

**České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
Katedra fyzikální elektroniky**

**Er,Pr:GGAG laser generující  
v oblasti 2,8  $\mu\text{m}$**

**Diplomová práce**

Autor práce: **Bc. Tamara Jamborová**  
Vedúci práce: **Ing. Richard Švejkar, Ph.D.**  
Konzultanti: **Ing. Jan Šulc, Ph.D.**  
**prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc.**  
Akademický rok: **2020/2021**

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracovala samostatne pod odborným vedením Ing. Richarda Švejgara, Ph.D. a s použitím literatúry, ktorú uvádzam v zozname literatúry.

Praha, 21.07.2021

Tamara Jamborová

*Názov práce:*

**Er,Pr:GGAG laser generujúci v oblasti 2,8  $\mu\text{m}$**

*Autor:* Bc. Tamara Jamborová

*Odbor:* Laserová technika a optoelektronika

*Druh práce:* Diplomová práca

*Vedúci práce:* Ing. Richard Švejkar, Ph.D.

*Konzultanti:* Ing. Jan Šulc, Ph.D.

prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc.

*Abstrakt:* Táto diplomová práca sa zaoberá laserovými aktívnymi prostrediami, ktoré sú dopované iónmi  $\text{Er}^{3+}$  a generujú žiarenie v okolí vlnovej dĺžky 3  $\mu\text{m}$ . Teoretická časť obsahuje charakteristiku pevnolátkového laseru, približuje erbiové lasery, využitie ko - dopantov a ich vplyv na vlastnosti materiálu. Cieľom experimentálnej časti tejto práce bolo zmeranie spektrálnych charakteristík daných aktívnych prostredí Er,Pr:GGAG. A následne zostrojenie laserového systému a premeranie laserových vlastností.

*Kľúčové slová:* Pevnolátkový laser, diódové budenie, erbium, prazeodým, ko-dopant

*Title:*

**Er,Pr:GGAG laser generating in spectral range 2,8  $\mu\text{m}$**

*Author:* Bc. Tamara Jamborová

*Branch:* Laser Technology and Optoelectronics

*Thesis:* Diploma thesis

*Thesis supervisor:* Ing. Richard Švejkar, Ph.D.

*Supervisors:* Ing. Jan Šulc, Ph.D.

prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc.

*Abstract:* This diploma thesis deals with media doped with erbium ions generating radiation around the wavelength of 3  $\mu\text{m}$ . The theoretical part includes the characteristics of solid-state laser. It describes the erbium lasers, the utilization of co-dopants and their impact based on the material and optical properties. The aim of the experimental part of this thesis was the measurement of the spectral characteristics of given active media Er,Pr:GGAG, the subsequent construction of the laser system and measuring laser properties.

*Key words:* Solid-state lasers, diode-pumping, erbium, praseodymium, co-dopant

### *Poďakovanie*

Chcela by som sa poďakovať predovšetkým svojmu vedúcemu diplomovej práce Ing. Richardovi Švejkarovi, Ph.D. za odbornú pomoc a usmernenie pri písaní mojej diplomovej práce, za cenné rady a v neposlednom rade za ochotu. Taktiež ďakujem prof. Ing. Helene Jelínkovej, DrSc. a Ing. Janovi Šulcovi, Ph.D. za konzultácie k tejto práci.

Tamara Jamborová

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Charakteristika pevnolátkového iónového laseru</b>	<b>9</b>
2.1	Trojhladinový systém . . . . .	10
2.2	Štvorhladinový systém . . . . .	10
2.3	Kvázi - trojhladinový systém . . . . .	11
2.4	Up-konverzné procesy . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Erbiom a prazeodýmom dopované granátové matrice</b>	<b>15</b>
3.1	Er,Pr:YAG . . . . .	17
3.2	Er,Pr:GSAG . . . . .	18
3.3	Er,Pr:GYSGG . . . . .	20
3.4	Er,Pr:GGG . . . . .	20
3.5	Yb,Er,Eu:LaYSGG . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Experimentálne usporiadanie</b>	<b>24</b>
4.1	Merané vzorky . . . . .	24
4.2	Zariadenia a prístroje . . . . .	26
4.2.1	Spektroskopické merania . . . . .	26
4.2.2	Laserové merania . . . . .	26
4.3	Popis merania . . . . .	28
4.3.1	Spektroskopické merania . . . . .	28
4.3.2	Laserové merania . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Experimentálne výsledky</b>	<b>30</b>
5.1	Spektroskopické výsledky . . . . .	30
5.2	Laserové výsledky . . . . .	36
5.2.1	GGA-79A . . . . .	36
5.2.2	GGA-79B . . . . .	38

5.2.3	GGA-80C . . . . .	39
5.2.4	GGA-80D . . . . .	41
5.2.5	GGA-80E . . . . .	43
5.2.6	GGA-80F . . . . .	44
5.3	Zhrnutie a porovnanie výsledkov . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Záver</b>	<b>50</b>
	<b>Zoznam tabuliek</b>	<b>52</b>
	<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>54</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>55</b>

# 1 Úvod

“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” znie slovné spojenie skrátané do slova LASER. Ide o technické zariadenie, ktoré generuje monochromatické žiarenie s nízkou divergenciou zväzku, vysokou hustotou prenášaného výkonu, koherentným optickým žiarením, módovou štruktúrou a s veľkým jasom. Vďaka týmto jedinečným vlastnostiam prispieva laserové žiarenie k zlepšeniu kvality života (napr. laserové operácie očí, dermatologické zákroky, a iné) a nachádza uplatnenie v rôznych odboroch ľudskej činnosti (napr. medicína, priemysel, výskum, a iné). Neustále prebiehajú nové výskumy, technológia laserov napreduje a vedie k významným pokrokom ľudstva. [1]

Táto diplomová práca sa zaoberá pevnolátkovými aktívnymi laserovými prostrediami dopovanými iónmi  $\text{Er}^{3+}$  generujúce žiarenie v stredne infračervenej oblasti. Práca je bližšie zameraná na využitie a vplyv prímiesí v materiáli. Konkrétne sa jedná o sledovanie pôsobenia  $\text{Pr}^{3+}$  na vlastnosti  $\text{Er,Pr:GGAG}$  kryštálu. Erbiové lasery emitujúce na vlnovej dĺžke v oblasti 2,7 - 3  $\mu\text{m}$  sa aplikujú najmä v medicíne, pretože v okolí tejto vlnovej dĺžky dochádza k maximálnej absorpcii žiarenia vo vode a tiež v biologických tkanivách. Ďalej sa využíva v spektroskopii a pri opracovávaní plastov. [1]

Cieľom diplomovej práce je vypracovať rešerš na tému laserové aktívne prostredia dopované iónmi  $\text{Er}^{3+}$ , ktoré vyžarujú v okolí vlnovej dĺžky 3  $\mu\text{m}$ . Ďalej sa zamerať na možnosti využitia ko-dopantov a ich vplyv na spektroskopické a laserové vlastnosti materiálov, predovšetkým sa zamerať na vplyv  $\text{Pr}^{3+}$  v aktívnych prostrediach. V experimentálnej časti zmerať spektrálne charakteristiky aktívnych prostredí  $\text{Er,Pr:GGAG}$ , zkonštruovať laserový systém a premerať výstupné charakteristiky generovaného žiarenia. Nakoniec zhodnotiť dosiahnuté výsledky.

Teoretická časť práce pojednáva o základných charakteristikách pevnolátkového laseru, stručne popisuje energetické systémy a ďalšia podkapitola sa zaoberá up-konverznými procesmi. Posledná kapitola rešeršnej časti je zameraná na erbiové lasery a



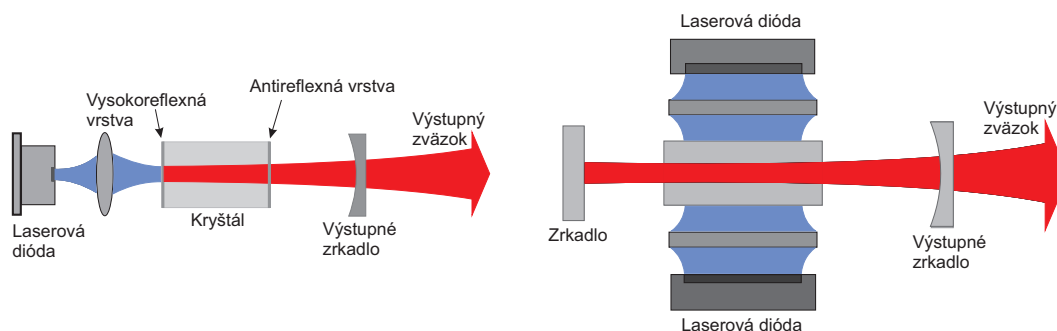
vplyv ko-dopantov na aktívne prostredia.

Experimentálna časť diplomovej práce nadväzuje na teoretickú časť. Skladá sa z dvoch kapitôl. Prvá kapitola popisuje experimentálne usporiadanie, kde je uvedený prehľad meraných vzoriek, použitých zariadení a popis meraní. Druhá kapitola sa zaoberá experimentálnymi výsledkami zo spektroskopických a laserových meraní.

Záver práce je venovaný zhrnutiu a zhodnoteniu dosiahnutých výsledkov, nakoniec ich porovnanie s výsledkami uvedenými v literatúre.

## 2 Charakteristika pevnolátkového iónového laseru

Základné komponenty pevnolátkového iónového laseru sú laserová hlavica, zdrojová jednotka a chladienie. Hlavica laseru obsahuje aktívne prostredie, budenie a rezonátor. Laserové aktívne prostredie sa skladá z aktivátoru a matrice. Aktivátorom môže byť prvok vzácnych zemín alebo tranzitný prvok, pri ktorých je dôležité, aby dobre nahradili prvok nachádzajúci sa v matrici. Matrica musí spĺňať niekoľko základných vlastností a pre generovanie žiarenia musí byť transparentná a opticky homogénna. Z tohto dôvodu sa na výrobu matrice používajú kryštály, sklo alebo keramika. Pevnolátkový laser možno budiť najmä opticky tj. použitím výbojky, laserovej diódy či laserového žiarenia. Budenie laserom môže mať rozloženie stranové alebo pozdĺžne, viď. Obr. 1. Pri pozdĺžnom dodávaní energie cez vstupné zrkadlo vedie laserový zväzok do aktívneho prostredia. V prípade stranového budenia je čerpací laserový zväzok kolmý na pozdĺžny smer laserového lúča. Chladiaca jednotka zabezpečuje odvádzanie tepla z aktívneho prostredia laseru. Zahrievanie aktívneho prostredia vzniká v dôsledku budenia laserov, kedy dochádza k premene dodanej energie na teplo. Zmena teploty vedie k ovplyvňovaniu výstupných laserových charakteristík laseru. V prípade nedostatočného chladienia aktívneho prostredia môže nastať posun spektrálnych čiar, prerušenie vyžarovania až poškodenie aktívneho prostredia.[1–3]



Obr. 1: Schéma pevnolátkového laseru s pozdĺžnym a stranovým budením pomocou laserovej diódy.[3]

Pre zosilnenie svetla pomocou stimulovanej emisie je potrebná inverzia populácie hladín. Tá vzniká budením hornej laserovej hladiny, ktorej populácia vzhľadom k populácii dolnej laserovej hladiny je väčšia. Základné energetické systémy, ktoré popisujú budenie a generáciu laserového žiarenia pri prechode medzi energetickými hladinami sú trojhladinový, štvorhladinový a kvázi - trojhladinový systém na Obr. 2. [1, 2]

## 2.1 Trojhladinový systém

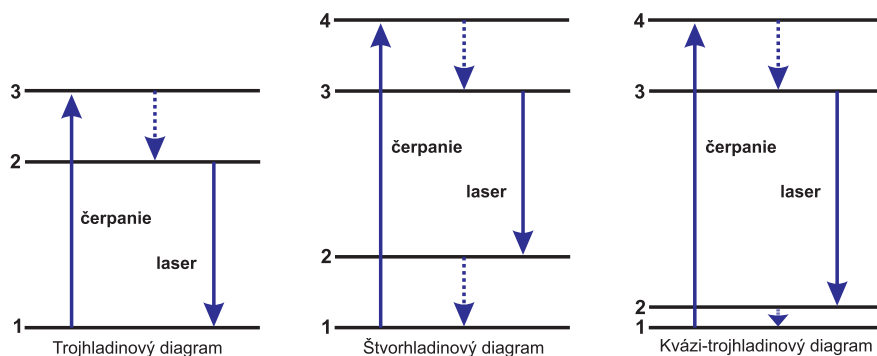
V usporiadaní na Obr. 2 je pri trojhladinovom systéme hladina 1 základný stav a zároveň dolná laserová hladina. Kvantové sústavy sú excitované vonkajším zdrojom zo základnej hladiny 1 na hladinu 3, ktorá má krátku dobu života. Odtiaľ spontánne nastane rýchly a nežiarivý kvantový prechod na hladinu 2. Metastabilná hladina má dlhú dobu života, kde sa kvantové sústavy nahromadia a následným prechodom na základnú hladinu 1 sa vytvorí emitujúci laserový prechod s určitou energiou.[3, 4]

## 2.2 Štvorhladinový systém

U štvorhladinového systému vid' Obr. 2 prebehne čerpanie medzi dolnou hladinou 1 a hornou hladinou 4. Hladina 4 je málo obsadená a rýchlo sa vyprázdňuje. Z hladiny 3, ktorá má dlhú dobu života nastane laserový prechod na hladinu 2. K laserovej činnosti príde v tomto systéme skôr ako kvantové sústavy dopadnú na základnú hladinu. Po stimulovanej emisii žiarenia ešte nastane rýchly a nežiarivý prechod z hladiny 2 na dolnú hladinu 1. Jedná sa hlavne o vzniknutú tepelnú energiu. Hlavným rozdielom medzi trojhladinovým a štvorhladinovým systémom je, že pri štvorhladinovom systéme dochádza k inverzii medzi hladinou 3 a neobsadenou hladinou 2. Vďaka tomu nie je potrebné toľko budiacej energie a teoreticky stačí excitovať jednu kvantovú sústavu. Pri trojhladinovom systéme je potrebné pre dosiahnutie inverzie populácie hladín excitovať viac ako polovicu kvantových sústav zo základnej hladiny. [4, 5]

## 2.3 Kvázi - trojhladinový systém

Kvázi-trojhladinový systém je určitá forma štvorhladinového systému. Hladina 2 je narozdiel od štvorhladinového systému veľmi blízko k základnému stavu. Pre laserovanie je potrebná dostatočná zosilnená čerpacia energia alebo nízka teplota, pretože pri izbovej teplote dochádza k tepelnej populácii tejto hladiny 2. Preto je pri kvázi - trojhladinových systémoch vhodné znížiť teplotu pre dosiahnutie vyššej účinnosti. Kvázi-trojhladinový systém je zobrazený na Obr. 2. [3,4]



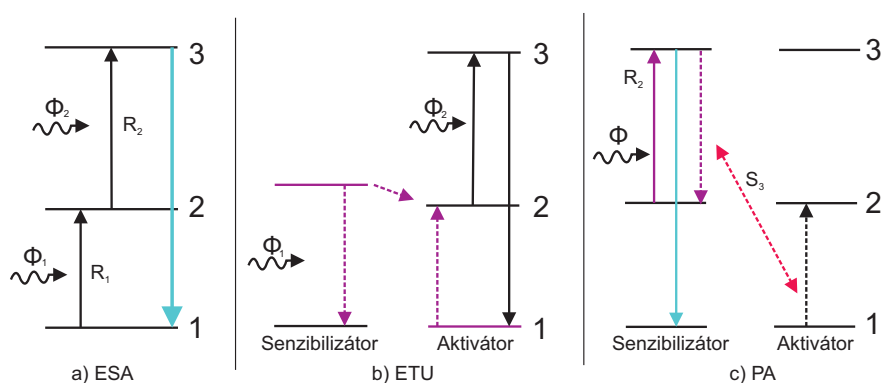
Obr. 2: Schémy energetických systémov laseru. [3]

## 2.4 Up-konverzné procesy

Up-konverzné procesy možno dosiahnuť optickým budením aktívneho prostredia dopovaného iónmi vzácnych zemín. Umožňujú populácie v excitovanom stave, ktorých energia je vyššia ako energia budiaceho fotónu. Up-konverzný proces môže pôsobiť nežiadúco u laserov, pri ktorých nastáva inverzia populácie medzi nízko položenými energetickými hladinami. Up-konverzia v takomto systéme môže prispievať k znižovaniu populácie hornej laserovej hladiny a tak zapríčiňuje nižšiu účinnosť laseru. V kladnom prípade môže proces up-konverzie pomôcť excitovať vyššie položené energetické hladiny. Rozlišujeme tri základné skupiny up-konverzných procesov, kedy up-konverzia vzniká absorpciou pomocou excitovaného stavu (ESA<sup>1</sup>), ener-

<sup>1</sup>ESA - Excited State Absorption

getickým prenosom (ETU<sup>2</sup>) alebo fotón-lavínovým (PA<sup>3</sup>) procesom. [3, 6]



