

Výbojkově čerpaný neodymový laser se zesilovačem

1. Cíle experimentu:

1. Nastavit a proměřit vlastnosti výbojkově čerpaného Nd:YAG laseru v režimu volné generace.
2. Zesílit záření Nd:YAG laseru pomocí zesilovače optických impulsů.
3. Nastavit a proměřit vlastnosti Nd:YAG laseru v režimu generace krátkých pulsů (tzv. Q-spinání).
4. Nastavit do generovaného svazku nelineární krystal KDP a pozorovat generaci druhé harmonické frekvence.

2. Úvod

Laserové záření v dnešní době nachází 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, čtečky čárových kódů, počítačové myši, dálkoměry či DVD nebo Blue-ray mechaniky. V optických komunikacích se využívá laserové záření k rychlému přenosu dat na dlouhé vzdálenosti. Lasery dále nacházejí spektroskopické uplatnění při detekci koncentrace různých molekul plynů v atmosféře či při navádění letadel během přistávání. Jednou z dalších oblastí využití je v armádě, kde se lasery využívají pro označování, sledování, rozpoznávání a ničení cílů. Využití laserů je opravdu široké a zájem o laserové odborníky velký.

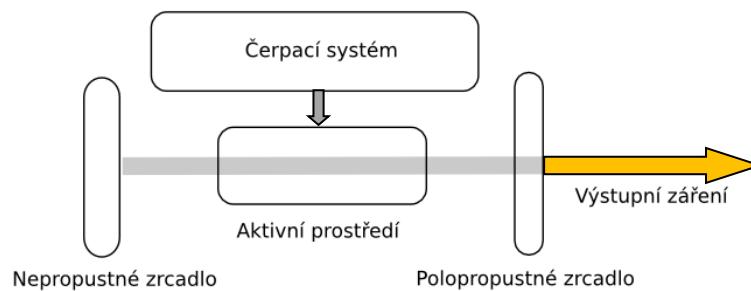
2.1. Laser a jeho vlastnosti

Označení laser vzniklo jako akronym z anglického *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Jedná se o generátor elektromagnetického záření, který využívá jevu stimulované emise fotonů kvantovými systémy (atomy, molekuly, ionty, elektrony), které tvoří tzv. aktivní prostředí laseru. To je buzeno vnějším zdrojem energie. Laser je zdrojem *monochromatického* (generované záření má stejnou frekvenci, resp. vlnovou délku), *koherentního* (vnitřně uspořádaného, sfázovaného), *kolimovaného* (vysoce směrového, resp. málo rozbíhavého) záření s velkým jasnem a hustotou záření generující ve frekvenčním rozsahu 10^{11} – 10^{17} Hz [1]. Tyto frekvence odpovídají mikrovlnné, infračervené, viditelné, ultrafialové a rentgenové oblasti spektra. Lasery lze dělit podle různých kritérií (např.: podle typu 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+} , Cr^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{3+} , Co^{2+} , Ti^{3+} , aj.). [1, 2]

2.2. Základní princip činnosti laseru

Při popisu laseru je možné vycházet z představy optického rezonátoru tvořeného dvojicí zrcadel – jedním totálně odrazným a druhým částečně propustným. Z hlediska stability rezonátoru je vhodné, je-li jedno ze zrcadel zakřivené. Díky zakřivení lze docílit toho, aby se zesilované záření nerozbíhalo z prostoru ohraničeného rezonátorem a minimalizovaly se tak ztráty. Pro zesilování záření je zapotřebí čerpací systém, díky kterému lze v aktivním prostředí vytvořit stav tzv. inverze populace energetických hladin systému. [3]

