



**Týden vědy na Jaderce 2024**



# Postavte si laserový zaměřovač

Katedra laserové fyziky a fotoniky

Ing. Richard Švejkar, Ph.D., Ing. Adam Říha, Ph.D., Ing. Michal Němec, Ph.D. – 2024

# 1 Stručný úvod do laserové techniky

Laserové záření nachází v dnešní době využití ve většině oblastí lidské činnosti – medicína, průmysl, věda a výzkum, armáda, meteorologie, komunikace aj. S lasery se v běžném životě můžeme setkávat denně, například laserová ukazovátka, radary pro měření rychlosti vozidel, dálkoměry či CD, DVD nebo Blue-ray mechaniky. V optických komunikacích se využívá laserového záření pro rychlý přenos dat na dlouhé vzdálenosti. Lasery dále nacházejí uplatnění při detekci koncentrace plynů v atmosféře či sledování růstu porostů v nedostupných částech lesů. Jednou z dalších oblastí využití je armáda, kde se lasery využívají pro označování, sledování, rozpoznávání a ničení cílů. Využití laserů je opravdu široké a zájem o laserové odborníky velký.

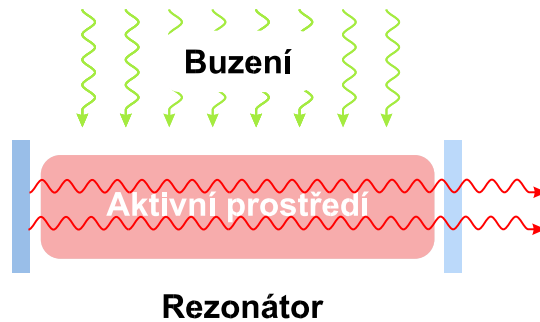
## Historické okénko

Kolem roku 1917 Albert Einstein předpověděl stimulovanou emisi, kterou se podařilo experimentálně potvrdit roku 1928. Sovětští vědci Nikolaj Basov a Alexander Prochorov popsali roku 1952 funkci MASERu (**M**icrowawe **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation), který fungoval na principu stimulované emise. V roce 1953 Charles H. Townes zkonstruoval první funkční maser a později spolu s Arthurem L. Schawlowem navrhli konstrukci optického maseru. Roku 1960 Theodore H. Maiman zkonstruoval první funkční pevnolátkový laser, který byl tříhladinový a jako aktivní prostředí byl použit krystal rubínu. Ve stejném roce Peter Sorokin sestrojil první uranový laser. V roce 1961 A. G. Fox a T. Li provedli teoretickou analýzu optických rezonátorů. V Bell Laboratories v USA A. Javan a W. Bennett vynalezli He-Ne laser. První polovodičový laser je datován k roku 1962, za objevitele je považován Robert Hall. V roce 1964 obdrželi Charles Townes, Nikolaj Basov a Alexander Prochorov Nobelovu cenu za fyziku v oblasti kvantové elektroniky. Roku 1984 se Dennis Matthew dopracoval k prvnímu laboratornímu rentgenovému laseru. [1,2]

**LASER** je anglická zkratka pro zesilování světla stimulovanou emisí (**L**ASER - **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation). Je to zařízení, které generuje monochromatické koherentní záření s velkým jasem a malou divergencí, jedná se o frekvenční rozsah  $10^{11}$  a  $10^{17}$  Hz. Tyto frekvence odpovídají mikrovlnné, infračervené, viditelné, ultrafialové a rentgenové oblasti spektra. Lasery lze dělit dle různých kritérií (např.: podle aktivního prostředí, způsobu čerpání, režimu činnosti atd.). V případě pevnolátkových laserů se jako aktivní prostředí využívá pevná látka (krystal, sklo, keramika, polovodič). Aktivním prostředím pevnolátkového iontového laseru jsou pak pouze dielektrické krystaly, skla nebo keramika dopované ionty vzácných zemin ( $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{2+}$ , aj.), nebo přechodových prvků ( $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{3+}$ ,  $\text{Ti}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , aj.). [3]

**Pevnolátkový iontový laser** se skládá z laserové hlavice, která je dále složená z aktivního prostředí, otevřeného rezonátoru a buzení (čerpání). Dalšími částmi jsou zdrojová jednotka a chladicí jednotka. Aktivní prostředí se skládá z matrice a aktivátoru. Základní přehledové schéma laseru je naznačeno na Obr. 1.

