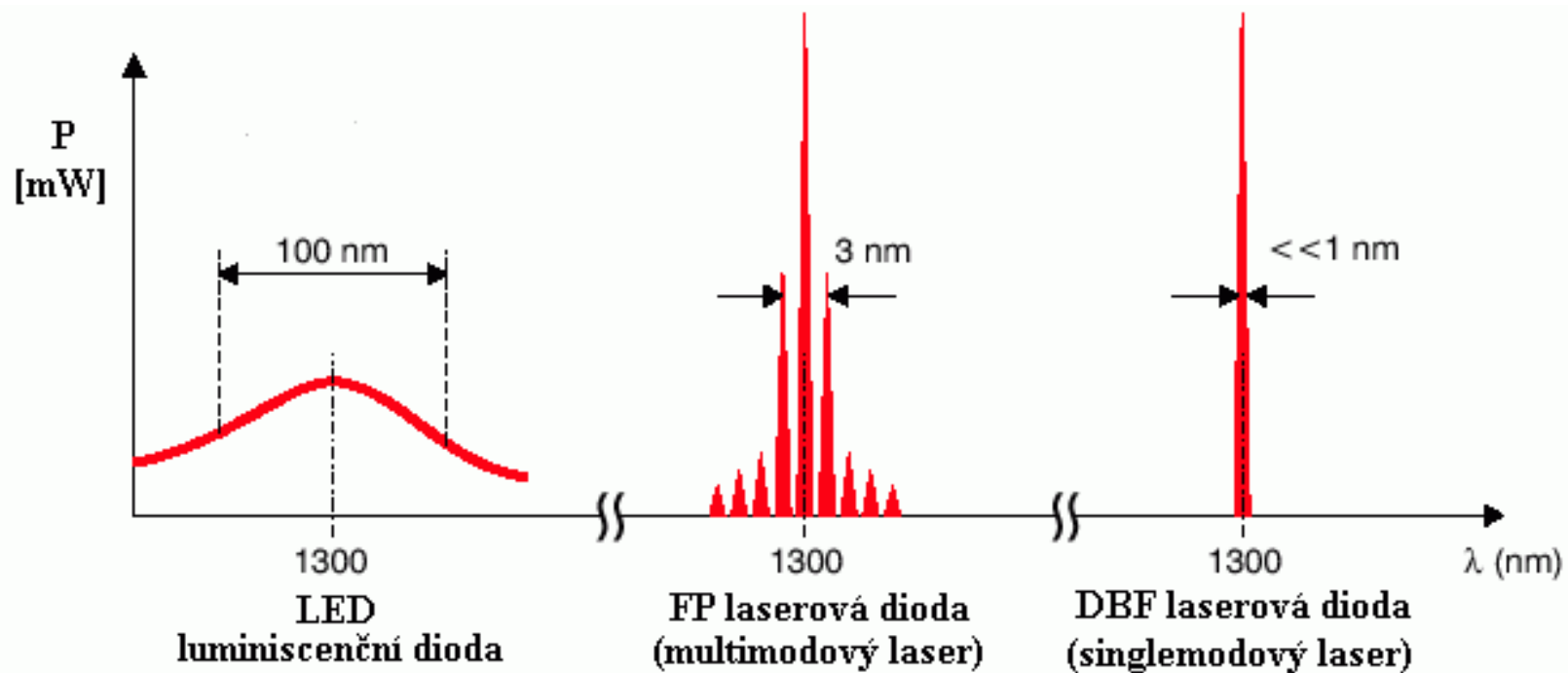


Laserové diody

- Pro malé proudy má záření LED spontánní charakter a je lineární funkcí budicího proudu. Po dosažení *prahového proudu*, prudce narůstá výkon stimulovaného záření a ze zrcadel rezonátoru je emitováno *koherentní záření* opět lineárně závislé na velikosti budicího 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

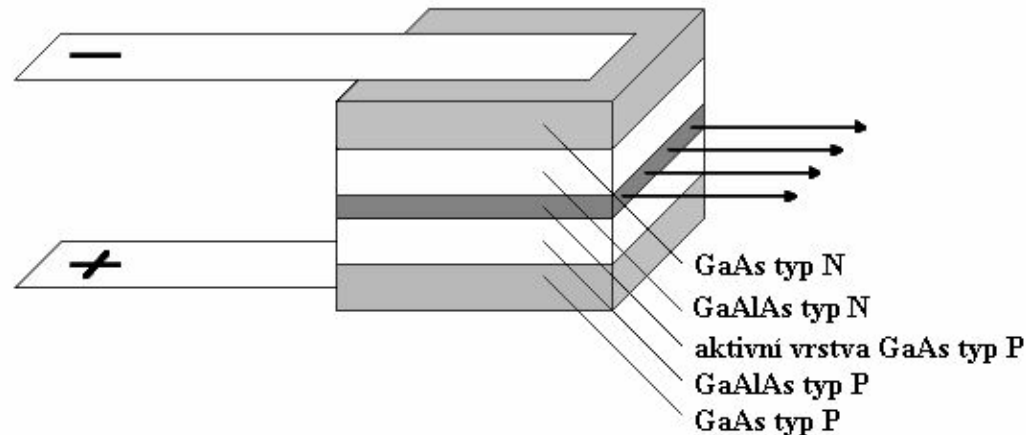


Spektrum LED a laserových diod



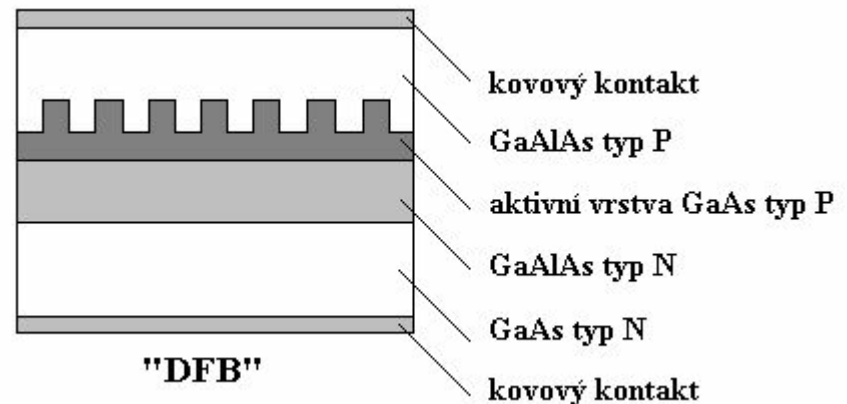
Heterostrukturální lasery

- 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.