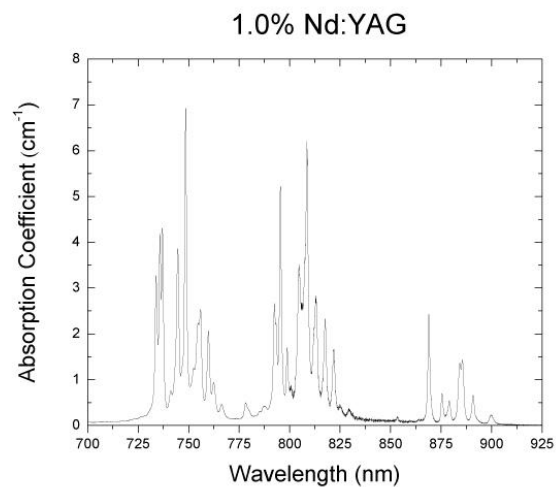
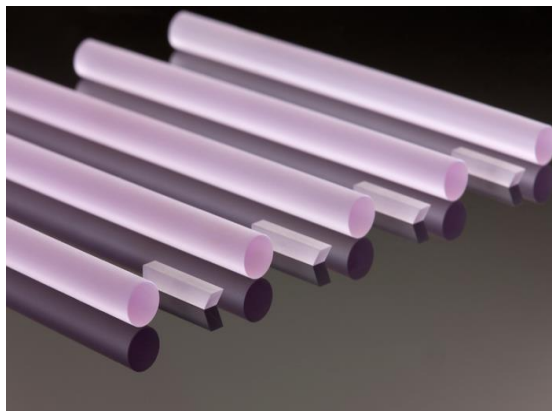
Aktivní prostředí (viz *obrázek 1*) dokáže přeměnit energii dodávanou buzením na záření, jež je zesilováno díky kladné zpětné vazbě rezonátoru prostřednictvím stimulované emise. Optický výkon roste do té míry, dokud se zesílení záření při průchodu aktivním prostředím nevyrovná optickým ztrátám rezonátoru. V takovém případě se jedná o tzv. saturevanou intenzitu záření. Zesílený laserový svazek je z rezonátoru vyveden výstupním, částečně propustným, zrcadlem. [3]



Obr. 1 Základní schéma laseru.

2.3. Nd:YAG laser

V současnosti se jedná o nejpoužívanější typ pevnolátkového laseru. Aktivním prostředím je tvořeno izotropním krystalem yttrito-hlinitého granátu ($Y_3Al_5O_{12}$) kubické struktury dopovaným ionty neodymu (Nd^{3+}). Barva tohoto krystalu je světle růžová až fialová v závislosti na koncentraci iontů neodymu. Absorpce záření probíhá v typických úzkých absorpčních čarách v rozmezí 725–900 nm (viz obrázek 2).



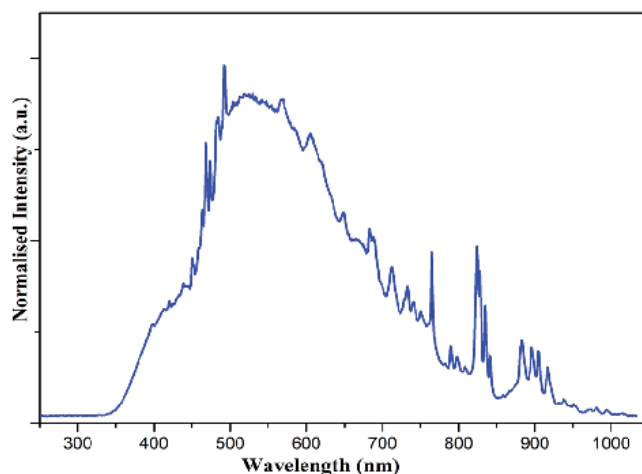
Obr. 2 Vlevo: Vybroušené laserové tyče z krystalů Nd:YAG; vpravo: absorpční spektrum krystalu Nd:YAG. [4]

Typická vlnová délka generovaného záření z krystalu Nd:YAG laseru je 1064,1 nm. S nižší účinností však může emitovat i záření o vlnových délkách 946, 1120, 1320 a 1440 nm. Buzení je nejčastěji zajištěno xenonovou výbojkou nebo laserovou diodou. V závislosti na délce buzení a chlazení aktivního prostředí může generovat záření jak v impulsním, tak i v kontinuálním režimu.

