

## 1. Pevnolátkový Nd:YAG laser v režimu volné generace a v režimu Q-spínání, zesilování laserového záření a generace druhé harmonické

### Úvod

Pevnolátkový Nd:YAG laser je tvořen budicí dutinou, ve které jsou umístěny laserový krystal a výbojka zajišťující optické buzení, a optickým rezonátorem, tvořeným 100% zadním zrcadlem a částečně propustným výstupním zrcadlem. Laserový krystal Nd:YAG představuje aktivní prostředí, ve kterém dochází ke stimulované emisi a následnému zesílení záření během každého průchodu. Základní úloha optického rezonátoru spočívá ve vytváření podmínky pro mnohonásobný průchod stimulovaného záření skrz aktivní objem krystalu. Tím vzniká kladná zpětná vazba, při které je zesilováno záření s vlnovou délkou rezonanční k délce rezonátoru. Z tohoto důvodu probíhá generace a zesílení laserového záření v úzkých spektrálních čarách (tzv. podélných módech). Optický rezonátor, kromě základní funkce pro vznik a udržování generace, určuje dále základní vlastnosti výstupního záření: monochromaticnost, koherenci, směrovost, prostorovou strukturu, výstupní výkon.

### Laserový oscilátor

Základní metoda nastavování laserových rezonátorů a aktivních elementů je metoda optického spřažení svazků. Jde o metodu, kdy se všechny odrazy He–Ne, či polovodičového laseru ve viditelné části spektra nastavují do jednoho bodu společně se zdrojovým svazkem.

Základním režimem provozu laseru je režim tzv. volné generace. S výjimkou optického buzení během generace a v důsledku stimulované emise v tomto režimu nedochází v laseru k žádnému dynamickému působení. Základní vlastnost režimu volné generace spočívá v jeho nestacionárnosti – při hladkém tvaru světelného impulsu buzení je časový průběh stimulovaného záření (resp. jeho obálka) složen z mnoha jednotlivých relaxačních impulsů (tzv. *spikes*).

Pro příčnou prostorovou strukturu svazku pevnolátkových laserů je charakteristické, že v jednotlivých impulzech obálky jsou obsaženy jednotlivé příčné módy. Po každém laserovém impulsu se mění jejich řád a jejich prostorová lokalizace. Důsledkem je pak velká nepravidelnost příčného průřezu svazku výstupního záření a nízký stupeň prostorové a časové koherence. Obecně lze vysvětlit takovou strukturu obálky v režimu volné generace modulací jakosti rezonátoru v důsledku změn jeho parametrů během generace. Tyto změny jsou vyvolány např. vibracemi prvků rezonátoru, změnou indexu lomu a rozměrů aktivního elementu v důsledku jeho nerovnoměrného zahřívání během výbojkového buzení.

Laser v režimu volné generace začíná generovat v okamžiku, kdy energie optického buzení  $E_b$  dosáhne takové úrovně, při které je splněna prahová podmínka pro generaci, tj. zesílení záření při jednom oběhu rezonátorem se vyrovná ztrátám v rezonátoru. Zesílení uvnitř aktivního materiálu je charakterizováno součinitelem zesílení  $g_0$

$$g_0 = \sigma \Delta N, \quad (1)$$

kde  $\sigma$  je účinný průřez laserového přechodu a  $\Delta N$  hustota inverze populace hladin.

S rostoucí energií buzení je v důsledku stimulované emise vyčerpávána inverze populace hladin, což způsobí pokles součinitele zesílení v době generace jednotlivých relaxačních impulsů, a naopak nárůst zesílení v době mezi jednotlivými relaxačními impulsy. S rostoucí úrovní energie buzení  $E_b$  se zvyšuje počet jednotlivých impulsů a klesá vzdálenost mezi nimi, celková délka impulsu generace  $\tau_{FR}$  a výstupní energie  $E$  narůstají. Pro popis laseru v režimu volné generace mají největší význam energetické charakteristiky – výstupní energie a časový průběh výstupního výkonu.