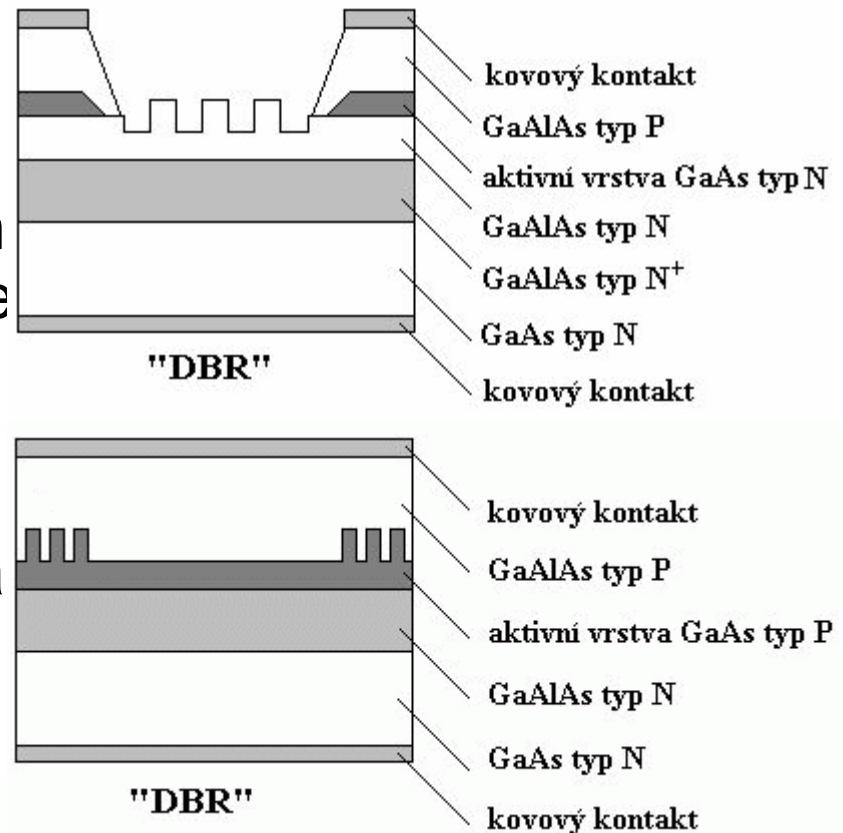
Lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou (*Distributed Feed Back*)

- 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**

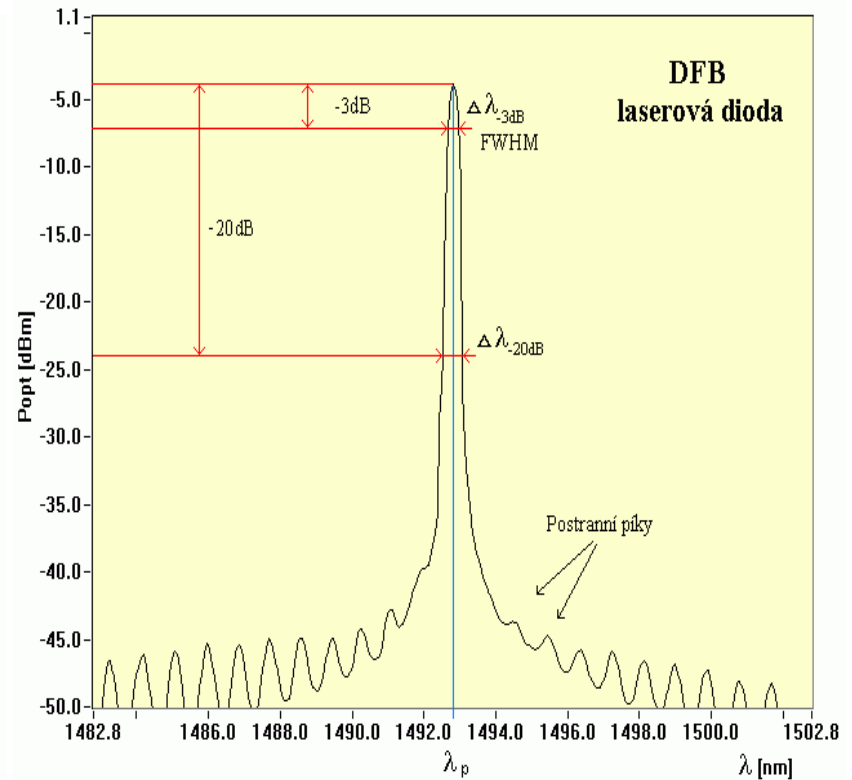
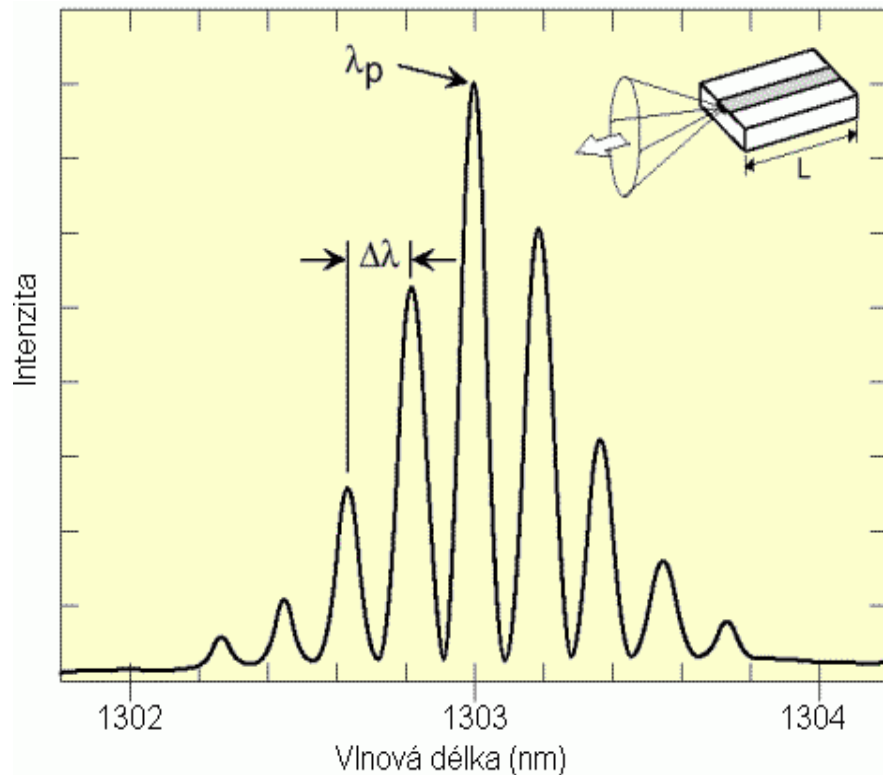


Lasery s rozloženým Braggovým zrcadlem (*Distributed Bragg Reflector*).