Obr. 3: Schémy up-konverzných procesov. [7]

ESA je proces, ktorý prebieha vrámci dvoch fotónov medzi troma energetickými hladinami, pričom nezávisí na koncentrácii iónov v materiáli. ESA proces je vidieť na Obr. 3a). Pri čerpaní sú dopadajúce fotóny v rezonancii s prechodom zo základného stavu a hladinou 2, pričom nastane absorpcia niektorých kvant a excitácia iónov na strednú hladinu 2. Ak sú dopadajúce fotóny v rezonancii medzi hladinou 2 a hladinou 3 môžu fotóny dosiahnuť excitáciu na vyššiu hladinu 3. Energia generovaných fotónov je väčšia ako energia čerpania a anti-Stokesova fluorescencia je úmerná súčinu toku dopadajúcich fotónov. [3, 8–10]

Proces ETU zahŕňa energetické prenosi medzi dvoma iónmi tj. aktivátorom a senzibilizátorom. Vďaka vzájomnej interakcii medzi týmito dvoma iónmi sa nahromadená energia preniesie zo senzibilizátoru na aktivátor. Senzibilizátory zachytávajú fotóny a podporujú prechody elektrónov aktivátora na vyššie hladiny. Najskôr nastane vybudenie elektrónového prechodu z hladiny 1 na hladinu 2. Následne ESA proces excituje ióny na vyššiu hladinu 3. Pri ETU procese je potrebná iba jedna vlnová dĺžka a schéma ETU je zobrazená na Obr. 3b). [3, 8, 10]

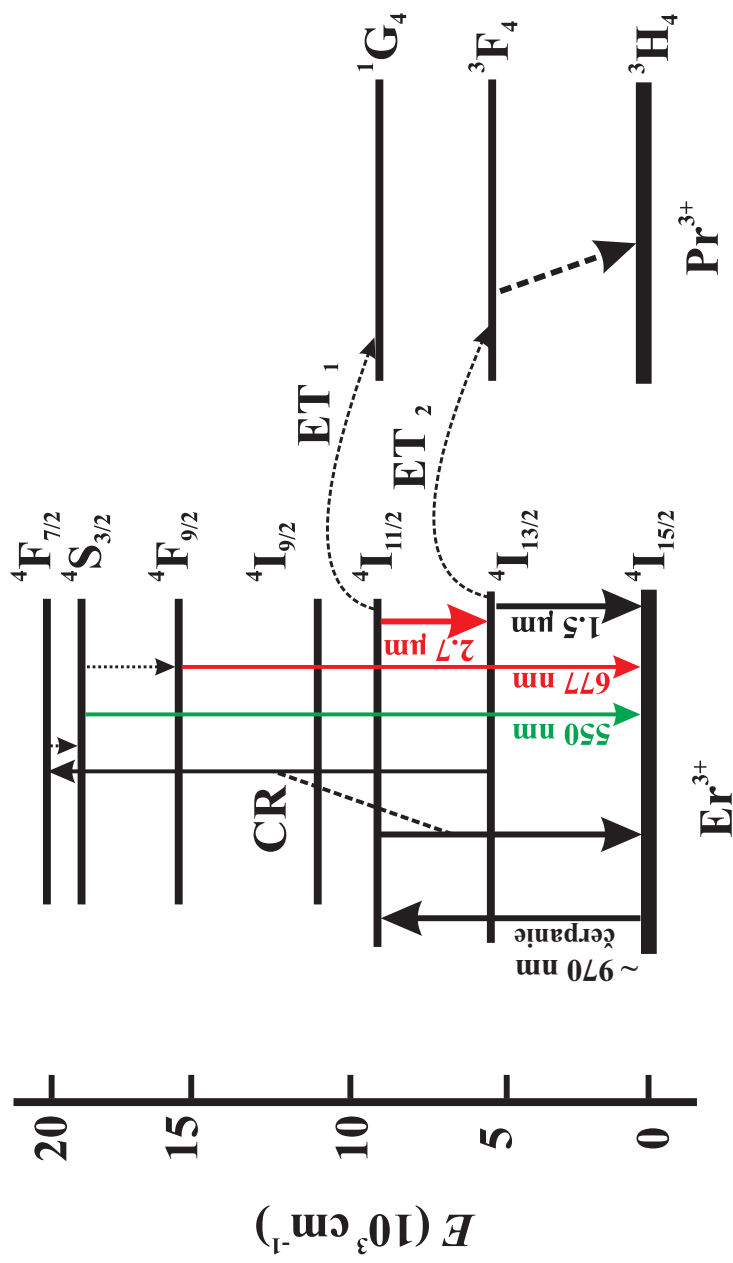
PA efekt bol prvýkrát pozorovaný v kryštáloch kvantových čítačov infračerveného

<sup>2</sup>ETU - Energy Transfer Upconversion

<sup>3</sup>PA - Photon Avalanche

žiarenia dopovanými iónmi  $\text{Pr}^{3+}$ . Avalančový proces je veľmi rýchly. Takýto typ up-konverzie môže viesť k silnej anti-Stokesovej emisii a spôsobuje prechod z hladiny 3 bez nutnosti čerpaceho žiarenia v rezonancii zo základnou hladinou 1. Čerpacia vlnová dĺžka je v rozonancii iba medzi energetickou hladinou 2 a vyššou hladinou 3. Charakteristikou PA procesu je excitačná prahová energia, ktorá rozdeľuje dva režimy. Pod prahovou energiou je kryštál transparentný pre čerpacie žiarenie a zmena intenzity up-konverznej fluorescencie je slabá. Postupným zvyšovaním čerpacej energie sa fluorescencia zvyšuje nad prahovú hodnotu čerpania a žiarenie je silne absorbované. Pri tomto type up-konverzia je dôležitá optimálna koncentrácia aktívnych iónov a pre čerpanie je nutná iba jedna vlnová dĺžka. Proces PA je uvedený na Obr. 3c). [3, 8, 10]

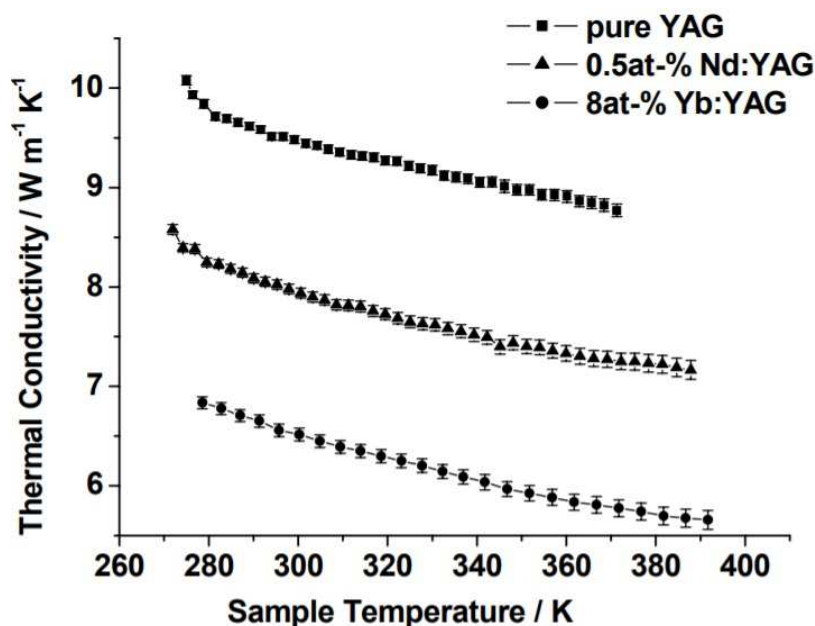
Najvhodnejšie materiály pre up-konverzné procesy sú trojmocné ióny vzácnych zemín kam patrí aj  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Pr}^{3+}$  viď. Obr. 4. Vďaka ich základnej konfigurácii  $4f_n$  môžu byť metastabilné hladiny populované absorpciou fotónov červenej alebo blízkej infračervenej oblasti. Metastabilné hladiny slúžia ako rezervoár pre budiace žiarenie. Vyššie excitované hladiny vytvárajú emisiu zeleného žiarenia. [3, 8, 10]



Obr. 4: Schéma energetických hladín  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Pr}^{3+}$ , ET - prenos energie, CR - krížová relaxácia. [11]

### 3 Erbiom a prazeodýmom dopované granátové matrice

Základné mechanické vlastnosti aktívneho prostredia určujú matrice. Granátové matrice patria medzi najpoužívanejšie hostiteľské materiály pevnolátkových laserov. Tieto kryštály sa vyznačujú vynikajúcimi vlastnosťami kryštálov tj. sú opticky izotropné, tvrdé, stabilné a majú dobrú tepelnú vodivosť materiálu, čo umožňuje laser používať pri vysokých výkonoch. Pri niektorých kryštáloch je výhoda aj jeho rýchlosť a spôsob vypestovania. Transparentnosť kryštálov umožňuje žiarenie v rozmedzí od ultrafialového až po stredne infračervené žiarenie. Medzi najrozšírenejšiu granátovú matricu patrí YAG (ytrium hlinitý granát). Na Obr. 5 je vidieť ako rôzne dopovanie prvku v matrici YAG ovplyvňuje tepelnú vodivosť, ktorá sa následne mení so zvyšujúcou teplotou. Možno pozorovať, že materiálové parametre síce záležia na matrici, ale sú silno ovplyvňované konkrétnym dopantom a jeho množstvom. S týmto faktom je potrebné počítať pri návrhu laseru. Detailnejšie budú rôzne granátové prostredia diskutované v nasledujúcich odstavcoch.[1, 2, 12]



Obr. 5: Závislosť tepelnej vodivosti rôzne dopovanej matrice YAG na teplote. [12]



Erbium je prvok vzácnych zemín, jeho elektrónová konfigurácia je  $[\text{Xe}]4f^{12} 6s^2$  a v laseroch tvorí aktívny ión umiestnený v matici. Prvky vzácnych zemín nemajú zaplnený 4f orbitál a je tienený zaplnenými orbitálmi 5s a 5d. Spektrálne čiary vzácnych prvkov sú vďaka tomu užšie ako spektrálne čiary prechodových prvkov. Pri elektrostatickej interakcii sa orbitál 4f ďalej rozkladá na energetické hladiny, medzi ktorými prebiehajú kvantové prechody. Pri prechode medzi stavmi  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  dochádza k vyžarovaniu vlnovej dĺžky v okolí 2,7 - 2,94  $\mu\text{m}$  a pri prechode  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  emituje žiarenie v oblasti 1,5 - 1,64  $\mu\text{m}$ , viď Obr. 4. Prvá spomenutá oblasť vlnových dĺžok sa približuje k maximu absorpcii vody. Práve preto sa lasery v tejto oblasti vlnových dĺžok využívajú najmä v zdravotníctve, v spektroskopii a pri opracovávaní plastov. Druhá uvedená oblasť vlnových dĺžok patrí do oblasti tzv. oku bezpečné, pretože žiarenie nepreniká priamo na sietnicu tj. má malú pravdepodobnosťou poškodenia sietnice, stratu zraku a je vhodná na aplikáciu v diaľkometroch. [13,14]

Prvok prazeodým sa tiež radí medzi vzácne prvky s elektrónovou konfiguráciou  $[\text{Xe}]4f^3 6s^2$ . Kryštály, ktoré sú dopované iónom  $\text{Pr}^{3+}$  umožňujú generovať laserové žiarenie v širokej oblasti vlnových dĺžok 0,48 - 7,24  $\mu\text{m}$ . Prazeodým môže byť taktiež pridaný do erbiovej matrice ako ko-dopujúci<sup>4</sup> aktívny prvok.[2, 14, 15]

Pridanie ďalšieho prvku do aktívneho prostredia a jeho množstvo ovplyvňuje materiálové a optické vlastnosti aktívneho prostredia. Výhodou pridania prímiesi do kryštálov je zmena dôb života na laserových hladinách, zníženie prahovej hodnoty laseru, zvýšenie zisku a zvýšenie výstupného výkonu laseru. U erbiových laserov pri využití prechodu  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  dochádza k nežiadúcemu efektu samoukončenia, ktorý je spôsobený tým, že doba života na hornej hladine je kratšia ako doba života na dolnej laserovej hladine. Ko-dopovanie je riešením k čiastočnému potlačeniu tohto efektu, pretože depopulačné ióny ako napr.  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  atď. znižujú dobu života na dolnej hladine erbia  ${}^4I_{13/2}$ . [16] Napríklad v prípade Er,Pr:GGG

---

<sup>4</sup>Ko-dopovanie je z anglického slova co-doping a znamená dodanie ďalšieho prvku do aktívneho prostredia.

nastáva výraznejšie skrátenie dôb života na dolnej laserovej hladine, ale zároveň je ovplyvnená a skrátená doba života na hornej laserovej hladine. V porovnaní s Er:GGG laserom na dolnej hladine bola doba života skrátená z 3,39 ms na 0,31 ms a rovnako tiež na hornej hladine poklesla doba života z 0,45 ms na 0,38 ms. Tento efekt má následne vplyv aj na výkon a účinnosť laseru. [3, 4, 15, 16]

Do kryštálu je možné pridanie viacerých prímies zároveň napr. Yb,Er,Ho:GYSGG laser.  $\text{Er}^{3+}$  je hlavný ión, kde dochádza k laserovým prechodom. Trojmocný  $\text{Yb}^{3+}$  pôsobí ako senzibilizátor a je schopný rozšíriť absorpčné pásmo a posunúť čerpací vrchol. Ión  $\text{Ho}^{3+}$  pracuje ako deaktivátor a ovplyvňuje doby života, kde populácia na dolnej hladine erbia  ${}^4\text{I}_{13/2}$  je skrátená. Aktívne prostredia dopované rôznymi iónmi súčasne sú predmetom ďalších skúmaní, zatiaľ však potvrdili, že sú teplotne stabilné, tepelná vodivosť sa zvyčajne znižuje, prispievajú k zlepšeniu kvality laserového lúča a dosiahnutie lepšieho výkonu laseru. [11, 16, 17]

### 3.1 Er,Pr:YAG

Er:YAG ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) je kryštál, ktorý patrí medzi najznámejšie erbium granátové lasery. Kryštál má kubickú štruktúru a vďaka nej vykazuje dobrú tepelnú vodivosť  $\kappa = 11,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  s hustotou  $\rho = 4,56 \text{ gm}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Množstvo koncentrácie dopovania erbia sa bežne pohybuje od 0,1 % do 50 %. Laser generuje infračervené žiarenie na vlnovej dĺžke 2,94  $\mu\text{m}$ . [1, 13, 18]

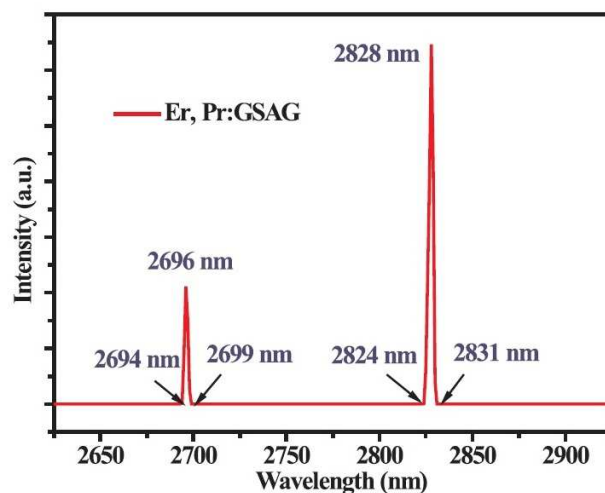
V článku [19] skúmali nasledujúce 3 vzorky (55 at. %  $\text{Er}^{3+}$ :YAG; 55 ppm  $\text{Eu}^{3+}$ , 55 at. %  $\text{Er}^{3+}$ :YAG; 1,4 at. %  $\text{Pr}^{3+}$ , 55 at. %  $\text{Er}^{3+}$ :YAG) s pomerne vysokou koncentráciou erbia. Spolu s rýchlosťou prenosu energie spôsobovali citlivosť systému na pridané malé množstvo ďalších iónov do aktívneho prostredia. Kryštály boli výbojkovo budené a umiestnené v dutine. Lasery generovali žiarenie na vlnovej dĺžke 2,936  $\mu\text{m}$  a výstupný zväzok bol v základom  $\text{TEM}_{00}$  móde. Experiment bol bližšie zameraný na meranie koeficientu zisku laseru, kedy nedochádza k saturácii kryštálu. V porovnaní Er:YAG kryštálu a kryštálu s dopovaným praeodýmom sa ukázalo, že koeficient zisku laseru klesol približne o 79 %. Na druhej strane, kde bol kryštál dopovaný euró-

piom bol zvýšený o 79 % narozdiel od kryštálu bez pridaných prímiesí Er:YAG. Rozdiel týchto výsledkov bol však zapríčinený odlišným experimentálnym rozložením pri oboch meraniach. V budúcnosti sa predpokladá zlepšenie výsledkov vhodnejším usporiadaním experimentu alebo využitím diódového budenia. [19]

