

## Oponentský posudek bakalářské práce

Název práce: Tm:YAG mikročipový laser diodově čerpaný na 1,7  $\mu\text{m}$

Studentka: Veronika Čírtková

Southampton, 8. srpna 2023

Předložená bakalářská práce na téma Tm:YAG mikročipový laser diodově čerpaný na 1,7  $\mu\text{m}$  studentky Veroniky Čírtkové byla vypracována v laboratořích KFE, FJFI, ČVUT v Praze. Cílem práce bylo seznámit se problematikou Tm-dopovaných aktivních prostředí a konstrukcí thuliových laserů čerpaných rezonančně v oblasti vlnové délky 1,7  $\mu\text{m}$ . Dále pak prozkoumat spektroskopické vlastnosti dostupných Tm:YAG krystalů a následně charakterizovat mikročipový Tm:YAG laser.

Bakalářská práce je psána česky, sestává celkem z 48 stran, je rozdělena na úvod, rešerši (obsahující dvě kapitoly), experimenty (obsahující dvě kapitoly), závěr a literaturu. V rešeršní části se autorka věnuje základním poznatkům o fungování laserů a pevnolátkovým laserům. Několik stran je rovněž věnováno thuliem dopovaným aktivním prostředím. Experimentální část práce obsahuje nejprve popis přístrojů a experimentů. Následně jsou prezentovány výsledky spektroskopických měření (absorpční, emisní spektra a fluorescenční doby života) na krystalech Tm:YAG a dále výsledky laserových měření na několika Tm:YAG mikročipových krystalech s různým uspořádáním nedopovaných koncovek YAG krystalu.

Po vizuální i jazykové stránce je práce zdařilá a neobsahuje gramatické chyby. Bohužel se v práci objevují typografické chyby, nepřesné a zavádějící formulace, zapomenuté komentáře autorky a chyby v citacích. Rešeršní část obsahující popis Tm-dopovaných aktivních prostředí je poměrně stručná. Přesto, že je zde uveden popis Tm:YAG krystalu, postrádám zde bližší srovnání s dalšími aktivními prostředím (Tm:YLF, Tm:YAP, Tm:sklo) a rovněž detailní popis procesu cross-relaxace a energetických přechodů, které jsou pro tyto aktivní prostředí zásadní. Detailně viz poznámky níže. Nicméně práce obsahuje mnoho experimentálních dat, dosažených při rezonančním čerpání, které byly prezentovány na mezinárodní konferenci, z čehož je vidět, že autorka dosáhla zajímavých výsledků.

### K práci mám konkrétní připomínky:

1. V práci se několikrát opakují chyby v citacích (strany 7, 8, 11, 13, 14) a odkazech na obrázky (strany 9, 19, 23). Na stranách 9 a 14 pak bloky textu úplně bez citací.
2. Ve schématu energetických hladin (strana 16) chybí vyznačený čerpací přechod pro rezonanční čerpání.
3. V práci jsou pozůstatky komentářů autorky z procesu psaní práce, které zapomněla smazat (strany 9 a 19), což kazí dojem z finální verze práce, podobně jako špatné citace.
4. Na straně 11 je uvedeno: „Diodové lasery mají velmi nízký práh generace okolo 10-100 mA.“ Toto obecně nemusí platit pro vysokovýkonné diody, kde se práh nachází nad 1 A, například diody nLight (90 W @ 793 nm, práh 1.1 A).
5. Poněkud zarážející je rozdělení laserů na straně 9. Kategorie pevnolátkových laserů neobsahuje lasery diodové a vláknové lasery, přesto, že do ní spadají, tyto jsou uvedeny jako specifické skupiny. U vláknových laserů je uvedeno: „... jejich fungování je však odlišné od běžných pevnolátkových laserů.“ Odlišná je pouze geometrie vláknových laserů, princip funkce je stále stejný. Dále pak autorka uvádí: „Vláknové lasery mohou být mnohem delší než klasické pevnolátkové lasery, a proto stačí nižší koncentrace dopantů.“, toto obecně neplatí. Především u thuliových vláknových laserů, kde se koncentrace mohou pohybovat i přes 4 wt. % (podle aplikace). Celkově je popis vláknových laserů velmi zavádějící a jednodušší by bylo ho v práci vynechat.
6. Na straně 13 je u keramiky uvedeno: „Její tepelná vodivost je lepší než u skla, a zároveň může být více dopovaná než krystaly.“ Toto je opět zavádějící, například Er:YAG krystaly pro emisi na 3  $\mu\text{m}$  běžně obsahují 50 % Er<sup>3+</sup>.
7. Strana 18: „Namísto čerpání standardní vlnovou délkou 785 nm se může použít i diodové čerpání na vedlejším maximu 805 nm. Absorpční účinný průřez je tu nižší, ale na této délce vyzářují