- 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 časteji užívá typ se dvěma Braggovými zrcadly na koncích vlnovodu

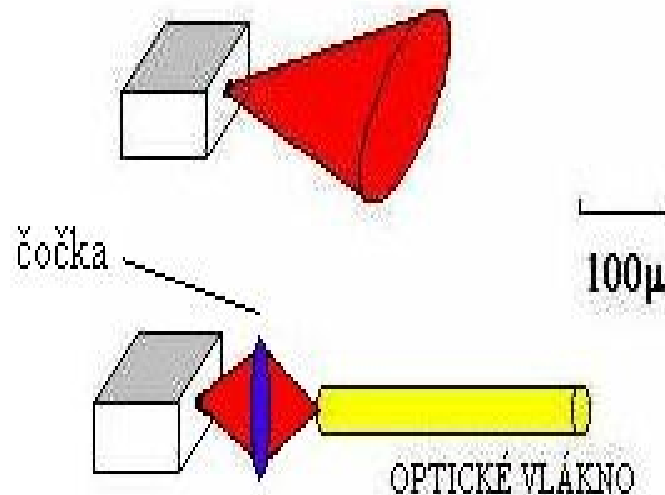


Spektrum laserových diod



Hranově vyzařující lasery

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

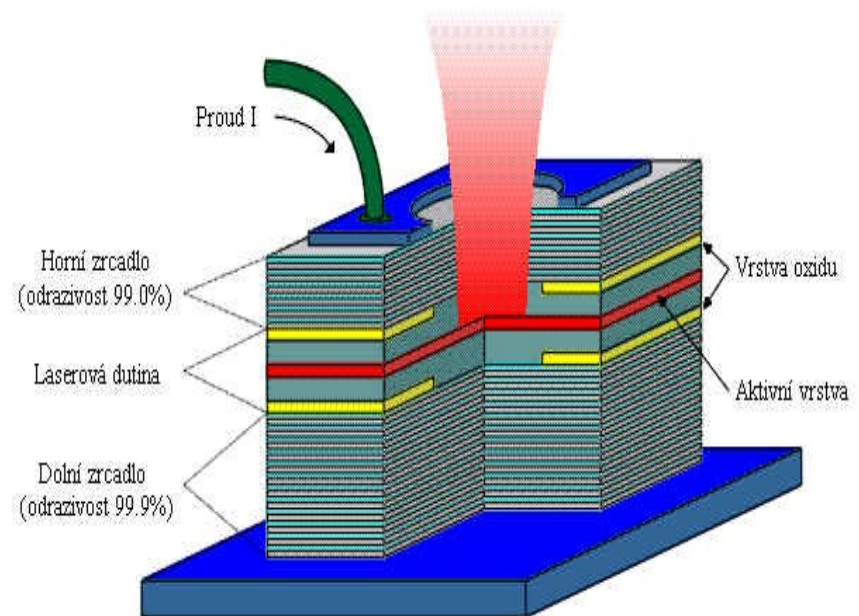


Hranově vyzařující LD



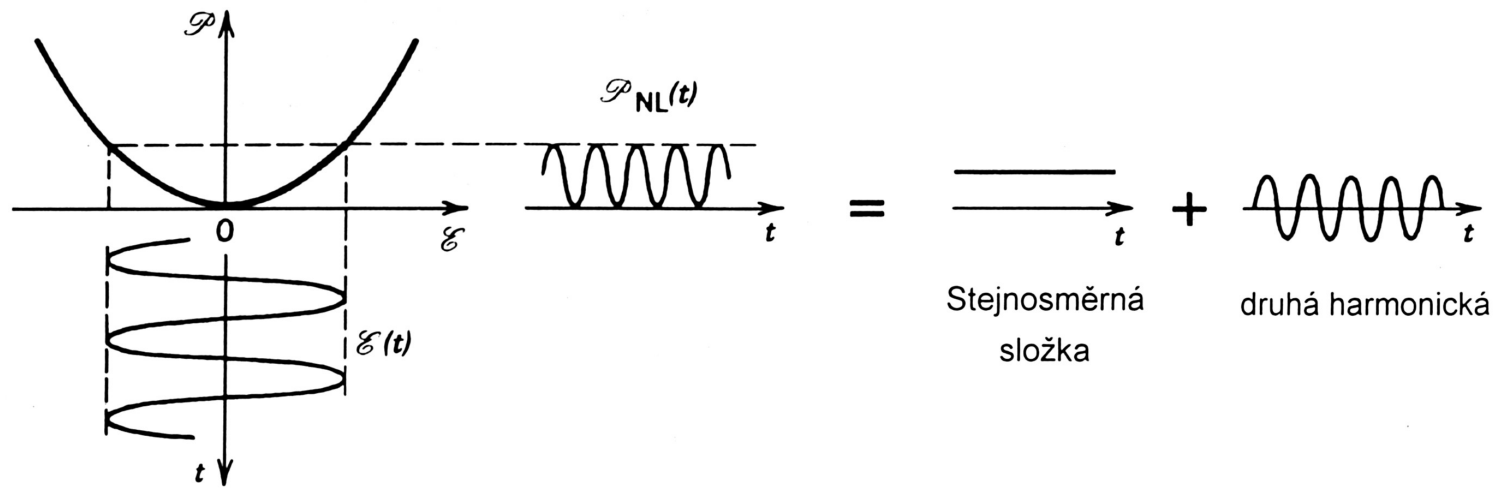
Plošně vyzařující lasery

- 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.

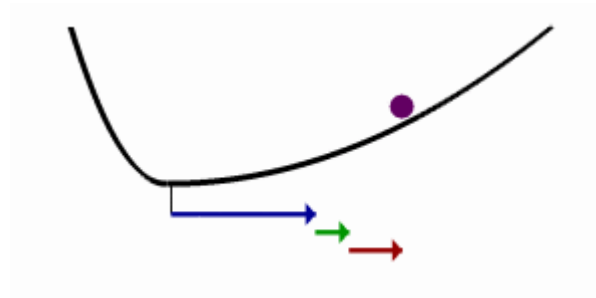
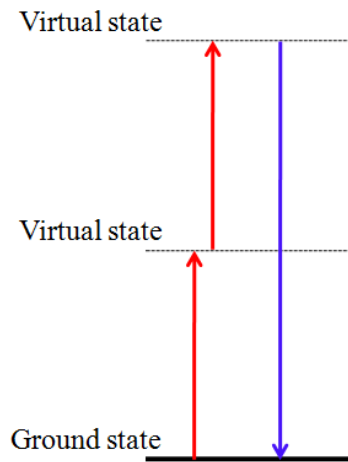
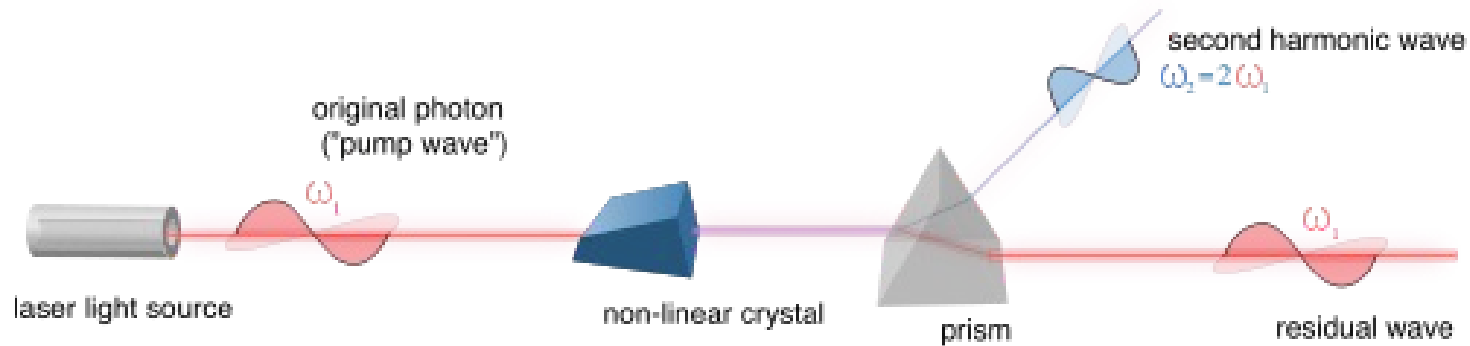


