

Development of high-repetition-rate picosecond thin-disk lasers

autor disertace: Ing. Jiří Mužík

školitel: Prof. Ing. Václav Kubeček, DrSc.

školitel-specialista: Ing. Martin Smrž, Ph.D.

studijní program: Aplikace přírodních věd

Katedra fyzikální elektroniky FJFI ČVUT v Praze

Aktuálnost tématu práce:

Téma předložené disertační práce je z oblasti pulzních laserů s vysokým průměrným výkonem, vysokou účinností a kvalitou svazku. Vysoká aktuálnost tématu práce má podle mého názoru zejména dva důvody: za prvé lasery se stávají nástrojem v čím dál více oblastech lidských aktivit, s nasazením diodově čerpaných laserů se jedná i o energeticky účinný nástroj, a výzkum laserů je celosvětově stále v popředí zájmu. Druhým důvodem aktuálnosti tématu práce je její přesah k rozvoji českého optického průmyslu, jak v oblasti materiálového výzkumu, návrhu a výroby optických komponent, tak sestavování laserových systémů. V práci jsou zkoumány nové typy laserových krystalů a nejrozsáhlejší část je pak věnována vývoji pikosekundového laserového systému na bázi tenkodiskového laseru s průměrným výkonem přes 0.5 kW.

Metody zpracování:

V rešeršní části autor podává srozumitelný a výstižný přehled znalostí potřebných k vysvětlení výsledků. Popisuje současný stav znalostí v oblasti materiálů pro pevnolátkové lasery s ohledem na jejich využití pro generaci ultrakrátkých optických pulzů, podrobněji se pak věnuje přehledu ytterbiem a erbiem dopovaných materiálů a efektu kryogenního chlazení na tvar emisního a absorpčního spektra. Dále je popsán stručně princip metody zesilování čerpaných pulzů (chirped pulse amplification, CPA) a některé pokročilé geometrie aktivního prostředí umožňující lepší chlazení než tradiční geometrie aktivního prostředí ve tvaru tyčinky. Oceňuji uceleně a poutavě napsaný úvod s historickou retrospektivou vývoje laserů a jejich aplikací. Z rešeršní části je zřejmé, že autor prokázal dobré pochopení teoretických základů i praktických technologických dovedností, které jsou důležité pro splnění cílů práce.

Rozbor výsledků odpovídá definovaným cílům:

1. Výzkum nových typů laserových materiálů s potenciálem na rozšíření možností technologie tenkodiskových laserů nad rámec dosud využívaných Yb:YAG disků, a to jednak pro pulzní lasery v oblasti 1 mikrometru a jednak pro generaci záření v oblasti kolem 3 mikrometrů.
2. Návrh, vývoj a zprovoznění laserového systému na bázi Yb:YAG tenkého disku s průměrným výkonem přes 0.5 kW, opakovací frekvencí 50 ... 200 kHz, délkou pulzů pod 2 ps a parametrem svazku $M^2 < 1.5$.

Autor otestoval nový typ aktivního prostředí dopovaného ytterbiem, experimentální vzorek Yb:YAG keramiky od firmy Konoshima Chemical, který má širší emisní spektrum v okolí 1030 nm již při pokojové teplotě, především pak má cca čtyřnásobnou šířku spektra při chlazení v kryostatu,

než běžně používané krystaly Yb:YAG. Vskutku, doktorandovi se podařilo získat pomocí tohoto krystalu 2.4 ps dlouhé pulzy, tedy cca 4x kratší, než v podobném laserovém uspořádání s krystalem Yb:YAG, a potvrdil tak potenciál nového materiálu pro generaci ultrakrátkých pulzů. S několika vzorky erbiem dopované keramiky Er:Y₂O₃ studoval emisi v okolí vlnové délky 2.7 μm a dosáhl bezmála 1 W výstupního výkonu v kontinuálním režimu. Nejrozsáhlejší a nejzodpovědnější část práce představuje vývoj vysokovýkonového pikosekundového laseru PERLA-C s posledním výkonovým stupněm na bázi tenkého disku dopovaného ytterbiem. Ve době návrhu představoval tento laserový systém rekordní parametry a stále je na světové špičce ve své kategorii výkonových pulzních laserů. I když většina systému je sestavena z komerčně dostupných součástí, musel doktorand vyřešit řadu složitých technických problémů, v literatuře obvykle detailně nepopisovaných. V průběhu vývoje a sestavování laseru se vyskytlo několik úloh zajímavých i pro širší vědeckou komunitu, ty jsou publikovány v samostatných článcích nebo konferenčních příspěvcích, např. problematika komprese pulzů v objemových mřížkách, generace vyšších harmonických frekvencí, nebo aplikace laserového systému pro laserové zpracování vrstev TiO₂ nanotrubiček. Některé úlohy by samy o sobě dostačovaly na samostatnou disertační práci. Oceňuji, že doktorand zvolil plný formát disertační práce, a nikoliv jen komentovaný soubor prací. Zvolený formát mu lépe umožnil chronologicky popsat práce na vývoji laserového systému PERLA C. Tento podrobný postup prací bude jistě velmi cenným zdrojem informací nejen pro jeho kolegy v HiLASE.