**Matrice** musí disponovat několika základními vlastnostmi jako je mechanická pevnost, chemická stabilita, tepelná odolnost a opracovatelnost. Matrice musí být průzračná pro generované záření a opticky homogenní. Používané materiály jsou krystaly, keramika a sklo. Jako krystalické materiály se používají např.: oxidy, granáty, fluoridy, fosfáty, alumináty a oxisulfidy. Jako příklad může být uveden YAG – yttrium aluminium granát a YAP – yttrium orthoaluminát. Výhodou krystalů je dobrá tepelná vodivost, tepelná a mechanická stabilita. U skla je výhodou, že se dá vyrobit téměř v neomezených velikostech, je



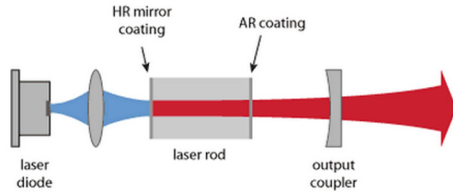
Obr. 1: Zjednodušené schéma laseru.

homogenní a jednodušší na výrobu než krystaly. Nevýhoda skel je nižší tepelná vodivost a tvrdost. Použití keramiky jako aktivního prostředí je poměrně nové, výhodou je možnost vyrobit aktivní prostředí s většími rozměry než u krystalů. Další výhodou keramiky je vyšší tepelná vodivost než u skla. [2]

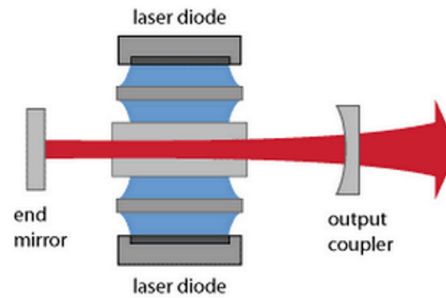
**Aktivátory** jsou atomy (ionty), které se přímo účastní generace optického záření, jako luminiscenční centrum, nebo předávají absorbovanou energii luminiscenčnímu centru. Jeden z nejpoužívanějších iontů je neodym ( $\text{Nd}^{3+}$ ), který se nejčastěji používá s maticemi sklo a YAG. Dalším významným iontem je erbium ( $\text{Er}^{3+}$ ). Matrice pro erbium mohou být např. YAG, YLF, YSGG,  $\text{CaF}_2$ , skla, fosfátová skla nebo  $\text{YVO}_4$ . [2]

**Buzení laseru**, někdy také **čerpání laseru**, je proces, při němž dochází v aktivním prostředí k udržování termodynamicky nerovnovážného stavu. Buzení laseru může být prováděno například opticky, chemicky, elektricky, tepelnými změnami a rekombinací. U pevnolátkových iontových laserů se využívá optického buzení. To může být koherentní, tzn. buzení laserovými diodami, případně jiným laserem, nebo nekoherentní, výbojkové. Buzení laserovými diodami má větší účinnost než buzení výbojkou. Jelikož laserová dioda generuje záření na určité vlnové délce je laser možné čerpat přesně danou vlnovou délkou. Laserové diody mají mnohem lepší překryv emisní čáry čerpacího záření s absorpčním spektrem aktivního prostředí laseru než výbojky. Čerpání laserového krystalu může být příčné nebo podélné. Podélné diodové čerpání je vidět na Obr. 2, příčné diodové čerpání je na Obr. 3. Podélné buzení je ve směru osy generace laserového svazku, to bude využito i v našem experimentu.[4]