Nelineární prostředí - krystaly

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



The blue arrow corresponds to ordinary (linear) susceptibility, the green arrow corresponds to second-harmonic generation, and the red arrow corresponds to optical rectification.



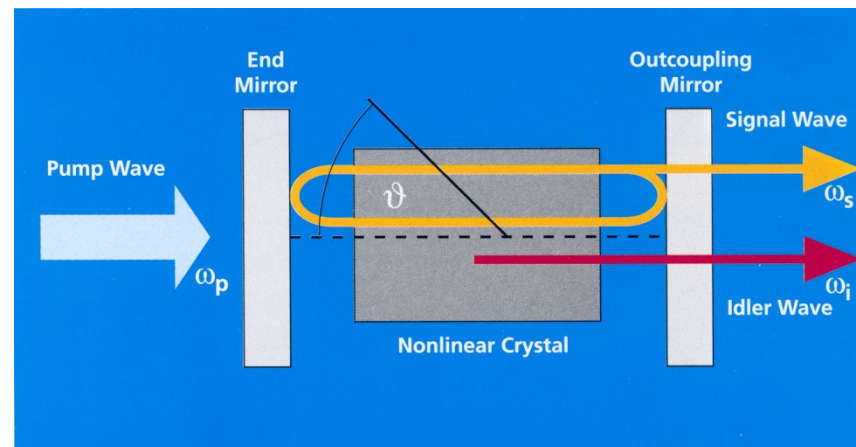
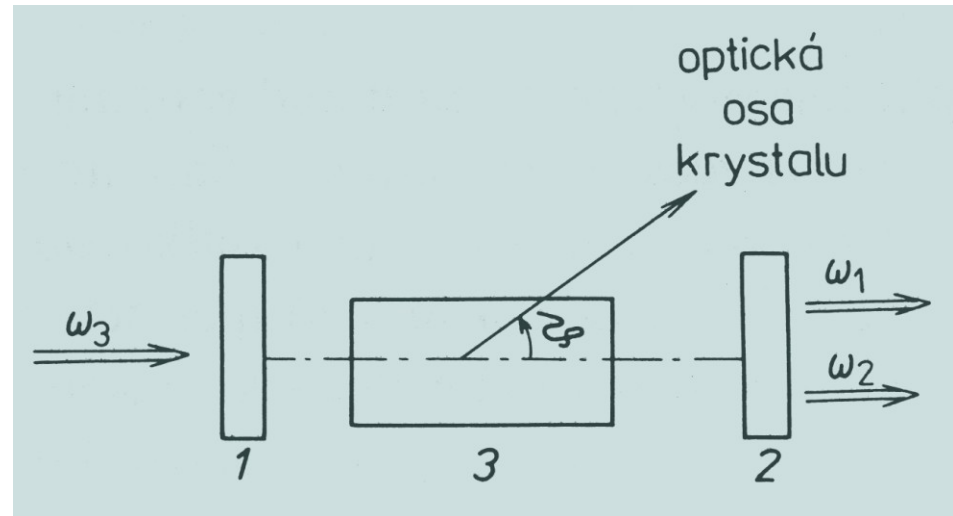
Optical Parametric Oscillator (OPO)

- 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:

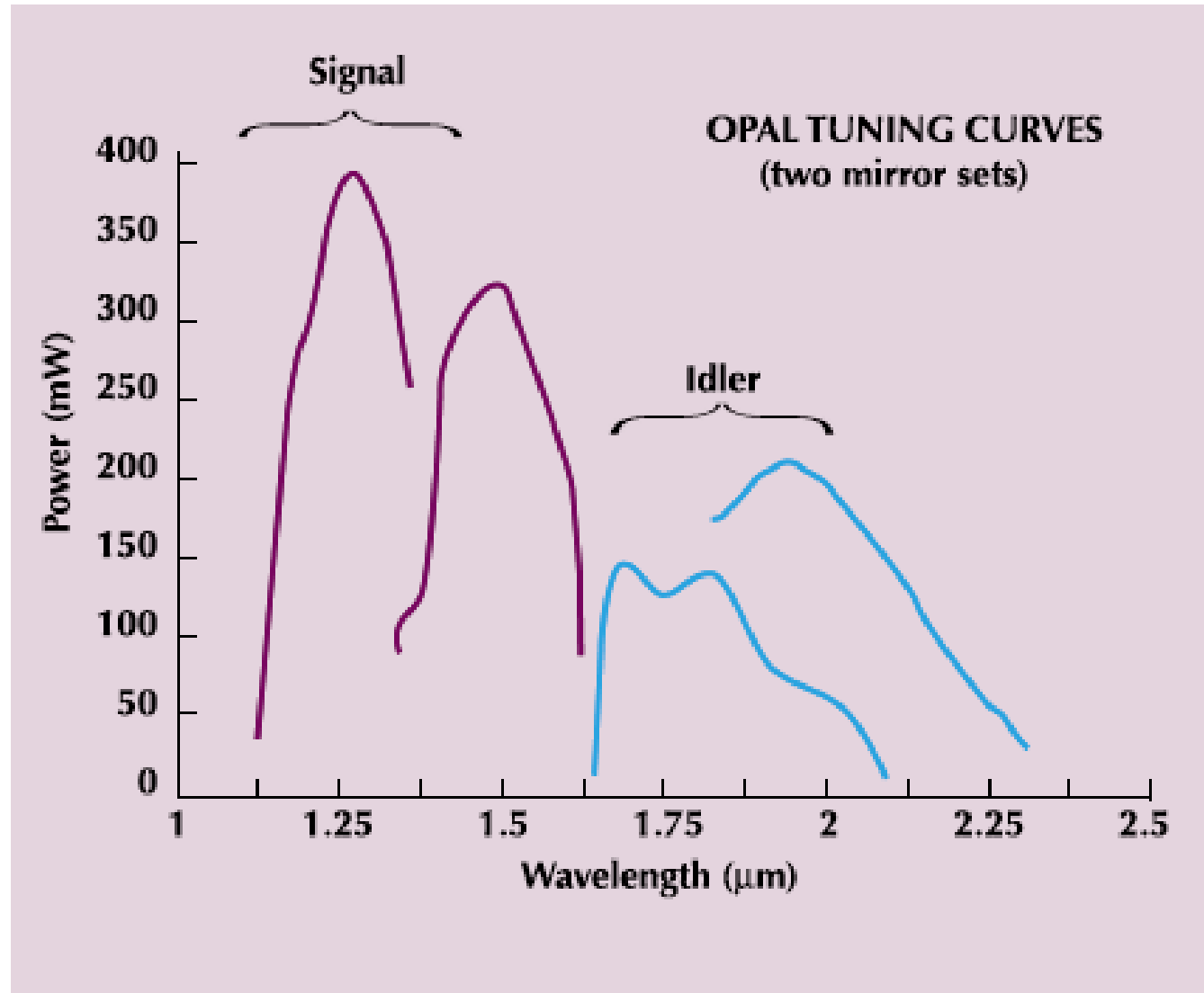
$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$$

