

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA JADERNÁ
A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ

Mikročipové a kompaktní lasery
pro generaci ve středí
infračervené oblasti

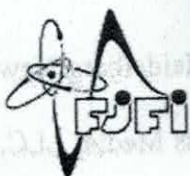
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE: Zuzana Fialková

VEDOUČÍ PRÁCE: Ing. Richard Švejkar, Ph.D.

KONZULTANT: prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc.

ŠKOLNÍ ROK: 2021/2022



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ
Katedra fyzikální elektroniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Zuzana F i a l k o v á

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Fyzikální elektronika

Akademický rok: 2021/2022

Název práce: Mikročipové a kompaktní lasery pro generaci ve střední
(česky) infračervené oblasti

Název práce: Microchip and compact lasers generating in mid-infrared
(anglicky) spectral range

Cíl práce:

Cílem této práce je vypracování rešerše na téma diodově čerpaných pevnolátkových laserů emitujících záření ve střední infračervené oblasti. Zejména se zaměřit na erbiem dopovaná aktivní prostředí. V rámci experimentální části práce budou měřeny spektrální charakteristiky aktivních prostředí. Dále studentka provede návržení a sestavení kompaktního laserového rezonátoru a charakterizaci výstupního laserového záření ve volně běžícím režimu a režimu spínání ziskem.

Pokyny pro vypracování:

1. Proved'te rešerši na téma diodově čerpaných pevnolátkových laserů emitujících ve střední infračervené oblasti. Zejména se zaměřte na erbiem dopovaná aktivní prostředí.
2. Proved'te měření spektrálních charakteristik testovaných aktivních laserových prostředí.
3. Navrhňte a sestrojte diodově čerpaný kompaktní laser generující v oblasti vlnových délek 2,8 μm . Pokuste se o generaci krátkých pulsů v režimu spínání ziskem. Proved'te charakterizaci výstupního generovaného záření. Naměřte výstupní výkon, resp. energii v závislosti na čerpání, určete prahové hodnoty výkonu, délku impulsu generovaného záření, profil svazku a vlnovou délku generovaného laserového záření.
4. Zhodnot'te dosažené charakteristiky a srovnajte je s výsledky uvedenými v literatuře.

Doporučená literatura:

1. Kochler W., Solid-State laser Engineering, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg New York, ed. 6, 2006.
2. Svetlo O., Principles of lasers (5th edition), Springer Science+Business Media, LLC, London, 2010.
3. Švejkar R. et. al., Er-doped crystalline active media for 3 μm diode-pumped lasers, Progress in Quantum Electronics, Vol. 74., p. 100276, 2020.
4. Godart A., Infrared (2-12 μm) solid-state laser sources: a review, Comptes Rendus Physique Express, Vol. 8., p. 1100-1128, 2007.

Jméno a pracoviště vedoucího práce:

Ing. Richard Švejkar, Ph.D.

Katedra fyzikální elektroniky, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze.

Jména a pracoviště konzultantů:

prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc.

Katedra fyzikální elektroniky, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze.

Datum zadání bakalářské práce: 15. říjen 2021

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. červenec 2022

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

Richard Švejkar

Garant oboru

[Signature]

Vedoucí katedry



[Signature]
Děkan

V Praze dne 15.10.2021

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškerou použitou literaturu.

Praha, 22.6.2022

Zuzana Fialková

Název práce:

Mikročipové a kompaktní lasery pro generaci ve střední infračervené oblasti

Autor: Zuzana Fialková

Studijní obor: Fyzikální elektronika

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Richard Švejkar, Ph.D.

Konzultant: prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc.

Abstrakt: Tato bakalářská práce je zaměřena na mikročipové a kompaktní lasery emitující záření ve střední infračervené oblasti. V rešeršní části je rozebrána problematika pevnolátkových laserů a teorie laserů dopovaných erbiem. V experimentální části jsou uvedeny spektroskopické vlastnosti krystalů Er:YAG, Er:GGAG, Er:YLF a ErLa:SrF₂-CaF₂ a výstupní charakteristiky laserů s aktivním prostředím Er:GGAG, Er:YLF a ErLa:SrF₂-CaF₂ a mikročipových laserů Er:YAG a Er:YLF.

Klíčová slova: Erbium, pevnolátkové lasery, střední infračervená oblast, diodové čerpání

Title:

Microchip and compact lasers generating in mid-infrared spectral range

Author: Zuzana Fialková

Branch: Physical Electronics

Thesis: Bachelor thesis

Thesis Supervisor: Ing. Richard Švejkar, Ph.D.

Supervisor: prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc.

Abstract: This bachelor thesis deals with microchip and compact lasers generating in the mid-infrared spectral range. The theoretical part consists of an overview of the theory behind solid-state lasers. The experimental part includes the spectroscopical properties of Er:YAG, Er:GGAG, Er:YLF, and ErLa:SrF₂-CaF₂ crystals and output characteristics of Er:GGAG, Er:YLF, and ErLa:SrF₂-CaF₂ lasers and of Er:YAG and Er:YLF microchip lasers.

Keywords: Erbium, solid-state lasers, mid-infrared lasers, diode-pumped

Poděkování

Děkuji Ing. Richardu Švejkarovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a za podnětné návrhy, které ji obohatily. Také děkuji prof. Ing. Heleně Jelínkové, DrSc. za konzultaci této práce.

Zuzana Fialková

Obsah

1	Úvod	6
2	Pevnolátkové lasery	7
2.1	Polovodičové lasery	7
2.2	Pevnolátkové iontové lasery	7
2.3	Procesy absorpce a emise	9
2.4	Spínání ziskem	10
3	Aktivní prostředí s ionty vzácných zemin	12
3.1	Aktivní prostředí s ionty Erbium	12
3.1.1	Er:YAG	14
3.1.2	Er:GGAG	15
3.1.3	Er:YAP	15
3.1.4	Er ³⁺ iont ve fluoridových maticích	16
4	Experimentální uspořádání	17
4.1	Materiály a optické součásti	17
4.2	Spektroskopie	19
4.3	Laserové vlastnosti	20
5	Experimentální výsledky	23
5.1	Spektroskopické charakteristiky	23
5.2	Charakteristiky jednotlivých laserů	28
5.2.1	Mikročipový laser Er:YAG	28
5.2.2	Er:GGAG laser	29
5.2.3	Er:YLF laser	31
5.2.4	Mikročipový laser Er:YLF	31
5.2.5	ErLa:SrF ₂ -CaF ₂ laser	32
6	Závěr	37
	Reference	41

1 Úvod

Je tomu již 105 let, co Albert Einstein položil teoretické základy laseru ve svém článku *Zur Quantentheorie der Strahlung* [1]. O 43 let později, v roce 1960 byl sestaven první funkční laser a od té doby jsou lasery stále zdokonalovány. Lasery jsou využívány napříč mnoha odvětvími například ve strojírenství (řezání, značkování), meteorologii (dálkoměry, spektroskopie, detekce látek) a v medicíně (dermatologie, stomatologie) aj. V dnešní době, kdy je stále důležitější miniaturizace elektroniky, je tlak i na lasery, aby byly co nejmenší, ale stále neztrácely své vlastnosti a parametry. Právě na kompaktní a mikročipové lasery emitující ve střední infračervené oblasti je zaměřena tato bakalářská práce.

První část této bakalářské práce je věnována rešerši, kde je rozebrána problematika pevnolátkových, zejména erbiem dopovaných laserů. Konkrétně je tato část rozdělena na kapitolu Pevnolátkové lasery, ve které je popsáno jejich fungování, a na kapitolu Aktivní prostředí s ionty vzácných zemin, ve které je pojednáváno o tom, proč volíme tato aktivní prostředí, a následně je rozebrána problematika erbiových aktivních prostředí. Po rešeršní části následuje část experimentální, která obsahuje popis experimentů a výsledky měření. Začíná kapitolou Experimentální uspořádání, kde je popsáno použité vybavení a jeho uspořádání v průběhu experimentů. Poslední kapitolou této práce jsou experimentální výsledky, kde jsou rozebrány naměřené výsledky experimentů. Na závěr jsou shrnuty dosažené výsledky a jejich srovnání s literaturou.

2 Pevnolátkové lasery

Laser je zařízení, které generuje koherentní a ve většině případů monochromatické optické záření [2]. Základní konstrukci pevnolátkového laseru tvoří rezonátor, aktivní prostředí, buzení a chlazení. V iontových pevnolátkových laserech je aktivní prostředí tvořeno krystalem, sklem nebo keramikou, další podkategorií pevnolátkových laserů jsou lasery polovodičové, u kterých jako aktivní prostředí slouží různé kombinace polovodičových materiálů.

2.1 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery jsou lasery, jejichž aktivní prostředí je tvořeno polovodičem a jejichž aktivními částicemi jsou elektrony a díry, to znamená volné nosiče náboje. Ke stimulované emisi u polovodičových laserů dochází přechodem elektronu mezi vodivostním a valenčním pásmem a tedy rekombinací páru elektron díra. Ke vzniku inverze populace hladin dojde, dodáme-li na polovodičový P-N přechod nosiče náboje [2]. Polovodičové lasery jsou tedy nejčastěji čerpány elektrickým proudem. Mohou ale být čerpány i opticky (např. VECSEL) nebo elektronovým svazkem [3].

Mezi přednosti polovodičových laserů patří jejich kompaktnost, možnost rychlého spínání, modulace výkonu a široké rozmezí generovaných vlnových délek od viditelného záření až po střední infračervenou oblast. Polovodičové lasery se řadí mezi velmi využívané lasery. Uplatnění mají v mnoha odvětvích průmyslu a v medicíně. Vysoce výkonné laserové diody jsou pak používány jako zdroje optického čerpání pevnolátkových iontových laserů [2, 4, 3].

2.2 Pevnolátkové iontové lasery

V pevnolátkovém iontovém laseru se aktivní prostředí skládá z matrice, do které jsou dopovány aktivátory. Jako ty slouží ionty vzácných zemin a ionty přechodových prvků. Matrice pevnolátkových iontových laserů může být tvořena sklem, krystalem nebo keramikou. Na její volbě závisí některé vlastnosti laserového záření a laserových přechodů. Musí být transparentní jak pro čerpací, tak pro generované záření,

chemicky stabilní a homogenní. Volbu matrice může ovlivnit pravděpodobnost nezářivého přechodu a možnost tvorby shluků aktivních iontů [2, 3].

Velkou výhodou skleněných matric je jejich relativně snadná výroba ve velkých rozměrech s výbornou optickou kvalitou. Problematická pro ně ale je nižší teplotní vodivost, která je dána amorfní strukturou skla. Na druhou stranu, vlastnosti krystalických matric závisí na materiálu a typu krystalu. Granátové matrice mají oproti sklu vyšší teplotní vodivost a úzká absorpční a emisní spektra. Fluoridy mají naopak široká absorpční a emisní spektra, jsou ale měkké a náchylné k mechanickému poškození. Poslední možností materiálu matrice je keramika, která spojuje vlastnosti skla a krystalu. Problematický je pro keramické matrice ale vysoký rozptyl uvnitř aktivního prostředí [4].

Aktivní prostředí v laseru je umístěno uvnitř rezonátoru. Hlavní funkcí rezonátoru v laseru je zajištění kladné zpětné vazby, pomocí které jsou kompenzovány optické ztráty uvnitř něho. Rezonátor se ve většině případů skládá ze dvou zrcadel umístěných tak, že aktivní prostředí leží mezi nimi. Jedno z těchto zrcadel je totálně odrazné. Druhé propouští část generovaného záření mimo rezonátor a říkáme mu výstupní zrcadlo. Tato zrcadla mohou být rovinná, konvexní i konkávní. Jedním ze základních a nejvíce používaných rezonátorů je hemisférický, který je sestavený z čerpacího rovinného zrcadla a výstupního konkávního zrcadla. Tento typ rezonátoru je jednoduchý na nastavení a snadno se u něj dosahuje překryvu čerpacího a laserového záření v aktivním prostředí [4, 5]. Rezonátor sestávající ze dvou rovinných zrcadel je používán typicky u Fabry-Pérotova rezonátoru nebo u mikročipových laserů, kde jsou čela leštěna rovnoběžně a zrcadla deponována přímo na ně [2, 3].

Pro koherentní čerpání, kterým se zabývá tato práce, musí být vhodně zvoleny parametry zrcadel rezonátoru. Je-li aktivní prostředí buzeno podélně, čerpací zrcadlo musí být transparentní pro excitační vlnové délky a zároveň totálně odrazné pro vlnovou délku laseru. Naopak při stranovém čerpání toto nemusí být zohledněno. Buzení zajišťuje dodání dostatečné energie do aktivního prostředí, aby bylo dosaženo prahu generace a mohlo vznikat laserové záření. Pro pevnolátkové iontové lasery je využíváno zejména optické buzení z koherentního zdroje, například laserové

diody, nebo z nekoherentního zdroje, výbojky. Laserová buzení mohou vyzařovat od monochromatického spektra po spektrum záření černého tělesa. Výhoda monochromatického buzení laserovou diodou je vyšší účinnost a snížení spotřeby proudu [2].

