

Oponentský posudek na disertační práci Ing. Josefa Cupala „Influence of gain medium birefringence on temporal pulse contrast in high peak power laser amplifiers“

Disertační práce Ing. Cupala je věnována velmi náročné problematice časového kontrastu optických impulsů generovaných laserem L3-HAPLS o špičkovém výkonu řádu petawattů, který je v současnosti připravován pro interakční experimenty v ELI Beamlines. Výsledky této práce mají zásadní význam pro pochopení příčin vzniku parazitních předimpulsů před hlavním optickým impulsem, které je nezbytným předpokladem pro jejich účinné potlačení. Vzhledem k velmi vysokému špičkovému výkonu hlavního impulsu je třeba tyto předimpulzy potlačit na úroveň o mnoho (deset i více) řádů menší, jinak dojde k nežádoucímu ovlivnění interakčního terče před příchodem hlavního impulsu, a tím i ke zkreslení, případně úplného znehodnocení výsledku interakčního experimentu.

Název práce odkazuje na vliv dvojlomu aktivního prostředí optických zesilovačů, které tvoří krystaly safíru dopované titanem, ale příčin vzniku parazitních impulsů, které byly identifikovány v průběhu práce na disertaci, je víc. Disertační práce má proto mnohem širší odborný záběr, jak je zřejmé z následujícího stručného popisu jejího obsahu.

Práce o celkovém rozsahu 118 stran je psaná v angličtině a – kromě úvodu a závěru – je rozdělena do šesti kapitol. V první kapitole je popsán současný stav vývoje impulsních laserů s velmi vysokou hustotou výkonu a jsou stručně popsány metody měření a potlačení předimpulsů. Je rovněž stručně popsána konstrukce laseru L3-HAPLS v ELI Beamlines, jemuž je práce věnována. Druhá kapitola je věnována vlastnostem disperzně „rozmítnutých“ (stretched) optických impulsů a jejich matematickému popisu. Je zde zaveden i popis polarizace optického záření pomocí Jonesova formalismu a vliv kerrovské nelinearity prostředí způsobující automodulaci a křížovou modulaci fáze šířícího se impulsu. Ve třetí kapitole je analyzován vznik postimpulsu ve dvojlomném prostředí a jeho konverze („zrcadlení“) na předimpuls vlivem kerrovské nelinearity s následnou kompresí a fokusací na terč. Poměrně stručná čtvrtá kapitola se zabývá dalším parazitním jevem – nehomogenitou orientace optické osy ve velkých titan-safírových krystalech používaných jako aktivní prostředí ve druhém zesilovacím stupni laseru. Byla vypracována původní metodika získání prostorově rozlišených map orientace optické osy využívající Jonesova formalismu, která zjistila významné odchylky orientace optické osy v určitých částech krystalu. Analýza ukázala, že vliv těchto odchylek se projeví méně, když jsou tyto krystaly umístěny v zesilovači jako krajní disky. Velmi obsáhlá pátá kapitola tvoří jádro práce, odpovídající jejímu názvu. Je v ní popsán podrobný numerický model celého zesilovače s dvojlomným aktivním prostředím založený na diskrétní Fourierově transformaci umožňující analyzovat vliv jednotlivých optických prvků, odchylek od jejich ideálního nastavení i vliv domén s odchylkou optické osy v aktivních krystalech na časový kontrast vzniklých předimpulsů. Poslední, šestá kapitola, popisuje metody potlačení předimpulsů vznikajících v různých místech zesilovače.

Práce obsahuje seznam autorových publikací se vztahem k disertaci, seznam citované literatury o 80 položkách a dodatek – tabulku disperzních koeficientů (do pátého řádu disperse) materiálů užívaných v petawattových laserech.

Disertační práce nepochybně představuje původní velmi kvalitní a široce zaměřené fyzikálně inženýrské dílo. Má přímý praktický přínos pro zdokonalování parametrů laseru L3-HAPLS pro interakční experimenty i jeho další aplikace v ELI Beamlines, ale některé výsledky – např. metoda testování prostorového rozložení orientace optické osy krystalů titan-safíru nebo numerický model zesilovače s dvojlomným aktivním prostředím mohou najít uplatnění i při vývoji jiných laserových petawattových systémů ve světě. Zvlášť je třeba ocenit úspěšný široký záběr práce, který zdaleka není omezen jen na analýzu vlivu anizotropie aktivního prostředí na časový kontrast impulsů, ale úspěšně řeší i další fyzikální a technické problémy, které mají vliv

na snížení časového kontrastu. Všechna řešení vycházejí z hlubokého teoretického porozumění relevantním fyzikálním procesům. Dobrým příkladem je sestavení komplexního numerického modelu laserového zesilovače rozmítnutých impulsů s anizotropním aktivním prostředím, jehož výsledky s ohledem na jeho složitost a řadu zjednodušujících aproximací použitých při jeho vývoji až překvapivě dobře souhlasí s experimenty, jak dokumentují grafy na obr. 5.9 a 5.10 na str. 80 a 81. Úspěšné omezení vlivu rozptylu na nedokonale vyleštěných čelních plochách titan-safirových disků druhého zesilovače a potlačení předimpulsů vznikajících v prvním zesilovači (výměnou foliových polarizátorů za krystalové, odstraněním rozptylu záření zesílené spontánní emise na clonce apod.) svědčí o autorově smyslu pro řešení praktických technických problémů, které jsou neodmyslitelnou součástí vývoje nových zařízení.

