

# Výbojkově čerpaný neodýmový laser se zesilovačem

Týden vědy na Jaderce 2022

Garant úlohy: Ing. Adam Říha

## 1. Cíle experimentu:

1. Nastavíte a proměříte základní vlastnosti výbojkově čerpaného Nd:YAG laseru v režimu volné generace.
2. Zesílíte záření Nd:YAG laseru pomocí jednopřechodového zesilovače optických impulsů.
3. Nastavíte a proměříte vlastnosti Nd:YAG laseru v režimu generace krátkých pulsů (tzv. Q-spínání).
4. Nastavíte do generovaného svazku krystal KDP a budete 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 setkáváme 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.

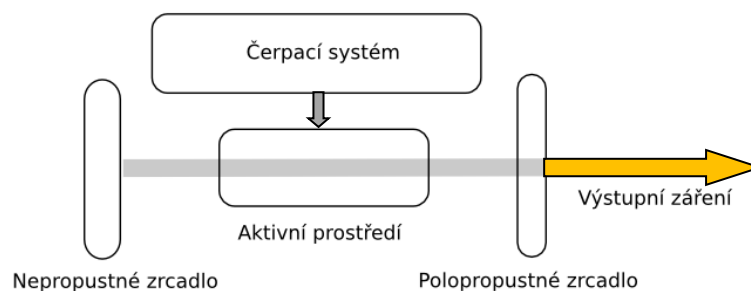
### 2.1. Laser a jeho vlastnosti

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 ( $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{2+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  aj.), nebo přechodových prvků ( $\text{Cr}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{3+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ti}^{3+}$ , aj.). [1, 2]

### 2.2. Základní princip činnosti laseru

Při popisu laseru je možné vycházet z představy optického rezonátoru tvořeného dvojicí zrcadel – totálně odrazné a částečně propustné pro generované záření. 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 jeho ztráty. Pro zesilování záření je zapotřebí čerpací systém, díky kterému lze v aktivním prostředí vytvořit stav tzv. inverze populace energetických hladin systému. [3]

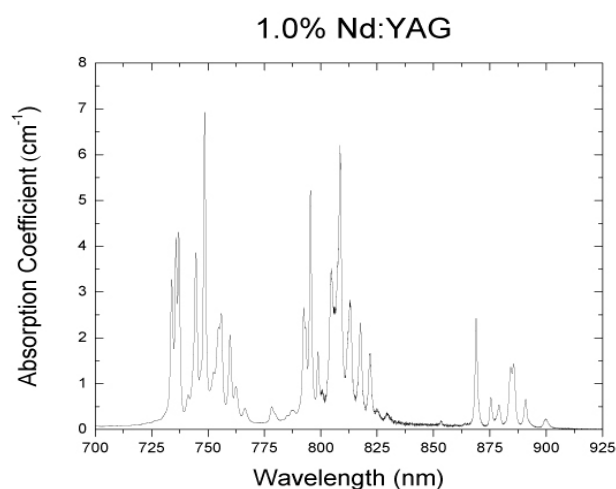
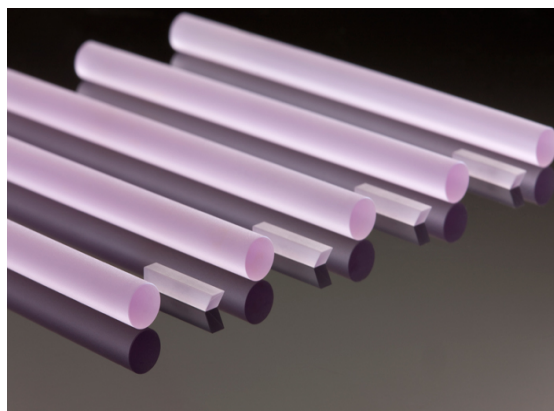
Aktivní prostředí (viz Obr. 1) dokáže přeměnit energii dodávanou buzením na elektromagnetické záření, jež je zesilováno díky kladné zpětné vazbě rezonátoru prostřednictvím stimulované emise. Optický výkon roste do té míry, dokud se zesílení záření při průchodu aktivním prostředím nevyrovná optickým ztrátám rezonátoru. V takovém případě se jedná o tzv. saturovanou 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 neodymových iontů. Absorpce záření probíhá v typických úzkých absorpčních čarách v rozmezí 725-900 nm (viz Obr. 2).



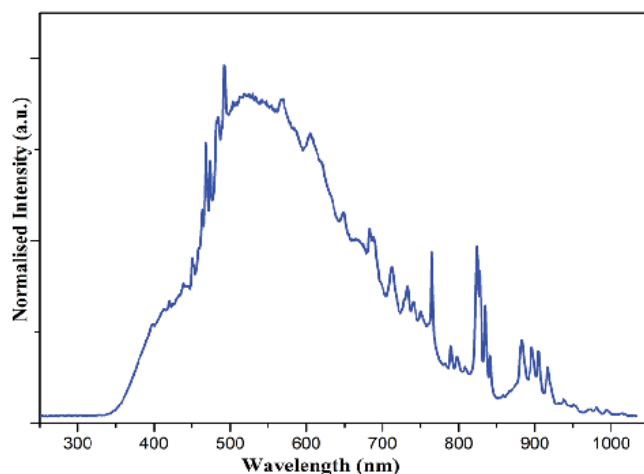
**Obr. 2** Vlevo: Vybroušené laserové tyče krystalů Nd:YAG; vpravo: absorpční spektrum krystalu Nd:YAG. [4]

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.