### 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 a je časově nepravidelná. Délka výstupního impulsu je velká (řádově  $\mu s$ ,  $ms$ ) 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 (řádově jednotky až stovky nanosekund) s vysokým špičkovým výkonem výstupního záření. V průběhu buzení aktivního prostředí jsou úmyslně nastaveny dostatečně vysoké ztráty v rezonátoru tak, aby podmínky pro generaci laserového záření nenastaly až do okamžiku, kdy inverze populace hladin v důsledku dostatečného buzení dosáhne maximálních hodnot. V tom okamžiku jsou ztráty rychle sníženy a nastává generace laserového záření s vysokým součinitelem zesílení. Inverze populace hladin je velice rychle vyčerpána, přičemž vzniká časově velice krátký, a tedy velmi výkonný, výstupní impuls záření.

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

- Opticko-mechanická uzávěrka (aktivní): např. rotující zrcadlo rezonátoru, které snižuje ztráty v rezonátoru v okamžiku, kdy prochází polohou kolmou k optické ose;
- Elektro-optická uzávěrka (aktivní): využívá možnosti řídit přiloženým napětím polarizaci (lineární nebo kruhovou) nebo její směr v konkrétním krystalu umístěném uvnitř rezonátoru;
- Pasivní modulace jakosti rezonátoru: využívá nelineární transmise některých krystalů nebo barviv absorbujících v oblasti vlnové délky laserového přechodu. Na začátku budicího impulsu je barvivo prakticky nepropustné, protože počet center absorbujících stimulované záření je 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, barvivo se stává transparentním a jakost rezonátoru Q tak rychle narůstá.

## Laserový zesilovač

Jednoprůchodový laserový zesilovač, jak už název napovídá, slouží ke zvýšení intenzity vygenerovaného laserového záření. Aktivní prostředí je opět tvořené krystalem Nd:YAG a buzené optickým zářením výbojky s tím rozdílem, že nemá vlastní optický rezonátor, tj. kladnou zpětnou vazbu. Během jediného průchodu laserového impulsu zesiluje procházející záření podél své délky L v optické ose z. Změnu intenzity záření  $I(z)$  podél optické osy z lze jednoduše popsat rovnicí:

$$\frac{dI(z)}{dz} = (g - \beta) I, \quad (2)$$

kde  $g$  a  $\beta$  jsou součinitelé zesílení a ztrát aktivního prostředí. Za předpokladu homogenního buzení aktivního prostředí a slabého vstupního signálu  $I_{in}$  můžeme řešení této rovnice pro intenzitu výstupního záření  $I_{out}$  zapsat ve tvaru:

$$I_{out} = I_{in} e^{(g_0 - \beta)L}, \quad (3)$$

kde L je délka aktivního prostředí,  $I_{in}$  intenzita na vstupu zesilovače a  $g_0$  součinitel zesílení pro slabý signál. Zesílení zesilovače G je definováno jako poměr výstupní intenzity  $I_{out}$  (resp. energie  $E_{out}$ ) ke vstupní intenzitě  $I_{in}$  (resp. energii  $E_0$ ):

$$G = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{E_{out}}{E_{in}}. \quad (4)$$

Při zvyšování intenzity zesilovaného záření dochází k poklesu inverze populace hladin uvnitř zesilujícího materiálu a k poklesu součinitele zesílení  $g$  a s tím spojeným poklesem zesílení G. Tento jev se nazývá *saturace zesílení*. Součinitel zesílení tak musíme uvažovat jako funkci závislou na intenzitě záření  $g = g(I)$ :

$$g(I) = \frac{g_0}{1 + \frac{I}{I_s}}, \quad (5)$$

kde  $g_0$  je součinitel zesílení slabého signálu a  $I_s$  je saturační intenzita aktivního prostředí.

