

Oponentský posudek

disertační práce na téma

Generace a aplikace superkontinua pro vysokovýkonové laserové systémy vypracované panem Ing. Lukášem Indrou

ELI-Beamlines je významná instituce, kde se připravují ultrarychlé a nelineární optické experimenty světového významu. Tato disertace se zabývá studiem generování superkontinua čerpaného pikosekundovými pulzy v blízké infračervené oblasti v krystalu $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG). Získané zkušenosti a experimentální uspořádání vybudované v rámci této disertace budou použity pro OPCPA zesílení v laserovém systému L1-Allegra v projektu F-SYNC a v laserovém systému L2-DUHA. Obtížným úkolem této práce je dosažení stabilního generování superkontinua v pikosekundovém režimu, tj. pomocí zesílených pulzů o délce jednotek pikosekund z tenkodiskového regenerativního zesilovače na bázi Yb:YAG. Z předložené práce jsem vysoudil, že Ing. Indra postavil tento tenkodiskový regenerativní zesilovač (nebo alespoň významným způsobem participoval na jeho koncepci a sestavení), postavil experiment pro generování bílého kontinua a prostudoval jeho vlastnosti v závislosti na experimentálních parametrech. Dále ověřil jeho fungování a stabilitu v předběžném experimentálním uspořádání simulujícím následné využití v laserových systémech a implementoval jej do systému L1-Allegra. Jedná se zde tedy o extenzivní a významnou experimentální práci.

Disertační práce má 85 stran textu včetně obrázků a je podpořena 89 odkazy na literaturu. Je psána anglicky, bohužel s četnými gramatickými chybami (zejména chybějící či špatně použité členy) a zavádějícími či nejasnými formulacemi. Jak bude ještě zmíněno dále, disertace obsahuje mnoho nejasností i po věcné stránce.

Kapitola 1 obsahuje teoretický úvod. Ten nejde příliš do hloubky, sestává z několika oddělených částí a většina z těchto částí obsahuje konkrétní diskusi podmínek pro realizaci zařízení v rámci zdrojů, které jsou v ELI k dispozici. Podle mého názoru se tím teoretický úvod rozmělní a čtenář ztrácí souvislosti. Vhodnější by bylo podat hlubší teoretický úvod všech souvisejících jevů v jednom celku a teprve poté v odděleném odstavci diskutovat možnou implementaci těchto jevů v podmínkách ELI. Příklady konkrétních výhrad k této kapitole uvádím níže v části Připomínky.

Kapitola 2 zahrnuje popis a charakterizaci tenkodiskového zesilovače, který slouží jako čerpací laser v dalších částech práce. Tuto kapitolu považuji za přehlednou a zdařilou. Během čtení se čtenáři vtírá otázka, zda autor disertace významným způsobem přispěl k postavení tohoto zařízení; ze závěru práce jsem pochopil, že ano. Tento významný experimentální výsledek je potřeba ocenit. Moje drobné připomínky a dotazy k této kapitole jsou opět shrnuty níže v přílohách.

Kapitola 3 obsahuje popis měření generování superkontinua v závislosti na mnoha parametrech (energie v čerpacím pulzu, poloha ohniska vůči nelineárnímu krystalu, ohnisková vzdálenost čočky, apertura, nastavení kompresoru a stupeň kompenzace nelineární modulace fáze, tzv. chirpu, a počet oběhů pulzu v rezonátoru čerpacího laseru udávající rovněž nelineární modulaci fáze). Tuto kapitolu hodnotím velmi kriticky, zcela zde postrádám analytický a vědecky rigorózní přístup. Rovněž se ukazuje nedostatek zkušeností autora v redakci exaktní vědecké zprávy. Autor sice systematicky mění vstupní parametry, avšak při prezentaci výsledků v grafech konkrétně použitý soubor parametrů neuvádí. Všiml jsem si několika diskrepancí mezi jednotlivými výsledky, autor je však nediskutuje; jejich původ je pro čtenáře nejasný vzhledem k tomu, že vstupní parametry nejsou zveřejněny. Diskuse je vesměs velmi mělká a