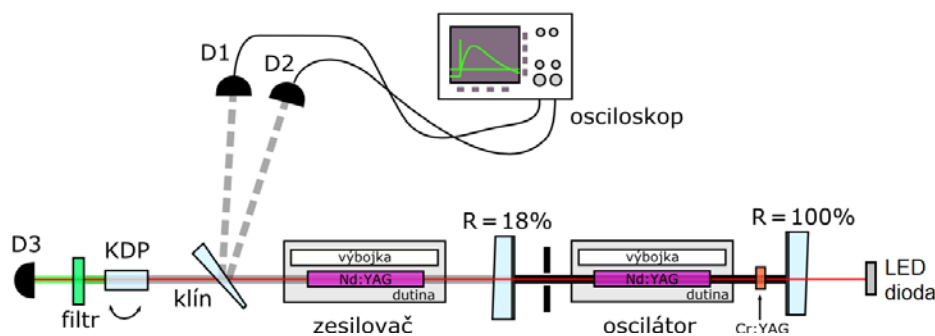
Nd:YAG laser má celou řadu uplatnění. Je využíván např. pro vrtání, svařování, žíhání, řezání a značkování. Dále se využívá v medicíně, vědě, biologii a pro vojenské aplikace. V medicíně se Nd:YAG laser využívá v oftalmologii pro odstranění druhotného šedého zákalu či vytvoření otvorů v duhovce za účelem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

### 3. Uspořádání úlohy

V našem případě je pevnolátkový Nd:YAG laser tvořen eliptickou postříbřenou keramickou 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 Obr. 3). Další nezbytnou součástí je optický rezonátor, tvořený zadním zrcadlem s odrazivostí  $R_1 = 100\%$  v oblasti okolo 1064 nm a výstupním zrcadlem s odrazivostí  $R_2$  k dispozici ve variantách 7%, 46% a 86%. 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 Obr. 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 nepravidelnost 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 ( $\tau_{FR}$ ) a výstupní energie ( $E_{out}$ ) tak 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. V našem případě se jedná o výbojkově čerpaný Nd:YAG krystal umístěný v eliptické dutině bez zrcadel optického rezonátoru. Během jediného průchodu se zesiluje laserové záření vystupující z oscilátoru (které prochází v optické ose zesilovače) na stejném principu stimulované emise, ke kterému dochází v krystalu zesilovače. 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 vstupující do zesilovače. 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. Charakteristická je větší délka výstupního impulsu (řádově  $\mu\text{s}$ ,  $\text{ms}$ ) a nízký špičkový výkon.

V režimu generace s modulací činitele jakosti rezonátoru  $Q$ , v tzv. režimu Q-spínání, je možné docílit generace velmi krátkých impulsů (řádově jednotky až desítky  $\text{ns}$ ) s vysokým špičkovým výkonem výstupního záření. V průběhu buzení aktivního prostředí jsou ztráty v rezonátoru uměle 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 umělé ztráty rychle sníženy a dochází ke generaci krátkého laserového pulsu s vysokým součinitelem zesílení záření. Inverze populace hladin je rychle vyčerpána, přičemž vzniká časově velice krátký, a tedy velmi výkonný, impuls laserového záření.

V technice Q-spínání se nejčastěji používají 4 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;
- **Akusto-optická uzávěrka (aktivní):** přiložené napětí určuje rozptyl záření na akustických (zvukových) vlnách;
- **Pasivní modulace činitele jakosti rezonátoru:** využívá nelineární transmisi některých krystalů nebo barviv absorbujících záření v oblasti vlnové délky laserového přechodu – tzv. *saturovatelných absorbérů*. Na začátku budícího impulsu je saturovatelný absorbér pro generované záření 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. Činitel jakosti rezonátoru rychle narůstá a dochází k vyvázání krátkého pulsu z rezonátoru a tím k opětovnému poklesu intenzity a ztráty transmisi saturovatelného absorbéru.

### 3.4. Generace druhé harmonické

Při průchodu záření prostředím s nelineárními dielektrickými vlastnostmi lze kromě lineární odezvy navíc registrovat vznik složky polarizace prostředí úměrné druhé mocnině intenzity pole. Tato nelinearita prostředí může 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  $\omega = 2\pi f$  přeměňuje na výstupu z prostředí v energii elektromagnetické vlny s frekvencí  $2\omega$ . Jelikož mezi frekvencí  $f$  a vlnovou délkou záření  $\lambda$  platí vztah:  $c = \lambda f$ , 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  $\omega$  pod vhodným úhlem vůči optické ose ( $\Theta_{\text{synch}}$ ) s polarizací odpovídající tzv. řádnému paprsku, vzniká vlna s frekvencí  $2\omega$  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  $\Theta_{\text{synch}} = 50,4^\circ$ . Poměr energie záření druhé harmonické frekvence k energii dopadajícího záření o základní frekvenci  $\omega$  pak definuje účinnost generace druhé harmonické.