a poměr

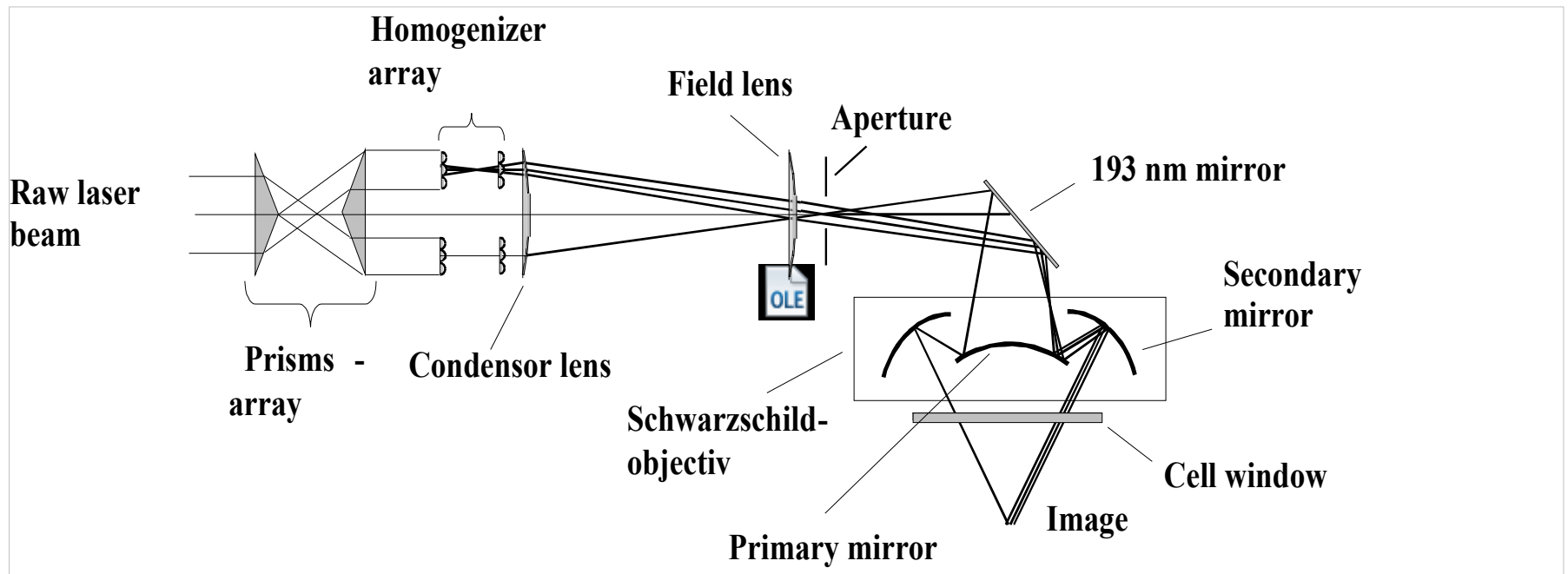
$$\omega_1 / \omega_2 = f(u)$$



OPO Spectra Physics



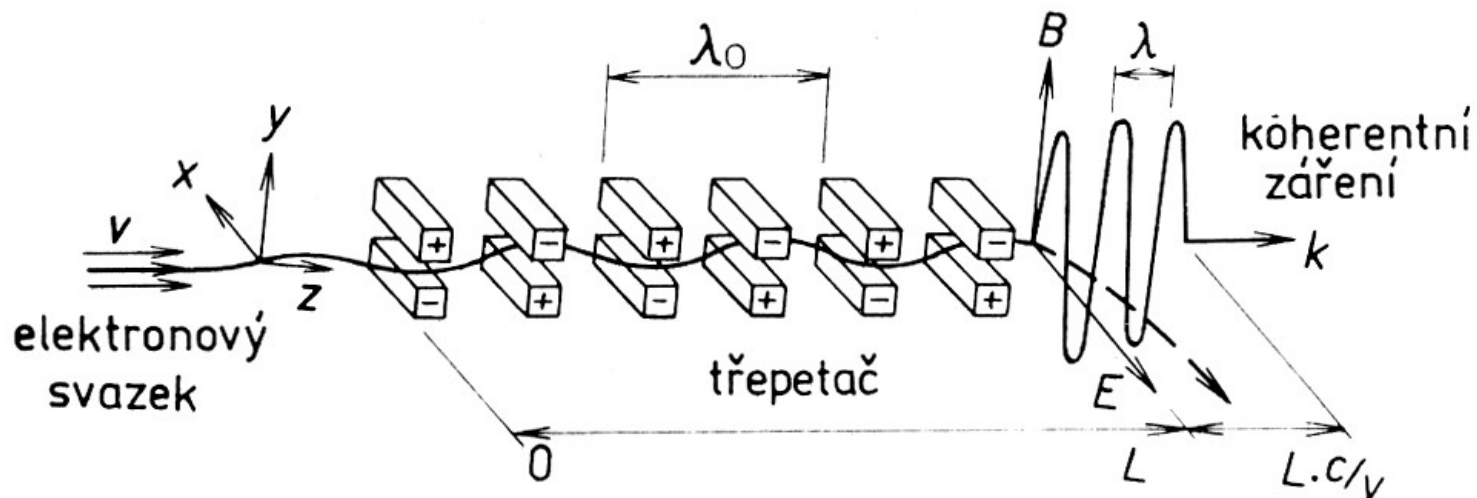
Homogenizace paprsku



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

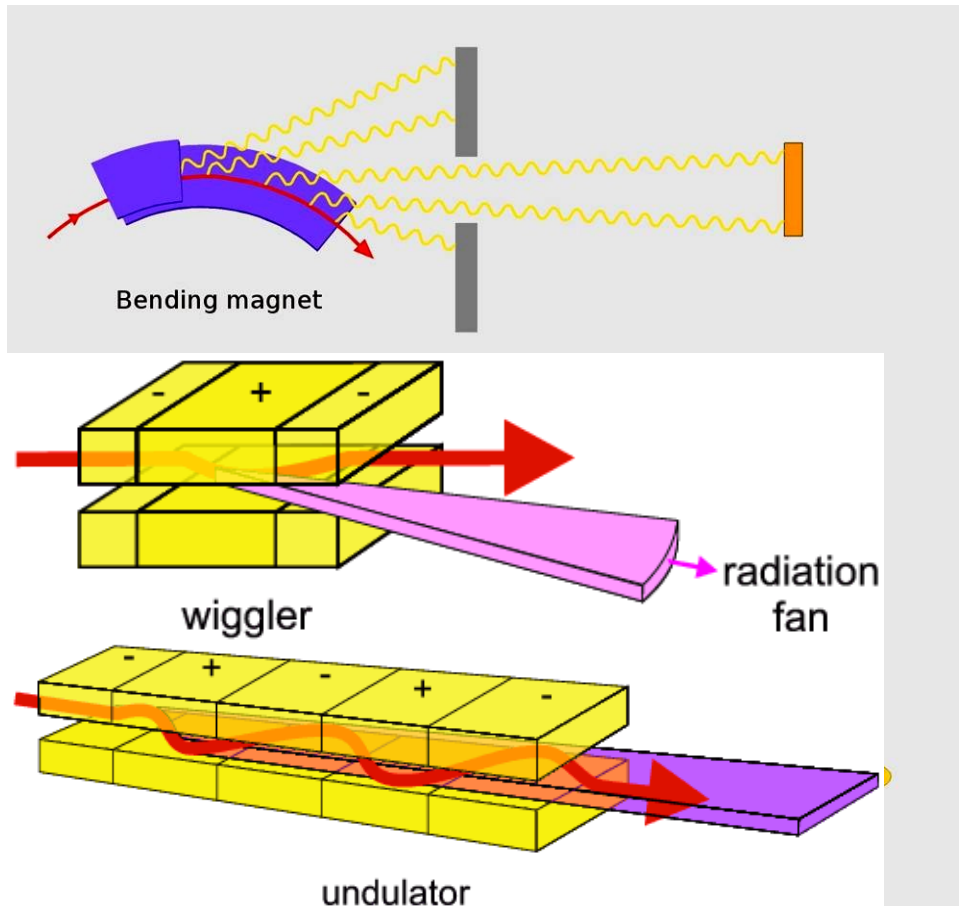
- Pro porovnání zdrojů vysoceintenzivního (především synchrotronového) záření se zavádí pojem **spektrální briliance (spectral brilliance)**, udávající počet vyzařovaných fotonů za sekundu na 1 mm² plochy zdroje záření, na divergenci 1 mrad² a na 10% šířky ($\Delta\lambda/\lambda=0,1$) vlnového oboru. 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 magnets