**Otevřený rezonátor** se nazývá soustava dvou nebo více odrazných ploch (zrcadel), mezi nimiž může být vybudováno stojaté vlnění s vlnovou délkou menší, než jsou rozměry těchto zrcadel. Jedno ze zrcadel je totálně odrazné a druhé polopropustné, skrze které vychází zesílené optické záření. Podle typu zrcadel můžeme rozlišovat rezonátory na planparalelní, konfokální, sférické, hemisférické, koncentrické, aj. Pro správnou funkci laseru musí být rezonátor stabilní, přičemž ve speciálních případech lze sestavit laser i s nestabilním rezonátorem. [2]



Obr. 2: Podélné diodové čerpání [4].



Obr. 3: Příčné diodové čerpání [4].

## 2 Cíle úlohy a úkoly

Cílem úlohy je vyzkoušet si sestavit diodově čerpaný pevnolátkový laser generující v oblasti 1645 nm (označované jako "eye-safe"- oku bezpečné záření), který je v praxi možné využít v dálkoměrech, zaměřovacích a detekčních systémech nebo v optických komunikacích. Studenti se nejprve seznámí s vybavením laserové laboratoře a s přístroji, se kterými budou pracovat. V další části úlohy si vyzkouší postavit laser a naladit optický laserový rezonátor s aktivním prostředím Er:YAG. Tj. nastavit optickou osu pomocí He-Ne laseru ve viditelné části spektra (červená barva - 633 nm), laserový rezonátor (dvojice zrcadel) a aktivní prostředí. Po sestavení laserového systému bude již následovat měření výstupních charakteristik zkonstruovaného laseru. Studenti si budou moci potvrdit, že záření je oku bezpečné díky měření absorpce v optickém elementu simulujícím lidské oko.

### Domácí příprava

1. Pročtete si tento text :-)
2. Podívejte se na základní princip a funkci laseru, například v [2,4-7]

### Laboratoř

1. Seznámení s bezpečností v laserové laboratoři
2. Seznámení s měřicími přístroji a pomůckami
3. Sestavení laserového systému a měření výstupní laserových charakteristik
  - (a) Závislost výstupního výkonu a energie na absorbovaných hodnotách
  - (b) Časový průběh generovaného laserového pulsu
  - (c) Emitovaná vlnová délka zkonstruovaného laseru i čerpacího záření
  - (d) Prostorová struktura generovaného laserového svazku
4. Vyhodnocení získaných závislostí
5. Ukázka bezpečnosti laserového záření zkonstruovaného laseru na systému simulujícím lidské oko

