

Oponentní posudek doktorské disertační práce

## **Lasers generating radiation in the mid-infrared region of the electromagnetic spectrum**

autor disertace: Ing. Adam Říha  
školitel: prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc.  
školitel-specialista: Ing. Michal Němec, Ph.D.  
studijní program: Aplikace přírodních věd  
Katedra fyzikální elektroniky FJFI ČVUT v Praze

### **Aktuálnost tématu práce:**

Téma předložené disertační práce je z oblasti nových typů pevnolátkových laserů určených pro vlnové délky ze střední infračervené oblasti spektra (nad 3  $\mu\text{m}$ , v rozšířeném pojetí již od 2  $\mu\text{m}$ ), které jsou dosud jen málo pokryty pevnolátkovými lasery. Vysoká aktuálnost tématu práce má podle mého názoru zejména dva důvody: lasery ze střední infračervené oblasti mají velké množství významných aplikací, např. ve spektroskopii, medicíně, zpracování materiálu, obraně, LIDARech, nebo nelineární optice. Druhým důvodem aktuálnosti tématu práce je, že pevnolátkové lasery mohou být cenově dostupnější a kompaktnější ve srovnání s laserovými zdroji založenými na optickém parametrickém zesilování. Plynové lasery v mid-IR, jako CO nebo CO<sub>2</sub> lasery, zase mají omezené spektrum vlnových délek. Zkoumané lasery na bázi krystalů dopovaných prvky přechodových kovů se oproti tomu vyznačují širokým pásem zesílení a tedy i přeladitelností, v práci jsou konkrétně studovány laserové přechody dvojmocného iontu chromu Cr<sup>2+</sup> v okolí 2.1 – 2.7  $\mu\text{m}$  a dvojmocného iontu železa Fe<sup>2+</sup> v rozsahu 3.95 – 6.05  $\mu\text{m}$ .

### **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 ve střední infračervené oblasti, podrobněji se pak věnuje přehledu Cr<sup>2+</sup> a Fe<sup>2+</sup> dopovaných chalkogenidových krystalech ZnSe včetně jejich spektroskopie. Dále jsou popsány metody optického čerpání a příklady laserů pracujícím jak v kontinuálním, tak pulzním (Q-spínaném a vidově synchronizovaném) režimu. 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 výzkumu nových typů laserových krystalů na bázi ZnSe dopovaného buď Cr<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, nebo oběma přechodovými kovy. Byl také zkoumán vliv příměsí manganu, magnezia a kadmia na posun vlnové délky. Mezi cíle patřilo dále porovnání různých metod optického

čerpání, různých režimů laseru a teplotní závislostí, jakož i spektroskopická charakterizace studovaných aktivních materiálů.

Nové typy aktivních prostředí, chalkogenidové krystaly, byly získány ze zahraničních spolupracujících laboratoří, avšak úkol jejich celkové charakterizace byl velice rozsáhlý, jak počtem měření, tvorbou nových měřicích sestav, tak zpracováním a rozbořem měření. Odpovídá tomu i velké množství publikací, které v rámci autorova doktorského studia vznikly. Charakterizace daného materiálu zahrnovala zpravidla měření absorpčního koeficientu, tvaru fluorescenčního spektra, změnu tvaru spekter s teplotou, měření fluorescenční doby života, příp. její závislosti na teplotě. Podrobně je rovněž zpracovaná část týkající se charakterizace přenosu energie z  $\text{Cr}^{2+}$  na  $\text{Fe}^{2+}$ , odhadovaná účinnost tohoto způsobu čerpání přesahovala 50 % ve vzorku  $\text{Cr}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ :ZnMnSe s vysokým obsahem (30 %) manganu. Testování nových materiálů v laseru pak zahrnovalo měření prahu a diferenciální účinnosti (slope efficiency) při různých typech čerpání, odrazivostech výstupního zrcadla a v různých režimech laseru, jak kontinuálních, tak pulzních a jejich teplotní závislosti jakož i měření kvality svazku. Ve vhodných případech byla zkoumána přeladitelnost laseru.

Metody měření i výsledky jsou dostatečně podrobně popsány a splnění deklarovaných cílů je zřejmé. Je patrné, že splnění cílů práce představovalo velké experimentální úsilí.