- undulatory
- wiggler
- free electron lasers

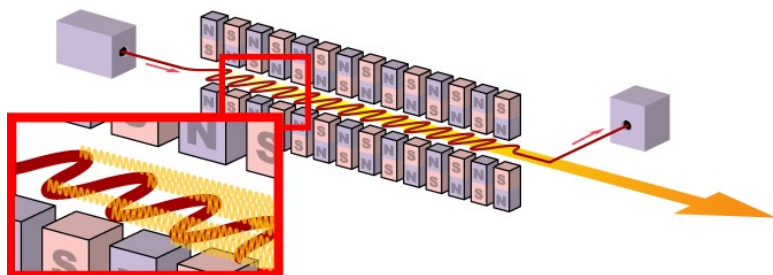


Laser na volných elektronech

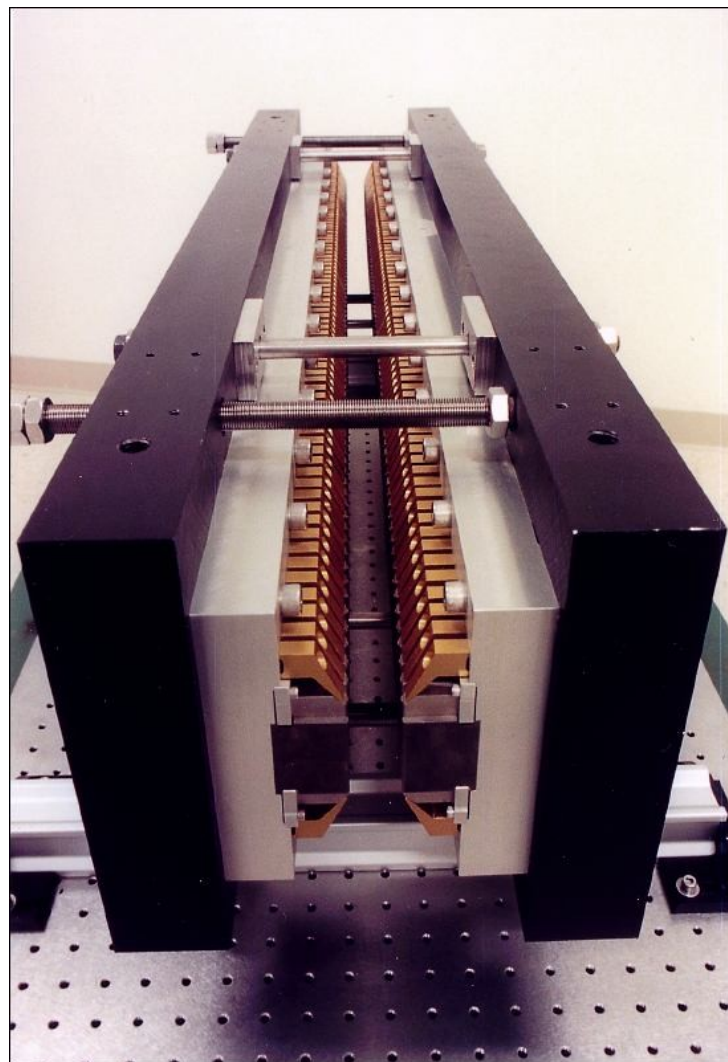
- **Čtvrtá generace** zdrojů SZ je založena na využití lineárních urychlovačů, které umožňují snížit emitanci a zkrátit délku pulsů. Probíhá-li krátký elektronový shluk dostatečně dlouhým undulátorem, pak elektromagnetická vlna generovaná v každém místě undulátoru postupuje společně s elektronovým svazkem 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.