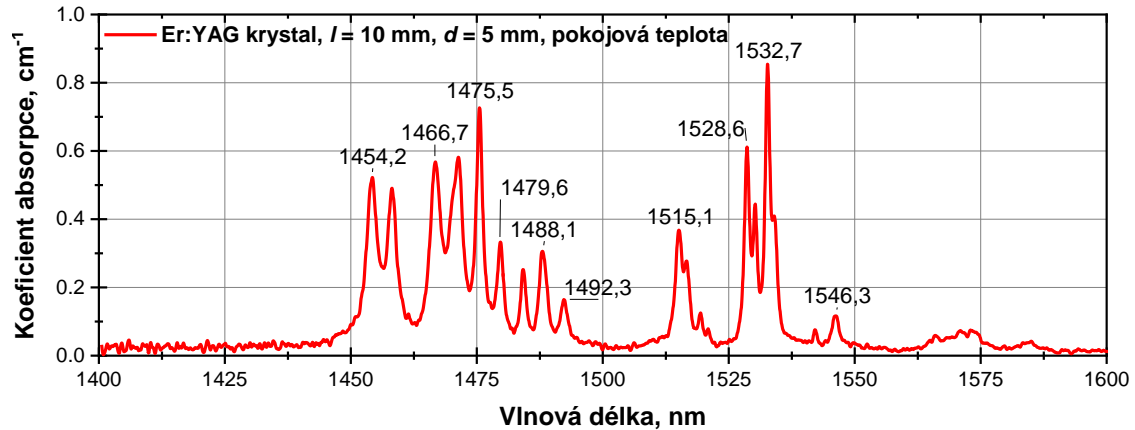
## 3 Pomůcky

Zdroj laserové diody LDC1000 (Laser Electronics), čerpací laserová dioda s vlnovou délkou 1532 nm (QPC Lasers), He-Ne laser, fokusační optika (Thorlabs), zrcadla rezonátoru, aktivní prostředí – krystal Er:YAG, vláknový spektrometr RedWave (StellarNet, spektrální rozsah: 900-2300 nm), výkonová sonda Power Max PM3 (Coherent), wattmetr FieldMate (Coherent), infračervená CCD pyrokamera Pyrocam IV (Ophir), osciloskop TDS2022C (Tektronix), clonka, germaniová fotodiody PDA30B-EC (Thorlabs), sada optických filtrů (Thorlabs).

## 4 Popis experimentu

### Aktivní prostředí Er:YAG

Yttrito-hlinitý granát (YAG –  $Y_3Al_5O_{12}$ ) dopovaný erbiovémi ionty je jedním z materiálů, který je schopný generovat záření v oblasti 1645 nm při přímém diodovém čerpání. Důvodem emise této vlnové délky je přechod mezi energetickými hladinami  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ . Z absorpčního spektra na Obr. 4 je vidět, že absorpční maximum se nachází v oblasti 1533 nm. Z tohoto důvodu budeme čerpat aktivní prostředí v této spektrální oblasti. Měřený vzorek obsahuje 0,5 at. % iontů  $Er^{3+}$ , má průměr 5 mm a délku 10 mm.



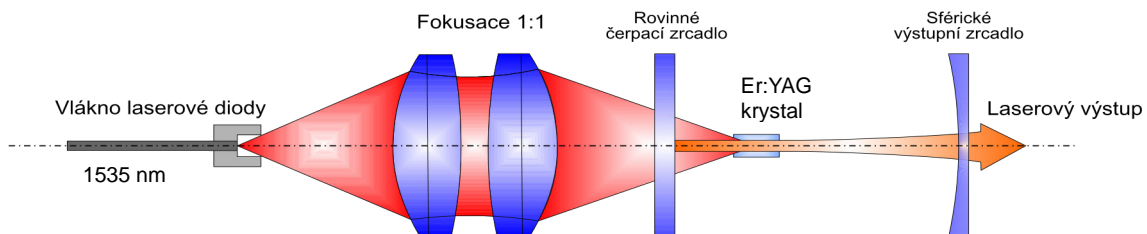
Obr. 4: Absorpční spektrum krystalu Er:YAG (0,5 at. %  $Er^{3+}$ ).

### Čerpací laserová dioda

Pro excitaci aktivního prostředí bude využita polovodičová laserová dioda od QPC Lasers generující záření v okolí vlnové délky 1535 nm, které je vyvedeno vláknem do fokusační optiky. Díky změně teploty je možné v malém rozsahu ladit generovanou vlnovou délku diody a lépe tak nastavit čerpací záření pro buzení aktivního prostředí. Čerpací laserová dioda bude během celého měření generovat laserové pulsy o délce –  $\Delta t_{\text{pump}} = 10$  ms s frekvencí –  $f = 10$  Hz, přičemž teplota diody bude udržována na teplotě  $T = 26$  °C, což odpovídá generované vlnové délce  $\lambda_{\text{pump}} \approx 1533$  nm.

### Laserový rezonátor

Nejprve je potřeba nastavit a vycentrovat jednotlivé prvky optického rezonátoru, který je vidět na Obr. 5, do jedné roviny. To se provede za pomoci naváděcího svazku He-Ne laseru a zpětných odrazů od jednotlivých prvků rezonátoru. Po tomto nastavení je možné za rezonátor umístit fotodiodu PDA30B-EC s odpovídajícím filtrem a zapnout čerpací laser. Pomocí nastavování nejprve výstupního zrcadla se pak pokusit doladit laserový rezonátor a dosáhnout tak laserové akce.