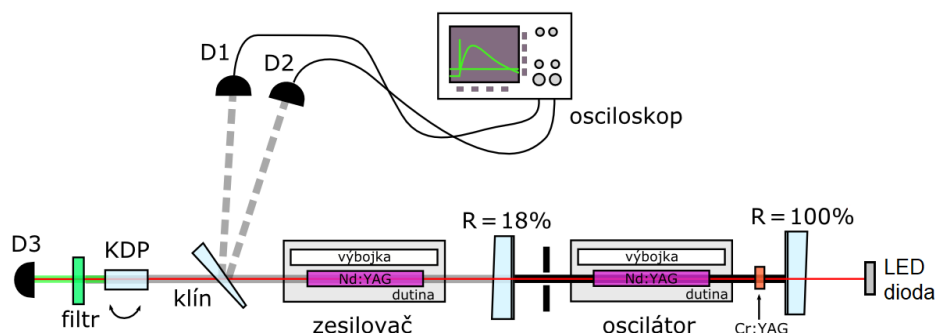
Nd:YAG má celou řadu uplatnění. Hojně je užíván v technologii, např. pro vrtání, svařování, žíhání, řezání a značkování. Dále se využívá v medicíně, vědě, biologii a pro vojenské aplikace. V medicíně se Nd:YAG laser využívá v oftalmologii pro odstranění druhotného šedého zákalu či vytvoření otvorů v duhovce za účelem redukce nitroočního tlaku. [5, 6]

3. Uspořádání úlohy

V našem konkrétním případě je pevnolátkový Nd:YAG laser tvořen eliptickou postříbřenou dutinou s vodním chlazením, ve které jsou paralelně umístěny laserový krystal a xenonová výbojka zajišťující optické buzení (typické spektrum xenonové výbojky si lze prohlédnout na *obrázku 3*). Další nezbytnou součástí je optický rezonátor, tvořený zadním zrcadlem s odrazivostí $R_1 = 100\%$ a výstupním zrcadlem s odrazivostí $R_2 = 18\%$. V krystalu dochází ke stimulované emisi záření a jeho následnému zesílení během každého průchodu díky kladné zpětné vazbě optického rezonátoru. Základním úkolem optického rezonátoru je vytváření podmínek pro mnohonásobný průchod stimulovaného záření skrz aktivní objem krystalu. Zesilováno je záření s vlnovou délkou rezonanční k délce rezonátoru. Z tohoto důvodu probíhá generace a zesilování laserového záření v úzkých spektrálních čarách (tzv. podélných módech). Kromě tohoto dále určuje optický rezonátor základní vlastnosti výstupního záření: koherenci, směrovost, prostorovou strukturu, výstupní výkon, aj. Experimentální uspořádání je znázorněno na *obrázku 4*.



Obr. 3 Typické emisní spektrum xenonové výbojky. [7]



Obr. 4 Zjednodušené schéma experimentální sestavy.

3.1. Režim volné generace laseru

Základní režim provozu laseru je tzv. režim volné generace. Základním rysem režimu volné generace je jeho nestacionárnost – při hladkém časovém průběhu impulsu budicího záření je časový průběh generovaného stimulovaného záření (obálka) složen z mnoha jednotlivých relaxačních impulsů (*spikes*).

Pro prostorovou strukturu svazku pevnolátkových laserů je charakteristické, že v jednotlivých impulsích jsou obsaženy různé příčné módy. Po každém laserovém impulsu se mění jejich řád a prostorová lokalizace. Důsledkem je pak velká nepravidlost příčného průřezu svazku výstupního záření a nízký stupeň prostorové a časové koherence. Obecně lze vysvětlit takovou strukturu modulací činitele jakosti rezonátoru Q (z angl. *Quality factor*) v důsledku změn jeho parametrů během generace. Tyto změny mohou být vyvolány např. vibracemi prvků rezonátoru, změnou indexu lomu a rozměrů aktivního elementu v důsledku jeho nerovnoměrného zahřívání během buzení.