2.3 Procesy absorpce a emise

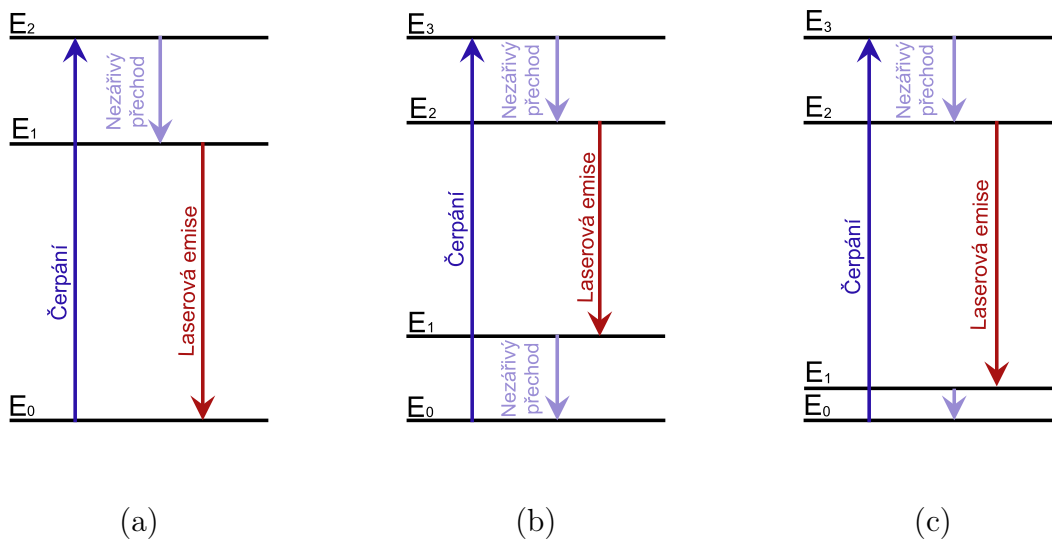
Čerpáním je do aktivního prostředí dodávána energie ve formě fotonů. Tyto fotony jsou absorbovány kvantovými soustavami, které pomocí takto získané energie mohou přejít do excitovaného stavu. Opačným procesem tohoto děje je emise. Ta může nastat spontánně, kdy kvantová soustava samovolně vyzáří foton a přejde do základního stavu. Je-li tento proces vyvolán dopadajícími fotony, nazveme ho stimulovanou emisí. Foton vyzářený stimulovanou emisí má stejné vlastnosti (směr, vlnovou délku, polarizaci) jako foton, který dopadl na kvantovou soustavu a vyvolal tento proces. Ke stimulované emisi může dojít pouze tehdy, když mají dopadající fotony vhodnou energii [3, 4].

V laseru lze popsat procesy absorpce a emise třemi hlavními laserovými systémy: tří-, čtyř- a kvazi-tříhladinovým, které jsou naznačeny na obrázku 1. Při funkci laseru v tříhladinovém uspořádání (obrázek 1a), čerpáme ze základní na nejvyšší hladinu. Z té kvantová soustava rychlým nezářivým přechodem sestoupí na prostřední hladinu, kterou nazveme horní laserovou metastabilní hladinou. Z této hladiny poté dojde k zářivému laserovému přechodu zpět do základního stavu [3].

Pokud využijeme čtyřhladinové uspořádání (obrázek 1b), kvantová soustava se ze základního stavu excitací dostane na nejvyšší hladinu a z té nezářivým přechodem sestoupí na horní laserovou hladinu, jako tomu bylo u tříhladinového systému. Spodní laserová hladina čtyřhladinového systému leží nad základní hladinou [3]. Pro některé laserové systémy dochází k tomu, že je spodní laserová hladina velmi blízká základní hladině (obrázek 1c). Takový systém musí být většinou chlazen, aby došlo k depopulaci dolní laserové hladiny a tím k umožnění vzniku inverze populace hladin. Takové laserové uspořádání nazveme kvazi-tříhladinovým uspořádáním [4].

Hlavním rozdílem tří- a čtyř- hladinového laserového systému je moment, kdy nastává inverze populace. Inverze populace hladin nastane, je-li na horní laserové

hladině excitováno více kvantových soustav, než je v základním stavu. Ve tříhladinovém systému tedy potřebujeme mít více než polovinu kvantových soustav v excitovaném stavu. V čtyřhladinovém systému k nastolení inverze populace hladin stačí, aby na horní laserové hladině byla jedna kvantová soustava, zatímco dolní laserová hladina je prázdná. Dosažení inverze populace hladin ve čtyřhladinovém systému je tak jednodušší [4].



Obrázek 1: Grafické znázornění tříhladinového (a) a čtyřhladinového (b) a kvazi-tříhladinového (c) laserového systému

2.4 Spínání ziskem

Existuje několik metod generace krátkých pulzů (mode-locking, Q-spínání, spínání ziskem) a každá z nich ke generaci krátkých pulzů používá různé postupy. Metoda spínání ziskem neboli gain-switching, na kterou je zaměřena tato práce, využívá intenzivní a krátké čerpací pulzy, jejichž pomocí získá krátké pulzy laserového záření s vysokým výkonem. Spínání ziskem funguje tak, že se v aktivním prostředí nahromadí energie, než dojde k překročení prahu generace. Po jeho překročení je vyzářen krátký velmi výkonný pulz laserového záření.

Jelikož délka generovaného pulzu závisí mimo jiné na délce aktivního prostředí (resp. rezonátoru), je spínání ziskem pro pevnolátkové iontové lasery možné pouze

pokud je laser čerpán diodou. Laser čerpaný výbojkou má moc dlouhé aktivní prostředí, rezonátor nemůže být dostatečně krátký a generované pulzy by byly velmi dlouhé [5, 6]. Spínání ziskem je proti Q-spínání velice výhodné, protože nepotřebuje žádný další optický prvek nebo speciální elektroniku v rezonátoru. Vlastnosti generovaných pulzů závisí na čerpacích pulzech a jsou tedy velmi snadno nastavitelné změnou vlastností čerpání. Energie pulsu generovaného spínání ziskem je typicky nižší než energie, které je možné dosahovat pomocí Q-spínání [3].

3 Aktivní prostředí s ionty vzácných zemin

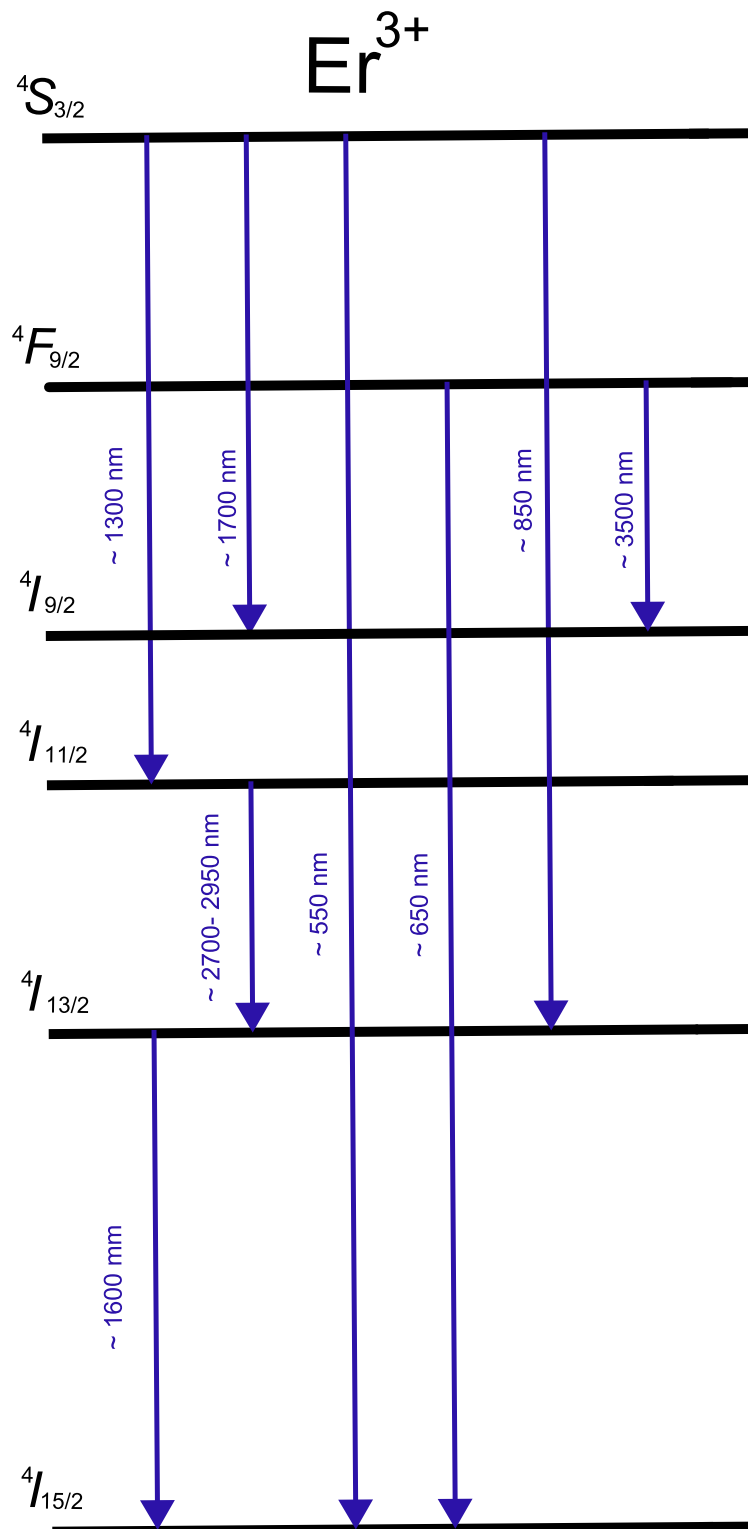
Ionty vzácných zemin neboli lanthanoidů jsou nejčastějším aktivátorem pevnolátkových iontových laserů, které ve struktuře matrice nahradí malou část jiných iontů podobné velikosti. Často používanými aktivátory jsou trojmocné zeminy, jako je neodym, ytterbium, erbium, holmium, praseodym nebo thulium. Výhodou lanthanoidů je, že poloha energetických hladin jen málo závisí na matrici. Na rozdíl od přechodových prvků mají lanthanoidy stíněnou 4f slupku, ve které se nacházejí opticky aktivní valenční elektrony. Díky tomuto stínění mají lanthanoidy úzké spektrální čáry [2, 3].

3.1 Aktivní prostředí s ionty Erbia

Erbium je 68. prvek v periodické tabulce. Řadí se do skupiny lanthanoidů a bylo objeveno v roce 1843 v minerálu zvaném gadolinit. K dopování laserových matic se využívají erbiové ionty Er^{3+} . Tyto ionty umožňují více laserových přechodů, nejčastěji se však využívá přechodů vyzařujících vlnové délky v oblasti kolem 1,5 μm a 2,8 μm [7, 8].

Laser emitující záření na vlnových délkách v oblasti 2,8 μm má velmi významné využití v medicíně. Vlnová délka záření Er:YAG laseru leží na maximu absorpce vody. Z tohoto důvodu je toto záření velmi dobře absorbováno tkáněmi a laser jej emitující může být využíván v mnoha odvětvích jako je například chirurgie, kožní a oční lékařství a stomatologie [7]. V dnešní době je využíván vysoko výkonný výbojkově čerpaný laser ve stomatologii a dermatologii. Kdyby se ale podařilo výkon laseru ještě zvýšit, mohl by být používán i ve více odvětvích, například i pro operace kostí. [7, 8, 9].

Pro generaci laserového záření v oblasti 1,6 μm (přechod z hladiny ${}^4\text{I}_{13/2}$ na ${}^4\text{I}_{15/2}$) používáme přímé buzení do hladiny ${}^4\text{I}_{13/2}$ vlnovou délkou 1,5 μm (tzv. rezonanční čerpání) nebo nepřímé buzení do hladiny ${}^4\text{I}_{11/2}$ vlnovou délkou 0,97 μm . Chceme-li vygenerovat záření vlnových délek kolem 2,8 μm (přechod z hladiny ${}^4\text{I}_{11/2}$ na ${}^4\text{I}_{13/2}$), použijeme čerpání vlnovou délkou $\sim 0,97 \mu\text{m}$, viz obrázek 2 [7].

Obrázek 2: Přejchody a energetické hladiny v Er^{3+}

Tady však nastává jeden ze zásadních problémů erbiem dopovaných aktivních prostředí a tím je snížení účinnosti laserů zapříčiněné dlouhou dobou života na spodní laserové hladině ve srovnání s horní laserovou hladinou. Kvantové soustavy se shromažďují na hladině ${}^4I_{13/2}$ a může dojít i k přerušení generace laserového záření. Tento problém můžeme řešit použitím matrice s nízkou energií fononů. V takovém aktivním prostředí je nižší pravděpodobnost, že kvantová soustava při přechodu z hladiny ${}^4I_{11/2}$ na hladinu ${}^4I_{13/2}$ místo emise fotonu předá svou energii okolí. Dojde tak k prodloužení doby života na horní laserové hladině, a tedy ke snížení pravděpodobnosti, že laser přestane generovat laserové záření kvůli přeplnění hladiny ${}^4I_{13/2}$ [7, 10].

Pokud použijeme vysokou koncentraci iontů Er^{3+} v aktivním prostředí, můžeme zkrátit dobu života na dolní laserové hladině a tím podpořit laserovou akci v oblasti 2,9 μm . Tím ale může dojít k dalším problémům s krystalem. S vyšší koncentrací snáze vznikají shluky iontů erbia. Musíme proto volit vhodnou matici, do které erbiem dopujeme. Při vyšší koncentraci iontů erbia také dojde ke snížení tepelné vodivosti materiálu, což má za následek špatný odvod tepla z laserového systému. Vypěstovat takový krystal může být obtížnější [7].

3.1.1 Er:YAG

YAG neboli yttrito-hlinitý-granát [2] je kubický krystal s výbornou tepelnou vodivostí v nedopované formě. Er:YAG byl prvním erbiem dopovaným laserem, který byl uveden do provozu v roce 1975 sovětskými vědci [4]. V krystalu Er:YAG je část iontů Y^{3+} nahrazena ionty Er^{3+} , které mají podobný atomární poloměr [5, 7]. Pro dopování se používají koncentrace iontů erbia od 0,5 do 50 %. Při vyšších koncentracích už může docházet k poruchám struktury krystalu, které mohou ovlivnit například tepelnou vodivost.