Obr. 5: Zjednodušené schéma laserového rezonátoru s aktivním prostředím.

### Měření výstupních charakteristik

Aby bylo možné vykreslit výstupní charakteristiky laseru do grafů, bude potřeba provést několik měření. Po úspěšném nastavení laserového rezonátoru a optimalizaci výstupního výkonu, se nejprve naměří výstupní výkon laseru –  $P_{OUT}$ , délka generovaného impulsu –  $\Delta t$ , čerpací –  $\lambda_{pump}$  a emisní vlnová délka –  $\lambda_{laser}$ . K tomu se využije výkonová sonda PM3 s wattmetrem FieldMate (Coherent), fotodioda PDA30B-EC (Thorlabs) s osciloskopem TDS2022C (Tektronix) a vláknový spektrometr RedWave (StellarNet). Jelikož se výstupní výkon laseru ve většině případů vztahuje k absorbovanému výkonu –  $P_{ABS}$  v aktivním prostředí (v tomto případě Er:YAG), bude dále potřeba změřit výkon v rezonátoru před ( $P_1$ ) a za krystalem ( $P_2$ ). Po jejich odečtení je pak možné odhadnout výkon absorbovaný v aktivním prostředí laseru. Poslední měřenou výstupní charakteristikou bude profil svazku generovaného záření, který bude zaznamenán pomocí infračervené CCD pyrokamery Pyrocam IV (Ophir).

### Absorpce laserového záření

V posledním úkolu projektu si ukážeme, že laserové záření o vlnové délce 1645 nm je silně absorbováno ve vodě. Jelikož lidské oko je z velké části (téměř z 80%) tvořeno vodou, tak záření o této vlnové délce nepronikne přes rohovku, čočku a sklivce až na sítnici a nepoškodí ji. Z toho důvodu bývá záření v této části spektra také označováno za "oku bezpečné". Lidské oko nám budou simulovat kyvety o různých tloušťkách naplněné vodou, případně želatina. Typický průměr lidského oka je přibližně 24 mm. Měřením výkonovou sondou si potvrdíme, že za vodním sloupcem o tloušťce srovnatelné s tloušťkou lidského oka nebudeme detekovat žádný signál.

## 5 Zpracování dat, vytvoření příspěvku a prezentace

Po naměření všech dat bude následovat jejich zpracování a vyhodnocení. V případě, že byste neměli nebo nemohli využít vlastní počítač, v laboratoři Vám bude k dispozici výkonný notebook se všemi potřebnými programy. Naměřená data budete zpracovávat v MS Excel, výsledné grafy do příspěvku můžete vytvořit v programu OriginPro. Prezentaci připravíme v MS PowerPoint.

## Reference

- [1] Štoll, I.: *Paprsek budoucnosti*, PRESSFOTO, 1975, ISBN 59-024-74.
- [2] Vrbová, M., Jelínková, H., Gavrilov, P.: *Úvod do laserové techniky*, CVUT, 1998, ISBN 80-01-01108-9.
- [3] Vrbová, M., kolektiv: *Oborová encyklopedie Lasery a moderní optika*, Prometheus, 1994, ISBN 80-85849-56-9.
- [4] Paschotta, R.: *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, Wiley, 2008, ISBN 978-3527-40828-3.
- [5] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: *Fundamentals of Physics*, John Wiley and Sons, 10<sup>th</sup> ed., 2013, ISBN 978-1118230718.
- [6] Teich, C. M., Saleh, B. E. A.: *Základy fotoniky*, Wiley Publication, 1991, ISBN 0-471-83965-5.
- [7] Koechner, W.: *Solid-State Laser Engineering*, Springer Science+Business Media, 2006, ISBN 0-387-29338-8.