### 3.2 Er,Pr:GSAG

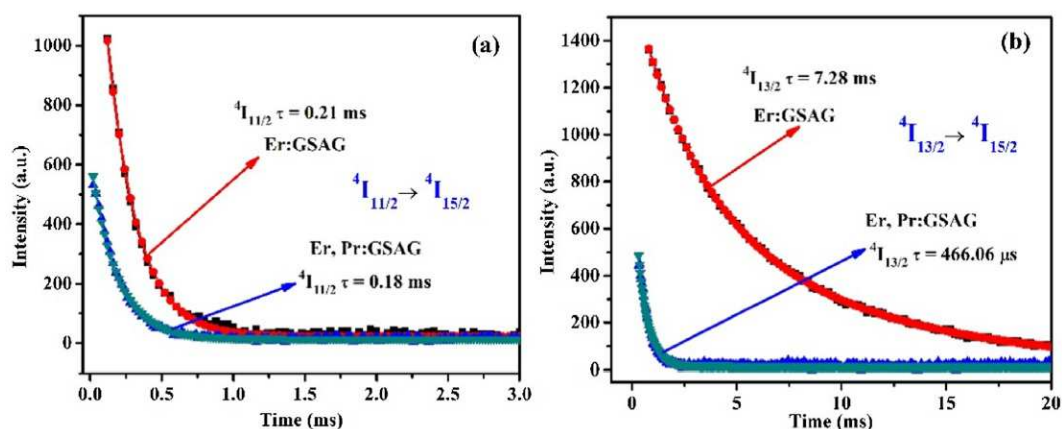
Kryštál gadolínium skandium alumínium granát (GSAG -  $Gd_3Sc_2Al_3O_{12}$ ) je možné vypestovať Czochralského metódou. Kryštál má tepelnú vodivosť  $\kappa = 4,76 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  a vynikajúcu odolnosť voči radiačnému žiareniu v porovnaní s YAG kryštálom. Hustota kryštálu Er,Pr:GSAG je  $\rho = 5,728 \text{ gm}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Na rozdiel od GSGG a GYSGG kryštálu je používanější častejšie, pretože neobsahuje ľahko prchavý prvok Ga. Kryštál GSAG kombinuje výhody kryštálov GSGG a YAG a je možné ho považovať za potenciálny materiál s veľkými rozmermi pre aplikáciu v prostredí ožarovania. V porovnaní mriežkových parametrov Er,Pr:GSAG a Er:GSAG sa hodnota mriežkovej konštanty s prímiesou  $Pr^{3+}$  mierne znížila zo 12,3926 Å na 12,3553 Å. Tento fakt možno pripísať k tomu, že polomer iónov  $Er^{3+}$  je menší ako polomer  $Gd^{3+}$ . A napriek tomu, že polomer iónov  $Pr^{3+}$  je väčší ako  $Gd^{3+}$ , koncentrácia dopovania  $Pr^{3+}$  je voči  $Er^{3+}$  veľmi nízka. [20–22]

Er,Pr:GSAG (18 at. %Er a 0,2 at. %Pr) laser z článku [23] bol pozdĺžne diódovo čerpaný v oblasti 962 nm, čomu zodpovedá široké absorpčné spektrum 950 - 990 nm. Pri fluorescenčnom meraní spektra ako vidieť na Obr. 6 bolo vygenerovaných niekoľko vrcholov, čo značí, že kryštál Er,Pr:GSAG má potenciál pri generovaní žiarenia v stredne infračervenej oblasti 2,6 – 2,9  $\mu\text{m}$ . Fluorescenčné doby života v porovnaní s Er:GSAG laserom sa znížili ako je vidieť na Obr. 7. Pri prechode  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  sa doba skrátila z jednotiek ms na stovky  $\mu\text{s}$ . Pokles doby života je väčší na úrovni  ${}^4I_{13/2}$ , čo sa pripisuje up-konverznému prenosu energie. [23]



Obr. 6: Emitujúce vlnové dĺžky Er,Pr:GSAG laseru. [23]

Maximálny výstupný výkon laseru bol dosiahnutý 344 mW s diferenciálnou účinnosťou 8,6 %, ktorý je v porovnaní s Er,Pr:GYSGG laserom vyšší. U Er,Pr:GYSGG bol maximálny výstupný výkon 284 mW a laserové žiarenie bolo generované na dvoch vlnových dĺžkach 2,696  $\mu\text{m}$  a 2,828  $\mu\text{m}$ . Profil zväzku bol gaussovský a získaný  $M^2$  parameter bol na ose x a y 1,615 a 1,732.[23]



Obr. 7: Fluorescenčná doba života Er:GSAG a Er,Pr:GSAG. [23]

Na základe týchto výsledkov možno zhrnúť, že u Er,Pr:GSAG laseru sa doba života na hladine  $^4I_{13/2}$  skrátila, laser pracuje na dvoch vlnových dĺžkach a má výbornú

kvalitu laserového lúča. Pevnolátkový Er,Pr:GSAG laser sa javí ako efektívny diódovo čerpaný laser generujúci žiarenie na viacerých vlnových dĺžkach.[22, 23]

### 3.3 Er,Pr:GYSGG

Kryštál Er,Pr:GYSGG ( $Gd_xY_ySc_2Ga_3O_{12}$ ) má kubickú štruktúru a jeho mriežková konštanta je 12,507 Å. Koeficienty  $x$  a  $y$  sa môžu v zlúčeninách odlišovať, avšak ich súčet musí byť 3. Kryštál bol vypestovaný Czochralského metódou obsahujúci 20 at. %  $Er^{3+}$  a 0,3 at. %  $Pr^{3+}$ . [6] V experimente [6] sa skrátili fluorescenčné doby života na laserových hladinách s prímiesou  $Pr^{3+}$  kvôli depopulácii v porovnaní s Er:GYSGG laserom, kedy sa na hladine  $^4I_{11/2}$  znížil čas z 1,2 ms na 0,52 ms a fluorescenčný čas na dolnej hladine  $^4I_{13/2}$  sa šesťnásobne skrátil z 3,9 ms na 0,60 ms. Er,Pr:GYSGG laser bol diódovo budený a emitujúci na vlnovej dĺžke v stredne infračervenej oblasti 2,79  $\mu m$ . Metódou knife-edge bola zistená kvalita zväzku  $M^2$  faktor 1,72. Maximálny výkon laseru v kontinuálnom režime bol 284 mW a zodpovedá prahovému výkonu 112 mW s diferenciálnou účinnosťou 17,4 %. Avšak u Er:GYSGG laseru bez prímiesi prazeodýmu je uvádzaný vyšší maximálny výkon 348 mW s diferenciálnou účinnosťou 10,1 %. [6] Napriek menšiemu dosiahnutému výkonu laseru Er,Pr:GYSGG, bola diferenciálna laserová účinnosť vyššia a prahová hodnota nižšia u laseru s dopovaným  $Pr^{3+}$ . Tento fakt je možno pripísať dopovaniu iónom  $Pr^{3+}$ , i keď je jeho percento koncentrácie nízke, ovplyvnil fluorescenčné doby života laseru. Optimálnejšou koncentráciou  $Er^{3+}$  a  $Pr^{3+}$  v kryštáli Er,Pr:GYSGG by v ďalších výskumoch bolo možné získať lepší laserový výkon. [6, 24]

### 3.4 Er,Pr:GGG

Gadolínium gálium granátový kryštál ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ) má kubickú štruktúru s mriežkovou konštantou 12,383 Å a hustotou kryštálu  $\rho = 7,08 \text{ gm}\cdot\text{cm}^{-3}$ . [15] GGG kryštál má dobrú tvrdosť a chemickú stabilitu, vyznačuje sa tiež viacerými výhodami v porovnaní s kryštálom YAG. Teplota topenia je nižšia (1725°C) ako v porovnaní s YAG

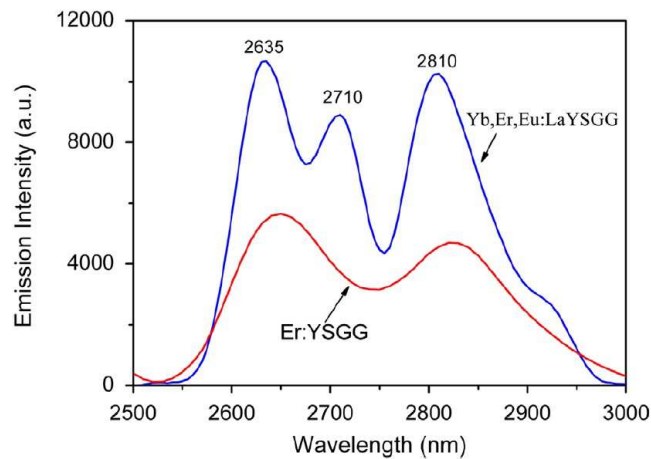
kryštálom (1940°C).[25] Kryštál GGG má dobré tepelné vlastnosti, odoláva vysokým teplotám a je pestovaný Czochralského metódou. Okrem toho je polomer iónov  $Gd^{3+}$  väčší ako u  $Y^{3+}$  iónu, vďaka čomu je možné získať väčšie rozmery kryštálu s dobrou optickou kvalitou. Ďalším pozitívom je, že má nižšiu fonónovú energiu a vykazuje relatívne dlhú dobu života na hornej hladine  $^4I_{11/2}$ . V porovnaní s inými granátmi s výbornou radiačnou odolnosťou ako napr. YSGG alebo GYSGG kryštálmi, ktoré obsahujú vzácny oxid škandia  $Sc_2O_3$  je z ekonomickejšieho hľadiska výroba GGG kryštálu menej nákladnejšia. V GGG kryštáli je použitý  $Gd_2O_3$ , ktorý je oveľa lacnejší ako  $Sc_2O_3$  v GYSGG a YSGG. [25, 26]

V experimentálnom meraní [26], v ktorom boli porovnávané výsledné charakteristiky Er:GGG laseru (30 at. %  $Er^{3+}$ ) s ko-dopujúcim Er,Pr:GGG laserom (10 at. %  $Er^{3+}$  a 0,17 at. %  $Pr^{3+}$ ) sa ukázalo, že Er,Pr:GGG sa javí ako efektívny laser v stredne infračervenej oblasti. V spektroskopickom meraní dôb života ko-dopujúci  $Pr^{3+}$  depopuloval hladinu  $^4I_{11/2}$  a  $^4I_{13/2}$ . Aj vďaka up-konverzii a krížovej relaxácii sa doba života na dolnej hladine rapídne skrátila z 3,39 ms na 0,31 ms. Ide o dokonca nižšiu hodnotu doby života, aká bola nameraná na hornej hladine (0,38 ms) tohto materiálu. Pri emisnom meraní spektra boli zmerané tri vrcholy (2705 nm, 2794 nm a 2823 nm), ktoré je možné prelaďovať. Zistilo sa, že vlnové dĺžky lineárne závisia na teplote chladenia. Pri meraní základnej laserovej charakteristiky Er,Pr:GGG v kontinuálnom režime bol výstupný výkon 324 mW s diferenciálnou účinnosťou 15,18 %. V pulznom režime bol dosiahnutý o trochu vyšší maximálny výstupný výkon 353 mW s diferenciálnou účinnosťou 16,06 %. Laser bez ko-dopantu  $Pr^{3+}$  v pulznom režime dosiahol maximálny výstupný výkon 312 mW s diferenciálnou účinnosťou 14,32 %. Narozdiel od Er:GGG laseru boli v oboch režimoch s Er,Pr:GGG laserom namerané vyššie hodnoty výkonu. [26]

### 3.5 Yb,Er,Eu:LaYSGG

Tento kryštál obsahuje viac než dva ko-dopanty ako to bolo u predchádzajúcich aktívnych prostredí. Yb,Er,Eu:LaYSGG ( $\text{La}_{0.3}\text{Y}_{2.7}\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ ) kryštál patrí svojou štruktúrou do kubického systému. YSGG kryštál má mriežkovú konštantu  $12,4584 \text{ \AA}$ , hustotu kryštálu  $\rho = 5,643 \text{ gm}\cdot\text{cm}^{-3}$  a teplotu topenia  $1877^\circ\text{C}$ . [16] Dopestovaný bol Czochralského technikou s dopovaním (1 at. %  $\text{Yb}^{3+}$  a 10 at. %  $\text{Er}^{3+}$  a 0.1 at. %  $\text{Eu}^{3+}$ ). Prvok  $\text{Yb}^{3+}$  pôsobí ako senzibilizátor dopovaný do aktívneho prostredia a absorbuje energiu z čerpaceho zdroja, ktorú neradiačne prenáša na aktívny ión  $\text{Er}^{3+}$ . Týmto spôsobom sa rozšíri absorpčné pásmo a zvýši účinnosť laseru. Vďaka krížovým relaxáciám, ktoré pri kvantových prechodoch nastávajú a energetickému prechodu medzi  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Eu}^{3+}$  sa ovplyvňuje obsadenie hladiny  $^4\text{I}_{13/2}$ . [27]

V článku [27] bola ďalej uvedená experimentálna časť tohto výskumu, kde boli merané spektroskopické charakteristiky Yb,Er,Eu:LaYSGG kryštálu a porovnané s Er:YSGG kryštálom (10 at. %  $\text{Er}^{3+}$ ). Pri absorpčných spektrách oboch kryštálov sa ukázalo, že absorpčná šírka pásma Yb,Er,Eu:LaYSGG bola zosilnená a rozšírená s vrcholom pri 967 nm. Zodpovedá za to prvok yterbia s energetickým prechodom  $^2\text{F}_{7/2} \rightarrow ^2\text{F}_{5/2}$ , pričom charakteristické absorpčné pásy  $\text{Eu}^{3+}$  sa neprejavujú vďaka jeho veľmi nízkej koncentrácii oproti  $\text{Er}^{3+}$ . Na Obr. 8 je uvedená intenzita vyžarovania v stredne infračervenej oblasti od 2500 - 3000 nm, kde zobrazuje, že kryštál Yb,Er,Eu:LaYSGG vykazuje dvojnásobnú intenzitu v emisii pravdepodobne spôsobenú nepravidelnou štruktúrou  $\text{La}^{3+}$ . [27]



Obr. 8: Fluorescenčné spektrum Er:YSGG a Yb,Er,Eu:LaYSGG laseru s čerpacou vlnovou dĺžkou 967 nm. [27]

Pri fluorescenčných dobách života na hladinách sa ukázalo, že doba života na dolnej hladine je oveľa kratšia. Doba života sa znížila z 3,355 ms na 0,203 ms, avšak doba života na hornej hladine ostala takmer rovnaká ( $\sim 0,754$  ms). Ko-dopant  $\text{Yb}^{3+}$  zvyšuje absorpčný koeficient,  $\text{Eu}^{3+}$  ovplyvňuje dobu života na hladine  ${}^4\text{I}_{13/2}$  a nemá takmer žiadny vplyv na hornú laserovú hladinu  ${}^4\text{I}_{11/2}$ . Problém so samoukončením je ko-dopovaním možné potlačiť a kryštál je vhodný na generovanie laserového zväzku s vysokou účinnosťou v stredne infračervenej oblasti. [27]



## 4 Experimentálne usporiadanie

V nasledujúcej kapitole sú najskôr zhrnuté informácie o skúmaných vzorkách, použité zariadenie a prístroje pri meraní. V ďalšej časti je bližší popis experimentov a získané výsledky.

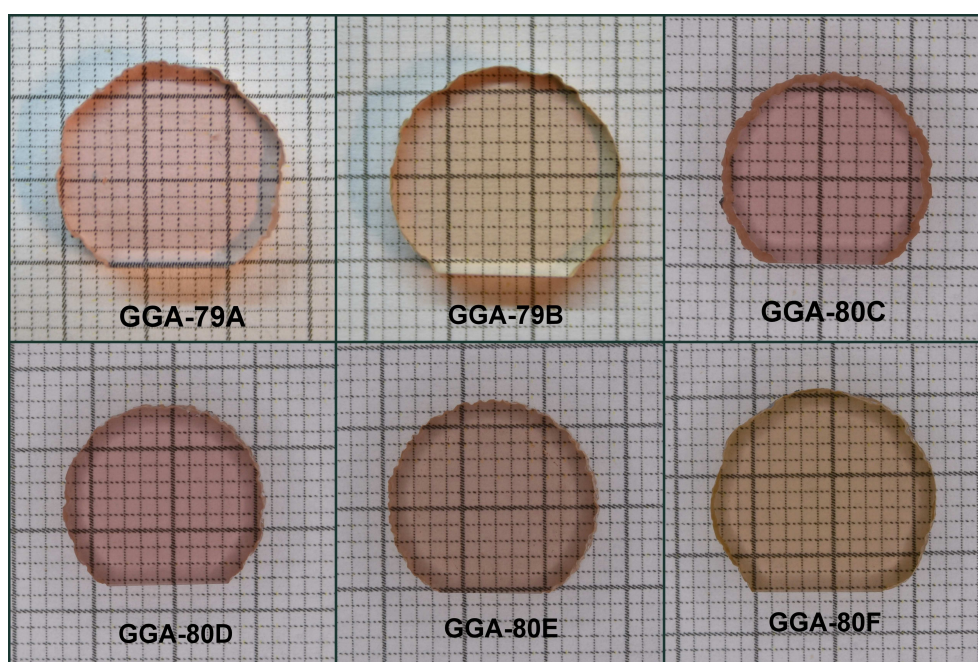
### 4.1 Merané vzorky

Pre experimenty bolo k dispozícii celkovo šesť vzoriek, ktoré sú vidieť na Obr. 9. Vzorky boli dodané v spolupráci s Fyzikálnym ústavom Akadémie vied Českej republiky (FZÚ AV ČR), kde bol kryštál vypestovaný Czochralského metódou. Vypestovaný kryštál bol následne rozrezaný na šesť vzoriek, ktoré boli ďalej skúmané. Hrúbka všetkých vzoriek je rovná 3,3 mm. Všetky vzorky boli založené na mixovanej granátovej matrici  $Gd_3Ga_3Al_2O_{12}$  (GGAG) a dopované rôznou koncentráciou  $Er^{3+}$  a  $Pr^{3+}$ . Vzhľadom k polomeru iónov  $Er^{3+}$  a jeho oxidačných stavoch dochádza v kryštalickej mriežke aktívneho prostredia k nahradeniu  $Gd^{3+}$  za  $Er^{3+}$ . Navyše vďaka čiastočnej substitúcii  $Ga^{3+}$  iónmi  $Al^{3+}$  sa kryštálové pole skresľuje a dochádza k rozširovaniu spektrálnych čiar. GGAG kryštál má kubickú štruktúru a v porovnaní s kryštálom YAG má nižšiu teplotu topenia ( $1827^{\circ}C$ ). [28, 29]

Všetky vzorky majú planparalelné leštené čelá a sú bez antireflexných vrstiev. Vzorky sa navzájom odlišujú rôznym obsahom koncentrácie iónov  $Er^{3+}$  a  $Pr^{3+}$ , čo je detailne popísané v Tabuľke 1.