Laser s aktivním prostředím Er:YAG generuje záření vlnových délek 1,6, 2,7 a 2,94 μm . Krystal s vysokou koncentrací iontů erbia (10-50 %) umožňuje laserový přechod mezi hladinami ${}^4I_{11/2}$ a ${}^4I_{13/2}$ a tedy generaci záření s vlnovou délkou 2,94 μm [5, 7]. V takovém krystalu dochází k rychlému vyprazdňování dolní laserové hladiny.

Naopak krystal s nízkými koncentracemi Er^{3+} generuje záření o vlnové délce 1,6 μm .

Er:YAG je jediný běžně používaný erbiem dopovaný laser generující na vlnové délce 2,94 μm a je široce používaný v medicíně, například v dermatologii, stomatologii nebo pro transplantace vlasů. Dále laser generující na vlnové délce 1,6 μm je využíván v oku bezpečném zaměřování a měření vzdáleností [5, 7].

3.1.2 Er:GGAG

Krystal GGAG ($\text{Gd}_3\text{Ga}_3\text{Al}_2\text{O}_{12}$) má stejně jako krystal YAG kubickou soustavu. Ionty Er^{3+} vstupují do krystalické mřížky na místo iontu Gd^{3+} . Spektrální čáry Er:GGAG jsou rozšířeny díky výměně iontů hliníku za ionty gallia. Výhodou krystalu Er:GGAG je energie fononů, která je nižší než u krystalů Er:YAG a Er:YVO₄. Z té plyne i delší doba života na horní laserové hladině tohoto krystalu. Spolu s širším emisním spektrem je umožněno ladění jeho laserového záření. Krystal GGAG má také nižší bod tání než YAG, což může být vhodné pro jeho pěstování. Fluoridové krystaly dosahují bodu tání ještě nižšího než krystal GGAG, ty jsou ale křehké. V dostupných publikacích je možné dohledat dříve dosažený výstupní výkon a účinnost laseru s Er:GGAG krystalem. V kontinuálním režimu dosáhl tento laser výkonu 75 mW a účinnosti 7,4 %. [7, 11]

3.1.3 Er:YAP

YAP (YAlO_3) je anizotropní krystal kosočtverečné soustavy, díky které je možné z Er:YAP laseru generovat polarizované záření [7, 12]. V aktivním prostředí laseru Er:YAP jsou stejně jako u Er:YAG laseru některé ionty Y^{3+} nahrazeny ionty Er^{3+} . Laser s aktivním prostředím Er:YAP s koncentrací erbia 1 % byl v kontinuálním režimu provozován s kryogenním chlazením a byl na něm dosažen výkon 27 mW a sklon účinnosti 3,5 % [7]. Aktivní prostředí Er:YAP je vhodné pro vysoce výkonné lasery v blízké infračervené oblasti svou teplotní vodivostí a nízkou energií fononů. Dle dostupných publikací bylo dosaženo průměrného výstupního výkonu až 26,75 W a účinnosti 26,75 % při frekvenci čerpacích pulzů 250 Hz a délce 200 μs [13].

3.1.4 Er^{3+} iont ve fluoridových maticích

První laser s fluoridovou maticí byl sestaven v roce 1960. Jednalo se o uranem dopovanou maticí CaF_2 vyzařující na vlnových délkách $2,5 \mu\text{m}$ [7]. Výhodou fluoridových matic je jejich nízký index lomu v blízké infračervené oblasti, dobrá teplotní vodivost a nízká energie fononů. Ta snižuje pravděpodobnost nezářivých přechodů [14, 9, 10]. Nízký bod tání a nízká koncentrace iontů erbia také umožňují snazší pěstování erbiem dopovaných fluoridových matic.

V krystalech SrF_2 , resp. CaF_2 je při dopování ionty Er^{3+} nahrazována část iontů Sr^{2+} , resp. Ca^{2+} . Dochází tak k přebytku pozitivního náboje, který poté musí být kompenzován. Ionty erbia se v těchto maticích snadno shlukují. To mezi nimi umožňuje snazší přenos energie [10, 14]. Kvůli vzniku těchto shluků ale lasery $\text{Er}:\text{CaF}_2$ a $\text{Er}:\text{SrF}_2$ nemohou mít vysokou koncentraci iontů erbia. Široká pásma absorpčních a emisních spekter laserů s aktivním prostředím $\text{Er}:\text{CaF}_2$ a $\text{Er}:\text{SrF}_2$ jsou dána jejich krystalickou strukturou a jsou zajímavá pro pulsní i kontinuální režim a ladění vlnových délek laseru [14]. Lasery s aktivním prostředím $\text{Er}:\text{CaF}_2$ a $\text{Er}:\text{SrF}_2$ nejsou vhodné pro vysoce výkonné lasery kvůli své teplotní roztažnosti a vodivosti. Maximální výkon těchto laserů se pohybuje okolo 1 W s diferenciální účinností 26% [7]. Lasery $\text{Er}:\text{CaF}_2$ a $\text{Er}:\text{SrF}_2$ mají dlouhou dobu života na hladině $^4\text{I}_{11/2}$ a vysoký poměr dob života mezi hladinami $^4\text{I}_{11/2}$ a $^4\text{I}_{13/2}$ [7, 9, 10, 14]. Tím jsou vhodné pro kontinuální režim [14].

Krystal **YLF** (LiYF_4) je anizotropní krystal čtverečné struktury. V matici $\text{Er}:\text{YLF}$ jsou stejně jako v maticích $\text{Er}:\text{YAG}$ a $\text{Er}:\text{YAP}$ zaměněny některé ionty Er^{3+} za ionty Y^{3+} a tedy narozdíl od matic $\text{Er}:\text{CaF}_2$ a $\text{Er}:\text{SrF}_2$ není třeba kompenzovat náboj [7]. Výhodou krystalu YLF je jeho přirozený dvojlom, který eliminuje teplotní depolarizaci přítomnou v krystalu YAG [2]. Díky anizotropnosti YLF krystalu je možné laserem vyzařovat lineárně polarizované záření vlnové délky $2,8 \mu\text{m}$. V pulsním režimu s bočním čerpáním lze získat vysoce výkonný laser. Jeho výkon se dostane až k 10 W a účinnost na $18,7 \%$. V kontinuálním režimu lze z $\text{Er}:\text{YLF}$ laseru získat výkon 4 W a účinnost $16,5 \%$ [7, 8]. V pulsním režimu lze při diodovém čerpání dosáhnout energií až $5,5 \text{ mJ}$ [8].

4 Experimentální uspořádání

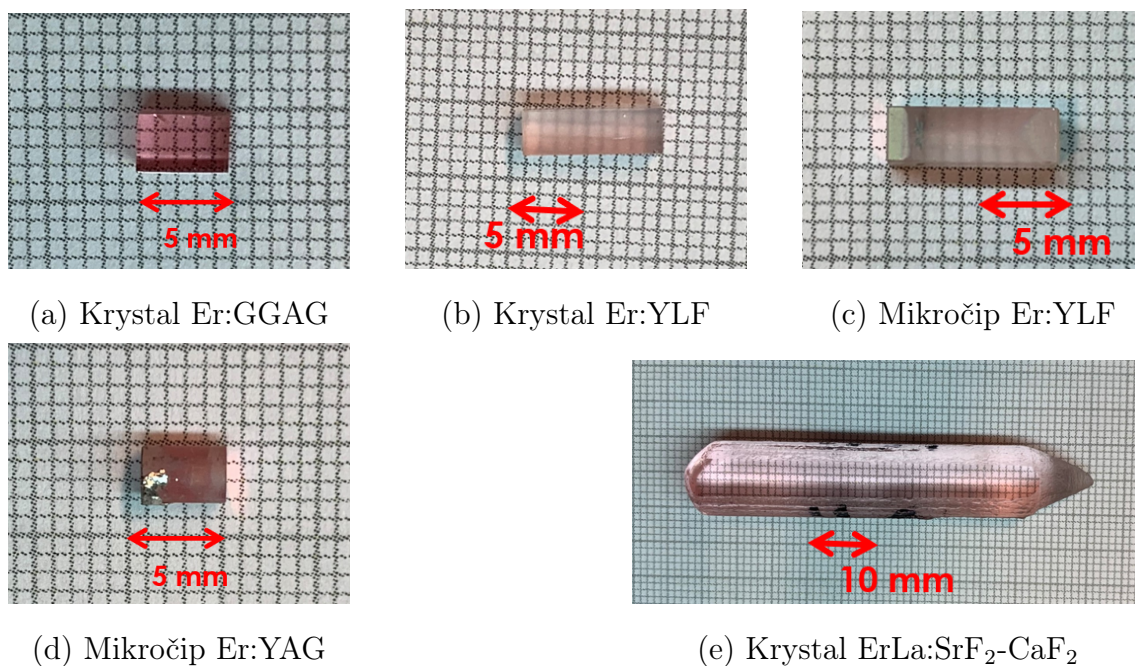
4.1 Materiály a optické součásti

K čerpání laserového systému byla využívána **laserová dioda** LDD50 od firmy LIMO s označením LIMO35-F100-DL976-EX1202. Šířka spektrální čáry této diody byla 0,3 nm a byla teplotou laděna na přibližně 970 nm. Záření z diody bylo navedeno do optického vlákna s průměrem 100 μm a numerickou aperturou $NA = 0,22$.

Vlákno bylo konektorem připojeno na **optický člen** složený ze dvou achromatických čoček. V rámci měření byly využity čtyři různé čočky od firmy Thorlabs. Ohniskové vzdálenosti těchto čoček byly 30, 40, 75 a 100 mm. Jejich označení byla AC-030-B, AC-040-B, AC-075-B a AC-100-B. Na površích těchto čoček byly antireflexní vrstvy s označením B propustné pro záření v rozsahu 650 až 1050 nm. Dále byla v využita dvě zrcadla od firmy Crytur: rovinné zrcadlo z materiálu CaF_2 s průměrem 25,4 mm, které mělo pro vlnové délky 1,6 a 2,8 μm odrazivost větší nebo rovnu 99 % a propustnost pro vlnovou délku 0,97 μm větší nebo rovnu 99 %, a konkávní zrcadlo o průměru 12,7 mm s poloměrem křivosti 50 mm a odrazivostí 95 % na vlnové délce 2,8 μm .

V rámci experimentů se pracovalo s pěti různými **krystaly**: krystal Er:GGAG (obrázek 3a) tvaru kvádrů o rozměrech 3x3x5 mm s atomární koncentrací erbia 38 %, krystal Er:YLF (obrázek 3b) a mikročip Er:YLF (obrázek 3c) oba tvaru kvádrů o rozměrech 3x3x9 mm a s atomární koncentrací erbia 6 %, dále krystal Er:YAG (obrázek 3d) tvaru válce o průměru 3 mm a délce 5 mm a atomární koncentraci erbia 50 % a nakonec krystal ErLa:SrF₂-CaF₂ (obrázek 3e) široký 8 mm s atomární koncentrací erbia 4 %.

Během měření byl použit **osciloskop** od firmy Tektronix s označením TDS3052B se samplováním 5 GS/s a šířkou pásma 500 MHz. Dále byly použity **spektrometr** FT-NIR firmy ARCOptix měřící v rozsahu vlnových délkách 2 - 6 μm a **spektrofotometr** Shimadzu UV-3600 měřící v rozsahu vlnových délek 185 - 3300 nm se šířkou štěrbinu 1 nm s rozlišením $\pm 0,2$ nm pro UV a viditelné spektrum a $\pm 0,8$ nm pro infračervenou oblast. Dále byly použity **wattmetry** PM100A od Thorlabs měřící



Obrázek 3: Testovaná aktivní prostředí dopovaná Er³⁺

do 1 W a EPM2000 od firmy Coherent. Nakonec byla využita **kamera snímající profil svazku** Pyrocam IV od firmy Spiricon s označením PY-IV-C-A.

K měření doby života na dolní laserové hladině byla využívána InGaAs fotodioda firmy Thorlabs s označením FGA10 pro rozsah vlnových délek 0,97 - 1,7 μm . Na fotodiodě byla během měření nasazena pinhole s průměrem 100 μm a pásmový Si filtr oba od firmy Thorlabs. Dále byla použita Si PIN fotodioda FDS1010 s rozsahem vlnových délek 350 - 1100 nm pro měření doby života na horní hladině. Pro měření pulzů v režimu spínání ziskem byla použita rychlá fotodioda s označením PVI-4TE-6 od firmy VIGO systems S.A. s časovou konstantou $\tau_c = 0,5 \text{ ns}$, měřící v rozsahu vlnových délek 2 - 6 μm . Při měření vlnové délky byla použita PbSe fotodioda PDA20H-EC od firmy Thorlabs s rozsahem vlnové délky 1,5 - 4,8 μm nastavená na výstup z monochromátoru. Dále byla využita energetická měrka Coherent s kódem J-10MB-LE s přepočtem $1,108 \times 10^4 \text{ V/J}$ při připojení na osciloskop. Na energetické měrce byl použit filtr firmy Thorlabs s označením FB2750-500. Pak byly využity výkonová sonda S401C firmy Thorlabs měřící v rozsahu vlnových délek od 200 nm do 10,6 μm se stejným filtrem jako byl na energetické měrce a výkonová sonda PM3 bez filtru.

