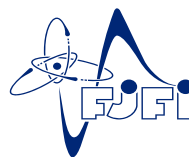




Týden vědy na FJFI 2019



POSTAVTE SI LASEROVÝ ZAMĚŘOVAČ

Katedra fyzikální elektroniky

Richard Švejkar – 2019

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]

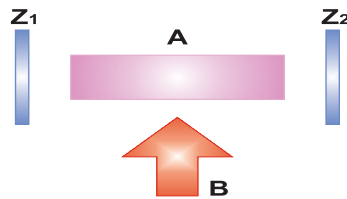
LASER

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 jasnem 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 (Nd^{3+} , Er^{3+} , Dy^{3+} , Ho^{2+} , aj.), nebo přechodových prvků (Cr^{3+} , Ni^{3+} , Co^{2+} , Ti^{3+} , aj.). [3]

Pevnolátkový iontový laser

Přehledové schéma laseru je naznačeno na Obr. 1. Pevnolátkový laser se skládá z laserové hlavičky, 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.

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

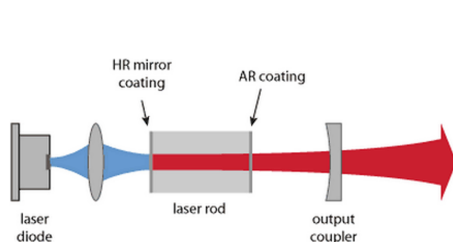


Obr. 1: Schéma laseru, Z_1 a Z_2 jsou zrcadla Z_1 stoprocentně odrazné a Z_2 polopropustné, A je aktivní prostředí, B buzení

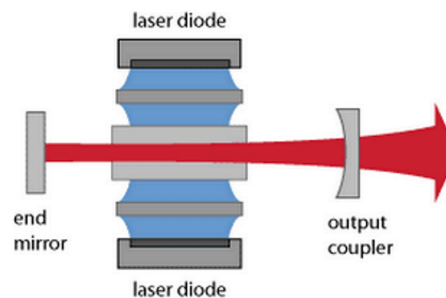
YAG – yttrium aluminium granát a YAP – yttrium orthoaluminát. Výhodou krystalů je dobrá tepelná vodivost, tepelná a mechanická stabilita. U skla je výhodou, že se dá vyrobit téměř v neomezených velikostech, je homogenní a jednodušší na výrobu než krystaly. Nevýhoda skel je nižší tepelná vodivost a tvrdost. 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 (Nd^{3+}), který se nejčastěji používá s maticemi sklo a YAG. Dalším významným iontem je erbium (Er^{3+}). Matrice pro erbium mohou být např. YAG, YLF, YSGG, CaF_2 , skla, fosfátová skla nebo 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 dané 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]



Obr. 2: Podélné diodové čerpání [4]



Obr. 3: Příčné diodové čerpání [4]

Otevřený rezonátor se nazývá soustava dvou nebo více odrazných ploch (zrcadel), mezi nimiž může být vybuzeno 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 planoparalelní, 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]

2 Cíle úlohy a úkoly

Cílem úlohy je vyzkoušet si sestavit diodově čerpaný pevnolátkový laser generující v oblasti $1.53 \mu\text{m}$ (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 a naladit optický laserový rezonátor s aktivním prostředím Er:Sklo. Po sestavení laserového systému bude již následovat měření výstupních charakteristik zkonstruovaného laseru. Studenti si budou moci potvrdit, že záření je oku bezpečné díky měření na systému simulující lidské oko.

Domácí příprava

1. Pročtete si tento text :-)
2. Podívejte se na základní princip a funkci laseru¹, například v [2, 4–7]

Laboratoř

1. Seznámení s bezpečností v laserové laboratoři
2. Seznámení s měřicími přístroji a pomůckami
3. Sestavení laserového rezonátoru a měření výstupní laserových charakteristik
 - (a) Závislost výstupního výkonu a energie na absorbované
 - (b) Časový průběh generovaného laserového pulsu
 - (c) Emitovaná vlnová délka zkonstruovaného laseru
 - (d) Profil laserového svazku
4. Vyhodnocení získaných závislostí
5. Ukázka bezpečnosti laserového záření zkonstruovaného laseru na simulovaném lidském oku

3 Pomůcky

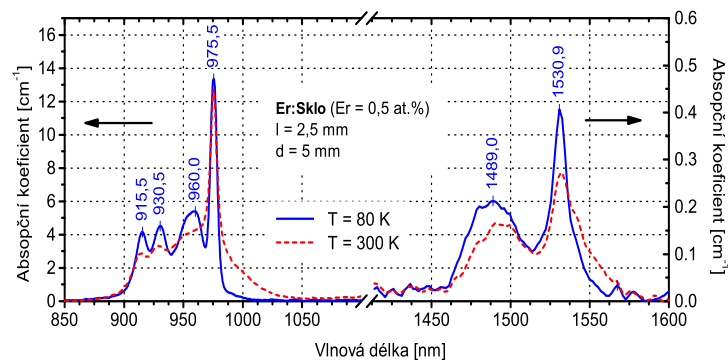
Zdroj laserové diody LDD50, čerpací laserová dioda LIMO970, He-Ne laser, fokusující optika, zrcadla rezonátoru, aktivní prostředí Er:Sklo, vláknový spektrometr StellarNet BlueWave (500 - 1300 nm), výkonová sonda Coherent PS19Q a PM3, wattmetr Molectron EMP2000, CCD kamera, IR viewer, osciloskop Tektronix TDS3052B, clonka, PIN FGA10 fotodiody (InGaAs), sada filtrů.