Vzorka	Koncentrácia Er/Gd [%]	Koncentrácia Pr/Gd [%]
GGA-80C	13,4	0,09
GGA-80D	12,9	0,09
GGA-80E	10,0	0,15
GGA-79A	9,7	0,16
GGA-80F	8,0	0,28
GGA-79B	6,9	0,29

Tabuľka 1: Prehľad meraných vzoriek podľa koncentrácie.



Obr. 9: Fotografie skúmaných vzoriek Er,Pr:GGAG.

## 4.2 Zariadenia a prístroje

### 4.2.1 Spektroskopické merania

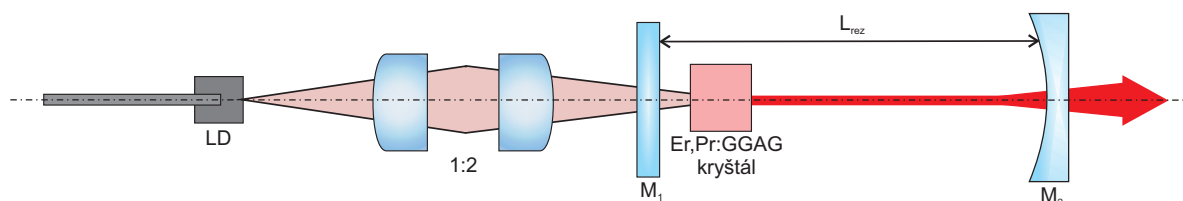
Transmisné spektrum vzoriek bolo merané spektrofotometrom SHIMADZU UV - 3600 s rozlíšením  $\pm 0,2$  nm vo viditeľnej i ultrafialovej oblasti a  $\pm 0,8$  nm v blízkej infračervenej oblasti.

Pre zmeranie fluorescenčnej doby života bola k excitácii použitá laserová dióda LIMO35-F100-DL976-EX1202, ktorá pracovala v pulznom režime. Čerpace parametre diódy: dĺžka pulzu  $\Delta t = 1$  ms, vlnová dĺžka  $\lambda = 963$  nm, opakovacia frekvencia  $f = 10$  Hz. Doby života boli zmerané pomocou kremíkového FDS10 detektoru (rozsah vlnových dĺžok 350 - 1100 nm, doba nábehu 65 ns, Thorlabs) s pásmovým spektrálnym filtrom FEL1000, ktorý neprepúšťa vlnové dĺžky pod 1000 nm a detektorom PIN FGA10 (rozsah vlnových dĺžok 900 - 1700 nm, doba nábehu 10 ns, Thorlabs) a taktiež s pásmovým filtrom FEL1000. Počas merania boli detektory pripojené cez attenuátor k osciloskopu Tektronix TDS 3052B (šírka pásma 500 MHz, vzorkovacia frekvencia 5 GS/s). Fluorescenčné spektrá v oblasti 3  $\mu\text{m}$  boli merané spektrometrom AROptix FT-MIR Rocket (2 - 6  $\mu\text{m}$ , s rozlíšením 4  $\text{cm}^{-1}$ ). Ďalšími vláknovými spektrometrami pre meranie fluorescenčných spektier vo viditeľnej oblasti boli StellarNet NIR50 Blue Wave s rozsahom vlnových dĺžok (200 - 1150 nm) a StellarNet RedDwarf (900 - 1700 nm).

### 4.2.2 Laserové merania

Počas merania bolo aktívne prostredie Er,Pr:GGAG laseru čerpané v pozdĺžnom smere diódou LIMO35-F100-DL976-EX1202, ktorá bola napájaná zdrojom Laser Diode Driver LDD50. Z diódy bolo laserové žiarenie vedené vláknom (priemer jadra 100  $\mu\text{m}$ , NA = 0,22) do fokuzáčnej optiky v pomere 1:2 ( $f_1 = 75$  mm a  $f_2 = 150$  mm). Hemisférický rezonátor sa skladal z dvoch zrkadiel, rovinné čerpace zrkadlo N81 (HR @ 2,65 - 2,95  $\mu\text{m}$ , HT @ 960 - 980 nm) a sférické výstupné zrkadlo N90 ( $r = 50$  mm, R = 97,5 %, @ 2,65 - 2,95  $\mu\text{m}$ ). Aktívne prostredie bolo počas me-

raní chladené iba pasívne. Schéma usporiadania čerpania s fokuzačnou optikou a rezonátorom je na Obr. 10. Meranie výstupného výkonu v rôznych bodoch kryštálu bolo prevedené automaticky pomocou servo motorčekov MTS50/M-Z8 (minimálny krok  $0,8 \mu\text{m}$ , Thorlabs) riadených pomocou počítača z prostredia LabView. Tým bolo možné určiť najlepšie fungujúce miesto v kryštáli. Tento postup bol zvolený z toho dôvodu, že kryštály neboli homogénne, čo bolo dokonca pri správnom nasvietení viditeľné okom. Absorbovaný výkon a stredný čerpací výkon laseru Er,Pr:GGAG bol meraný výkonovou sondou Coherent PM3 ( $0,3 - 11 \mu\text{m}$ , maximálny výkon  $3 \text{ W}$ ) pripojenou k wattmetru Molectron EPM2000. Meranie stredného výkonu laseru bolo prevedené sondou S401C ( $0,2 - 10,6 \mu\text{m}$ , maximálny výkon  $1 \text{ W}$ , Thorlabs), ktorá bola pripojená k meraču výkonu PM100A. Časový vývoj výstupného laserového signálu bol zaznamenaný detektorom PDA-20H (PbSe,  $1,5 - 4,8 \mu\text{m}$ , Thorlabs), ktorý bol pripojený k digitálnemu osciloskopu Tektronix TDS 3052B. Výstupná vlnová dĺžka laseru bola meraná monochromátorom Oriel 77250 s difrakčnou mriežkou 77300. Kamerou Spiricon Pyrocam IV (čip kamery  $\text{LiTaO}_3$ , aktívna oblasť  $24,5 \times 24,5 \text{ mm}$ ) s pripevneným filtrom FB-2750-500 bol charakterizovaný profil zväzku laseru.



Obr. 10: Schéma usporiadania rezonátoru Er,Pr:GGAG laseru. LD - laserová dióda, 1:2 - fokuzačná optika,  $M_1$  - rovinné zrkadlo,  $M_2$  - sférické zrkadlo,  $L_{rez}$  - dĺžka rezonátoru.

## 4.3 Popis merania

### 4.3.1 Spektroskopické merania

Pre meranie transmisných spektier vzoriek bol použitý SHIMADZU spektrofotometer. Absorpčné spektrá boli následne získané z nameraných hodnôt pre transmisné spektrá a zo znalosti hrúbky vzoriek pomocou Lambert - Beerovho zákona.

Pri meraní dôb života pre budenie vzoriek pracovala laserová dióda v pulznom režime. Fluorescenčné doby života na hornej laserovej hladine  ${}^4I_{11/2}$  boli merané pomocou detektoru Si FDS10, doby života na dolnej laserovej hladine  ${}^4I_{13/2}$  boli merané fotodiódou PIN FGA10. Na osciloskope bol zaznamenaný exponenciálny pokles intenzity fluorescenčného žiarenia. Dáta boli následne spracované a pomocou exponenciálneho preloženia bola určená doba života.

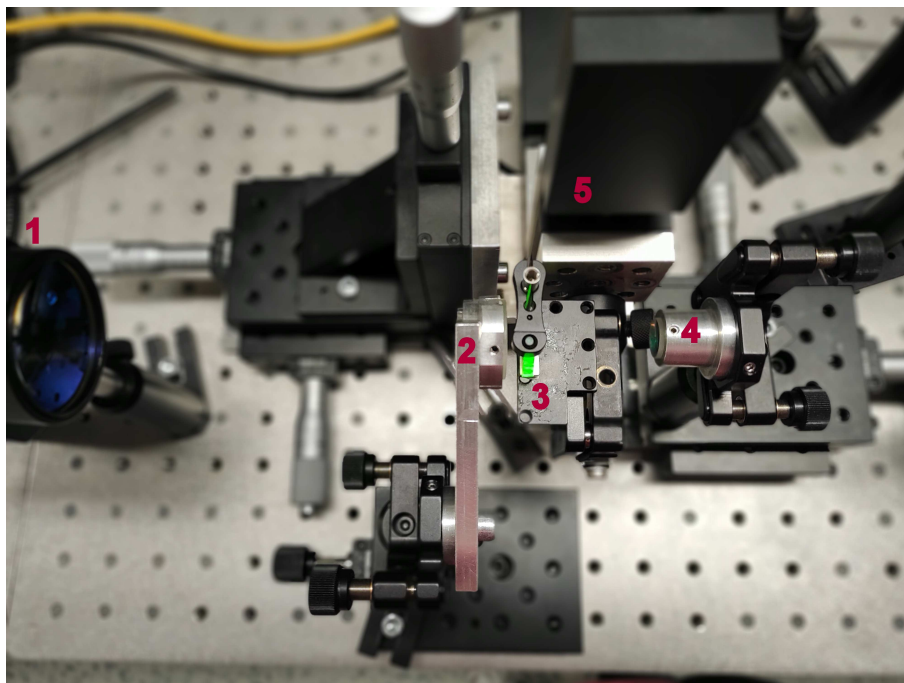
Pri meraní fluorescenčných spektier budiaca laserová dióda pracovala v kontinuálnom režime s čerpacou vlnovou dĺžkou 963 nm. Fluorescenčné spektrá boli zaznamenané pomocou spektrometru AROptix FT-MIR Rocket, vláknovými spektrometrami StellarNet NIR50 Blue Wave a StellarNet RedDwarf.

### 4.3.2 Laserové merania

Postup u všetkých vzoriek prebiehal rovnako. Najskôr bol zostrojený a naladený laserový rezonátor. Schéma je zobrazená na Obr. 10 a fotografia usporiadania je vidieť na Obr. 11.

Čerpacie parametre laserovej diódy sa počas meraní nemenili a sú uvedené pri jednotlivých výsledkoch v nasledujúcej kapitole. Laserová dióda pracovala v pulznom režime a excitovaný zväzok viedol cez vlákno do fokuzáčnej optiky, kde sa sfokuzoval a smeroval do aktívneho prostredia. Priemer čerpacieho zväzku na kryštáli bol 200  $\mu\text{m}$ . Po nastavení rezonátoru boli preskenované všetky vzorky pomocou servo motorov vo vertikálnom a v horizontálnom smere, aby sa zistil najvhodnejší bod pre laserovanie. Pre zistenie výstupnej charakteristiky laseru bol ako prvé zmerovaný výstupný výkon laseru. Následne po odstránení výstupného sférického zrkadla

bol zmeraný výkon za kryštálom a nakoniec samotný výkon za čerpacím zrkadlom. Z nameraných výsledkov bol dopočítaný absorbovaný výkon v kryštáli. Pomocou kamery Spiricon PYROCAM IV umiestnenou za rezonátor bol nameraný profil zväzku a výstupná vlnová dĺžka laseru bola určená pomocou monochromátorom Oriel 77250.



Obr. 11: Fotografia usporiadania laserového systému, 1 - fokuzačná optika čerpacej diódy, 2 - rovinné zrkadlo, 3 - aktívne prostredie Er,Pr:GGAG, 4 - výstupné sférické zrkadlo, 5 - servo motorčeky pre posun kryštálu.

## 5 Experimentálne výsledky

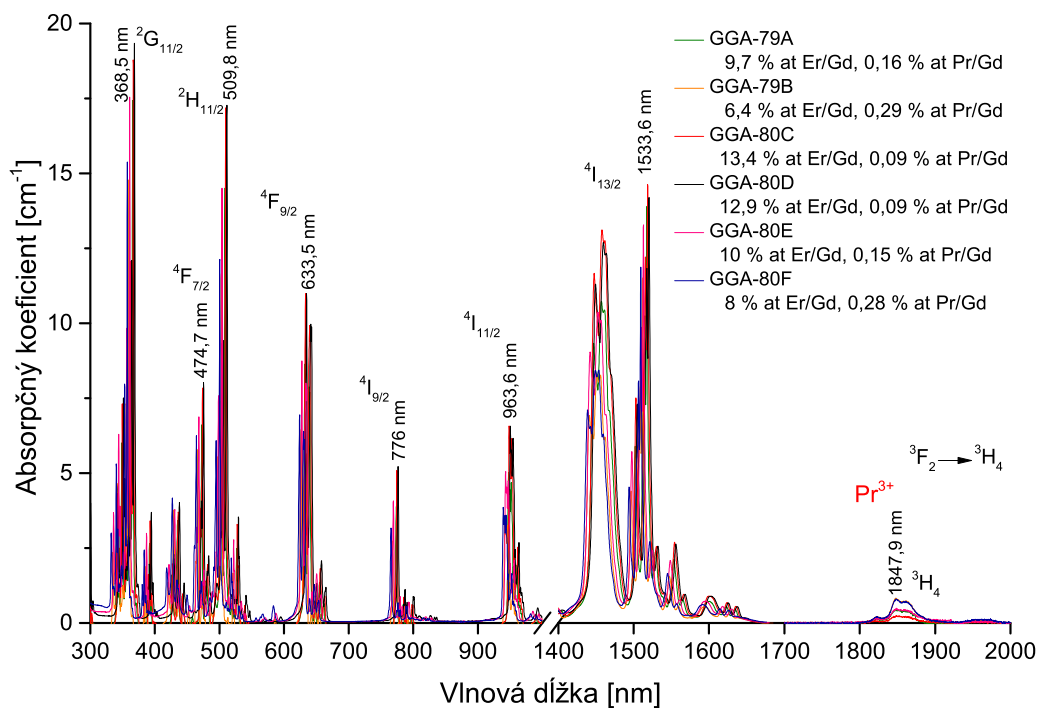
V tejto kapitole sú zhrnuté informácie z jednotlivých meraní. Prvá časť sa skladá z výsledkov spektroskopických meraní vzoriek a druhá časť sú výsledky z laserových meraní Er,Pr:GGAG.

### 5.1 Spektroskopické výsledky

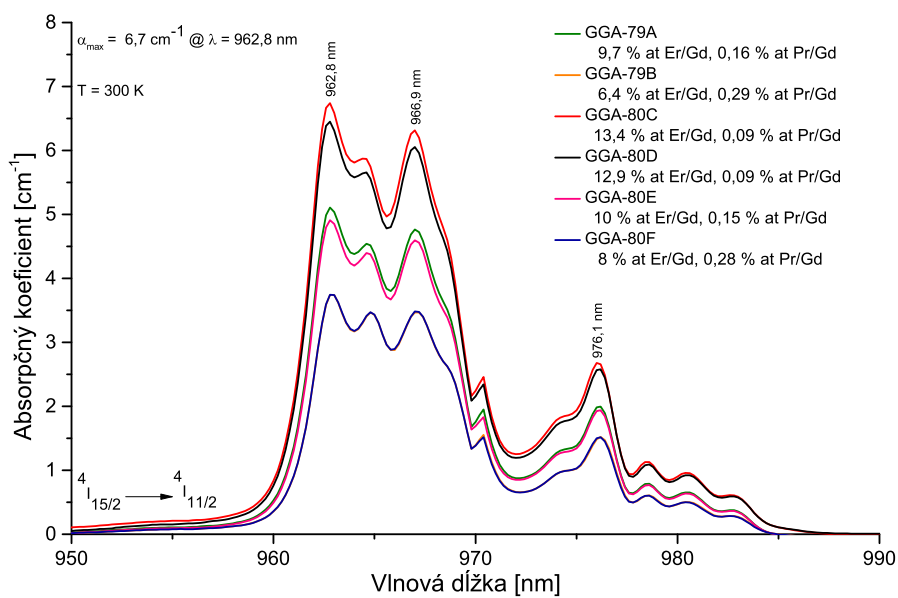
Pre všetky vzorky z Tabuľky 1 a Obr. 9 boli premerané spektroskopické charakteristiky, pričom meranie prebehlo pri izbovej teplote.