V režimu volné generace začíná laser pracovat v okamžiku, kdy energie optického buzení E_b dosáhne úrovně, kdy je splněna prahová podmínka pro generaci, tj. zesílení záření při jednom oběhu rezonátorem se právě vyrovná ztrátám v rezonátoru. Se zvyšováním energie buzení E_b je v důsledku stimulované emise vyčerpávána inverze populace hladin. Obecně s rostoucí úrovní energie buzení se zvyšuje počet jednotlivých impulsů (*spikes*) a klesá vzdálenost mezi nimi, celková délka impulsu generace (τ_{FR}) a výstupní energie (E_{out}) narůstají. Pro charakterizaci laseru v režimu volné generace mají největší význam energetické charakteristiky – závislost výstupní energie E_{out} na energii buzení E_b a časový průběh výstupního výkonu (závislost délky generovaných impulsů na energii buzení).

3.2. Laserový zesilovač

Jednoprůchodový laserový zesilovač, jak už název napovídá, slouží ke zvýšení intenzity generovaného laserového záření. Je tvořen podobným způsobem jako samotný laserový oscilátor, s tím rozdílem, že nemá vlastní optický rezonátor. Aktivní prostředí je v tomto případě tvořené opět krystalem Nd:YAG a synchronizované buzené optickým zářením výbojky. Během jediného průchodu se zesiluje laserové záření z oscilátoru procházející v optické ose zesilovače na stejném principu stimulované emise nastávající tentokrát v zesilovači. Při zvyšování intenzity zesilovaného záření dochází k poklesu inverze populace hladin uvnitř zesilujícího materiálu a k poklesu součinitele zesílení zesilovače $G = E_{out}/E_{in}$, kde E_{out} je energie zesíleného záření na výstupu zesilovače a E_{in} energie záření ze základního oscilátoru do zesilovače vstupujícího. Tento jev se nazývá *saturace zesílení*.

3.3. Generace krátkých impulsů – Q-spínání

V režimu volné generace zůstávají ztráty v rezonátoru po dobu buzení prakticky stejné, generace v tomto režimu začíná obvykle na nízké úrovni inverze populace hladin a je časově nepravidelná. Délka výstupního impulsu je velká (řádově μs , ms) a špičkový výkon nízký.

V režimu generace s modulací činitele jakosti rezonátoru Q , v tzv. režimu Q-spínání, je možné docílit generace velmi krátkých impulsů (ns) s vysokým špičkovým výkonem výstupního záření. V průběhu buzení aktivního prostředí jsou ztráty v rezonátoru schválně zvýšeny, aby podmínky pro generaci laserového záření nenastaly až do okamžiku, kdy dosáhne inverze populace hladin v důsledku dostatečného buzení maximálních hodnot. V tom okamžiku jsou ztráty rychle sníženy a dochází ke generaci laserového záření s vysokým součinitelem zesílení. Inverze populace hladin je velice rychle vyčerpána, přičemž vzniká časově velice krátký, a tedy velmi výkonný, impuls výstupního záření.

V technice Q-spínání se nejčastěji používají tři typy uzávěrek, zajišťující výše popsanou modulaci činitele jakosti rezonátoru Q :

- **Opticko-mechanická uzávěrka (aktivní):** např. jedno ze zrcadel rezonátoru rotující s vhodnou frekvencí, které snižuje ztráty v rezonátoru v okamžiku, kdy prochází polohou kolmou k optické ose;
- **Elektro-optická uzávěrka (aktivní):** využívá možnosti řídit přiloženým napětím polarizaci záření (lineární nebo kruhovou) nebo její směr v konkrétním krystalu umístěném uvnitř rezonátoru;
- **Pasivní modulace činitele jakosti rezonátoru:** využívá nelineární transmise některých krystalů nebo barviv absorbujících záření v oblasti vlnové délky laserového přechodu – tzv. *saturovatelných absorberů*. Na začátku budicího impulsu je saturovatelný absorber prakticky nepropustný, protože počet center absorbujících stimulované záření je příliš velký. Při zvyšování úrovně buzení vzrůstá počet center přecházejících na vyšší hladiny, a to až do okamžiku, kdy počet center schopných ještě absorbovat záření rychle klesá, materiál se saturuje a se stává transparentním. V tu chvíli jakost rezonátoru rychle narůstá.