## Generace druhé harmonické

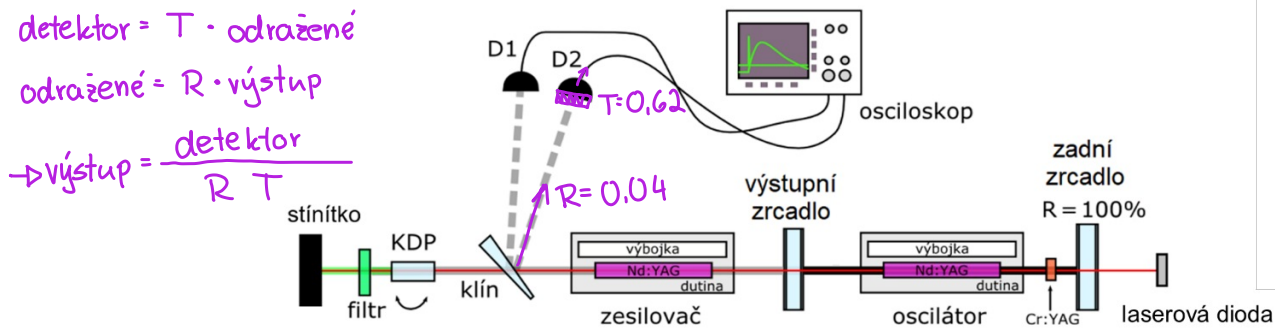
Při průchodu záření nelineárním prostředím lze kromě lineární odezvy navíc registrovat vznik složky polarizace prostředí na jiné frekvenci, než má dopadající záření. Tato nelinearita prostředí může vést k výměně energie mezi elektromagnetickými poli různých frekvencí. Jeden z nejdůležitějších jevů s tímto spojený, je generace druhé harmonické frekvence; proces, při kterém se část energie elektromagnetické vlny s kruhovou frekvencí  $\omega$  se na výstupu z nelineárního prostředí přemění v energii elektromagnetické vlny s frekvencí  $2\omega$ . Podrobný teoretický rozbor (viz literatura, např. Fiala, *Nelineární optika*) stanoví, že předpokladem pro efektivní generaci druhé harmonické frekvence je splnění podmínky tzv. *fázového synchronismu* neboli platnost podmínky pro složky vlnového vektoru:

$$k_{2\omega} - k_{\omega} - k_{\omega} = 0. \quad (6)$$

Jeden ze způsobů splnění této podmínky je využití anizotropních krystalů, u nichž se projevuje dvojlom. Šíří-li se vlna s frekvencí  $\omega$  pod vhodným úhlem vůči optické ose ( $\Theta_{\text{synch}}$ ) a 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 fázového synchronismu, tj. závisí na úhlu natočení krystalu vůči základnímu směru. Pro krystal KDP je  $\Theta_{\text{synch}} = 50,4^\circ$ . Poměr energie záření druhé harmonické frekvence  $2\omega$  k energii dopadajícího záření o základní frekvenci  $\omega$  definuje účinnost generace druhé harmonické.

## Cíle:

1. Nastavit a optimalizovat Nd:YAG laser v režimu volné generace. Najít optimální výstupní zrcadlo pro dosažení maximální možné výstupní energie. Provést měření a porovnat energetické, časové a prostorové charakteristiky generovaného záření.
2. Určit zesílení G optického jednorůchodového zesilovače.
3. Nastavit Nd:YAG laser v režimu Q-spínání. Změřit energetické a časové charakteristiky generovaného záření.
4. Nastavit KDP krystal pro dosažení generace druhé harmonické frekvence v režimu Q-spínání. Na stínítku sledovat změnu intenzity záření druhé harmonické (účinnosti konverze) se změnou úhlu natočení KDP krystalu.



Obrázek 1: Zjednodušené schéma experimentální sestavy.