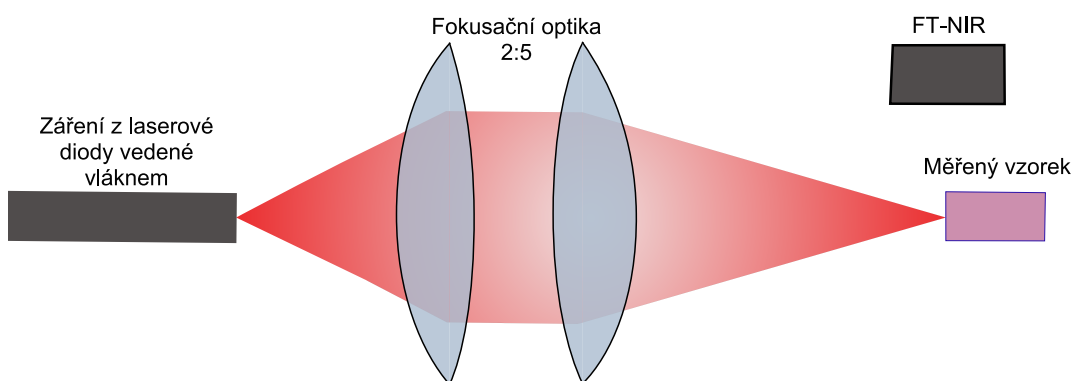
4.2 Spektroskopie

Měření absorpčních spekter bylo provedeno na spektrofotometru, který byl ovládnán přes připojený počítač programem UVprobe. Pro každý vzorek byl použit speciální držák vytištěný na 3D tiskárně, který rozměrově přesně odpovídal velikosti krystalu. Nejprve byl spektrofotometr zkalibrován pro konkrétní držák a poté bylo provedeno měření transmittance v rozsahu vlnových délek 200-1700 nm s krokem 0,2 nm. Z naměřených hodnot transmittance byly poté určeny přibližné meze absorpčního peaku v oblasti 970 nm a v tomto rozsahu bylo provedeno měření s krokem 0,05 nm. Z naměřených hodnot transmittance T byl následně určen koeficient absorpce α aplikací Lambert-Beerova zákona: [15]

$$\alpha = -\frac{\ln T}{l} \quad (1)$$

kde l je délka krystalu.

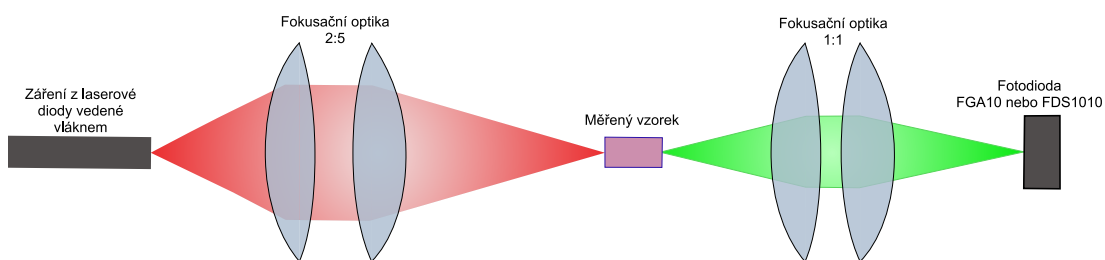
Pro měření fluorescenčních spekter bylo využito uspořádání, které je vidět na obrázku 4. Byly použity čočky s ohniskovou vzdáleností 40 a 100 mm. Přední hrana krystalu byla umístěna do ohniska čerpací optiky. Jako detektor byl použit spektrometr FT-NIR umístěný ze strany vzorku. Rozptýlené fluorescenční záření bylo následně sbíráno přes optiku uvnitř spektrometru.



Obrázek 4: Schéma experimentálního uspořádání při měření fluorescenčních spekter

Měření dob života na horní a dolní laserové hladině probíhalo v uspořádání podle schématu na obrázku 5. Pro fokusaci čerpacího svazku byly použity čočky s ohniskovou vzdáleností 40 a 100 mm a pro fokusaci výstupního záření na detektor byly použity dvě čočky s ohniskovou vzdáleností 75 mm. Přední hrana krystalu byla umístěna do ohniska čerpací optiky. Jako detektor sloužily fotodiody FGA10 pro měření doby života na dolní laserové hladině a FDS1010 pro měření doby života na horní laserové hladině zapojené do osciloskopu. Byl zaznamenán pokles dohasínání fluorescence a takto naměřená data pak byla proložena sestupnou exponenciální funkcí podle vzorce 2. Určením velikosti t z této funkce je určena doba života na hladině τ .

$$y = A \exp \frac{-x}{t} + y_0 \quad (2)$$

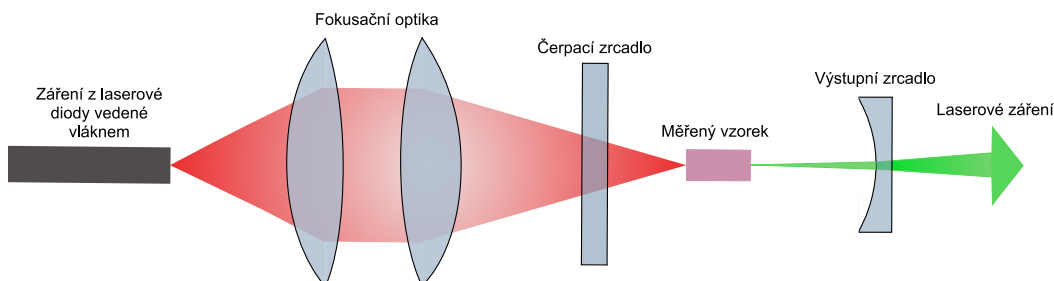


Obrázek 5: Schéma experimentálního uspořádání při měření dob života na hladinách ${}^4I_{13/2}$ a ${}^4I_{11/2}$

4.3 Laserové vlastnosti

Pro měření všech vlastností laseru v režimu volné generace bylo využito uspořádání, jak je znázorněné na schématu na obrázku 6. Pro laser Er:GGAG byly ve fokusační optice využity čočky s ohniskovou vzdáleností 40 a 100 mm. Pro lasery Er:YLF a ErLa:SrF₂ - CaF₂ byly ve fokusační optice použity čočky s ohniskovou vzdáleností 30 a 75 mm. Jako čerpací zrcadlo bylo použito rovinné zrcadlo a výstupním zrcadlem bylo zrcadlo konkávní. Obě zrcadla byla umístěna tak blízko krystalu, jak to bylo možné bez ztráty výkonu a bez přímého kontaktu. U mikročipových

laserů vynecháme čerpací a výstupní zrcadlo, protože ta jsou deponována na čelech krystalu a zbytek uspořádání byl ponechán stejný jako byl u laserů Er:YLF a ErLa:SrF₂-CaF₂.



Obrázek 6: Schéma experimentálního uspořádání při měření vlastností laserového záření

Pro měření výkonu laserového záření byla jako detektor použita výkonová sonda S401C zapojená do wattmetru PM100A. Pro určení absorbovaného výkonu volně běžícího laseru byl výkonovou sondou Coherent PM3 připojenou k wattmetru EMP2000 změřen výkon před a za krystalem. Výkon za krystalem byl potom odečten od výkonu před krystalem. Pro určení absorbovaného výkonu mikročipového laseru byl změřený výkon záření z diody P_{in} a dosazen do vzorce

$$P_{abs} = P_{in}(1 - \exp(-\alpha l)) \quad (3)$$

kde alfa je absorpční koeficient a l je délka aktivního prostředí.

Pro určení délky pulzu v režimu spínání ziskem byl využit detektor PVI-4TE-6 připojený na osciloskop s výše uvedenou dostatečnou šířkou pásma. Délka pulzu byl určena v polovině maxima (FWHM). Vhodným nastavením délky a frekvence čerpacího pulzu byl získán právě jeden pulz laserového záření. Použitá nastavení pulzu čerpací diody jsou zapsaná v tabulce 1. Získaná data byla proložena Gaussovou funkcí, ze které byly určeny délky pulzu v polovině maxima τ_{FWHM} . Takto bylo naměřeno pro každé nastavení čerpací diody deset hodnot délek pulzu, které byly následně vyhodnoceny.

Tabulka 1: Použitá nastavení délky čerpacího pulzu čerpací diody dt a frekvence pulzů f pro jednotlivé materiály

Aktivní prostředí	dt [ms]	f [Hz]
Er:YAG mikročip	190	150
Er:GGAG	88	1666
	8	2000
Er:YLF	73	666
	77	83
Er:YLF mikročip	120	52
	130	137
ErLa:SrF ₂ -CaF ₂	80	1000
	130	77

Po změření délky pulzu byla na místo detektoru umístěna energetická měrka připojená do osciloskopu. Na osciloskopu bylo poté provedeno deset měření amplitudy průběhu energie E_{OUT} . Z naměřené průměrné hodnoty energie a délky pulzu byl poté určen špičkový výstupní výkon P_{PEAK} pomocí vzorce 4.

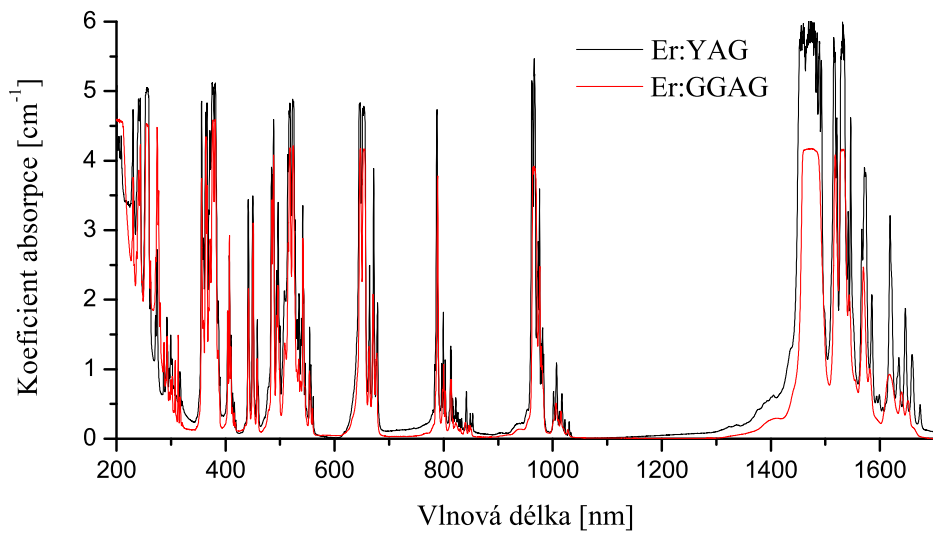
$$P_{PEAK} = \frac{E_{OUT}}{\tau_{FWHM}} \quad (4)$$

Pro naměření vlnové délky výstupního záření byl použit monochromátor, na jehož výstup byla umístěna fotodioda PDA20H-EC. Pro změření profilu generovaného svazku byla na místě detektoru použita kamera snímající profil svazku Pyrocam IV, na které byl nasazen filtr FB2750-500.

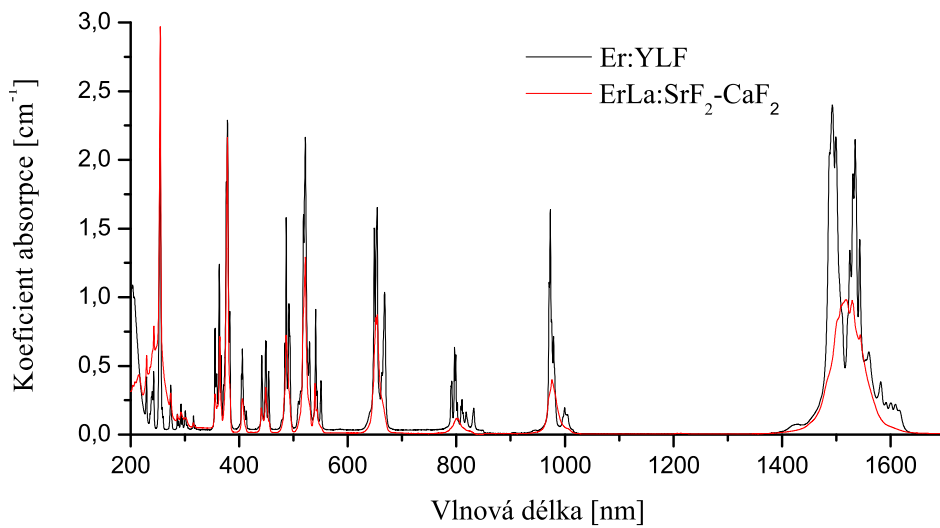
5 Experimentální výsledky

5.1 Spektroskopické charakteristiky

Byla změřena transmisní spektra a z nich pomocí vzorce 1 určena absorpční spektra. Porovnání absorpčního spektra v rozsahu vlnových délek 200 - 1700 nm pro použité granátové matrice je zaneseno na obrázku 7 a pro použité fluoridové matrice na obrázku 8.