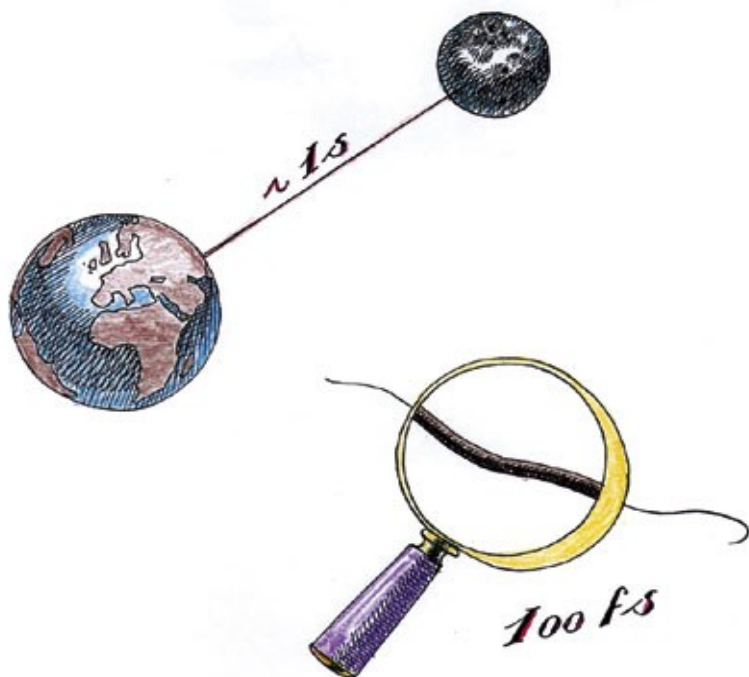
Laser na volných elektronech



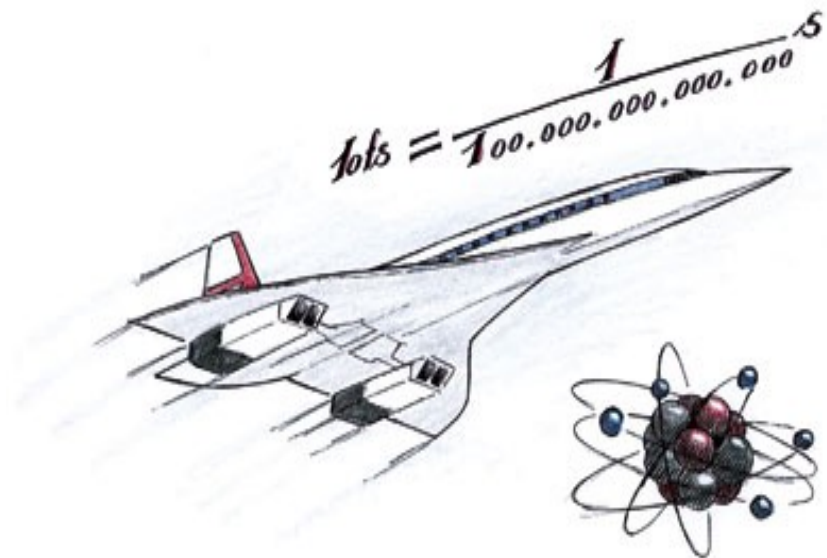
Shluky elektronů se pohybují po vlnkovité dráze. Nabité částice, které mění svou rychlost (postačí směr), září. Pro pochopení si představme, že se elektrony v shluku pohybují po sinusoidě podél undulátoru. Pokud se na ně díváme z konce této osy, nevidíme, že se pohybují směrem k nám, ale vidíme kmitat 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



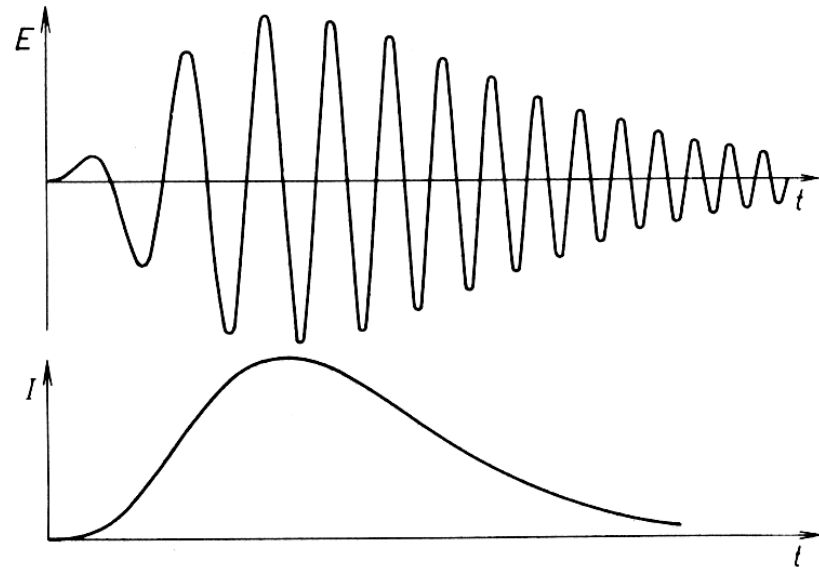
Nadzvukový Concorde létá přibližně rychlostí 2 machů (dvojnásobek rychlosti zvuku ve vzduchu), neboli 600 m/s (2 160 km/h). Za dobu 10 fs uletí jen 6 pikometrů ($6 \cdot 10^{-12}$ m), to je 10krát méně, než je průměr atomu uhlíku