3.4. Generace druhé harmonické

Při průchodu záření prostředím s nelineárními dielektrickými vlastnostmi lze kromě lineární odezvy navíc registrovat vznik složky polarizace prostředí úměrné kvadrátu intenzity pole. Tato nelinearita prostředí umůže vést k výměně energie mezi elektromagnetickými poli různých frekvencí. Jeden z nejdůležitějších jevů s tímto spojený, je generace druhé harmonické frekvence. Jedná se o proces, při kterém se část energie elektromagnetické vlny s kruhovou frekvencí ω ($= 2\pi f$) přeměňuje na výstupu z prostředí v energii elektromagnetické vlny s frekvencí 2ω . Jelikož mezi frekvencí f a vlnovou délkou záření λ platí vztah: $\lambda = c/f$, kde c je rychlost světla šířícího se v daném prostředí, je zřejmé, že bude-li frekvence dvojnásobná, vlnová délka bude poloviční.

K tomuto jevu může, za splnění některých podmínek, docházet např. v anizotropních krystalech, u nichž se projevuje vlastnost dvojlomu. Šíří-li se vlna s frekvencí ω pod vhodným úhlem vůči optické ose (Θ_{synchron}) a s polarizací odpovídající tzv. řádnému paprsku, vzniká vlna s frekvencí 2ω ve stejném směru a s polarizací odpovídající tzv. mimořádnému paprsku. Výstupní výkon záření druhé harmonické frekvence je závislý na splnění podmínky tzv. fázového synchronismu, tj. závisí na úhlu natočení krystalu vůči základnímu směru. Pro krystal KDP je tento úhel $\Theta_{\text{synchron}} = 50,4^\circ$. Poměr energie záření druhé harmonické frekvence k energii dopadajícího záření o základní frekvenci ω definuje účinnost generace druhé harmonické.

4. Postup měření:

4.1. Charakterizace laseru v režimu volné generace

1. Nastavit laserový rezonátor metodou optického spřažení svazků – jedná se o základní metodu nastavování laserových rezonátorů a aktivních prostředí. Snahou je, aby veškeré odrazy He–Ne nebo polovodičového laseru od optických prvků směřovaly do jednoho bodu shodného s čerpacím, případně generovaným, svazkem.
2. Umístit optický klín za výstupní zrcadlo rezonátoru a nastavit odrazy trasovacího laseru na detektory D1, D2.
3. Spustit laser (podle instrukcí) a nastavit ho na generaci maximální výstupní energie pomocí jemného ladění zrcadel rezonátoru.
4. Přečíst napětí na zdroji výbojky oscilátoru (převodní tabulka nastaveného napětí na skutečné je uvedena na boční straně zdroje) a přepočítat na energii uloženou v kondenzátoru (kapacita $C = 100 \mu\text{F}$) reprezentující energii buzení (E_b).
5. Najít prahovou energii buzení (E_{th}) v režimu volné generace.
6. Naměřit závislost výstupní energie generovaného záření E_{out} na energii buzení E_b .
7. Pozorovat na osciloskopu časové průběhy generovaného záření a měřit dobu generace τ_{FR} :

Pozn.: i) V režimu volné generace se uvažuje délka pulsu τ_{FR} jako celková doba obálky pozorovaného impulsu.
ii) Reflektivita použitého optického klínu (rozhraní sklo-vzduch) je přibližně $R = 4 \%$.

- iii) Transmittance matrice pyroelektrické energetické sondy D2 je $T = 62 \%$.
- iv) Citlivost pyroelektrické sondy D2 je $15,8 \text{ V/J}$.