Absorpčné čiary v spektre vznikajú následkom prechodov medzi jednotlivými energetickými hladinami a sú ovplyvňované vlastnosťami materiálu, cez ktoré žiarenie prechádza [3]. Na Obr. 12 je zobrazený graf absorpčného spektra Er,Pr:GGAG všetkých vzoriek a zahŕňa celý meraný rozsah od 300 - 2000 nm. Pri vrcholoch sú uvedené vlnové dĺžky s prislúchajúcimi hornými hladinami príslušného absorpčného prechodu. Krivka pozostáva z ôsmich významných vrcholov, pričom sedem z nich patrí prechodom prvku erbia zo základnej hladiny  $^4I_{15/2}$  a posledný vrchol v oblasti 1800 - 1900 nm je spôsobený prímiesou praeodymu pri prechode z hladiny  $^3F_2$  na hladinu  $^3H_4$ .

Na Obr. 13 je vidieť, že sa približujú vždy dve krivky k sebe s podobnou koncentráciou dopovania, a že absorpčný koeficient je úmerný koncentrácii Er/Gd vo vzorkách. So vzorkou GGA-80C bol dosiahnutý maximálny absorpčný koeficient  $6,7 \text{ cm}^{-1}$  na vlnovej dĺžke 962,8 nm. FWHM tejto vlnovej oblasti je približne 8 nm. Absorpčné pásmo v oblasti 962,8 nm je ideálne na čerpanie ( $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ ) z dôvodu prekrytia spektrálnej čiary laserovej diódy. Naopak minimálny absorpčný koeficient bol nameraný so vzorkami GGA-79B a GGA-80F, kde sa krivky prekrývajú a pri vlnovej dĺžke 962,8 nm hodnota absorpčného koeficientu klesla skoro na polovicu ( $3,7 \text{ cm}^{-1}$ ) maximálnej hodnoty ( $6,7 \text{ cm}^{-1}$ ) vzorky GGA-80C. Z Obr. 13 je jasne vidieť, že absorpčný koeficient sa bude meniť s koncentráciou  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Pr}^{3+}$ .



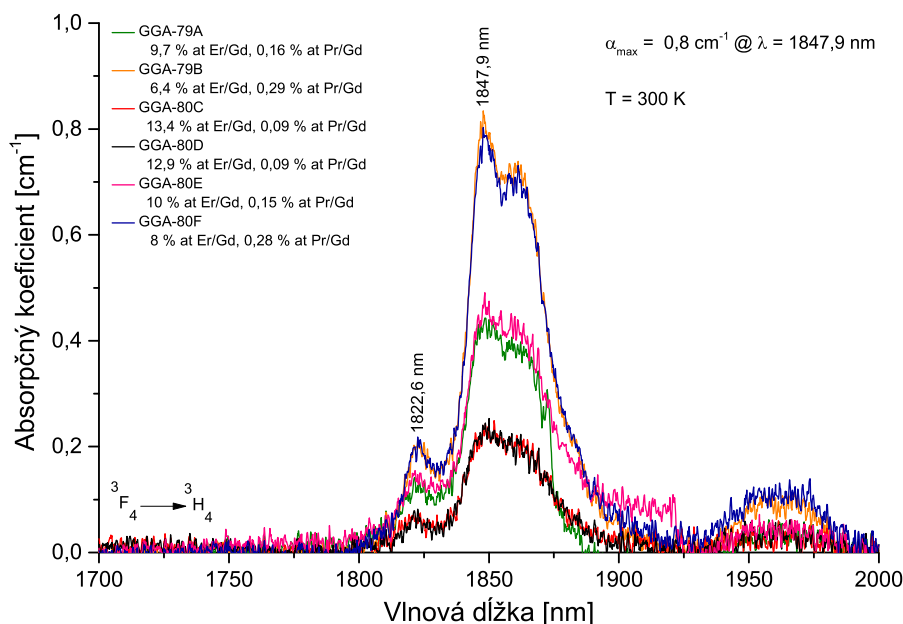
Obr. 12: Absorpční spektrum Er,Pr:GGAG.



Obr. 13: Absorpční spektrum v oblasti 950 - 990 nm.



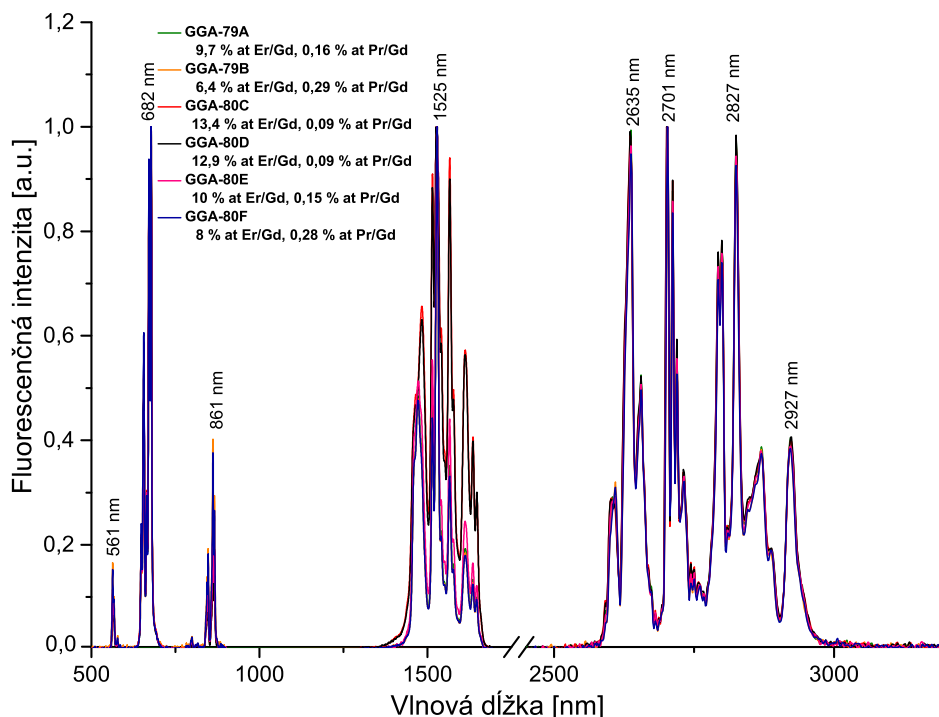
Absorpčný vrchol na vlnových dĺžkach blízky 1847,9 nm zobrazený na Obr. 14 zodpovedá prechodom iónov zo stavu  $^3F_2$  do stavu  $^3H_4$ . Absorpčné krivky odpovedajú prechodom  $Pr^{3+}$  a ako je vidieť krivky nie sú úplne hladké. To je zapríčinené šumom detektoru, nakoľko bol signál počas merania pomerne slabý. Absorpčné koeficienty sú veľmi nízke a maximum je dosiahnuté so vzorkou GGA-79B s najvyšším obsahom Pr/Gd pri vlnovej dĺžke 1847,9 nm s hodnotou  $0,8 \text{ cm}^{-1}$ .



Obr. 14: Absorpčné spektrum v oblasti 1700 - 2000 nm.

Fluorescenčné spektrum bolo zmerané v rozsahu 500 - 3000 nm. Z Obr. 15 vidieť, že dochádzalo k up-konverzným prechodom a žiarenie emituje v zelenej a červenej oblasti vlnových dĺžok. ESA prenos pravdepodobne spôsobuje červenú emisiu, čo je pre oblasť  $\sim 2,8 \mu\text{m}$  laserového žiarenia výhodou, keďže vyprázdňuje dolnú laserovú hladinu  $^4I_{13/2}$ . Prenos ETU opäť obsadí hornú hladinu  $^4I_{11/2}$ , ale zároveň aj vyprázdňuje dolnú hladinu  $^4I_{13/2}$ , čím čiastočne potláča efekt samoukončenia. Vďaka tomu je nutné vhodne zvoliť obsah matrice a koncentráciu iónov erbia [29]. Na fotografii Obr. 11 je vidieť zelené fluorescenčné žiarenie generujúceho laseru Er,Pr:GGAG.

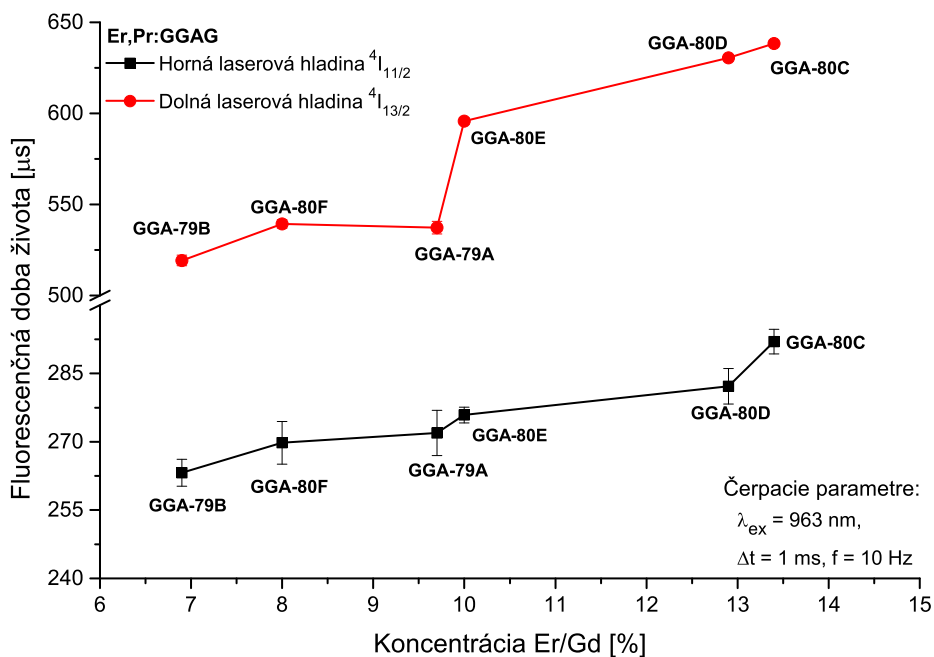
Oblasť 2500 - 3000 nm zodpovedá laserovému prechodu z excitovanej hladiny  $^4I_{11/2}$  do nižšej  $^4I_{13/2}$  hladiny ako je aj znázornené na Obr. 4. Jednotlivé časti fluorescenčného spektra na Obr. 15 sú normované na lokálne maximum. Fluorescenčné spektrá vzoriek sa pomerne prekrývajú, a to i v porovnaní vzorky s najvyšším a najnižším obsahom koncentrácie Er/Gd. Je možné konštatovať, že so zmenou koncentrácie nenastali žiadne výrazné posuny čiar.



Obr. 15: Fluorescenčné spektrum Er,Pr:GGAG.

Priebehy fluorescenčných dôb života na hornej  $^4I_{11/2}$  (prechod 2,8  $\mu\text{m}$ ) i dolnej laserovej hladine  $^4I_{13/2}$  (prechod 1,5  $\mu\text{m}$ ) v závislosti na koncentrácii Er/Gd sú zobrazené na Obr. 16. Vidieť, že fluorescenčná doba života na hornej laserovej hladine sa s narastajúcou koncentráciou  $\text{Er}^{3+}$  zvyšuje. Zároveň má rovnaký trend aj závislosť fluorescenčnej doby života dolnej laserovej hladiny na koncentrácii Er/Gd, avšak vzorka GGA-79A vyniká z monotónnej závislosti, čo je pravdepodobne spôsobené chybou merania. Dôležitý fakt tiež je, že vplyvom ko-dopovania prímiesou prazeodýmu sa doba

života na dolnej laserovej hladine erbia rádozo znížila v porovnaní s Er:GGAG. V prípade Er:GGAG sa doba života na dolnej hladine pohybuje v jednotkách ms. Efekt samoukončenia je tak čiastočne potlačený, nakoľko doba života na hornej aj dolnej hladine je v jednotkách  $\mu\text{s}$ . [28] V Tabuľke 2 je uvedený súhrn spektroskopických výsledkov.



Obr. 16: Fluorescenčná doba života na laserových hladinách.  $\lambda_{ex}$  - excitačná vlnová dĺžka,  $\Delta t$  - dĺžka pulzu,  $f$  - frekvencia opakovania impulzov.

Vzorka	Koncentrácia Er/Gd [%]	Koncentrácia Pr/Gd [%]	Doba života [ $\mu$ s]	Doba života [ $\mu$ s]	$\lambda_{a1}$ [nm]	$a_{a1}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$\lambda_{a2}$ [nm]	$a_{a2}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$\lambda_{a3}$ [nm]	$a_{a3}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]
GGA-79A	9,7	0,16	271,9	537,3	962,8	5,1	1533,0	13,8	1847,4	0,4
GGA-79B	6,9	0,29	263,2	519,3	962,8	3,7	1533,0	11,7	1847,9	0,8
GGA-80C	13,4	0,09	291,9	638,4	962,8	6,7	1533,6	14,5	1852,2	0,2
GGA-80D	12,9	0,09	282,2	630,5	962,8	6,4	1533,0	14,0	1850,0	0,2
GGA-80E	10,0	0,15	275,9	595,8	962,8	4,9	1533,0	13,1	1848,4	0,5
GGA-80F	8,0	0,28	269,8	539,4	962,8	3,7	1533,0	11,7	1847,8	0,8

Tabuľka 2:  $\lambda_{a1}$  - vlnová dĺžka abs. maxima v oblasti 950 - 990 nm,  $a_{a1}$  - abs. koeficient abs. maxima v oblasti 950 - 990 nm,

$\lambda_{a2}$  - vlnová dĺžka abs. maxima v oblasti 1400 - 1700 nm,  $a_{a2}$  - abs. koeficient abs. maxima v oblasti 1400 - 1700 nm,  $\lambda_{a3}$

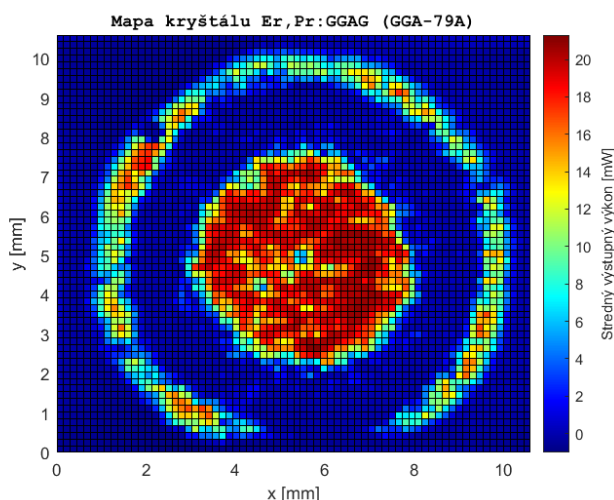
- vlnová dĺžka abs. maxima v oblasti 1700 - 2000 nm,  $a_{a3}$  - abs. koeficient abs. maxima v oblasti 1700 - 2000 nm

## 5.2 Laserové výsledky

Laserový rezonátor bol zostavený podľa Obr. 10 a laserovanie v oblasti vlnovej dĺžky  $\sim 2,8 \mu\text{m}$  sa podarilo dosiahnuť so všetkými dostupnými vzorkami. Čerpacia dióda pracovala v pulznom režime a jej parametre sú pre všetky vzorky rovnaké. Výsledky sú uvedené pre každú vzorku Er,Pr:GGAG jednotlivo a následne je zhrnutie výstupných charakteristík generovaného žiarenia v Tabuľke 3.