## 4. Postup měření:

### 4.1. Charakterizace laseru v režimu volné generace

1. Nastavte laserový rezonátor metodou optického spřažení svazků – jedná se o základní metodu nastavování laserových rezonátorů a aktivních prostředí. Snahou je, aby veškeré odrazy červeného polovodičového trasovacího laseru od optických prvků směřovaly do jednoho bodu shodného s čerpacím, případně generovaným, svazkem.
2. Umístěte optický klín za výstupní zrcadlo rezonátoru a nastavte odrazy trasovacího laseru na detektory D1, D2.
3. Zapněte laser podle instrukcí a nastavte ho pro danou úroveň budícího záření na generaci maximální výstupní energie pomocí jemného ladění výstupního zrcadla rezonátoru.
4. Určete napětí na zdroji pro výbojky oscilátoru (převodní tabulka nastaveného napětí na skutečné je uvedena na boční straně zdroje) a vypočítejte elektrickou energii uloženou v kondenzátoru (kapacita  $C = 100 \mu\text{F}$ ) reprezentující energii buzení ( $E_b$ ).

5. Určete prahovou energii buzení ( $E_{\text{prah}}$ ) v režimu volné generace.
  6. Naměřte závislost výstupní energie generovaného záření  $E_{\text{out}}$  na energii buzení  $E_b$ .
  7. Zaměřte výstupní zrcadlo za další s odlišnou odrazivostí a opakujte postup od bodu 1.
  8. Pozorujte na osciloskopu časové průběhy generovaného záření a změřte dobu generace  $\tau_{FR}$ :
- Pozn.:** i) V režimu volné generace se uvažuje délka pulsu  $\tau_{FR}$  jako celková doba obálky pozorovaného impulsu.  
 ii) Reflektivita použitého optického klínu (rozhraní sklo-vzduch) je přibližně  $R = 4 \%$ .  
 iii) Transmittance matnice pyroelektrické energetické sondy D2 je  $T = 62 \%$ .  
 iv) Citlivost pyroelektrické sondy D2 je  $15,8 \text{ V/J}$ .

## 4.2. Zesilování impulsů

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

## 4.3. Q-spínaný režim

1. Vložte krystal saturovatelného absorbéru Cr:YAG sloužícího k pasivnímu Q-spínání do rezonátoru tak, aby jeho střed byl v optické ose a čela přibližně kolmo ke svazku trasovacího laseru (použijte posuvy stojanu s krystalem).
2. Přeneste optický klín společně s detektorem energie D2 opět do původní polohy za výstupní zrcadlo laserového oscilátoru.
3. Nastavte laser na generaci jednoho Q-spínaného impulsu a pozorujte (+ zaznamenejte) na osciloskopu časový průběh Q-spínaného impulsu.
4. Určete průměrnou délku, energii a výkon (s příslušnými odchylkami) generovaného Q-spínaného impulsu (použijte pro statistiku alespoň 10 měření).

**Pozn.:** V režimu generace Q-spínaných impulsů je délka impulsu  $\tau_Q$  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. zesilujte Q-spínané impulsy pomocí Nd:YAG zesilovače.
2. Nastavte krystal KDP do osy generovaného svazku a jeho vhodným natočením dosáhněte maximální výstupní energie záření druhé harmonické frekvence.
3. Pozorujte závislost energie druhé harmonické frekvence na úhlu rozladění. Pokuste se určit úhel rozladění generace druhé harmonické frekvence.

## 5. Požadované výsledky:

- A) Výsledky měření výstupní energie laseru  $E_{\text{out}}$  v režimu volné generace, účinnosti  $\eta = E_{\text{out}}/E_b$ , a středního výkonu  $P_{\text{str}} = E_{\text{out}}/\tau_{FR}$ . V tabulkách a grafech uvést naměřené závislosti:  $E_{\text{out}}(E_b)$ ;  $\eta(E_b)$ ;  $\tau_{FR}(E_b)$ ;  $P_{\text{str}}(E_b)$ . Přiložte pro ilustraci jeden záznam časového průběhu záření (snímek obrazovky osciloskopu).
- B) Graf závislosti zesílení impulsu  $G$  v závislosti na budící energii laserového oscilátoru  $G(E_b)$  a závislost plošné hustoty energie  $W_1 = E_{\text{out}}/S$  a výkonu  $W_2 = P_{\text{avg}}/S$  na budící energii  $W_1(E_b)$ ,  $W_2(E_b)$ .
- C) Výsledky měření průměrné délky, energie a výkonu Q-spínaného impulsu s přiloženým záznamem jeho časového průběhu (snímek obrazovky osciloskopu).
- D) Fotografii dokumentující generaci záření druhé harmonické frekvence. Velikost úhlu potřebného k rozladění generace druhé harmonické frekvence.

## 6. 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 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 LATEX a prezentaci buď také v LATEX nebo v MS PowerPoint.

## 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](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“, (3<sup>rd</sup> 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