¹Budu to vysvětlovat před měřením, ale byl bych rád, abyste měli alespoň hrubou představu a třeba ušetříme čas na další pokusy

4 Popis experimentu

Aktivní prostředí Er:Sklo

Sklo dopované erbiovémi ionty je jediným materiálem, který je v současné době schopný generovat záření v oblasti $1,53 \mu\text{m}$ při přímém diodovém čerpání. Důvodem emise této vlnové délky je přechod mezi energetickými hladinami ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$. U některých typů skel (fluorido-beryliové, teluridové) je možné pozorovat luminiscenci v oblasti dalších vlnových délek. Z absorpčního spektra na Obr. 4 je vidět, že absorpční maximum se nachází v oblasti 975 nm, z toho důvodu budeme čerpat aktivní prostředí v této oblasti. Měřený vzorek obsahuje 0,5 at. % iontu Er^{3+} , má průměr 5 mm a délku 2,5 mm.



Obr. 4: Absorpční spektrum Er:Skla

Čerpací laserová dioda

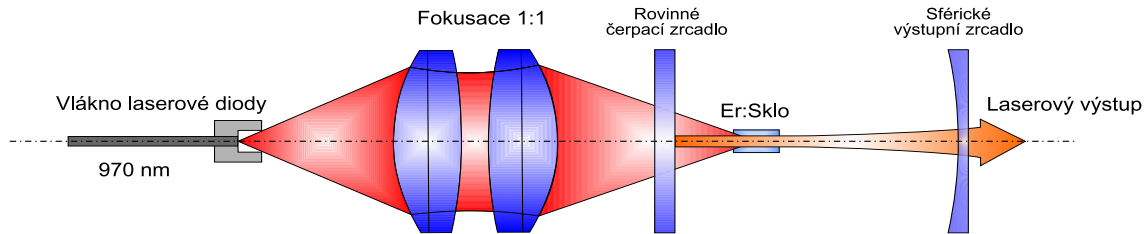
Pro excitaci aktivního prostředí bude využita polovodičová laserová dioda LIMO970, jejíž záření bude vedeno vláknem do fokusační optiky. Díky změně teploty je možné v malém rozsahu ladit generovanou vlnovou délku a lépe tak nastavit čerpací záření pro buzení aktivního prostředí. Jelikož je sklo amorfní materiál a má mnohem nižší tepelnou vodivost než krystalické materiály bude nutné nastavit budící zdroj do pulsního režimu. Čerpací laserová dioda bude během celého měření generovat laserové pulsy o délce $\Delta t_{pump} = 3 \text{ ms}$ s frekvencí $f = 5 \text{ Hz}$, přičemž teplota diody bude udržována na teplotě $T = 16^\circ\text{C}$, což odpovídá generované vlnové délce $\lambda_{pump} = 967 \text{ nm}$.

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 FGA10 s filtrem a zapnout čerpací laser. Pomocí nastavování nejprve výstupního zrcadla se pak pokusit doladit laserový rezonátor a dosáhnout tak laserové akce.

Měření výstupních charakteristik

Aby bylo možné vykreslit výstupní charakteristiky laseru do grafů, bude potřeba provést několik měření. Po úspěšném vyladění laserového rezonátoru a optimalizace výstupního výkonu, se nejprve změří výstupní výkon laseru P_{OUT} , délka generovaného impulsu Δt a emisní vlnová délka λ_{laser} .



Obr. 5: Zjednodušené schéma laserového rezonátoru s aktivním prostředím

K tomu se využije výkonová sonda PS19Q s wattmetrem Molectron EMP2000, fotodioda FGA10 s osciloskopem Tektronix TDS3052B a vláknový spektrometr StellarNet BlueWave. Jelikož se výstupní výkon laseru ve většině případech vztahuje k absorbovanému výkonu – P_{ABS} v aktivním prostředí (v tomto případě Er:Sklo), bude dále potřeba změřit výkon v rezonátoru před – P_1 a za – P_2 vzorkem. Po jejich odečtení je pak možné stanovit výkon absorbovaný v aktivním prostředí laseru. Poslední měřenou výstupní charakteristikou bude profil svazku generovaného záření, který bude zaznamenán pomocí CCD kamery.

Absorpce laserového záření

V posledním úkolu projektu si ukážeme, že laserové záření o vlnové délce $1,53 \mu\text{m}$ je silně absorbováno ve vodě. Jelikož lidské oko je z velké části tvořeno vodou, tak záření o této vlnové délce nepronikne na sítnici a nepoškodí ji. Z toho důvodu bývá tato vlnová délka označována za „oku bezpečné“ záření. Lidské oko nám budou simulovat kyvety naplněné vodou a želatina. Měřením výkonovou sondou a současně pozorováním IR viewerem si potvrdíme, že za vodní stěnou o tloušťce shodné s lidským okem nebudeme schopni 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 v programu OriginPro, samotný příspěvek si vyzkoušíte vytvořit v programu $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ a prezentaci buď taktéž v $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ nebo 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*, ČVUT, 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-VCH, 2008, ISBN 978-3-527-40828-3.
- [5] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: *Fundamentals of Physics*, John Wiley and Sons, 10th ed., 2013, ISBN 978-1118230718.
- [6] TEICH, C. M., SALEH, B. E. A.: *Základy fotoniky*, Wiley-interscience Publication, 1991, ISBN 0-471-83965-5.
- [7] KOECHNER, W.: *Solid-State Laser Engineering*, Springer Science+Business Media, 2006, ISBN 0-387-29338-8.