### 5.2.1 GGA-79A

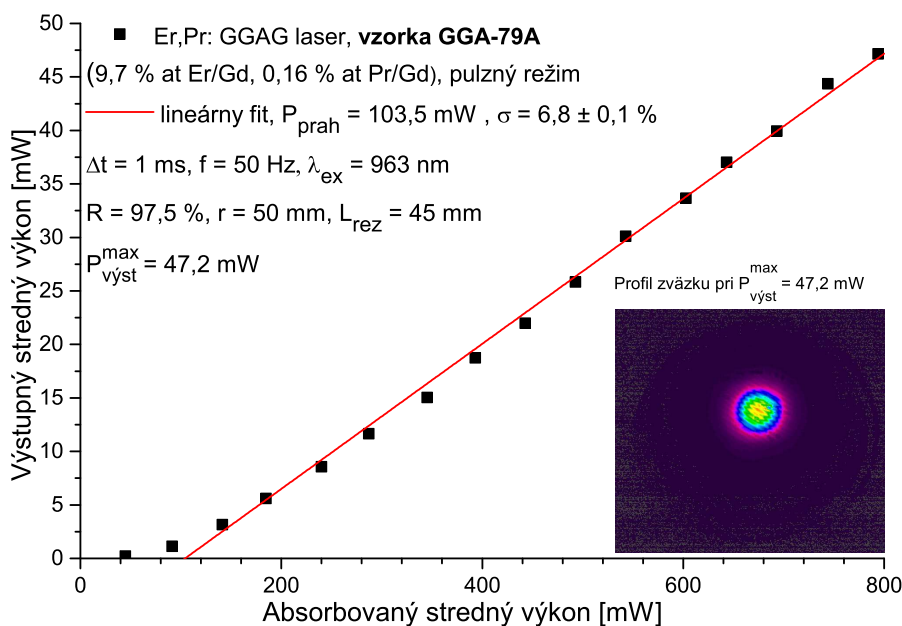
Na Obr. 17 je vidieť výsledok 2D skenovania kryštálom pre zistenie optimálneho miesta na laserovanie v kryštáli GGA-79A. Kryštál má okolo intenzívnej oblasti prstenec, ktorý nelaseruje. Táto nehomogenita pravdepodobne vznikla v priebehu rastu, pnutím kryštálu a čiastočne bola pozorovateľná aj voľným okom.



Obr. 17: Výkonová mapa kryštálu GGA-79A.

Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone je zobrazená na Obr. 18. Laserový rezonátor bol dlhý 45 mm, aby sa eliminovali straty spôsobené absorpciou na molekulách vody vo vzduchu. Laser generoval žiarenie na vlnovej dĺžke 2882,4 nm. Lineárnym fitom hodnôt bola primárne určená diferen-

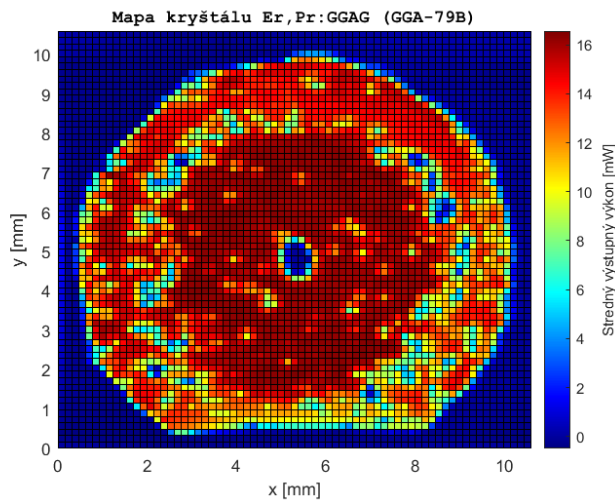
ciálna účinnosť a prah generácie laseru vzhľadom na absorbovaný výkon je daný bodom, kde regresná priamka pretla os x. Maximálny dosiahnutý výstupný výkon bol  $P_{vyst}^{max} = 47,2$  mW, diferenciálna účinnosť  $\sigma = 6,8$  % a laserový prah  $P_{prah} = 103,5$  mW. V grafe je uvedený aj profil zväzku, ktorý bol meraný pri maximálnom výstupnom výkone a približuje sa k základnému transverzálnemu elektromagnetickému ( $TEM_{00}$ ) módu.



Obr. 18: Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-79A.  $P_{prah}$  - prahová hodnota,  $\sigma$  - diferenciálna účinnosť,  $\Delta t$  - dĺžka pulzu,  $f$  - frekvencia opakovania impulzov,  $\lambda_{ex}$  - excitačná vlnová dĺžka,  $R$  - odrazivosť zrkadla,  $r$  - polomer krivosti,  $L_{rez}$  - dĺžka rezonátoru,  $P_{vyst}^{max}$  - maximálny výstupný výkon.

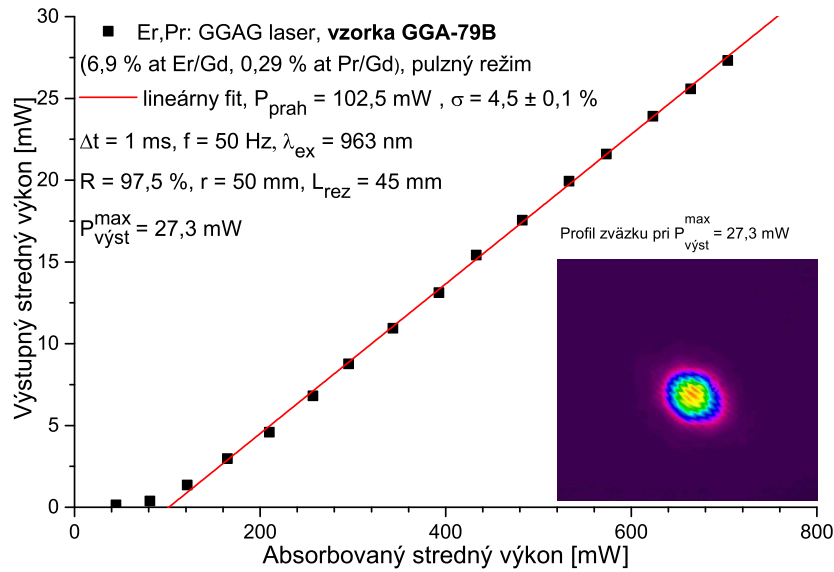
### 5.2.2 GGA-79B

Vzorka GGA-79B má najnižší obsah koncentrácie Er/Gd a zároveň najvyšší obsah Pr/Gd zo všetkých skúmaných vzoriek. Meranie výstupného výkonu v rôznych bodoch kryštálu GGA-79B pre zistenie najvhodnejšieho miesta pre laserovanie je zobrazené na Obr. 19. Vidieť, že v strede kryštálu sa nachádza kruhová oblasť, v ktorej je nulový výstupný výkon. Avšak naokolo tejto oblasti je intenzita dostatočne veľká a kryštál sa zdá homogénny.



Obr. 19: Výkonová mapa kryštálu GGA-79B.

Skonštruovaný laserový rezonátor mal dĺžku  $L_{rez} = 45$  mm. Graf na Obr. 20 zobrazuje závislosť výstupného výkonu na absorbovanom strednom výkone, kde maximálny výstupný výkon bol  $P_{vyst}^{max} = 27,3$  mW, pričom táto hodnota je najnižšia získaná spomedzi meraných vzoriek. Prah laseru vzhľadom na absorbovaný výkon dosiahol hodnotu  $P_{prah} = 102,5$  mW a diferenciálnu účinnosť  $\sigma = 4,5$  %. Súčasťou grafu je aj profil zväzku, ktorý bol meraný pri maximálnom čerpaní a približuje sa ku gaussovskému profilu. Vlnová dĺžka, na ktorej laser emitoval bola 2880,8 nm.

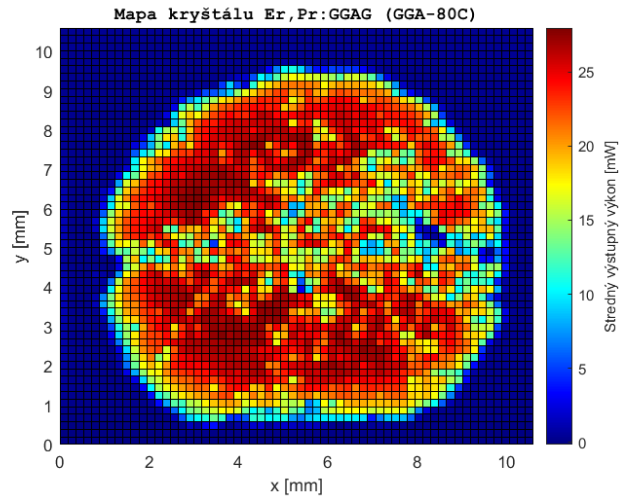


Obr. 20: Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-79B.  $P_{\text{prah}}$  - prahová hodnota,  $\sigma$  - diferenciálna účinnosť,  $\Delta t$  - dĺžka pulzu,  $f$  - frekvencia opakovania impulzov,  $\lambda_{\text{ex}}$  - excitačná vlnová dĺžka,  $R$  - odrazivosť zrkadla,  $r$  - polomer krivosti,  $L_{\text{rez}}$  - dĺžka rezonátoru,  $P_{\text{vyst}}^{\text{max}}$  - maximálny výstupný výkon.

### 5.2.3 GGA-80C

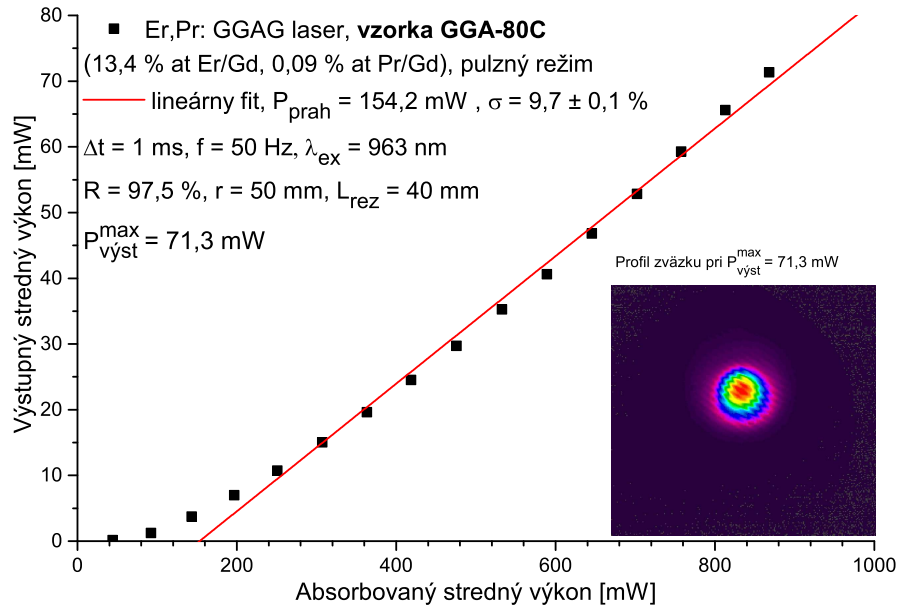
Na Obr. 21 je zobrazený sken kryštálu GGA-80C, ktorým bolo zistené optimálne miesto pre laser. Z výslednej výkonovej mapy je vidieť, že kryštál je pomerne homogénnejší oproti predchádzajúcim dvom vzorkám. To môže byť spôsobené tým, že je kryštál vyrezaný zo stredovej časti vypestovaného kryštálu, podobne ako kryštál GGA-80D.





Obr. 21: Výkonová mapa kryštálu GGA-80C.

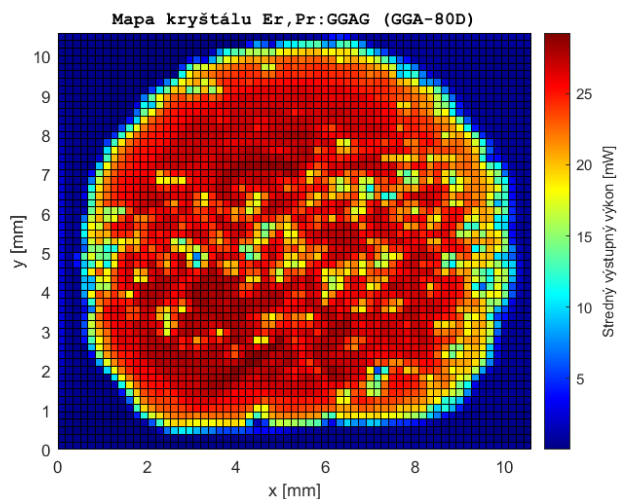
V prípade merania so vzorkou GGA-80C bola dosiahnutá najvyššia diferenciálna účinnosť zo všetkých meraných vzoriek  $\sigma = 9,7\%$  ako je vidieť na Obr. 22. Vzorka GGA-80C má najvyšší obsah koncentrácie Er/Gd, ale najnižší obsah Pr/Gd. Na grafe je tiež vidieť, že lineárnym fitom bola získaná diferenciálna účinnosť  $\sigma = 9,7\%$  a prah generácie laseru vzhľadom k absorbovanému výkonu bol  $P_{prah} = 154,2$  mW. Najvyššia hodnota výstupného výkonu vyšla  $P_{vyst}^{max} = 71,3$  mW, pri ktorej bol zmeraný profil laserového zväzku. Dĺžka rezonátoru  $L_{rez} = 40$  mm bola najkratšia v porovnaní s ostatnými meraniami. Hodnota vlnovej dĺžky, na ktorej laser žiaril bola 2879,2 nm.



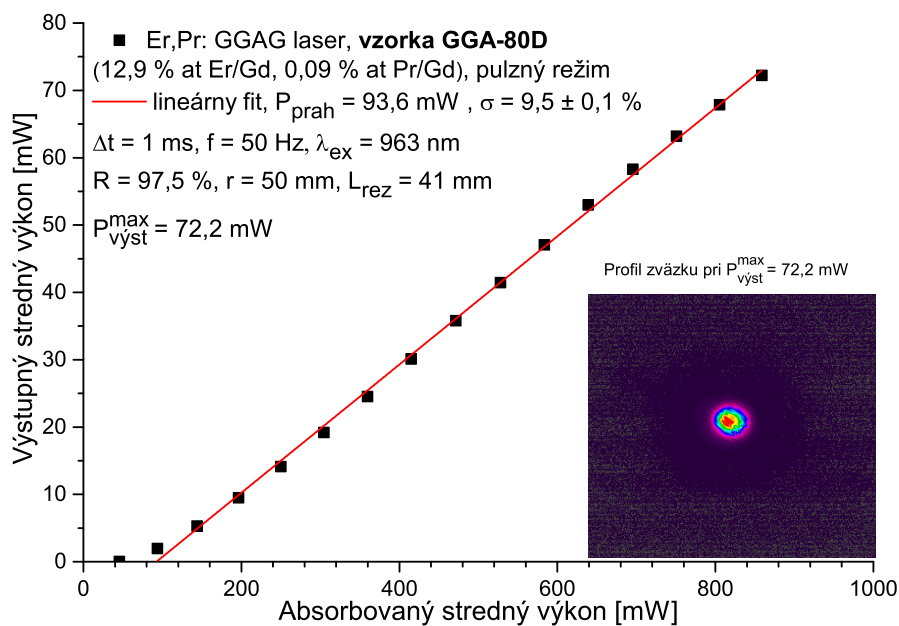
Obr. 22: Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-80C.  $P_{prah}$  - prahová hodnota,  $\sigma$  - diferenciálna účinnosť,  $\Delta t$  - dĺžka pulzu,  $f$  - frekvencia opakovania impulzov,  $\lambda_{ex}$  - excitačná vlnová dĺžka,  $R$  - odrazivosť zrkadla,  $r$  - polomer krivosti,  $L_{rez}$  - dĺžka rezonátoru,  $P_{vyst}^{max}$  - maximálny výstupný výkon.

#### 5.2.4 GGA-80D

Výsledná výkonová mapa kryštálu vzorky GGA-80D je na Obr. 23. Vzorky GGA-80C a GGA-80D sú odrezané so stredovej časti vypestovaného kryštálu, vďaka tomu vykazujú najlepšiu homogenitu a v kombinácii s vhodným pomerom erbia a praeodymu sa podarilo získať najvyššie výstupné výkony. Pri meraní výstupnej laserovej charakteristiky GGA-80D kryštálu bol rezonátor dlhý  $L_{rez} = 41$  mm. Maximálny výstupný výkon bol dosiahnutý  $P_{vyst}^{max} = 72,2$  mW s diferenciálnou účinnosťou  $\sigma = 9,5$  % a prahová hodnota vzhľadom k absorbovanému výkonu bola  $P_{prah} = 93,6$  mW. Profil laserového zväzku sa približuje základnému gaussovskému módu  $TEM_{00}$  a je zobrazený na grafe Obr. 24. Zmeraná emitovaná vlnová dĺžka laseru bola 2877,6 nm.



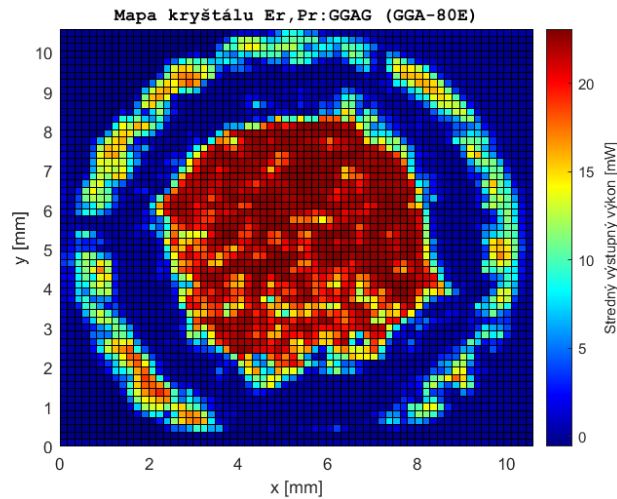
Obr. 23: Výkonová mapa kryštálu GGA-80D.