omezuje se na popis průběhu křivek v obrázcích. Chybí syntéza a hlubší diskuse výsledků. Na závěr uvádí autor podmínky pro dosažení nejlepších parametrů superkontinua. Není však jasné, na základě čeho je zvolil; kritérií pro nejlepší řešení je možno zvolit několik (stabilita výstupu, výstupní výkon, šířka spektra, tvar spektra, prostorová kvalita svazku) a zjevně je potřeba hledat kompromisní řešení. Proč autor umístí do ideálního uspořádání aperturu, když v předchozí části diskutuje, že její přítomnost v první řadě snižuje stabilitu výstupu? Proč volí negativně chirpované pulzy o délce 3 ps, když z obrázku 49 plyne, že spektrum pro pulzy o délce 2.4 ps je podstatně hladší než spektrum pro 2.9 ps dlouhé pulzy? Je též patrné, že úzké maximum u 550 nm ve spektru na obr. 58(a) bylo systematicky přítomno u měření s pozitivně chirpovanými pulzy, zatímco měření s negativně chirpovanými pulzy takové maximum neobsahovala. Otazníků je celá řada; některé problémy jsou uvedeny v částech Připomínky a Otázky níže.

Kapitola 4 zahrnuje implementaci generátoru superkontinua do testovacího uspořádání podobného plánovaným aplikacím. Toto testování proběhlo úspěšně, což je třeba opět vyzdvihnout. Kapitola 5 se zabývá popisem finálních aplikací v laserových systémech L2-DUHA a L1-Allegra, některé části již byly realizovány, některé čekají na implementaci.

Ing. Indra je spoluautorem řady konferenčních příspěvků (včetně proceedings) a 3 publikací v recenzovaných časopisech. Je prvním autorem článku v Optics Letters, který ukázal poprvé stabilní generování superkontinua pomocí pikosekundových pulzů v YAG krystalu. Jeho přínos k experimentu v ELI Beamlines je velmi významný. Na druhou stranu, předložený manuskript disertační práce vykazuje celou řadu nedostatků a autor by potřeboval získat více zkušeností v psaní vědeckých zpráv a článků. Vycházím z předpokladu, že autor během obhajoby podá přehlednou a precizní zprávu o výsledcích své disertace včetně detailních odpovědí na vznesené otázky. V tomto smyslu doporučuji práci k obhajobě.

Připomínky:

(tato příloha je míněna zejména jako reference a zpětná vazba pro autora a níže uvedené připomínky nemusí být součástí diskuse během ústní obhajoby)

Kapitola 1:

A. Příklady nejasných větných formulací

- str. 6: pulse splitting místo beam splitting, jedná se o rozdělení pulzu v čase;
- str. 6 a str. 20: broadening of the pulse spectrum místo broadening of the pulse;
- str. 7: B -integral varies by a factor of one lépe formulovat jako B -integral changes by a value of one, „factor“ se většinou chápe jako násobící;
- str. 7: v odstavci pod rovnicí (3) je třeba alespoň jednou uvést, že je zde míněn špičkový výkon pulzu;
- str. 10: The necessary condition ... it can be a limiting factor for some materials – větu je třeba přerformulovat – co je zde limitujícím faktorem?;
- obdobně věta str. 12 ... maximum intensity in the crystal changes very little with respect to the input energy;
- str. 17: neměří se „temporal profile“ pulzu, ale jeho autokorelační funkce – důležité k pochopení obr. 7

B. Nejasné či nepřesné rovnice

- Rovnice (7) popisuje multifotonovou ionizaci, avšak z textu a z odhadů se zdá, že v této práci dochází převážně k ionizaci v tunelovacím režimu. Doporučil bych teoretickou práci H. R. Reiss, Phys. Rev. A **22**, 1786 (1980), která dle mého popisuje obojí zároveň, ale je jasné, že překračuje rámec této disertace. K dalšímu studiu též doporučuji přehledový článek J. H. Posthumus, Rep. Prog. Phys. **67**, 623 (2004).
- Rovnici (8) není možné nalézt v referenci [48]; je možné ji samozřejmě odvodit z Drudeho formule, nicméně podle mého názoru pak v (9) chybí n_0 .

C. Obrázky

- autor systematicky neudává podmínky experimentu či výpočtu v přejatých obrázcích. Udává pouze citaci a k pochopení obrázku tedy čtenář vždy musí vyhledat příslušnou referenci. V přehledových člancích se vždy nejdůležitější podmínky v popiskách k obrázkům uvádějí.

- Obr. 6: není jasné, co je míněno pojmem „original pulse“, neboť tento pulz již neexistuje. Za jakých podmínek bylo toto určeno?

- Obr. 9: bylo by vhodné uvést alespoň špičkové výkony v pulzech.