$$E_b = \frac{1}{2} C U^2$$

## Postup měření

### A) Charakteristika laseru v režimu volné generace

1. Nastavte střed krystalu v oscilátoru do trasovacího svazku červené laserové diody.
2. Nastavte laserový rezonátor metodou spřažení svazků.
3. Umístěte optický klín za výstupní zrcadlo rezonátoru, nastavte odrazy záření laserové diody na detektory D1, D2.
4. Podle instrukce zapněte laser a nastavte ho při libovolné (ale dostatečné) energii buzení na generaci co nejvyšší výstupní energie  $E$  pomocí jemného ladění zrcadel rezonátoru. Profil svazku, zaznamenávaný na luminiscenční destičku nebo fotocitlivý papír, nastavte tak, aby byl maximálně blízký kruhovému průřezu.
5. Přečtěte napětí na zdroji oscilátoru  $U_b$  (převodní tabulka nastaveného napětí na reálné je uvedena v Příloze na konci textu) a vypočítejte energii uloženou v kondenzátoru ( $C = 100 \mu\text{F}$ ) reprezentující energii buzení  $E_b$ .
6. Určete prahovou energii buzení  $E_{th}$  a proměřte energetickou charakteristiku  $E = E(E_b)$  laserového systému. Určete maximální výstupní energii  $E_{max}$  pro režim volné generace.
7. Vyměňte výstupní zrcadlo, opět optimalizujte rezonátor a opakujte bod 6. Určete optimální reflektivitu výstupního zrcadla z výběru k dispozici: (a) M337,  $R = 74 \% @ 1064 \text{ nm}$ ; (b) M327,  $R = 48 \% @ 1064 \text{ nm}$ ; (c) křemenné sklo,  $R = 7 \% @ 1064 \text{ nm}$ .
8. Ve všech dalších měřeních již pokračujte s optimálním výstupním zrcadlem (dávajícím nejvyšší hodnotu  $E_{max}$ ).
9. Na černý fotocitlivý papír zaznamenejte stopu svazku při maximální výstupní energii  $E_{max}$ . Určete její plochu  $S$  nutnou k výpočtu plošné hustoty energie  $W_{max} = E_{max}/S$ .
10. Pozorujte a zaznamenejte na osciloskopu časový průběh generovaného záření a změřte dobu generace  $\tau_{FR}$  (celková doba obálky pozorovaného impulsu). K záznamu můžete použít USB disk, případně obrazovku vyfotografovat.
  - a) při prahové energii buzení (resp. těsně nad ní);
  - b) v polovině  $E_b$ ;
  - c) pro maximální  $E_b$ .

- Pozn.: i) Reflektivita optického klínu (jedno rozhraní sklo-vzduch) je přibližně  $R \approx 4\%$ .  
ii) Transmittance matnice pyroelektrické energetické sondy D2 je přibližně  $T \approx 62\%$ .  
iii) Citlivost pyroelektrické sondy D2 je  $S = 15,8 \text{ V/J}$ .

### B) Zesilování impulsů

1. Umístěte optický klín s detektorem D2 do nové polohy za výstup laserového zesilovače (viz Obrázek 1).
2. Pro různé úrovně buzení oscilátoru  $E_b$  (změnou napětí  $U_b$  na zdroji oscilátoru) změřte energii na výstupu zesilovače  $E_{out}$  a vypočítejte jeho zesílení  $G = E_{out}/E_{in}$ . Využijte takové hodnoty  $E_b$ , pro které máte energii na vstupu  $E_{in}$  naměřenou z předchozího měření, tj.  $E_{in} = E$  (Postup A, bod 6).

### C) Q-spínaný režim

1. Vložte do rezonátoru krystal Cr:YAG sloužící k pasivnímu Q-spínání tak, aby jeho střed byl v optické ose a přibližně kolmo k trasovacímu svazku červené laserové diody (použít posuvy stojanu s držákem krystalu).
2. Vraťte optický klín zpět do původní polohy za výstupní zrcadlo laserového oscilátoru a do odpovídajících míst umístěte i oba detektory D1 a D2.
3. Nastavte laser v režimu generace jednoho Q-spínaného impulsu na jeden impuls budícího výboje. Pozorujte na osciloskopu a zaznamenejte (uložit na USB disk / vyfotit) časový průběh Q-spínaného impulsu v tomto režimu.
4. Určete průměrnou délku, energii a špičkový výkon (a jejich odchylky) jednoho Q-spínaného impulsu. Použijte minimálně 10 měření. Nezapomeňte také zaznamenat stopu svazku pro určení plošné hustoty energie. 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*.  $d = 2,9 \text{ mm}$

### D) Generace druhé harmonické frekvence

1. Pokračujte v režimu Q-spínání a zapněte zesilovač, naladěný z předchozího měření.
2. Nastavte KDP krystal pro dosažení generace druhé harmonické frekvence. Na stínítku pozorujte zelené záření odpovídající druhé harmonické frekvenci a vyzkoušejte změnou úhlu natočení KDP krystalu měnit jeho intenzitu.