Obr. 24: Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-80D.  $P_{prah}$  - prahová hodnota,  $\sigma$  - diferenciálna účinnosť,  $\Delta t$  - dĺžka pulzu,  $f$  - frekvencia opakovania impulzov,  $\lambda_{ex}$  - excitačná vlnová dĺžka,  $R$  - odrazivosť zrkadla,  $r$  - polomer krivosti,  $L_{rez}$  - dĺžka rezonátoru,  $P_{vyst}^{max}$  - maximálny výstupný výkon.

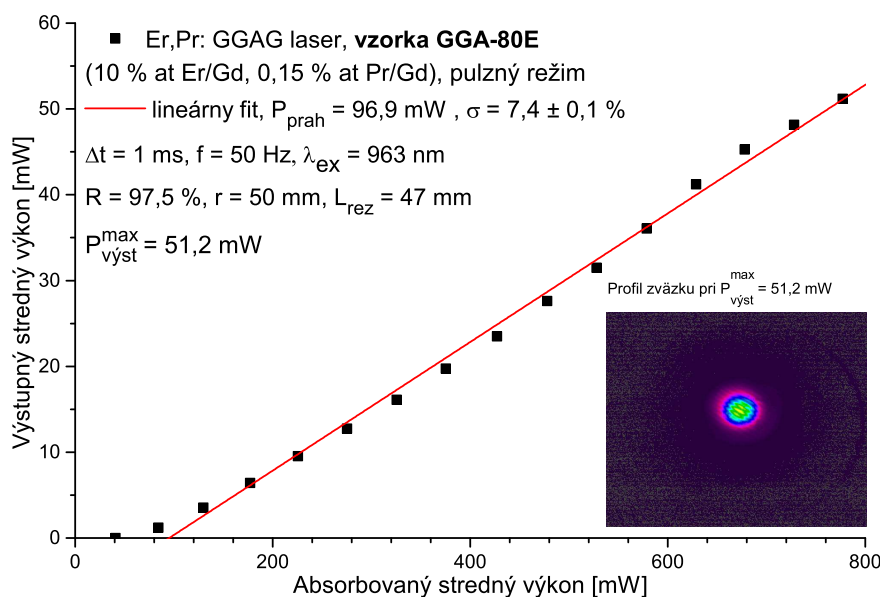
### 5.2.5 GGA-80E

Pred laserovým meraním bola taktiež preskenovaná vzorka GGA-80E. Výsledná výkonová mapa je zobrazená na Obr. 25. Ako aj pri vzorke GGA-79A má táto vzorka po okraji prstencovú oblasť s nulovým výkonom. Avšak stred kryštálu je viacme nej homogénny a okolitá nehomogenita bola pravdepodobne tiež vzniknutá pri raste kryštálu.



Obr. 25: Výkonová mapa kryštálu GGA-80E.

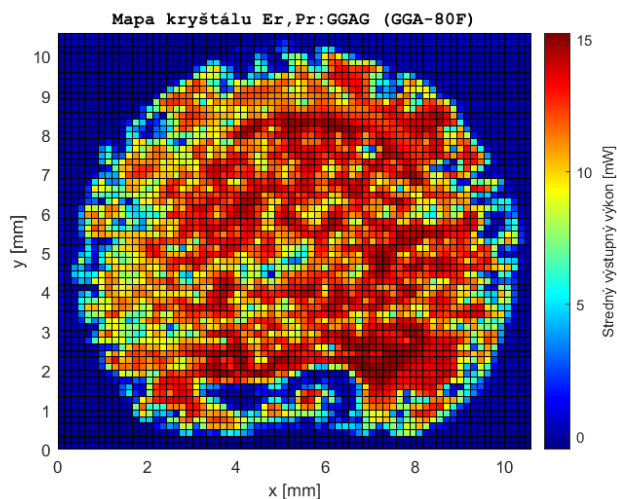
V experimentálnom meraní vzorky GGA-80E laser emitoval stredne infračervené žiarenie na 2884 nm, pričom pri meraní laserových vlastností bol zostavený najdlhší rezonátor dĺžky  $L_{rez} = 47$  mm. Na Obr. 26 je vidieť závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone spolu s profilom laserového zväzku lúča, ktorý je ako aj u ostatných vzoriek podobný  $TEM_{00}$  režimu. Dosiachnutá maximálna účinnosť bola  $\sigma = 7,4$  % a maximálny výstupný výkon mal hodnotu  $P_{vyst}^{max} = 51,2$  mW. Prah generovania laserového žiarenia k absorbovanému výkonu vzorky GGA-80E bol  $P_{prah} = 96,9$  mW.



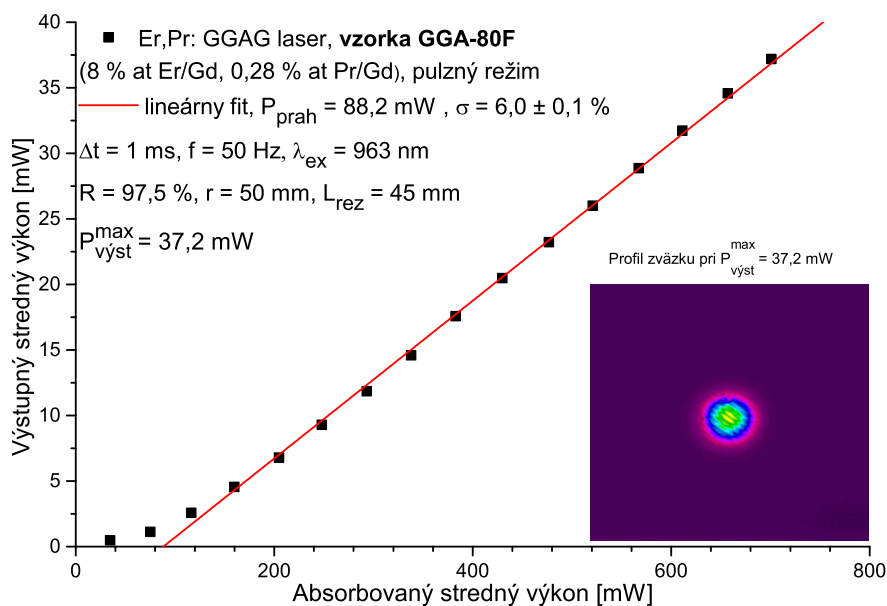
Obr. 26: Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-80E.  $P_{prah}$  - prahová hodnota,  $\sigma$  - diferenciálna účinnosť,  $\Delta t$  - dĺžka pulzu,  $f$  - frekvencia opakovania impulzov,  $\lambda_{ex}$  - excitačná vlnová dĺžka,  $R$  - odrazivosť zrkadla,  $r$  - polomer krivosti,  $L_{rez}$  - dĺžka rezonátoru,  $P_{vyst}^{max}$  - maximálny výstupný výkon.

### 5.2.6 GGA-80F

Na Obr. 27 je zmapovaný kryštál GGA-80F, kde v spodnej časti kryštálu je vidieť menšia súvislá oblasť, ktorá je nehomogénna a nebol tam zmeraný žiadny výstupný výkon. Pri meraní so vzorkou GGA-80F bolo aktívne prostredie vložené v rezonátore dĺžky  $L_{rez} = 45 \text{ mm}$ . Laserové žiarenie bolo generované na vlnovej dĺžke  $2876,8 \text{ nm}$ . Graf závislosti výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone je zobrazený na Obr. 28. Je vidieť, že hodnota prahu laseru vzhľadom k absorbovanému výkonu  $P_{prah} = 88,2 \text{ mW}$  klesla na najnižšie zmeranú prahovú hodnotu. Bola získaná malá diferenciálna účinnosť  $\sigma = 6,0 \%$  a výstupný výkon dosiahol  $P_{vyst}^{max} = 37,2 \text{ mW}$ . Ďalej je na Obr. 28 vidieť profil zväzku laseru, ktorý bol meraný pri maximálnom výstupnom výkone a blíži sa ku základnému módu.



Obr. 27: Výkonová mapa kryštálu GGA-80F.



Obr. 28: Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-80F.  $P_{\text{prah}}$  - prahová hodnota,  $\sigma$  - diferenciálna účinnosť,  $\Delta t$  - dĺžka pulzu,  $f$  - frekvencia opakovania impulzov,  $\lambda_{\text{ex}}$  - excitačná vlnová dĺžka,  $R$  - odrazivosť zrkadla,  $r$  - polomer krivosti,  $L_{\text{rez}}$  - dĺžka rezonátoru,  $P_{\text{vyst}}^{\text{max}}$  - maximálny výstupný výkon.

### 5.3 Zhrnutie a porovnanie výsledkov

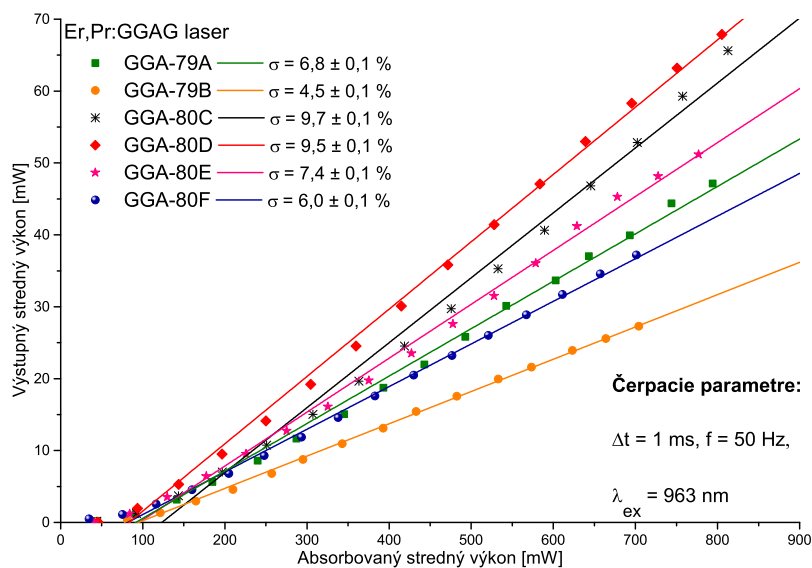
Výsledky laserových meraní pre všetky skúmané vzorky Er,Pr:GGAG sú zhrnuté v Tabuľke 3, z ktorej je vidieť, že najvyšší dosiahnutý výstupný výkon bol so vzorkou GGA-80D.

Graf na Obr. 29 uvádza porovnanie závislosti výstupných výkonov všetkých vzoriek. Maximálna diferenciálna účinnosť  $\sigma = 9,7 \pm 0,1$  % bola nameraná so vzorkou GGA-80C, zároveň má však jej prah laseru najvyššiu hodnotu. Obdobné a najvyššie výstupné výkony generovali vzorky GGA-80D ( $P_{vyst}^{max} = 72,2$  mW) a vzorka GGA-80C ( $P_{vyst}^{max} = 71,3$  mW).

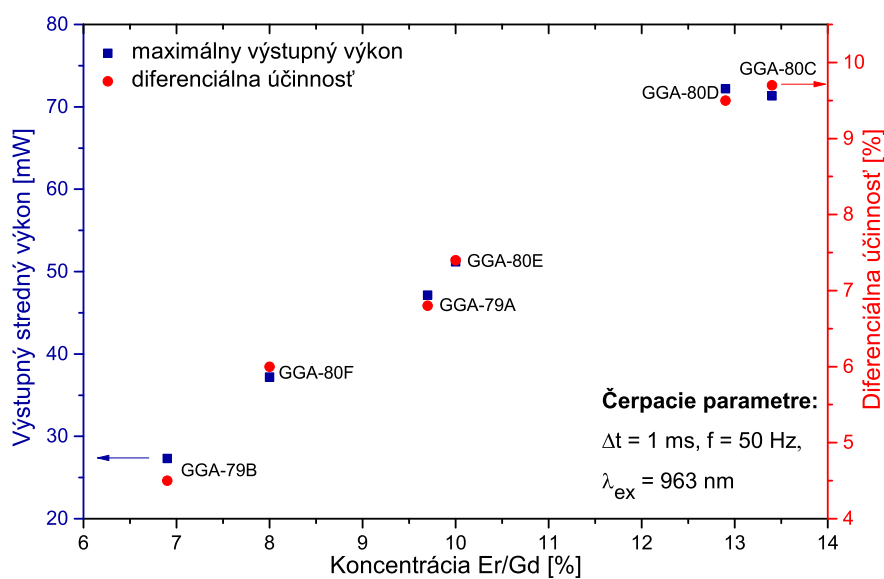
Na Obr. 30 je vidieť ako sa menila diferenciálna účinnosť a výstupný výkon v závislosti na koncentrácii dopovania Er/Gd. So zvyšujúcou koncentráciou erbia pomerne lineárne narastal výstupný výkon aj diferenciálna účinnosť laseru. Z dosiahnutých výsledkov sa nedá bohužiaľ jednoznačne povedať, či by pri zvýšení koncentrácií erbia nad 13,4 % a zachovaní koncentrácie Pr<sup>3+</sup> (0,09 %) nastalo navýšenie výstupných výkonov a účinností.

Vzorka	Koncentrácia Er/Gd [%]	Koncentrácia Pr/Gd [%]	$\lambda$ [nm]	$P_{vyst}^{max}$ [mW]	$P_{prah}$ [mW]	$\sigma$ [%]
GGA-79A	9,7	0,16	2882,4	47,2	103,5	6,8
GGA-79B	6,9	0,29	2880,8	27,3	102,5	4,5
GGA-80C	13,4	0,09	2879,2	71,3	154,2	9,7
GGA-80D	12,9	0,09	2877,6	72,2	93,60	9,5
GGA-80E	10,0	0,15	2884,0	51,2	96,90	7,4
GGA-80F	8,0	0,28	2876,8	37,2	88,20	6,0

Tabuľka 3: Prehľad laserových výsledkov skúmaných vzoriek Er,Pr:GGAG.  $\lambda$  - vlnová dĺžka,  $P_{vyst}^{max}$  - maximálny výstupný výkon,  $P_{prah}$  - prahová hodnota výkonu,  $\sigma$  - diferenciálna účinnosť



Obr. 29: Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone všetkých vzoriek.



Obr. 30: Závislosť diferenciálnej účinnosti a výstupného stredného výkonu na koncentrácii Er/Gd.



Pre porovnanie Er,Pr:GGAG s Er:GGAG využijem hodnoty namerané v mojej bakalárskej a výskumnej práci. Počas experimentu s Er:GGAG laserom (GGA-63-8, 7,1 % at Er/Gd) bez prímеси prazeodýmu boli použité rovnaké čerpace parametre ako pri experimentoch s Er,Pr:GGAG laserom v tejto diplomovej práci. Pri vzorke Er:GGAG (GGA-33d, 30 % at Er/Gd) boli parametre nasledovné: dĺžka pulzu  $\Delta t = 2$  ms, frekvencia opakovania impulzov  $f = 25$  Hz a čerpacia vlnová dĺžka  $\lambda_{ex} = 963$  nm. V experimentálnom meraní so vzorkou GGA-63-8 s najmenšou koncentráciou Er/Gd bol najvyšší dosiahnutý výstupný výkon  $P_{vyst}^{max} = 53,3$  mW s diferenciálnou účinnosťou  $\sigma = 9,2 \pm 0,1$  %. Na druhej strane so vzorkou GGA-33d s vyššou koncentráciou erbia maximálna hodnota výstupného výkonu je nižšia a dosiahla iba  $P_{vyst}^{max} = 35$  mW s účinnosťou  $\sigma = 5,9 \pm 0,1$  %. Z týchto výsledkov je vidieť, že optimálnejšou koncentráciou Er/Gd spolu s  $Pr^{3+}$  bol výkon zvýšený a účinnosť mierne vzrástla. Ko-dopant prazeodýmu pôsobil najmä na spektroskopické vlastnosti, vďaka čomu sa zvýšil aj výstupný výkon laseru. Najvýraznejšou zmenou bola doba života na dolnej laserovej hladine  $^4I_{13/2}$ , pretože vďaka prímеси  $Pr^{3+}$  a v dôsledku up-konverzii sa doba života z jednotiek ms skrátila na stovky  $\mu s$ . V prípade Er:GGAG (GGA-63-8) laseru bola hodnota doby života na dolnej hladine 3,230 ms a v porovnaní s Er,Pr:GGAG laserom sa doba života znížila približne päťkrát na 0,638 ms. Tým sa proces samoukončenia čiastočne potlačí a v budúcnosti je možné využiť nižšie koncentrácie erbia spolu s ko-dopantom prazeodýmu, ktoré majú jasný vplyv na laserové doby života ako aj výstupnú charakteristiku laseru. Porovnanie výsledkov je zhrnuté v Tabuľke 4.