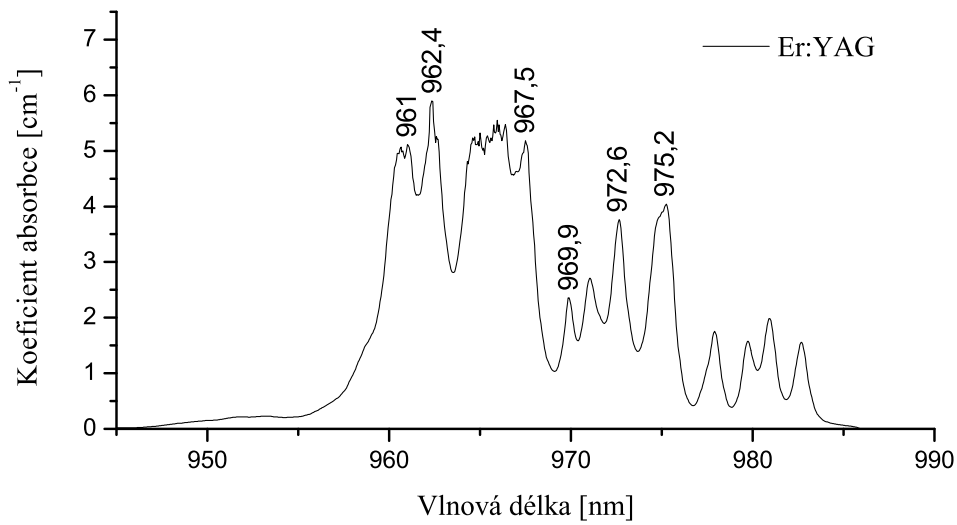


Obrázek 7: Absorpční spektrum pro granátové matrice

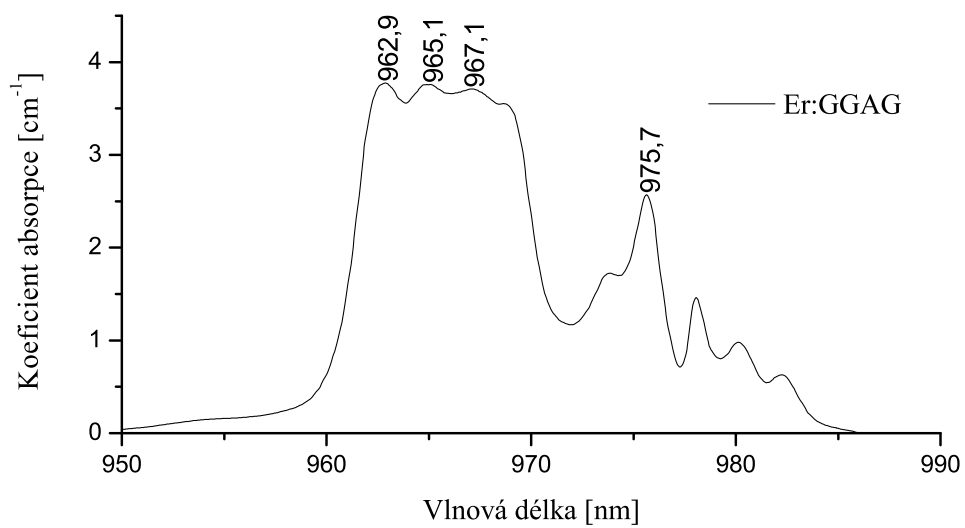


Obrázek 8: Absorpční spektrum pro fluoridové matrice

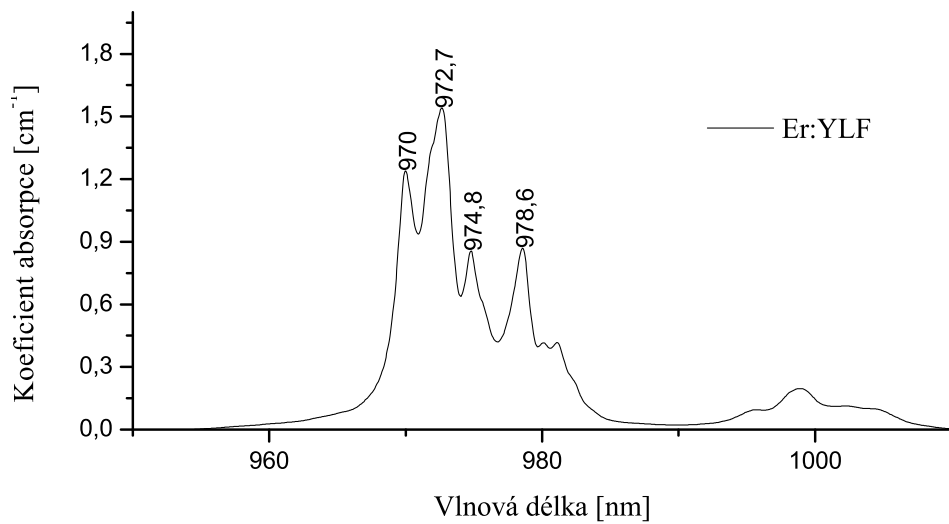
Krystal Er:YAG (obrázek 9) měl dvě významná absorpční maxima. Jedno se nacházelo v okolí vlnové délky 962,3 nm a druhé v okolí vlnové délky 965,9 nm. Krystal Er:GGAG (obrázek 10) měl široké spektrum složené z několika maxim. Krajní maxima tohoto spektra byla v okolí vlnových délek 962,9 a 968,6 nm. Krystal Er:YLF (obrázek 11) měl nejvyšší maximum v okolí vlnové délky 972,6 nm. Krystal ErLa:SrF₂-CaF₂ (obrázek 12) měl jediné výrazné maximum a to v okolí vlnové délky 975,4 nm.



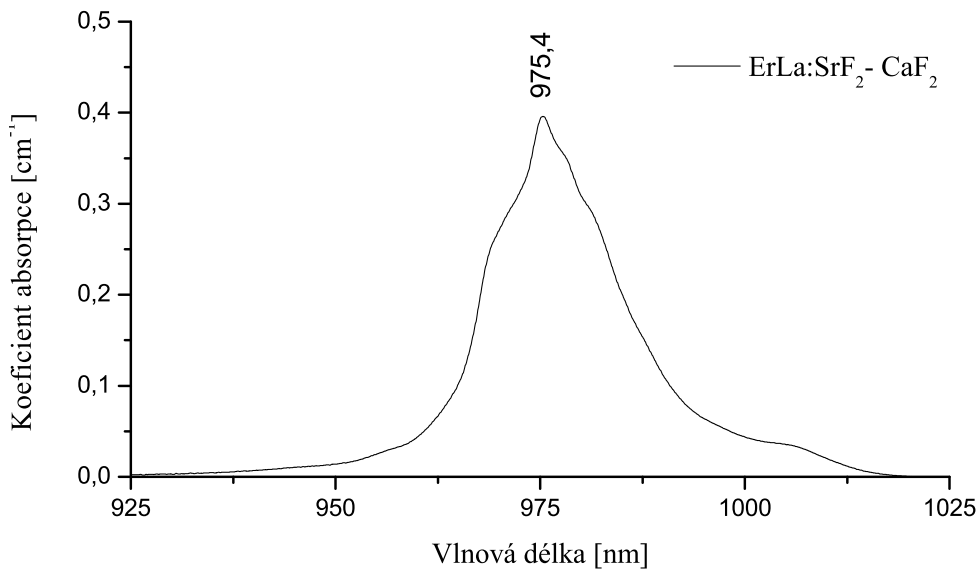
Obrázek 9: Absorpční spektrum krystalu Er:YAG



Obrázek 10: Absorpční spektrum krystalu Er:GGAG



Obrázek 11: Absorpční spektrum krystalu Er:YLF

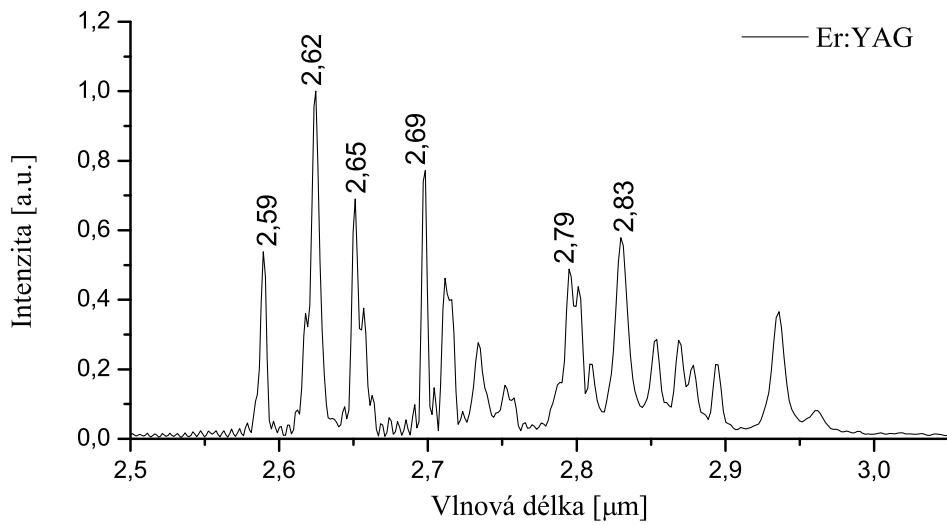
Obrázek 12: Absorpční spektrum krystalu ErLa:SrF₂-CaF₂

Dále byla změřena doba života na horní a dolní laserové hladině použitých krystalů (tabulka 2).

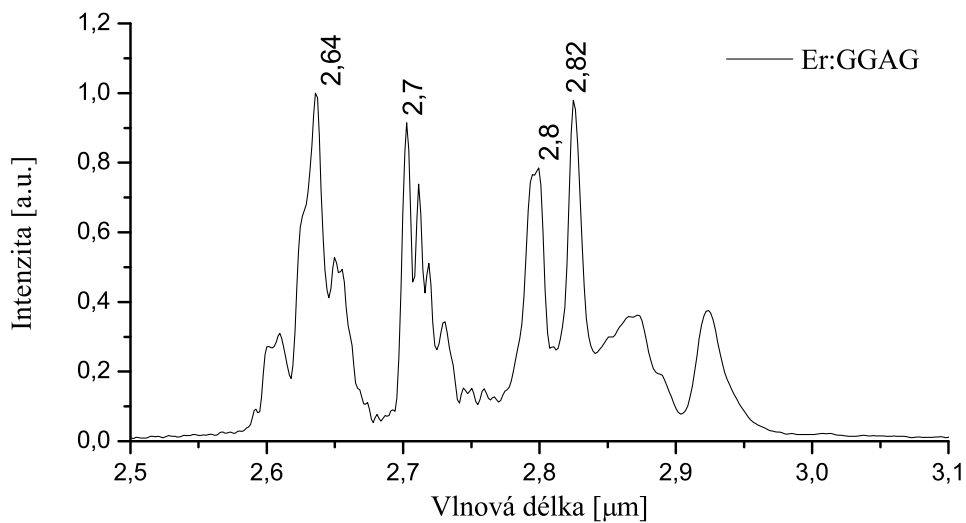
Tabulka 2: Naměřené doby života na dolní (⁴I_{13/2}) a horní (⁴I_{11/2}) laserové hladině pro jednotlivá aktivní prostředí

Materiál	τ na ⁴ I _{13/2} [ms]	τ na ⁴ I _{11/2} [ms]
Er:YAG	4,40 ± 0,02	0,340 ± 0,020
Er:GGAG	3,28 ± 0,03	0,422 ± 0,002
Er:YLF	4,63 ± 0,01	11,34 ± 0,03
ErLa:SrF ₂ -CaF ₂	9,33 ± 0,01	13,55 ± 0,04

Fluorescenční spektra byla měřena v rozsahu vlnových délek 2 - 6 μm . Pro všechny krystaly se maxima nacházela v rozsahu vlnových délek 2,5 - 3 μm . Krystal Er:YAG měl na fluorescenčním spektru (obrázek 13) mnoho úzkých vysokých maxim. Nejvyšší z nich byly v okolí vlnových délek 2,62 μm , 2,69 μm , 2,65 μm a 2,82 μm . Krystal Er:GGAG měl na fluorescenčním spektru (obrázek 14) čtyři hlavní maxima nacházející se v okolí vlnových délek 2,63 μm , 2,70 μm , 2,80 μm a 2,82 μm .



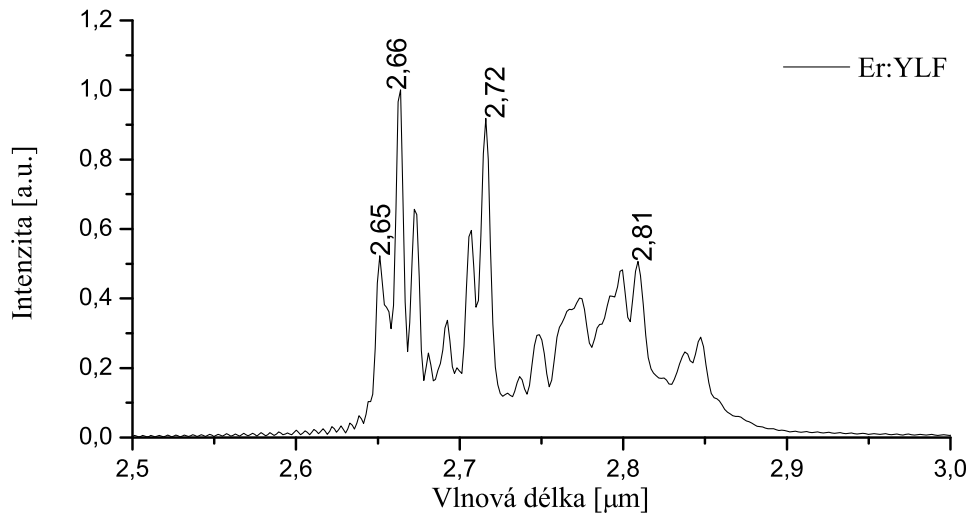
Obrázek 13: Fluorescenční spektrum krystalu Er:YAG



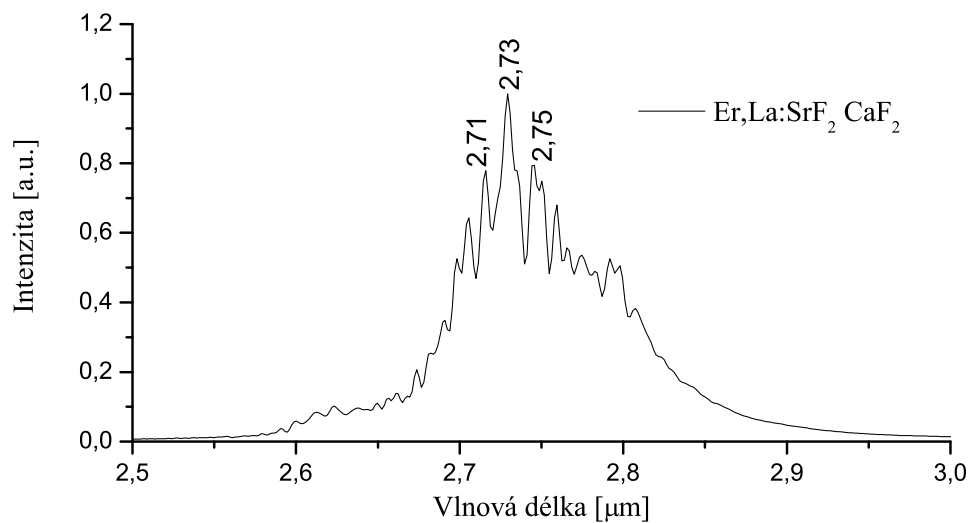
Obrázek 14: Fluorescenční spektrum krystalu Er:GGAG

Krystal Er:YLF měl členité fluorescenční spektrum (obrázek 15) se třemi oblastmi vlnových délek, ve kterých se vyskytovala nejvyšší maxima, a to oblasti v okolí vlnových délek 2,66 μm, 2,71 μm a 2,80 μm. Krystal ErLa:SrF₂-CaF₂ měl na fluorescenčním spektru mnoho maxim blízko u sebe (obrázek 16). Nejvyšší z nich se vyskytovalo na vlnové délce 2,72 μm. Fluorescenční i absorpční spektra fluoridových krystalů jsou poměrně široká ve srovnání s granáty. Tato šířka je důležitá z pohledu

generace krátkých pulzů v režimu mode-locking.