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

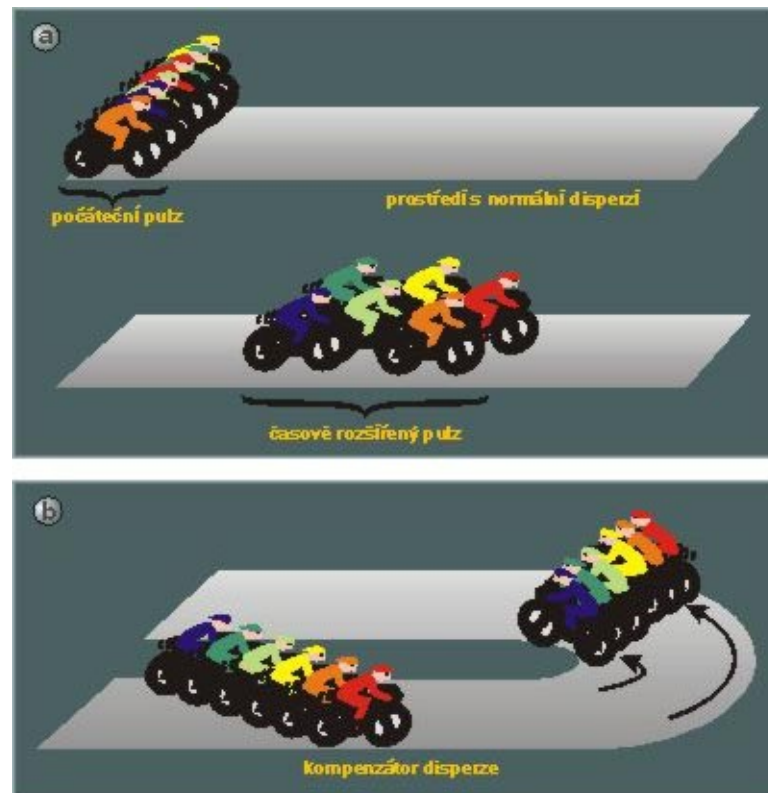


Čerp impulsu optického záření: *a)* závislost intenzity elektrického pole E optického záření na čase t , *b)* závislost intenzity I optického záření na čase t



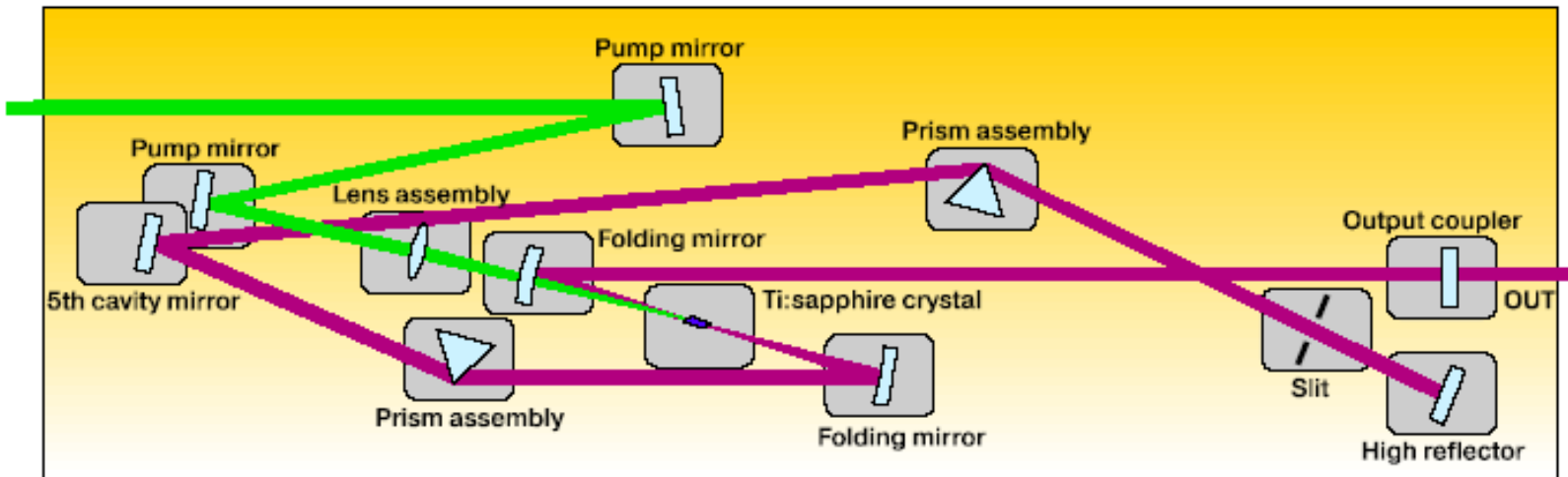
Chirp femtosekundového pulzu

- V disperzním prostředí femtosekundový puls, 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 kompenzátorem disperze.



Model TISSA-20: < 20 fs

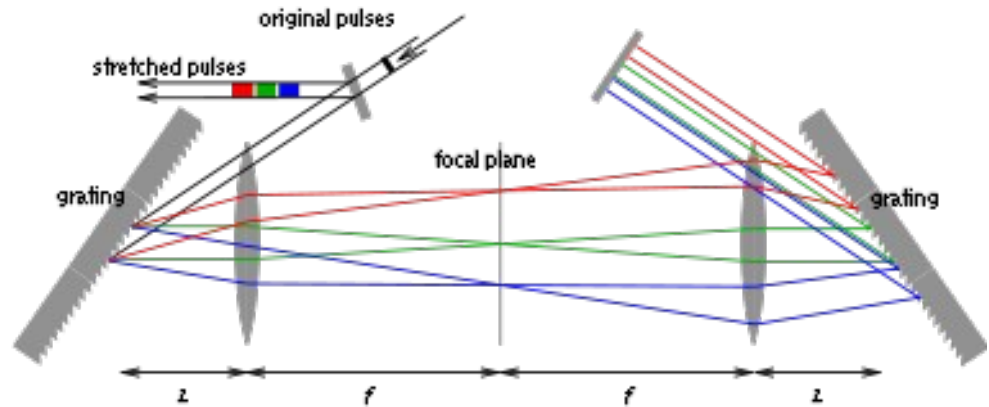
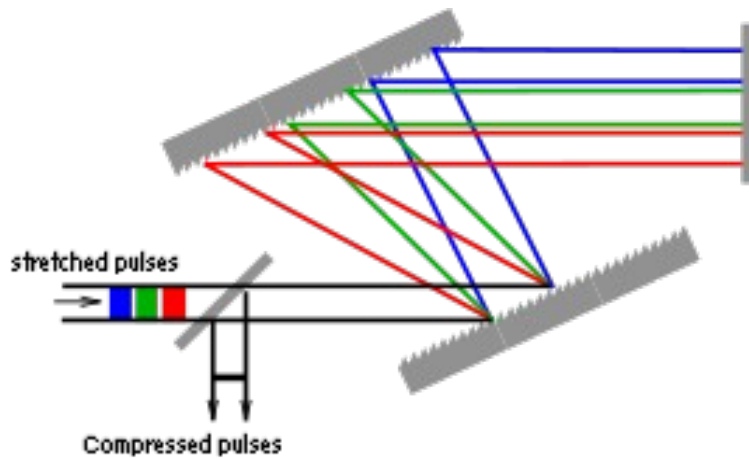
- Stable Kerr-lens mode-locking operation 5-mirror compact cavity design.
- Model TISSA-20: Seeding source of broadband femtosecond pulses for Ti:sapphire amplifiers



Stretcher and compressor design

With gratings compressor

With gratings stretcher



Zesílení femtosekundových pulsů s výkony do PW