Vzorka	Er,Pr:GGAG (GGA-80C)	Er:GGAG (GGA-63-8)	Er:GGAG (GGA-33d)
Koncentrácia Er/Gd	13,4	7,1	30
Koncentrácia Pr/Gd	0,09	0,00	0,00
Doba života [ $\mu$ s] (horná hladina)	291,9	641,0	389,8
Doba života [ $\mu$ s] (dolná hladina)	638,4	3230	1461
$P_{vyst}^{max}$ [mW]	71,3	53,3	35,0
$\sigma$ [%]	9,7	9,2	5,9

Tabuľka 4: Porovnanie Er,Pr:GGAG laseru a Er:GGAG laserov.  $P_{vyst}^{max}$  - maximálny výstupný výkon,  $\sigma$  - diferenciálna účinnosť

## 6 Záver

V diplomovej práci bolo cieľom spraviť rešerš o aktívnych laserových prostrediach, ktoré sú dopované iónmi  $\text{Er}^{3+}$  a generujú žiarenie v oblasti vlnových dĺžok  $\sim 3 \mu\text{m}$ . Ďalej sa zaoberať vplyvom ko-dopantov na spektroskopické a laserové charakteristiky materiálov, kde bolo sledované najmä pôsobenie prímеси  $\text{Pr}^{3+}$ . Následne v experimentálnej časti premerať spektroskopické charakteristiky dostupných vzoriek  $\text{Er,Pr:GGAG}$ , zostrojil laserový rezonátor pre jednotlivé aktívne prostredia a zmerať základné výstupné charakteristiky laserového žiarenia. Nakoniec dosiahnuté výsledky zhodnotiť a porovnať s výsledkami uvedenými v literatúre.

V úvode teoretickej časti je uvedená stručná charakteristika pevnolátkového laseru a ďalej sú rozobrané energetické systémy, ktoré popisujú excitáciu kvantovej sústavy a vznik laserového žiarenia medzi energetickými stavmi. Následne sú priblížené up-konverzné procesy a ich základné rozdelenie. Poslednou kapitolou teoretickej časti sú erbiom a prazeodýmom dopované granátové lasery, kde boli postupne rozobrané jednotlivé aktívne prostredia dopované  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Pr}^{3+}$  dohľadateľné v literatúre.

Experimentálna časť diplomovej práce sa rozdeľuje na dve kapitoly. Experimentálne usporiadanie zahŕňa popis aktívnych prostredí, použité zariadenia pri meraní a postup merania. V druhej kapitole sú uvedené samotné výsledky spektrálnej charakteristiky aktívnych prostredí a výstupné charakteristiky laserového žiarenia. Pri meraní spektroskopických vlastností boli získané absorpčné spektrá, zmerané fluorescenčné doby života na hornej a dolnej laserovej hladine a fluorescenčné spektrá. Ko-dopantom prazeodýmu boli ovplyvnené hlavne doby života na hladinách. Fluorescenčná doba života na hladine  ${}^4\text{I}_{13/2}$  sa skrátila (z  $3230 \mu\text{s}$  na  $638,4 \mu\text{s}$ ), čo pravdepodobne čiastočne potlačilo efekt samoukončenia. Vo fluorescenčnom spektre sú vidieť prejavy up-konverzných procesov v zelenej a červenej oblasti vlnových dĺžok, ktoré ovplyvňujú laserovú akciu a možno ich do istej miery považovať za nežiadúce, pretože depopulujú hornú laserovú hladinu. Výsledky spektroskopických meraní sú zhrnuté v Tabuľke 2. Meranie laserových výstupných charakteristík sa podarilo na-

merať pri všetkých vzorkách. Ide o diódovo čerpaný pevnolátkový laser generujúci žiarenie v oblasti  $\sim 2,8 \mu\text{m}$ . Výstupné charakteristiky boli dosiahnuté v pulznom režime. Maximálny výstupný stredný výkon  $P_{\text{vyst}}^{\text{max}} = 72,2 \text{ mW}$  bol získaný so vzorkou GGA-80D a najvyššia diferenciálna účinnosť  $\sigma = 9,7 \pm 0,1 \%$  pri vzorke GGA-80C.

Vzorky GGAG, ktoré boli použité pri meraniach neboli opracované do tvaru kociek, čo zapríčinilo zhoršenie možnosti chladenia, a tým pádom boli možnosti čerpania vyšším výkonom značne ovplyvnené. Dôležitým poznatkom je, že vplyvom kodopantu  $\text{Pr}^{3+}$  sa doba života na dolnej laserovej hladine pätnásobne skrátila a doba života na hornej hladine bola zachovaná v stovkách  $\mu\text{s}$ . Optimálnejšie výsledky by v budúcnosti mohli byť dosiahnuté za použitia chladenia v pulznom aj kontinuálnom režime. Nakoľko neboli k dispozícii ani vhodné rozmery kryštálov, kontinuálny režim nebol zmeraný, pretože by pravdepodobne prišlo k prehriatiu kryštálu prípadne k jeho celkovému poškodeniu.

Na záver možno konštatovať, že ciele tejto diplomovej práce boli splnené a pevnolátkový Er,Pr:GGAG laser sa do budúca javí ako vhodný kandidát na nové aktívne prostredie v stredne infračervenej oblasti vlnových dĺžok.

## Zoznam tabuliek

1	Prehľad meraných vzoriek podľa koncentrácie. . . . .	25
2	Spektroskopické výsledky Er,Pr:GGAG. . . . .	35
3	Prehľad laserových výsledkov skúmaných vzoriek Er,Pr:GGAG. . . . .	46
4	Porovnanie Er,Pr:GGAG laseru a Er:GGAG laserov. . . . .	49

## Zoznam obrázkov

1	Schéma pevnolátkového laseru s pozdĺžnym a stranovým budením pomocou laserovej diódy.[3] . . . . .	9
2	Schémy energetických systémov laseru. [3] . . . . .	11
3	Schémy up-konverzných procesov. [7] . . . . .	12
4	Schéma energetických hladín $Er^{3+}$ a $Pr^{3+}$ , ET - <i>prenos energie</i> , CR - <i>križová relaxácia</i> . [11] . . . . .	14
5	Závislosť tepelnej vodivosti rôzne dopovanej matrice YAG na teplote. [12] . . . . .	15
6	Emitujúce vlnové dĺžky Er,Pr:GSAG laseru. [23] . . . . .	19
7	Fluorescenčná doba života Er:GSAG a Er,Pr:GSAG. [23] . . . . .	19
8	Fluorescenčné spektrum Er:YSGG a Yb,Er,Eu:LaYSGG laseru s čerpacou vlnovou dĺžkou 967 nm. [27] . . . . .	23
9	Fotografie skúmaných vzoriek Er,Pr:GGAG. . . . .	25
10	Schéma usporiadania rezonátoru Er,Pr:GGAG laseru. LD - laserová dióda, 1:2 - fokuzáčna optika, $M_1$ - rovinné zrkadlo, $M_2$ - sférické zrkadlo, $L_{rez}$ - dĺžka rezonátoru. . . . .	27
11	Fotografia usporiadania laserového systému, 1 - fokuzáčna optika čerpacej diódy, 2 - rovinné zrkadlo, 3 - aktívne prostredie Er,Pr:GGAG, 4 - výstupné sférické zrkadlo, 5 - servo motorčky pre posun kryštálu. . . . .	29
12	Absorpčné spektrum Er,Pr:GGAG. . . . .	31
13	Absorpčné spektrum v oblasti 950 - 900 nm. . . . .	31
14	Absorpčné spektrum v oblasti 1700 - 2000 nm. . . . .	32
15	Fluorescenčné spektrum Er,Pr:GGAG. . . . .	33
16	Fluorescenčná doba života na laserových hladinách. $\lambda_{ex}$ - excitačná vlnová dĺžka, $\Delta t$ - dĺžka pulzu, f - frekvencia opakovania impulzov. . . . .	34
17	Výkonová mapa kryštálu GGA-79A. . . . .	36
18	Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-79A. . . . .	37

19	Výkonová mapa kryštálu GGA-79B. . . . .	38
20	Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-79B. . . . .	39
21	Výkonová mapa kryštálu GGA-80C. . . . .	40
22	Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-80C. . . . .	41
23	Výkonová mapa kryštálu GGA-80D. . . . .	42
24	Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-80D. . . . .	42
25	Výkonová mapa kryštálu GGA-80E. . . . .	43
26	Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-80E. . . . .	44
27	Výkonová mapa kryštálu GGA-80F. . . . .	45
28	Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone vzorky GGA-80F. . . . .	45
29	Závislosť výstupného stredného výkonu na absorbovanom strednom výkone všetkých vzoriek. . . . .	47
30	Závislosť diferenciálnej účinnosti a výstupného stredného výkonu na koncentrácii Er/Gd. . . . .	47

## Literatúra

- [1] VRBOVÁ, M., JELÍNKOVÁ, H., GAVRILOV, P.: *Úvod do laserove techniky*, ČVUT, Praha, 1998, ISBN 80-01-01108-9.
- [2] KOECHNER, W.: *Solid-State Laser Engineering*, Springer, USA, 6th ed., 2006, ISBN 978-0387-29094-2.
- [3] PASCHOTTA, R.: *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, Wiley-VCH, Weinheim, 2008, ISBN 978-3-527-40828-3.
- [4] HITZ, C., EWING, J., HECHT, J.: *Introduction to Laser Technology*, John Wiley and Sons, Inc., 4th ed., 2012, ISBN 978-0-470-91620-9.
- [5] SALEH, B., TEICH, M.: *Základy fotoniky (Fundamentals of Photonics)*, John Wiley and Sons, Inc., 1991, ISBN 0-471-83965-5.
- [6] CHEN, J., SUN, D., LUO, J., ZHANG, H., DOU, R., XIAO, J., ZHANG, Q., YIN, S.: Spectroscopic properties and diode end-pumped 2.79  $\mu\text{m}$  laser performance of Er,Pr:GYSGG crystal, *Optics Express*, 10 2013, **vol. 21**, pp. 23425–23432, doi:10.1364/OE.21.023425.
- [7] GÜDEL, H., POLLNAU, M.: Near-infrared to visible photon upconversion processes in lanthanide doped chloride, bromide and iodide lattices, *Journal of Alloys and Compounds*, 05 2000, **vol. 303**, pp. 307–315, doi:10.1016/S0925-8388(00)00593-4.
- [8] MA, W., QIAN, X., SU, L., LIU, J., FAN, X., LIU, J., XU, J.: Highly efficient dual-wavelength CW mid-infrared laser in diode-pumped Er:SrF<sub>2</sub> crystals, *Lasers Congress 2016 (ASSL, LSC, LAC)*, 2016, doi:10.1364/ASSL.2016.JTh2A.27.
- [9] ZHANG, C., SUN, L., ZHANG, Y., YAN, C.: Rare earth upconversion nanophosphors: synthesis, functionalization and application as biolabels and energy transfer donors, *Journal of Rare Earths*, 2010, **vol. 28(6)**, pp. 807 – 819, ISSN 1002-0721, doi:10.1016/S1002-0721(09)60206-4.



- [10] JOUBERT, M.-F.: Photon avalanche upconversion in rare earth laser materials, *Optical Materials*, 1999, **vol. 11(2)**, pp. 181 – 203, ISSN 0925-3467, doi:10.1016/S0925-3467(98)00043-3.
- [11] XIA, H., FENG, J., WANG, Y., LI, J., JIA, Z., TU, C.: Evaluation of spectroscopic properties of (Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>/Pr<sup>3+</sup>): SrGdGa<sub>3</sub>O<sub>7</sub> crystal for use in mid-infrared lasers, *Scientific reports*, 09 2015, **vol. 5**, p. 13988, doi:10.1038/srep13988.
- [12] WANG, B., HAIHE, J., ZHANG, Q., YIN, S.: Thermal conductivity of garnet laser crystals, *The European Physical Journal Applied Physics*, 07 2007, **vol. 39**, pp. 23 – 26, doi:10.1051/epjap:2007091.
- [13] SVELTO, O.: *Principles of Lasers*, Springer US, Italy, 5th ed., 2010, ISBN 978-1-4419-1301-2.
- [14] HAYNES, W.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, 97th ed., 2017, ISBN 978-1-4987-5429-3.
- [15] NACCACHE, R.: *Cross-relaxation and energy transfer processes in praseodymium - doped gadolinium gallium garnet (Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Pr<sup>3+</sup>) bulk and nanocrystalline systems*, Ph.D. thesis, Concordia University, 01 2006, URL <https://spectrum.library.concordia.ca/9270/>.
- [16] WANG, Y., LI, J., ZHU, Z., YOU, Z., XU, J., TU, C.: Dual function of Nd<sup>3+</sup> in Nd,Er:LuYSGG crystal for LD pumped 3 μm mid-infrared laser, *Optics Express*, 07 2015, **vol. 23**, p. 18554, doi:10.1364/OE.23.018554.
- [17] ZHONG, K.: Laser performance of neodymium- and erbium-doped GYSGG crystals, *Crystals*, 2019, **vol. 9(4)**, ISSN 2073-4352, doi:10.3390/cryst9040220.
- [18] SETZLER, S. D., FRANCIS, M. P., YOUNG, Y. E., KONVES, J. R., CHICKLIS, E. P.: Resonantly pumped eyesafe erbium lasers, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, **vol. 11(3)**, pp. 645–657, doi:10.1109/JSTQE.2005.850249.

- [19] JOSHI, A., FURTADO, M., SHORI, R., STAFSUDD, O. M.: Small-signal gain measurements for highly doped and co-doped  $\text{Er}^{3+}$ :YAG at 2.936  $\mu\text{m}$ , *Optics Laser Technology*, mar 2013, **vol. 56**, pp. 58–64, ISSN 0030-3992, doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.06.019>.
- [20] DING, S., WANG, H., LIU, W., LUO, J., MA, Y., ZHANG, Q.: Enhanced radiation resistant properties of Nd:GSAG laser crystal by co-doping of  $\text{Cr}^{3+}$ , *Journal of Luminescence*, 05 2019, **vol. 213**, doi:[10.1016/j.jlumin.2019.05.040](https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.05.040).
- [21] RAND, D., MILLER, D., RIPIN, D. J., FAN, T. Y.: Cryogenic  $\text{Yb}^{3+}$  - doped materials for pulsed solid-state laser applications [invited], *Opt. Mater. Express*, 07 2011, **vol. 1(3)**, pp. 434–450, doi:[10.1364/OME.1.000434](https://doi.org/10.1364/OME.1.000434).
- [22] CHEN, Y., ZHANG, Q., PENG, F., LIU, W., HE, Y., DOU, R., ZHANG, H., LUO, J., SUN, D.: Growth, structure and radiation resistant properties of Er,Pr:GSAG laser crystals, *Optical Materials*, 2018, **vol. 84**, pp. 172 – 177, ISSN 0925-3467, doi:[10.1016/j.optmat.2018.07.002](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.07.002).
- [23] CHEN, Y., ZHANG, Q., HE, Y., QUAN, C., LUO, J., XU, J., SUN, D.: Diode end-pumped dual-wavelength Er,Pr:GSAG laser operating at 2696 and 2828 nm, *Optics Laser Technology*, Jan. 2020, **vol. 121**, doi:[10.1016/j.optlastec.2019.105811](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105811).
- [24] FANG, Z., SUN, D., LUO, J., ZHANG, H., ZHAO, X., QUAN, C., HU, L., CHENG, M., ZHANG, Q., YIN, S.: Thermal analysis and laser performance of a GYSGG/Cr,Er,Pr:GYSGG composite laser crystal operated at 2.79  $\mu\text{m}$ , *Opt. Express*, Sep 2017, **vol. 25(18)**, pp. 21349–21357, doi:[10.1364/OE.25.021349](https://doi.org/10.1364/OE.25.021349).
- [25] WANG, Y., YOU, Z., LI, J., ZHU, Z., MA, E., TU, C.: Spectroscopic investigations of highly doped  $\text{Er}^{3+}$ :GGG and  $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ :GGG crystals, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 10 2009, **vol. 42**, doi:[10.1088/0022-3727/42/21/215406](https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/21/215406).
- [26] YOU, Z., WANG, Y., XU, J., ZHU, Z., LI, J., TU, C.: Diode-end-pumped midinfrared multiwavelength Er,Pr:GGG laser, *Photonics Technology Letters, IEEE*, 04 2014, **vol. 26**, pp. 667–670, doi:[10.1109/LPT.2014.2302837](https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2302837).

- [27] WANG, Y., LI, J., ZHU, Z., YOU, Z., XU, J., TU, C.: Impact of codopant ions on 2.5-3.0  $\mu\text{m}$  emission of  $\text{Er}^{3+}$ :  ${}^4\text{I}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$  transition in Yb,Er,Eu:LaYSGG crystal, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 12 2015, **vol. 167**, pp. 76–81, doi:10.1016/j.jqsrt.2015.08.009.
- [28] ŠVEJKAR, R., ŠULC, J., NĚMEC, M., BOHÁČEK, P., JELÍNKOVÁ, H., TRUNDA, B., HAVLÁK, L., NIKL, M., JUREK, K.: Line-tunable Er:GGAG laser, *Opt. Lett.*, 07 2018, **vol. 43(14)**, pp. 3309–3312, doi:10.1364/OL.43.003309.
- [29] ŠVEJKAR, R., ŠULC, J., JELÍNKOVÁ, H.: Er-doped crystalline active media for  $\sim 3 \mu\text{m}$  diode-pumped lasers, *Progress in Quantum Electronics*, 2020, **vol. 74**, p. 100276, ISSN 0079-6727, doi:<https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2020.100276>.