Obrázek 15: Fluorescenční spektrum krystalu Er:YLF



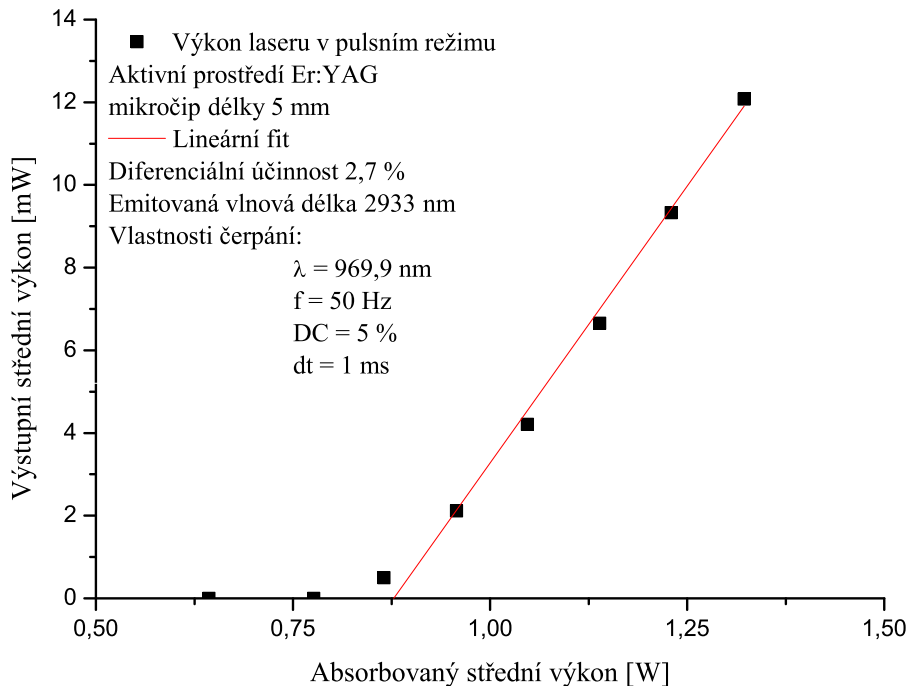
Obrázek 16: Fluorescenční spektrum krystalu Er,La:SrF₂-CaF₂

5.2 Charakteristiky jednotlivých laserů

5.2.1 Mikročipový laser Er:YAG

Mikročipový laser Er:YAG s atomární koncentrací Er³⁺ 50% pracoval s velmi vysokým prahem generace. Jeho účinnost byla 2,7%, práh generace byl 0,88 W a

generovaná vlnová délka byla 2933 nm (obrázek 17). Laser pracující v režimu spínání ziskem čerpaný pulzy diody o frekvenci 150 Hz dosahoval pulzů o délce (318 ± 16) ns a špičkového výkonu 1,9 W (obrázek 24a). Dosažený špičkový výkon mikročipového Er:YAG laseru byl více než poloviční proti špičkovému výkonu druhého měřeného mikročipového laseru (Er:YLF).

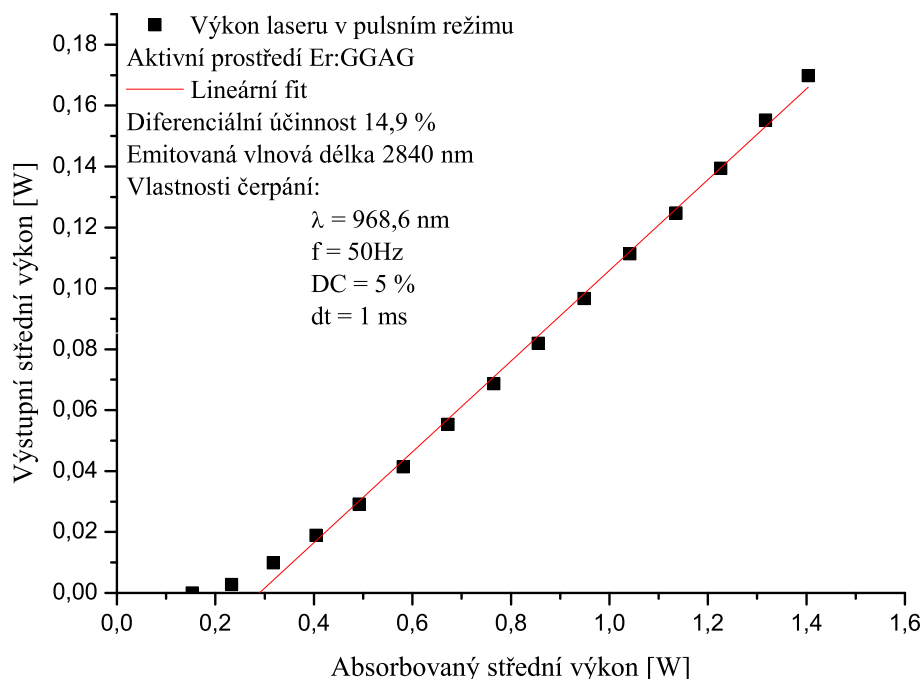


Obrázek 17: Výstupní výkonová charakteristika mikročipového Er:YAG laseru; λ - vlnová délka, f - frekvence, DC - střída, dt - délka čerpacího pulzu

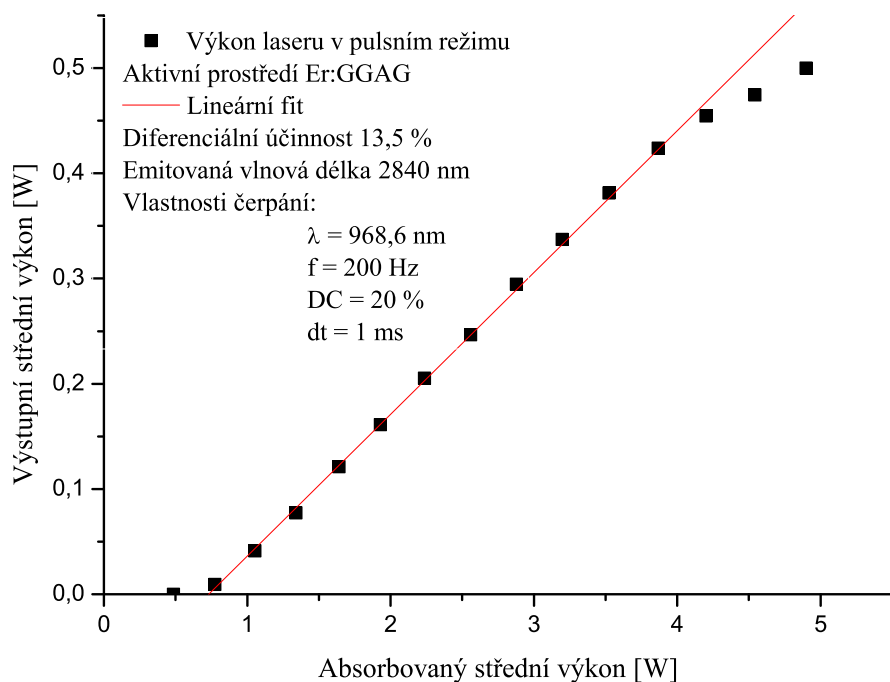
5.2.2 Er:GGAG laser

Laser s aktivním prostředím Er:GGAG s atomární koncentrací Er^{3+} 38 % byl testován pro dvě různá nastavení čerpací laserové diody. Laser čerpaný zářením se střídou 5 % a s frekvencí 50 Hz pracoval s účinností 14,9 % a s prahem generace 0,29 W (obrázek 18) a laser čerpaný zářením se střídou 20 % a s frekvencí 200 Hz pracoval s účinností 13,5 % a s prahem generace 0,73 W (obrázek 19). Oba generovaly záření s vlnovou délkou 2,84 μm . Pro dvě různá nastavení čerpací laserové diody byly měřeny ziskem spínané pulzy. Nejkratší generované pulzy při frekvenci 1666 Hz dosahovaly délky (296 ± 35) ns a špičkového výkonu 7,3 W (obrázek 24b). Pulzy laseru o frekvenci 2000 Hz dosáhly délky (244 ± 9) ns a špičkového výkonu 3,5 W

(obrázek 24c). Dosažený špičkový výkon pulzů Er:GGAG laseru generovaných v režimu spínání ziskem byl pro měřené lasery nejvyšší.



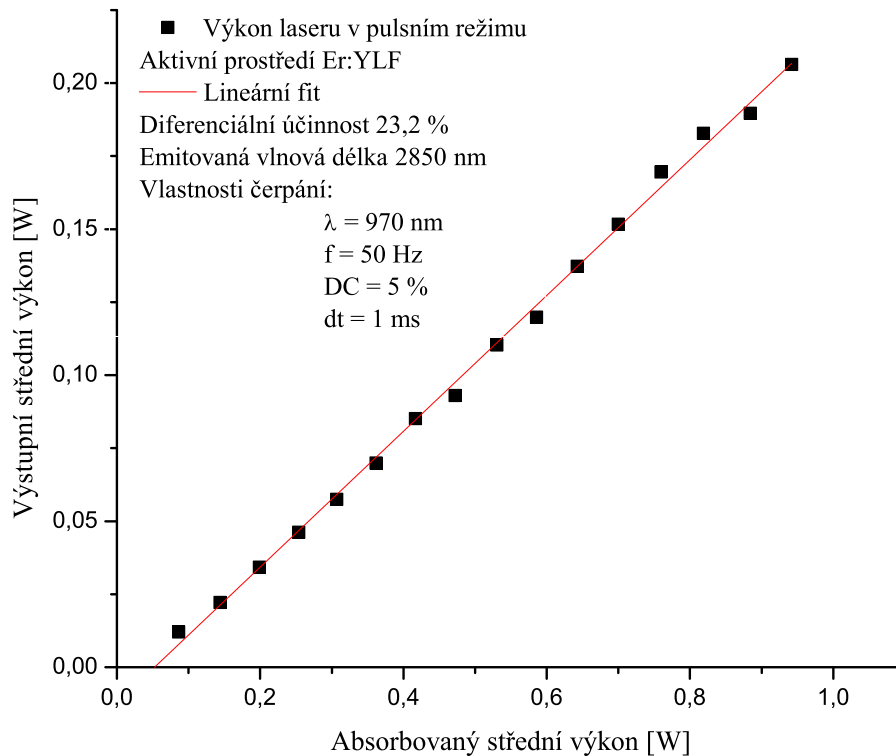
Obrázek 18: Výstupní výkonová charakteristika Er:GGAG laseru čerpaného při střídě DC = 5 %; λ - vlnová délka, f - frekvence, dt - délka čerpacího pulzu



Obrázek 19: Výstupní výkonová charakteristika Er:GGAG laseru čerpaného při střídě DC = 20 %; λ - vlnová délka, f - frekvence, dt - délka čerpacího pulzu

5.2.3 Er:YLF laser

Pro laser s aktivním prostředím Er:YLF, které mělo atomární koncentraci Er^{3+} 6 %, bylo dosaženo účinnosti 23,2 % a prahu generace 0,05 W (obrázek 20). Tento laser generoval záření s vlnovou délkou 2850 nm. Při práci v režimu spínání ziskem byla dvě různá nastavení čerpacího pulzu. Při frekvenci čerpacích pulzů 666 Hz bylo dosaženo délky generovaného pulzu (394 ± 21) ns a špičkového výkonu 4,7 W (obrázek 24d). Při frekvenci čerpacích pulzů 83 Hz bylo dosaženo délky generovaného pulzu (192 ± 6) ns a špičkového výkonu 3,9 W (obrázek 24e). Délka ziskem generovaných pulzů laseru Er:YLF byla nejkratší dosažená.