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 jednu nepřesnost: na str. 74 je uvedeno „...measurements were performed with a slit width of 2nm ...“ mělo by být uvedeno, že „...measurements were performed with a slit width that corresponds to the resolution of 2nm ...“. Členění práce považuji za logické a úpravu výbornou.

### **Výsledky a vědecký přínos práce:**

Autor práce měl vynikající možnost podílet se na výzkumu nových typů laserových materiálů s využitím rozsáhlého experimentálního vybavení na katedře fyzikální elektroniky, včetně tam vyvinutých čerpacích laserů. Naskytnutých šancí velmi dobře využil ku prospěchu rozvoje této problematiky. Mohl též spolupracovat s řadou předních odborníků v oboru z různých výzkumných pracovišť, včetně zahraničních. Je to patrné ze seznamu publikací. Jedná se o 7 článků v impaktovaných časopisech a celou řadu konferenčních příspěvků. U impaktovaných publikací je u šesti publikací mezi prvními třemi autory (na čtyřech publikacích je prvním z autorů) a je tedy zřejmý klíčový podíl autora disertace na vzniku těchto prací.

Za významné výsledky a přínos považuji úspěšnou realizaci pevnolátkových laserů generujících v oblasti 2.1 až 6.05  $\mu\text{m}$  a to s použitím nových typů laserových krystalů, přičemž šlo o experimentální vzorky, které oproti komerčním, technologicky zvládnutým krystalům, vyžadují velkou zručnost a zkušenost při práci s nimi. Zajímavé je pozorování čerpání iontů  $\text{Fe}^{2+}$  v krystalech  $\text{Cr}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ :ZnMnSe díky laserování na dvou vlnových délkách. Zvláště významnými výsledky jsou pozorování posunu vlnové délky laseru až za vlnovou délku 6  $\mu\text{m}$  v krystalech s příměsí kadmia, jakož i první demonstrace laseru s excitací iontů  $\text{Fe}^{2+}$  díky přenosu energie z excitovaných iontů  $\text{Cr}^{2+}$ .



### 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 Adamovi Říhovi udělit vědecko-akademickou hodnost Ph. D. (doktor).

### Otázky do diskuse při obhajobě:

1. Na str. 75 je v obr. 6.3(a) uvedeno, že měření v kryostatu byla prováděna až do teploty 380 K. Jak bylo prováděno zahřívání, je zahřívání součástí samotného komerčního kryostatu? Na obr. 6.3(b) je pak uvedena závislost centrální vlnové délky na teplotě. Jak byla centrální vlnová délka určována? Jedná se o vlnovou délku maxima emisního spektra ať změřeného nebo fitovaného např. několika Gaussovými funkcemi, nebo se jedná o střední vlnovou délku určenou jako "těžiště" daného spektra? Podobně u spekter na obrázku 6.67(a) na str. 122, kde by bylo asi nejvhodnější použít střední vlnovou délku pro sledování posunu vlnové délky s koncentrací manganu na obr. 6.67(b) a s teplotou na obr. 6.68.
2. Na str. 90 je na obr. 6.26 patrný trend snižování a rozšiřování absorpčního spektra při kryogenní teplotě s rostoucím podílem koncentrace manganu. Ovšem pro nejvyšší koncentraci, 30 % obsahu manganu dochází opět k zvýšení absorpce, tedy změně trendu. Je pro tuto změnu trendu nějaké vysvětlení? Jakým způsobem byla zjišťována koncentrace iontů přechodových kovů v krystalech? Jedná o údaj z výroby, nebo byla jejich koncentrace ověřována u hotových krystalů ještě nějakou další metodou, např. EPMA (electron probe micro analyzer) nebo EDX (Energy dispersive X-ray analysis) nebo z měření absorpce? Jaká je homogenita dopování krystalu?
3. V diskuzi a závěrech na str. 131 autor zmiňuje možnost vložení zrcadel rezonátoru do kryostatu spolu s aktivním médiem. Jak by potom byla prováděna justáž zrcadel? Nebo je třeba zrcadla přednastavit před umístěním do kryostatu a spoléhat, že nebude nutné jejich polohu doladit?

V Praze, dne 10. listopadu 2023

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