### Požadované výsledky:

- A) Graf závislosti maximální výstupní energie  $E_{max}$  na odrazivosti výstupního zrcadla  $R_{OC}$ . Pro všechna testovaná zrcadla graf a tabulka závislosti výstupní energie  $E$  a účinnosti  $\eta = E/E_b$  na budící energii  $E_b$ . Pro optimální výstupní zrcadlo graf a tabulka závislosti délky impulsu  $\tau_{FR}$ , a středního výkonu  $P_{str} = E/\tau_{FR}$  na budící energii  $E_b$ . Doplňte obrázky časových průběhů záření a hustotu energie při maximální energii  $W_{max} = E_{max}/S$  (v  $\text{J/cm}^2$ ).
- B) Graf závislosti zesílení impulsu  $G$  na budící energii laserového oscilátoru pro optimální výstupní zrcadlo.
- C) Výsledky měření délky  $\tau_Q$ , energie  $E_Q$ , špičkového výkonu  $P_Q$  (vše s odchylkou), plošné hustoty energie  $W_Q$  Q-spínaných impulsů a záznam časového vývoje (z osciloskopu) Q-spínaného impulsu. Porovnejte plošnou hustotu energie impulsu v režimu Q-spínání a v režimu volné generace.

SDSO...1, SDSO...2 : M 327  
220 dílků

SDSO. 8 Q-spínání

SDSO. .3, SDSO... 4 M 327  
550 dílků

SDSO. .5, SDSO. . 6 M 327  
700 dílků

## Příloha

**Tabulka 1:** Převodní tabulka mezi číselným nastavením napětí na zdroji a reálnou hodnotou napětí budicího napětí  $U_b$  zdroje laserového oscilátoru. Kapacita kondenzátoru zdroje:  $C = 100 \mu F$ .

| Dílky nastavené<br>na aripotu zdroje | Budící napětí<br>zdroje $U_b$ [V] |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 200                                  | 369                               |
| 210                                  | 370                               |
| 220                                  | 371                               |
| 230                                  | 373                               |
| 240                                  | 374                               |
| 250                                  | 376                               |
| 260                                  | 378                               |
| 270                                  | 381                               |
| 280                                  | 384                               |
| 290                                  | 387                               |
| 300                                  | 390                               |
| 310                                  | 394                               |
| 320                                  | 398                               |
| 330                                  | 402                               |
| 340                                  | 406                               |
| 350                                  | 411                               |
| 360                                  | 416                               |
| 370                                  | 421                               |
| 380                                  | 427                               |
| 390                                  | 433                               |
| 400                                  | 439                               |
| 410                                  | 445                               |
| 420                                  | 452                               |
| 430                                  | 459                               |
| 440                                  | 466                               |
| 450                                  | 473                               |
| 460                                  | 481                               |
| 470                                  | 489                               |

| Dílky nastavené<br>na aripotu zdroje | Budící napětí<br>zdroje $U_b$ [V] |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 480                                  | 498                               |
| 490                                  | 506                               |
| 500                                  | 515                               |
| 510                                  | 524                               |
| 520                                  | 534                               |
| 530                                  | 543                               |
| 540                                  | 553                               |
| 550                                  | 563                               |
| 560                                  | 574                               |
| 570                                  | 585                               |
| 580                                  | 596                               |
| 590                                  | 607                               |
| 600                                  | 619                               |
| 610                                  | 631                               |
| 620                                  | 643                               |
| 630                                  | 655                               |
| 640                                  | 668                               |
| 650                                  | 681                               |
| 660                                  | 694                               |
| 670                                  | 708                               |
| 680                                  | 720                               |
| 690                                  | 735                               |
| 700                                  | 750                               |
| 710                                  | 765                               |
| 720                                  | 780                               |
| 730                                  | 795                               |
| 740                                  | 810                               |
| 750                                  | 825                               |