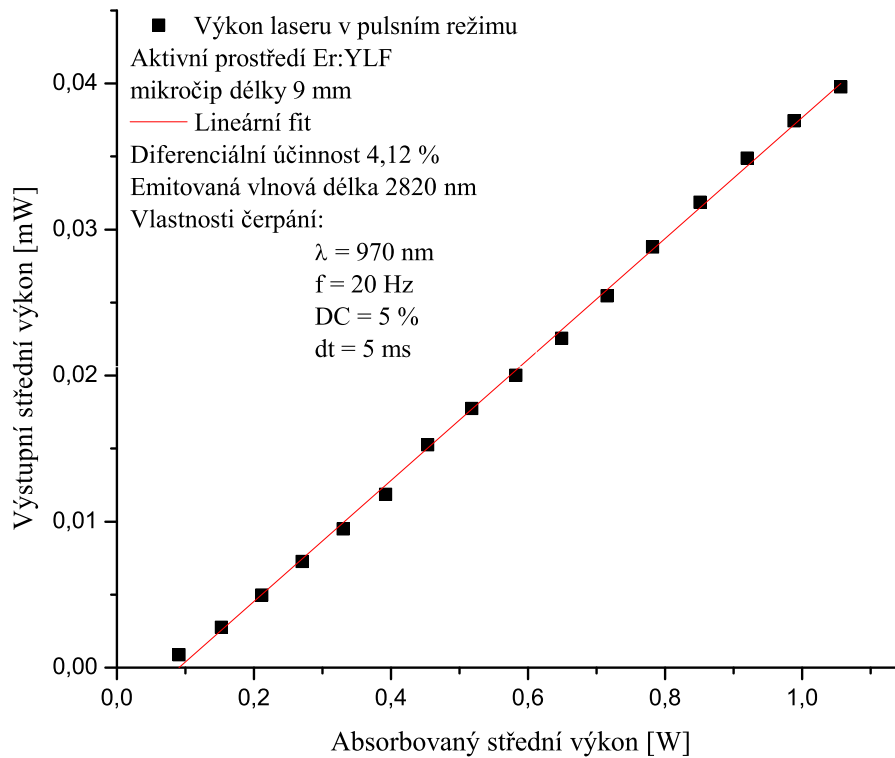


Obrázek 20: Výstupní výkonová charakteristika Er:YLF laseru; λ - vlnová délka, f - frekvence, DC - střída, dt - délka čerpacího pulzu

5.2.4 Mikročipový laser Er:YLF

Mikročipový laser Er:YLF měl stejné parametry aktivního prostředí jako Er:YLF laser v předchozí kapitole. Tento laser pracoval s účinností 4,12 % a s prahem generace 0,09 W (obrázek 20) a generoval laserové záření na třech vlnových délkách:

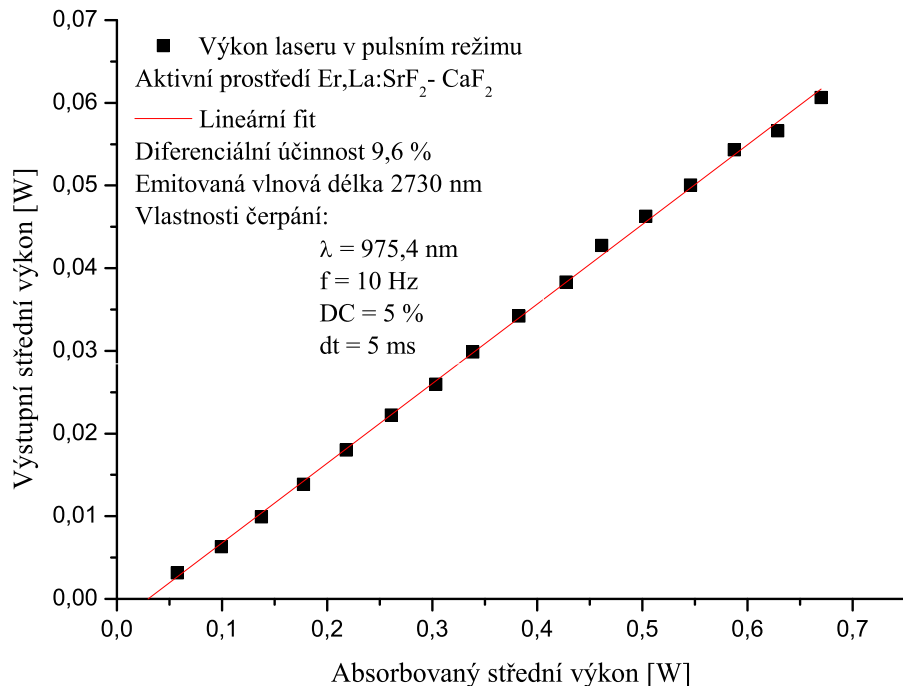
2,85 μm , 2,82 μm a 2,67 μm . Měření vlastností laseru, který pracuje v režimu spínání ziskem, bylo provedeno pro dvě různá nastavení čerpacích pulzů. Při frekvenci 137 Hz bylo dosaženo délky pulzu (256 ± 3) ns a špičkového výkonu 4,2 W (obrázek 24f). Pro laser pracující s frekvencí 52 Hz bylo dosaženo délky pulzu (288 ± 10) ns a špičkového výkonu 4,6 W (obrázek 24g).



Obrázek 21: Výstupní výkonová charakteristika mikročipového Er:YLF laseru; λ - vlnová délka, f - frekvence, DC - střída, dt - délka čerpacího pulzu

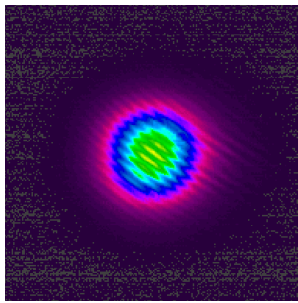
5.2.5 ErLa:SrF₂-CaF₂ laser

Laser s aktivním prostředím ErLa:SrF₂-CaF₂ (4 at. % Er³⁺) dosáhl účinnosti 9,6 %, jeho práh generace byl rovný 0,03 W a generoval záření vlnové délky 2730 nm (obrázek 22). Během laserové generace v režimu spínání ziskem byla použita dvě nastavení čerpací diody. Při nastavení čerpací diody na frekvenci 1000 Hz bylo dosaženo pulzu o délce (400 ± 18) ns a o špičkovém výkonu 4,6 W (obrázek 24h). Při nastavení čerpací diody na frekvenci 77 Hz bylo dosaženo pulzu o délce (360 ± 8) ns a o špičkovém výkonu 2,1 W (obrázek 24i).

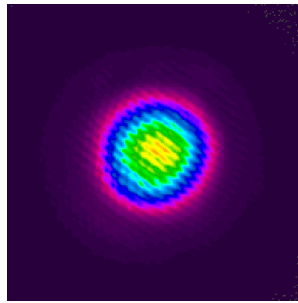


Obrázek 22: Výstupní výkonová charakteristika ErLa:SrF₂-CaF₂ laseru; λ - vlnová délka, f - frekvence, DC - střída, dt - délka pulzu

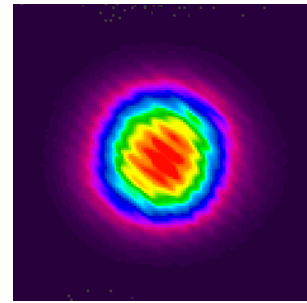
Profily svazků záření měřených laserů (obrázky 23a - 23e) jsou velmi blízké základnímu módu TEM₀₀.



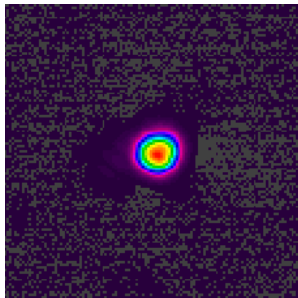
(a) Mikročip Er:YAG



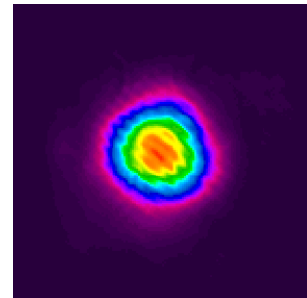
(b) Er:GGAG



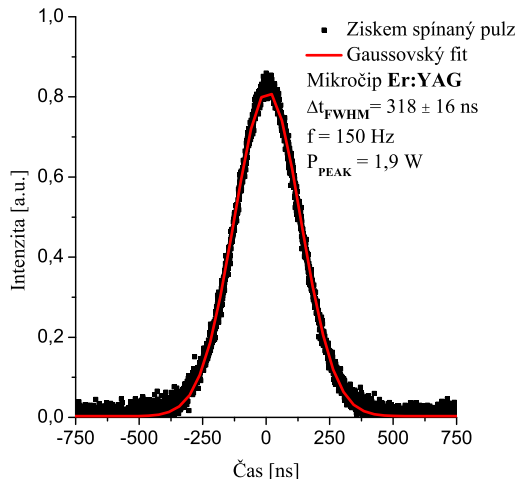
(c) Er:YLF



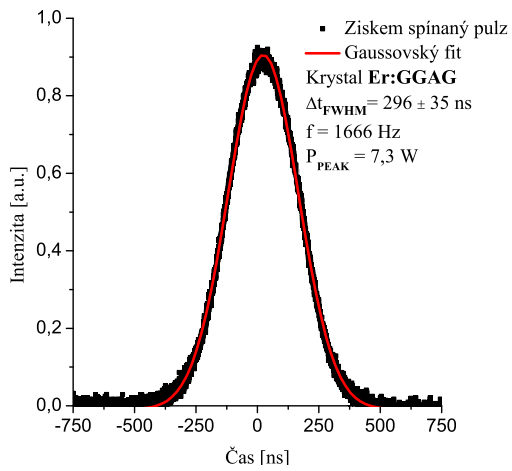
(d) Mikročip Er:YLF

(e) ErLa:SrF₂-CaF₂

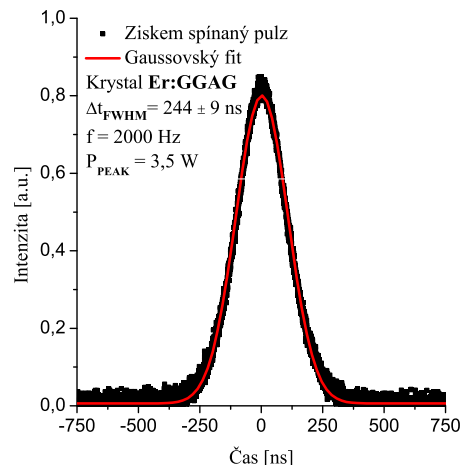
Obrázek 23: Profily laserových svazků



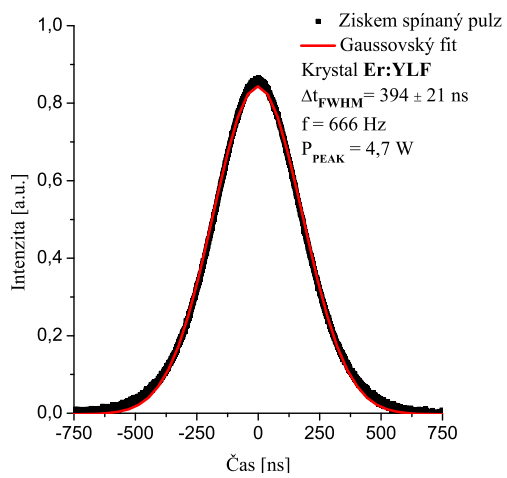
(a) Mikročip Er:YAG



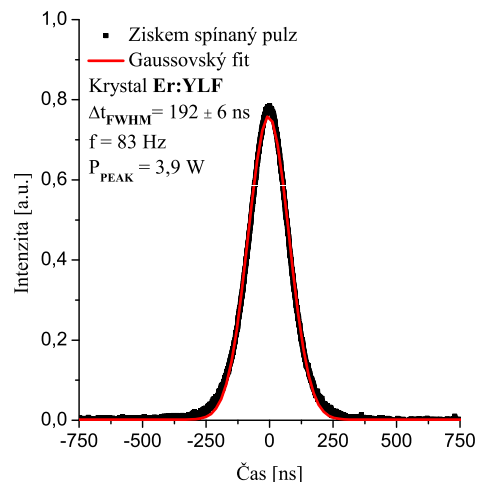
(b) Er:GGAG, frekvence 1666 Hz



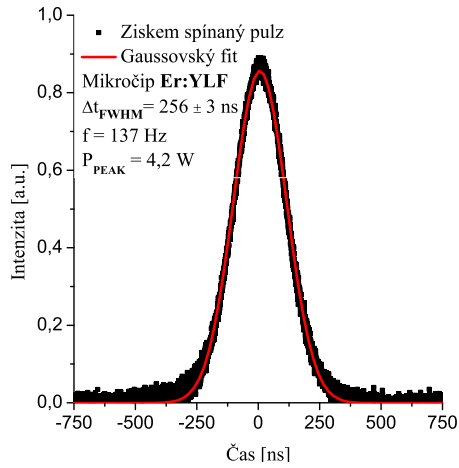
(c) Er:GGAG, frekvence 2000 Hz



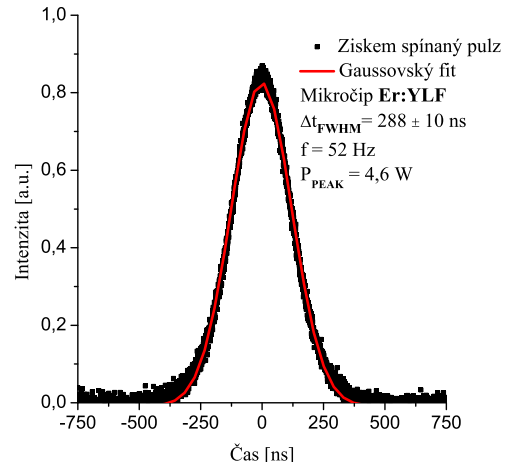
(d) Er:YLF, frekvence 666 Hz



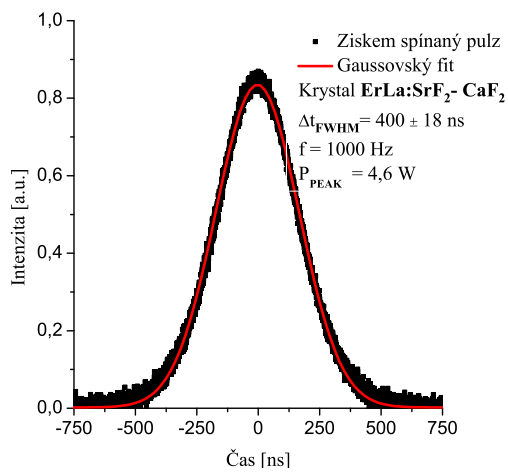
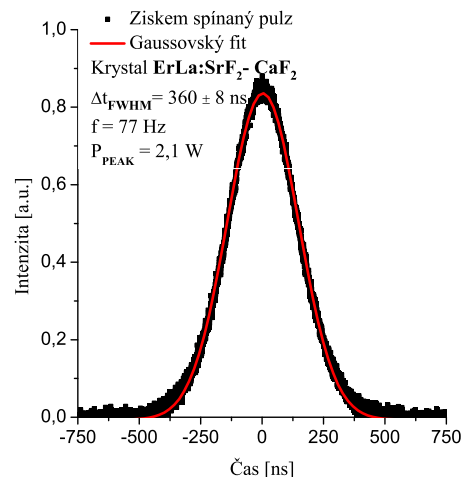
(e) Er:YLF, frekvence 83 Hz