Práce je psána srozumitelnou angličtinou, kterou dost dobře nemohu z pozice nerodilého mluvčího detailněji hodnotit. Překlepy se vyskytují v minimálním počtu a nijak neovlivňují porozumění textu. Obrázky, grafy a tabulky jsou použity účelně a mají standardní velmi dobrou kvalitu.

Určitý problém pro porozumění při plynulém čtení představovalo používání pojmů a symbolů, které byly podrobněji definovány až později v dalším textu. Typickou ukázkou je použití pojmu B-integrál, který se vyskytuje bez vysvětlení jeho významu na straně 27, přičemž jeho vysvětlení je uvedeno až na konci další strany. Snazší orientaci by také pomohlo uvedení seznamu častěji používaných symbolů (např. koeficientu β). Pro frekvenční závislost spektra impulsu (označovanou ne zcela přesným, ale již vžitým pojmem *spektrální fáze*) se na různých místech v práci používají výrazy $\phi(\omega)$, $\Phi(\omega)$, $\phi(\Omega)$ a $\Phi(\Omega)$, kde $\Omega = \omega - \omega_0$, ω_0 je nosná frekvence optického impulsu; tyto výrazy mají zřejmě též význam.

Poněkud nerozumím vztahu (2.5) na str. 21; zřejmě by vyžadoval bližší vysvětlení. Intenzita elektrického pole je vektorová veličina, a vztah mezi jejími hodnotami na rozhraní prostředí závisí na orientaci jejího vektoru vůči rovině rozhraní (tečné složky intenzity elektrického pole jsou na rozhraní spojité, $E_2 = E_1$, zatímco pro normálové složky platí vztah $n_2^2 E_2 = n_1^2 E_1$). Do energetické bilance na dielektrickém rozhraní je samozřejmě třeba započítat dopadající, prošlou i odraženou vlnu. Nerozumím rovněž větě bezprostředně následující za vztahem (2.5); proč je možno nebrat v úvahu index lomu ve vztahu (2.2) v případě dielektrického prostředí? Dále se domnívám, že správný tvar vztahu (2.9) je

$$\tilde{\mathcal{E}}(\omega) = \frac{1}{2} \tilde{E}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \tilde{E}^*(-\omega + \omega_0).$$

V článku 2.4 je zmínka o tom, že ve dvojlomném prostředí se obecně šíří řádná a mimořádná vlna. To je ale platí jen pro jednoosé prostředí; ve dvojosém prostředí (správně charakterizovaném v následující kapitole 3) jsou obecně obě vlny „mimořádné“.

Velmi rozumím tomu a oceňuji, že autor vychází z detailního teoretického popisu šíření optického záření v anizotropním prostředí, podrobně analyzuje disperzi jako lineární proces fázové modulace spektra impulsu a detailně popisuje i princip elektrooptických modulátorů využívajících lineární (Pockelsův, nikoli Pockelův) elektrooptický jev; vzhledem k velkému rozsahu práce by však patrně stačilo uvést jen potřebné vztahy s příslušnými odkazy na zdrojovou literaturu. Odkaz na původní prameny by určitě neměl chybět u tabulky disperzních koeficientů materiálů v dodatku A.

Těchto několik poznámek nijak nesnižuje kvalitu předložené práce a nepovažuji za nutné se k nim vracet v průběhu obhajoby. Ocenil bych však, kdyby se autor při obhajobě mohl vyjádřit k následujícím dotazům či poznámkám:

1. Z optických schémat laserových zesilovačů na obr. 3.7 a 5.12 mi není příliš jasná funkce zrcadel; uvítal bych názornější objasnění, jakým způsobem se zajišťuje násobný průchod svazku aktivními prostředími obou zesilovačů. Podobně ze schematického uspořádání Beta zesilovače na obr. 6.3 mi není jasné, kudy vystupuje zesílený svazek ze zesilovače.
2. Zajímaly by mě bližší údaje o rozsahu vyvinutého programu pro modelování zesilovače s dvojlomným aktivním prostředím, popsaného v kapitole 5. Jaké byly nároky na operační paměť a dobu výpočtu při použití jemného vzorkování s plným počtem 2^{20} vzorků, případně jaké byly základní parametry počítače, na kterém byl výpočet prováděn.
3. Použití dvou dazzlerů v zesilovacím řetězci má jistě velký vliv na celkovou energetickou bilanci zesilovače vzhledem k jejich malé difrakční účinnosti. Proč je jejich aplikace nezbytná, resp. jakou korekci disperze v zesilovači zajišťují?

Závěr: Po prostudování a zhodnocení práce jsem dospěl k jednoznačnému závěru, že předložená disertační práce Ing. Josefa Cupala obsahuje hodnotné původní výsledky a splňuje všechny požadavky na disertační práci kladené příslušnými předpisy. Proto práci doporučuji k obhajobě k získání titulu Ph.D.

Ve Velkých Přílepech 15. července 2022


prof. Ing. Jiří Ctýroký, DrSc.