4.2. Zesilování impulsů

1. Umístit optický klín za výstup laserového zesilovače a přenést detektor D2 do nové polohy.
2. Naměřením energie na vstupu E_{in} (výsledky z předchozí měření) a výstupu zesilovače E_{out} pro různé úrovně buzení určit zesílení Nd:YAG zesilovače $G = E_{out}/E_{in}$ pro různé úrovně buzení oscilátoru E_b (změnou napětí na zdroji oscilátoru).
3. Zaznamenat na fotocitlivý papír stopy svazku pro několik různých energií buzení, určit jejich plochu S a vypočítat plošnou hustotu výkonu laserového záření.

4.3. Q-spínaný režim

1. Vložit krystal saturovatelného absorbéru Cr:YAG sloužící k pasivnímu Q-spínání do rezonátoru tak, aby jeho střed byl v optické ose a čela přibližně kolmo ke svazku trasovacího laseru (použít výškový posuv stojanu s krystalem).
2. Přenést optický klín společně s detektory opět do původní polohy za výstupní zrcadlo laserového oscilátoru.
3. Nastavit laser na generaci jednoho Q-spínaného impulsu a pozorovat (+ zaznamenat) na osciloskopu časový průběh Q-spínaného impulsu.
4. Určit průměrnou délku, energii, výkon (s příslušnými odchylkami) generovaného Q-spínaného impulsu (použít alespoň 10 měření). (Pozn.: v režimu generace Q-spínaných impulsů je délka impulsu τ_Q definována jako šířka časového průběhu intenzity impulsu na polovině maxima – FWHM z angl. *full width at half maximum*).

4.4. Generace druhé harmonické frekvence

1. Pro generaci druhé harmonické frekvence použijte zesílený Q-spínaný puls; tj. zesílit Q-spínané impulsy pomocí Nd:YAG zesilovače.
2. Nastavte úhel krystal KDP do osy generovaného svazku a jeho vhodným natočením dosáhněte maximální výstupní energie záření druhé harmonické frekvence.
3. Pozorovat závislost energie druhé harmonické frekvence na úhlu rozladění.

5. Požadované výsledky:

- A) Výsledky měření výstupní energie laseru E_{out} v režimu volné generace, účinnosti $\eta = E_{out}/E_b$, a středního výkonu $P_{str} = E_{out}/\tau_{FR}$. V tabulkách a grafech uvést naměřené závislosti: $E_{out}(E_b)$; $\eta(E_b)$; $\tau_{FR}(E_b)$; $P_{str}(E_b)$.
- B) Graf závislosti zesílení impulsu G v závislosti na budící energii laserového oscilátoru $G(E_b)$ a závislost plošné hustoty energie $W = E_{out}/S$ na budící energii $W(E_b)$.
- C) Výsledky měření průměrné délky, energie a výkonu Q-spínaného impulsu s přiloženým záznamem jeho časového průběhu (snímek obrazovky osciloskopu).
- D) Fotografii zaznamenávající generaci záření druhé harmonické frekvence. Komentování pozorované citlivosti generace druhé harmonické v závislosti na úhlu natočení krystalu KDP.

Literatura

- [1] Vrbová, M., a kol. „Oborová encyklopedie Lasery a moderní optika“, Prometheus, ISBN 80-85849-56-9, 1994
- [2] Vrbová, M., Jelínková, H., Gavrilov, P., „Úvod do laserové techniky“, Vydavatelství ČVUT, Praha, ISBN 80-01-01108-9, 1998
- [3] Paschotta, R. „Field Guide to Lasers“, Society of Photo Optical, 2008
- [4] http://www.scientificmaterials.com/products/nd-yag_yttrium_aluminum_garnet.php online [cit. 16. 5. 2019]
- [5] Geusic, J. E., et. al. „Laser oscillations in Nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets“, Applied Physics Letters, 4, 182, 1964
- [6] Koechner, W. „Solid-State Laser Engineering“, (3rd ed.), Springer-Verlag, ISBN 0-387-53756-2, 1992
- [7] Mallikarjuna, K., Hyun-Jun, H., Wan-Ho, Ch., Hak-sung, K. „Photonic welding of ultra-long copper nanowire network for flexible transparent electrodes using white flash light sintering“, RSC Adv. 6., 2016