Metody měření i výsledky jsou dostatečně podrobně popsány a splnění deklarovaných cílů je zřejmé. Je patrné, že splnění cílů práce představovalo velké úsilí, zvláště v případě organizačně a týmově extrémně náročného sestavování výkonového zdroje pulzů PERLA C.

Práce je dostatečně přehledná, má všechny formální náležitosti a odpovídající úpravu. Je znát, že text práce byl pečlivě zkontrolován a obsahuje velmi málo překlepů nebo stylistických nepřesností. Snad jen dvě nepřesnosti: v popisu obrázku 4.11 by bylo vhodnější použít označení *rf spectrum* místo *microwave spectrum* a na str. 13 je překlep v označení erbových hladin ⁴I_{11/2} a ⁴I_{13/2} kde je použito písmeno H místo I, v obrázku 2.2 a v dalším textu je však označení hladin již správně. Členění práce považuji za logické a úpravu výbornou.

Výsledky a vědecký přínos práce:

Autor práce měl vynikající možnost podílet se na výzkumu laserů se světově unikátními výkonovými parametry vyvíjené v centru HiLASE. Naskytnutých šancí velmi dobře využil ku prospěchu rozvoje této problematiky. Mohl též spolupracovat s řadou předních odborníků v oboru z různých výzkumných pracovišť, včetně komerčních a zahraničních. Je to patrné ze seznamu publikací. Jedná se o 11 článků v impaktovaných časopisech, jedna kapitola v knize a celá řada konferenčních příspěvků. U impaktových publikací je u sedmi publikací mezi prvními třemi autory (na dvou publikacích je prvním z autorů) a je tedy zřejmý klíčový podíl autora disertace na vzniku těchto prací.

Za významné výsledky a přínos považuji výzkum nových typů laserových krystalů pro pulzní lasery v okolí 1 mikrometru a pro zdroje záření v okolí 2.7 mikrometru. Hlavní výsledek je pak samotný výkonový zdroj pulzů PERLA C, kde doktorand prokázal i velké organizační schopnosti, píli a vůli.

Splnění cílů:

Podle mého názoru předložená práce splňuje všechny stanovené cíle a vyhovuje formálním a faktickým požadavkům kladeným na tento druh prací. Doporučuji proto práci k obhajobě před komisí a v případě její úspěšné obhajoby Jiřímu Mužíkovi udělit vědecko-akademickou hodnost Ph. D. (doktor).

Otázky do diskuse při obhajobě:

1. V první verzi ytterbiového, dopředně čerpaného vláknového zesilovače autor zmínil vysokou úroveň zesílené spontánní emise (amplified spontaneous emission, ASE), kvůli které nebylo možné plně využít dostupný výkon optického čerpání (str. 57). Zkoušel již v první verzi vláknového zesilovače odstranit problém ASE také optimalizací délky vlákna, např. numerickým modelem, příp. použitím protisměrného čerpání? V druhé verzi již optimalizace délky vlákna numerickým modelem a protisměrné čerpání použité bylo. Byla v numerickém modelu vzata do úvahy ASE? Na str. 61 je zmíněno, že protisměrné čerpání snižuje vliv nelineárních jevů; k tomu by bylo hodné doplnit, že protisměrné čerpání také může omezit vliv ASE a zvýšit výkonovou konverzní účinnost vláknového zesilovače.
2. Na str. 70 je uvedeno, že byla navržena definovaná sada kroků pro nastavení kruhového rezonátoru výstupního výkonového stupně. Uvedl byste některé základní kroky z tohoto postupu? Definovanou sadu kroků je nutné provádět ručně operátorem, nebo je možné nastavení provádět automaticky, např. po spuštění laserového systému? Souvisí toto nastavení s automatickým nastavením optického rezonátoru, které je zmíněno na str. 81?
3. V první verzi byl použit vláknový oscilátor GO-pico, avšak na str. 55 je uvedeno, že v druhé verzi byl použit pevnolátkový oscilátor Onefive-Origami, který byl stabilnější. Mohl byste porovnat klíčové vlastnosti obou zdrojů optických pulzů a zdůvodnit, který parametr je pro stabilitu celého systému Perla nejdůležitější? Souvisí stabilita zdroje pulzů s délkou rezonátoru, která je u vláknového zdroje řádově delší a tedy náchylnější na teplotní změny optické délky rezonátoru?

V Praze, dne 25. srpna 2021

doc. Ing. Pavel Peterka, Ph.D.
Ústav fotoniky a elektroniky
Akademie věd České republiky, v.v.i.
Chaberská 57
182 51 Praha 8 – Kobylisy