- Obr. 10 a 11 jsou bez dalšího komentáře a bez specifikování parametrů zcela zbytečné.

D. Přesnost odhadů

Autor by měl být konzistentní v numerických odhadech a udávat vždy relevantní počet platných číslic

Kapitola 2:

Pečlivější kontrola textu by autorovi velmi rychle umožnila odhalit spoustu nedostatků (Bragg vs. bragg vs. brag; losses vs. loses, $\lambda/4$ vs. $L/4$)

Bylo by vhodné uvést k popisu měření profilu a stabilizaci laserové dutiny (obr. 24) jak často se měří referenční obraz svazku a jaká je časová konstanta stabilizace svazku (beam centering).

Kapitola 3:

Údaje pro fokusaci čerpacího svazku uvnitř krystalu YAG na str. 44 jsou zavádějící. Ohnisko se posune kvůli Snellovu zákonu, čili, podle mého názoru, se pro uvažovanou polohu ohniska uvnitř krystalu 2 cm od jeho konce bude ve skutečnosti ohnisko nacházet až za krystalem (posuv $= d - d/n$).

Při optimalizaci vzdálenosti mezi čočkou a krystalem YAG byla změřena stabilita výstupu 0.39% RMS (odst. 3.4) a toto minimum RMS bylo poměrně ploché vůči optimalizovanému parametru; v následujícím odstavci vychází pro jednu z těchto vzdáleností a při optimalizaci volby fokusující čočky 0.77%. Diskrepance není zmíněna ani diskutována.

Ještě větší diskrepanci nalezneme mezi obrázky 34 a 35 a to téměř ve všech výstupních parametrech: v prahové čerpací intenzitě, v intenzitě superkontinua, v tvaru křivek i celkové stabilitě (příčemž u obrázku 35 nejsou žádné údaje o parametrech experimentu).

Obrázek 39 je zcela zbytečný. Vztahuje se ke specifickým experimentálním podmínkám, které však nejsou uvedeny. Jakmile se tyto podmínky změní, změřené body se rovněž změní. Pokud by autor chtěl např. poukázat na linearitu této závislosti, měl by ji alespoň komentovat.

Otázky:

(tyto dotazy by měly být podkladem pro diskusi při obhajobě)

1. Prosím o celkové shrnutí výsledků práce dosažených autorem disertace.

2. Prosím o vysvětlení průběhu velikosti svazku v dutině tenkodiskového zesilovače (Obr. 19). Domnívám se, že v textu nad obrázkem je uvedeno špatné znaménko u koncového zrcadla (má být $r = +1$ m); podle obrázku bych odhadl, že je špatné znaménko i u poloměru křivosti laserové hlavy. Obrázku by prospělo uvedení poloh jednotlivých elementů v dutině vůči vodorovné ose grafu.

3. Jak velký je svazek na výstupu z kompresoru? Pro jeho zobrazení (po kompresi) se používá čočkový teleskop: mohou se zde projevit nelinearity vlivem šíření pulzu v čočkách?

4. Prosím, aby autor uvedl detailní komentář k volbě optimálních parametrů generování superkontinua, též s přihlédnutím ke kritickým komentářům v posudku.

5. Kompresor zesilovače umožňuje kontrolovat délku výstupních pulzů kompenzací nelineární fáze pulzů (zejména kompenzací fázového členu 2. řádu popisujícího tzv. chirp). B-integrál popisuje nelineární modulaci fáze vlivem šíření pulzů v materiálovém prostředí. Tyto dva experimentální parametry tedy spolu souvisí. Prosím, aby byla uvedena do souvislosti měření v závislosti na poloze mřížek kompresoru a na počtu oběhů pulzu v rezonátoru. Byly při měřeních se změnami B-integrálu měněny pozice kompresoru? Byla přitom měřena délka pulzů? Jakým způsobem spolu tato měření korespondují?

6. Prosím o vysvětlení, který zjevů na obrázku 52 se vztahuje k zmiňovanému „supercontinuum halo“.

7. Prosím o komentář k multifilamentaci pozorované na obr. 30. Autor se odvolává na odst. 1.4, kde se však o více filamentech nehovoří (pouze o refokusaci svazku; na obr. 2 je např. jedním filamentem popsána několikerá refokusace). Na obr. 30(a) jsou však vidět dva filameny nad sebou.

V Praze dne 19.9.2023

Doc. RNDr. Petr Kužel, PhD
Fyzikální ústav AVČR
Na Slovance 2
182 21 Praha 8