spolehlivější diody.“ Toto tvrzení je zavádějící. Na vlnových délkách  $\sim 790$  nm jsou komerčně dostupné spolehlivé a vysokovýkonné diody od několika firem.

8. Na straně 19 autorka uvádí, že čerpání vlnovou délkou  $1,7 \mu\text{m}$  je okrajová záležitost a důvodem nevyužívání těchto diod je jejich malá rozšířenost. Zde je zásadní problém, škálování výstupního výkonu Tm-laserů. Z mého pohledu je hlavní problém v nedostupnosti diod  $1,7 \mu\text{m}$  s vysokým jasem, tedy diod s vysokým výkonem navázaným do vlákna s malým průměrem, typicky  $105 \mu\text{m}$ . Nejvýkonnější diody dosahují výkonu  $60 \text{ W @ } 1710 \text{ nm}$  a to ve  $400 \mu\text{m}$  vlákne, což je v porovnání s  $180 \text{ W @ } 790 \text{ nm}$  ve  $105 \mu\text{m}$  velmi nízký výstupní výkon i jas. Právě čerpání pak hraje zásadní roli v navýšení výstupních výkonů.
9. V experimentální části mi chybí fotografie zkoumaných krystalů, které mohly být zajímavé a názorné právě díky různým nedopovaným koncovkám YAG krystalu.
10. Strana 25, wattmetr Molektron EMP2000 je chybně označen za výkonovou měрку.
11. Na straně 32 je prezentované spektrum vykreslené v bodovém grafu, přesto, že pro všechna ostatní spektra jsou použity spojitě křivkové grafy. Spektra se běžně vykreslují spojitě.
12. Další větší nedostatek vidím v závěru práce, kde chybí alespoň stručné shrnutí výsledků, nějaká přehledová tabulka nebo zhodnocení či porovnání jednotlivých kompozitových krystalů. Stejně tak srovnání spektroskopických výsledků s literaturou, např.: DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.05.070.

#### K předložené práci mám následující dotazy:

1. V úvodu autorka uvádí, že je vlnová délka  $2 \mu\text{m}$  je zajímavá pro komunikace. Jsou tím myšleny optické komunikace ve vlákne nebo jiný typ? Mohla by toto autorka blíže popsat.
2. Na straně 6, v popisu inverze populace hladin, je uvedeno: „Při inverzi populace převládne stimulovaná emise fotonů nad absorpcí a dojde k zesílení dopadajícího záření.“ Tato věta nedává smysl ani v kontextu odstavce v práci. Mohla by autora popsat proces stimulované emise a vysvětlit princip funkce laseru.
3. V práci jsem postrádal výsledky exponenciálního poklesu doby dohasínání fluorescence. Alespoň jeden graf, jako zástupce. Mohla byste ho prezentovat spolu s fitovací funkcí a popsat, zda byl pokles čistě jednoexponenciální nebo jste pozorovala nějaké odchylky?
4. V práci chybí časová charakteristika laserů, můžete prezentovat nějaký graf (např. pro pulsní režim laseru)? Ve výsledných grafech pro pulsní i CW režim je vidět, že při vyšších čerpacích výkonech dochází k rolování výstupního výkonu. Mohla byste vysvětlit proč, případně jak tomu zamezit?

Práce svým rozsahem i obsahem odpovídá požadavků kladeným na bakalářskou práci a jsem přesvědčen, že autorka splnila všechny podmínky, kladené na tento typ práce. Závěrem mohu konstatovat, že autorka splnila zadání bakalářské práce. Bohužel, vzhledem k výše uvedeným nedostatkům navrhuji kvalifikovat předloženou bakalářskou práci stupněm **D- uspokojivě**.



Richard Švejkar, Ph.D.  
Research Fellow

University of Southampton  
Optoelectronics Research Centre (ORC)