(f) Mikročip Er:YLF, frekvence 137 Hz



(g) Mikročip Er:YLF, frekvence 52 Hz

(h) ErLa:SrF₂-CaF₂, frekvence 1000 Hz(i) ErLa:SrF₂-CaF₂, frekvence 77 Hz

Obrázek 24: Generované ziskem spínané pulsy pro jednotlivé zkonstruované lasery, kde Δt_{FWHM} je délka pulzu, f je frekvence, P_{peak} je špičkový výkon

6 Závěr

Mezi cíle této bakalářské práce patřilo napsat rešerši na téma diodově čerpaných pevnolátkových laserů emitujících záření ve střední infračervené oblasti se zaměřením na lasery s aktivním prostředím dopovaným ionty erbia. Dalším cílem bylo změřit spektrální charakteristiky dostupných aktivních prostředí a navrhnout a sestavit kompaktní laserový rezonátor pro generaci krátkých pulzů metodou spínání ziskem. Dále pak změřit a charakterizovat vlastnosti generovaného laserového záření.

V rešerši této bakalářské práce byla nejprve rozebrána problematika polovodičových a pevnolátkových iontových laserů, procesy absorpce a emise a generace pulzů metodou spínání ziskem. Následně byla rešerše zaměřena na aktivní prostředí s ionty vzácných zemin a speciálně aktivní prostředí s ionty erbia, kde byla některá z těchto aktivních prostředí podrobně rozebrána.

V experimentální části práce byla popsána použitá zařízení, přístroje a uspořádání experimentů. Poté byly rozebrány spektroskopické charakteristiky jednotlivých aktivních materiálů, konkrétně se jednalo o absorpční a fluorescenční spektra a doby života pro horní a dolní laserovou hladinu. Následně byly uvedeny výsledky měření laserových vlastností. Laser Er:YLF dosáhl nejvyšší diferenciální účinnosti v režimu volné generace a zároveň nejkratších pulzů při práci v režimu spínání ziskem. Generovaných pulzů s nejvyšším špičkovým výkonem a nejvyšší frekvencí bylo dosaženo pro laser Er:GGAG. Pro lasery Er:GGAG, Er:YLF a ErLa:SrF₂-CaF₂ byly měřeny pulzy generované v režimu spínání ziskem poprvé. Pro mikročipový laser Er:YAG bylo v režimu spínání ziskem dosaženo delších pulzů s nižším špičkovým výkonem, než jakých bylo dosaženo dříve [16]. Výsledky měření spektroskopických charakteristik jednotlivých aktivních prostředí jsou uvedeny v tabulce 3 a výsledky měření výstupních charakteristik jednotlivých laserů v tabulce 4.

Na závěr lze konstatovat, že cíle bakalářské práce byly splněny. Výsledky měření laseru s aktivním prostředím Er:GGAG byly prezentovány na mezinárodní konferenci High-Brightness Sources and Light-Driven Interactions Congress 2022 v Budapešti.

Tabulka 3: Shrnutí spektroskopických charakteristik

Aktivní prostředí	τ na ${}^4I_{13/2}$ [ms]	τ na ${}^4I_{11/2}$ [ms]	λ_{max} [nm]	α [cm^{-1}]
Er:YAG mikročip	$4,40 \pm 0,02$	$0,340 \pm 0,020$	965,9	5,86
Er:GGAG	$3,28 \pm 0,03$	$0,422 \pm 0,002$	967,0	3,82
Er:YLF	$4,63 \pm 0,01$	$11,34 \pm 0,03$	972,6	1,64
ErLa:SrF ₂ – CaF ₂	$9,33 \pm 0,01$	$13,55 \pm 0,04$	975,4	0,56

Tabulka 4: Srovnání charakteristik generovaného záření pro jednotlivé laserové systémy; η - diferenciální účinnost, P_{max} - maximální výstupní výkon v režimu volné generace, P_{peak} - špičkový výkon, Δt_{FWHM} - délka pulzu, f - frekvence při generaci krátkých pulzů v režimu spínání ziskem

Aktivní prostředí	η	P_{max} [W]	P_{peak} [W]	Δt_{FWHM} [ns]	f [Hz]
Er:YAG mikročip	2,7 %	0,01	1,9	(318 ± 16)	150
Er:GGAG	14,9 %	0,17	7,3	(296 ± 35)	1666
	13,5 %	0,50	3,5	(244 ± 9)	2000
Er:YLF	23,2 %	0,20	4,7	(394 ± 21)	666
			3,9	(192 ± 6)	83
Er:YLF mikročip	4,1 %	0,04	4,6	(288 ± 10)	52
			4,2	(256 ± 3)	137
ErLa:SrF ₂ – CaF ₂	9,6 %	0,06	4,6	(400 ± 18)	1000
			2,1	(360 ± 8)	77

Seznam tabulek

1	Použitá nastavení délky čerpacího pulzu čerpací diody dt a frekvence pulzů f pro jednotlivé materiály	22
2	Naměřené doby života na dolní (${}^4I_{13/2}$) a horní (${}^4I_{11/2}$) laserové hladině pro jednotlivá aktivní prostředí	26
3	Shrnutí spektroskopických charakteristik	38
4	Srovnání charakteristik generovaného záření pro jednotlivé laserové systémy; η - diferenciální účinnost, P_{max} - maximální výstupní výkon v režimu volné generace, P_{peak} - špičkový výkon, Δt_{FWHM} - délka pulzu, f - frekvence při generaci krátkých pulzů v režimu spínání ziskem	38

Seznam obrázků

1	Grafické znázornění tříhladinového (a) a čtyřhladinového (b) a kvazitříhladinového (c) laserového systému	10
2	Přechody a energetické hladiny v Er^{3+}	13
3	Testovaná aktivní prostředí dopovaná Er^{3+}	18
4	Schéma experimentálního uspořádání při měření fluorescenčních spekter	19
5	Schéma experimentálního uspořádání při měření dob života na hladinách ${}^4I_{13/2}$ a ${}^4I_{11/2}$	20
6	Schéma experimentálního uspořádání při měření vlastností laserového záření	21
7	Absorpční spektrum pro granátové matrice	23
8	Absorpční spektrum pro fluoridové matrice	23
9	Absorpční spektrum krystalu Er:YAG	24
10	Absorpční spektrum krystalu Er:GGAG	25
11	Absorpční spektrum krystalu Er:YLF	25
12	Absorpční spektrum krystalu ErLa:SrF ₂ -CaF ₂	26
13	Fluorescenční spektrum krystalu Er:YAG	27

14	Fluorescenční spektrum krystalu Er:GGAG	27
15	Fluorescenční spektrum krystalu Er:YLF	28
16	Fluorescenční spektrum krystalu ErLa:SrF ₂ -CaF ₂	28
17	Výstupní výkonová charakteristika mikročipového Er:YAG laseru; λ - vlnová délka, f - frekvence, DC - střída, dt - délka čerpacího pulzu . .	29
18	Výstupní výkonová charakteristika Er:GGAG laseru čerpaného při střídě DC = 5 %; λ - vlnová délka, f - frekvence, dt - délka čerpacího pulzu	30
19	Výstupní výkonová charakteristika Er:GGAG laseru čerpaného při střídě DC = 20 %; λ - vlnová délka, f - frekvence, dt - délka čerpacího pulzu	30
20	Výstupní výkonová charakteristika Er:YLF laseru; λ - vlnová délka, f - frekvence, DC - střída, dt - délka čerpacího pulzu	31
21	Výstupní výkonová charakteristika mikročipového Er:YLF laseru; λ - vlnová délka, f - frekvence, DC - střída, dt - délka čerpacího pulzu . .	32
22	Výstupní výkonová charakteristika ErLa:SrF ₂ -CaF ₂ laseru; λ - vlnová délka, f - frekvence, DC - střída, dt - délka pulzu	33
23	Profily laserových svazků	34
24	Generované ziskem spínané pulsy pro jednotlivé zkonstruované lasery, kde Δt_{FWHM} je délka pulzu, f je frekvence, P_{peak} je špičkový výkon .	36

Reference

- [1] EINSTEIN, A.: Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physika Zeitschrift*, 1917, **vol. 18**, pp. 121–128.
- [2] VRBOVÁ, M., GAVRILOV, P., JELÍNKOVÁ, H.: *Úvod do laserové techniky*, České vysoké učení technické, 1994, ISBN 80-01-01108-9.
- [3] PASCHOTTA, R.: *Field Guide to Lasers (SPIE Field Guide Vol. FG12) (Field Guide Series)*, SPIE Publications, spi ed., 2008, ISBN 978-0-8194-6961-8.
- [4] KOECHNER, W.: *Solid-State Laser Engineering*, Springer Publishing, New York, United States, 2006, ISBN 978-0387-29094-2.
- [5] SVELTO, O.: *Principles of Lasers*, Springer, 5th ed., 2009, ISBN 978-1-4419-1301-2.
- [6] PASCHOTTA, R.: *Field Guide to Laser Pulse Generation (SPIE Vol. FG14) (Field Guide) (Field Guide) (Field Guide) (Spie Field Guides)*, SPIE Publications, spi ed., 2008, ISBN 978-0-8194-7248-9.
- [7] ŠVEJKAR, R., ŠULC, J., JELÍNKOVÁ, H.: Er-doped crystalline active media for 3 μm diode-pumped lasers, *Progress in Quantum Electronics*, 2020, **vol. 74**, p. 100276, doi:10.1016/j.pquantelec.2020.100276.
- [8] GODARD, A.: Infrared (2–12 μm) solid-state laser sources: a review, *Comptes Rendus Physique*, 2007, **vol. 8(10)**, pp. 1100–1128, doi:10.1016/j.crhy.2007.09.010.
- [9] LI, C., LIU, J., JIANG, S., XU, S., MA, W., WANG, J., XU, X., SU, L.: 2,8 μm passively Q-switched Er:CaF₂ diode-pumped laser, *Optical Materials Express*, 2016, **vol. 6(5)**, p. 1570, doi:10.1364/ome.6.001570.
- [10] MA, W., QIAN, X., WANG, J., LIU, J., FAN, X., LIU, J., SU, L., XU, J.: Highly efficient dual-wavelength mid-infrared CW Laser in diode end-pumped Er:SrF₂ single crystals, *Scientific Reports*, 2016, **vol. 6(1)**, doi:10.1038/srep36635.

-
- [11] ŠVEJKAR, R., ŠULC, J., NĚMEC, M., BOHÁČEK, P., JELÍNKOVÁ, H., TRUNDA, B., HAVLÁK, L., NIKL, M., JUREK, K.: Line-tunable Er:GGAG laser, *Optics Letters*, 2018, **vol. 43**, p. 3309, doi:10.1364/ol.43.003309.
- [12] KAWASE, H., YASUHARA, R.: 2,92- μm high-efficiency continuous-wave laser operation of diode-pumped Er:YAP crystal at room temperature, *Optics Express*, 2019, **vol. 27(9)**, p. 12213, doi:10.1364/oe.27.012213.
- [13] QUAN, C., SUN, D., ZHANG, H., LUO, J., HU, L., HAN, Z., DONG, K., CHEN, Y., CHENG, M.: 13-W and 1000-Hz of a 27- μm laser on the 968 nm LD side-pumped Er:YAP crystal with concave end-faces, *Optics Express*, 2021, **vol. 29(14)**, p. 21655, doi:10.1364/oe.428874.
- [14] ŠVEJKAR, R., ŠULC, J., JELÍNKOVÁ, H., KUBEČEK, V., MA, W., JIANG, D., WU, Q., SU, L.: Diode-pumped Er:SrF₂ laser tunable at 2,7 μm , *Optical Materials Express*, 2018, **vol. 8(4)**, p. 1025, doi:10.1364/ome.8.001025.
- [15] VERHOEVEN, J.: Glossary of terms used in photochemistry (IUPAC Recommendations), *Pure and Applied chemistry*, 1996, **vol. 68(12)**, pp. 2223–2286, doi:10.1351/pac199668122223.
- [16] ŠVEJKAR, R., ŠULC, J., JELÍNKOVÁ, H.: Er:YAG microchip for lasing in spectral range 2.94 μm and gain switching generation, *OSA High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress 2020 (EUVXRAY, HILAS, MICS)*, 2020, doi:10.1364/euvxray.2020.jw1a.25.