

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2013/57



ZAKLJUČNO POROČILO RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra projekta	L2-2323
Naslov projekta	Bliskovni vlakenski laserji velikih vršnih moči na osnovi mikro-strukturiranih aktivnih optičnih vlaken
Vodja projekta	15646 Rok Petkovšek
Tip projekta	L Aplikativni projekt
Obseg raziskovalnih ur	4653
Cenovni razred	B
Trajanje projekta	05.2009 - 04.2012
Nosilna raziskovalna organizacija	782 Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
Raziskovalne organizacije - soizvajalke	143 Fotona proizvodnja optoelektronskih naprav d.d. 1617 OPTOTEK razvoj in proizvodnja optične in laserske opreme d.o.o. 7741 LPKF LASER & ELEKTRONIKA d.o.o.
Raziskovalno področje po šifrantu ARRS	2 TEHNIKA 2.21 Tehnološko usmerjena fizika
Družbeno-ekonomski cilj	06. Industrijska proizvodnja in tehnologija

2. Raziskovalno področje po šifrantu FOS¹

Šifra	1.03
- Veda	1 Naravoslovne vede
- Področje	1.03 Fizika

B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

3. Povzetek raziskovalnega projekta²

SLO

Glavne prednosti vlakenskih laserjev izhajajo iz osnovnega koncepta, ki omogoča integracijo optičnih komponent v enovito vlakno. Tako dobimo mehansko in termično

izredno stabilne laserje, ki jih odlikujejo velika kvaliteta žarka, izjemen izkoristek črpalne energije, robustnost, dolga življenjska doba ter preprostost uporabe. Zaradi teh izjemnih lastnosti hitro izpodrivajo klasične trdninske laserje predvsem v primeru kontinuirnega delovanja. Po drugi strani pa so klasična aktivna vlakna v primeru bliskovnih laserjev še vedno zelo omejena glede doseganja zelenih vršnih moči, ki so potrebne za številne sicer specifične a zelo aktualne aplikacije v industriji (npr. nekateri procesi razenja substratov sončnih celic, hitra izdelava prototipov v elektroniki,...) in medicini (oftalmologija, dermatologija). Problem izvira iz relativno majhnega polmera jedra vlakna, po katerem se vodi žarek in ki je potreben za zagotavljanje eno-rodovnosti in s tem ustrezne kvalitete izhodnega žarka. V zadnjem času na pomenu vse bolj pridobivajo tako imenovana mikro-strukturirana optična vlakna. V tej relativno novi vrsti aktivnih optičnih vlaken se uporablja tako imenovani zračni plašč za vodenje črpalne svetlobe ali pa se notranji plašč formira z ustrezno razporeditvijo zračnih cevk v dielektričnem materialu. Zaradi takšne zgradbe imajo izredne lastnosti glede vodenja svetlobnega žarka in so zato zanimivi za uporabo na različnih področjih: od telekomunikacij do spektroskopije, mikroskopije, senzorjev in podobno. Hkrati pa tak tip vlaken postaja vedno bolj zanimiv tudi zaradi njegove zmožnosti prenašanja velikih moči ob hkratni ohranitvi velike kvalitete izhodnega žarka. Zato predstavljajo zelo obetaven material za izgradnjo vlakenskih laserjev z veliko vršno močjo (območje 100 kW) ob hkratni eno-rodovnosti vlaken, ki omogoča izredno kvaliteto izhodnega žarka. Cilj projekta so raziskave na področju vlakenskih laserjev za uporabo v medicini in industriji. Za medicinske aplikacije so bile aktivnosti osredotočene na raziskave polariziranega kontinuiranega laserja z ozkim izhodnim spektrom in izhodno močjo okoli 8 W v bližnjem IR področju (1064 nm) ter kvazi-kontinuirnega laserja z delovanjem v IR področju (2,8 μ m). Za industrijsko aplikacijo so bile opravljen raziskave sub-ns laserja z izhodno močjo 10W, vršnimi močmi okoli 100kW in izhodno valovno dolžino v bližnjem IR področju (1064 nm). V primerih laserjev v bližnjem IR področju so raziskave temeljile na mikro-strukturiranih aktivnih optičnih vlaknih, ki zagotavljajo veliko kvaliteto izhodnega žarka.

ANG

The main advantages of fiber lasers are derived from the basic concept that enables the integration of optical components into a single fiber. In that way we get mechanically and thermally extremely stable lasers that are distinguished by high beam quality, extremely high pumping energy efficiency, robustness, longevity and ease of use. Because of these exceptional properties they are quickly displacing traditional solid state lasers particularly in the case of continuous operation. On the other hand, the classical active fiber lasers in the case of pulsed operation are still very limited regarding achieving the desired peak power needed for a specific number of highly topical applications in industry (eg certain processes of solar cells substrate scribing, rapid prototyping in electronics , ..) and medicine (ophthalmology, dermatology). The problem originates from a relatively small radius of fiber core, where the beam is propagating, and which is necessary to ensure single mode operation needed for appropriate quality of the output beam. Recently, the so-called micro-fiber structured fibers are gaining more and more importance. In this relatively new type of active fiber the so-called air holes are introduced in the cladding region or, in the other case, the fiber core is formed by placing the air holes in the dielectric material. Due to this structure the fibers have extraordinary properties of keeping the beam contained and are therefore interesting for application in various fields: telecommunications, spectroscopy, microscopy, sensors and the like. At the same time, this type of fiber is becoming more interesting because of its ability to transfer high power while maintaining high quality output beam. Therefore they represent a very promising material for the construction of fiber lasers with high peak power (100 kW range) and at the same time single mode operation which enables highly quality output beam. The project aims to research in the field of fiber lasers for use in medicine and industry. For

medical applications, the activities focused on research of polarized continuous laser with a narrow output spectrum and power output of about 8 W in the near-infrared (1064 nm) and quasi-continuous laser to operate in the IR region (2.8 μm). For industrial application studies have been performed of a sub-ns laser with an output power of 10 W, peak power around 100 kW and wavelength in the near-infrared (1064 nm). In the case of lasers in the near-infrared field the research was based on micro-structured active optical fibers that provide high quality output beam.

4. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem projektu³

Aktivnosti na projektu so v skladu z predlogom projekta potekale v štirih fazah. Glede na stanje razvoja vlakenskih laserjev in glede na potrebe industrijskih partnerjev je v posameznih faza prišlo do manjših sprememb, ki so utemeljene v točki 6.

Glavne aktivnosti v fazi 1 so bile:

Pregled stanja na področju bliskovnih vlakenskih laserjev

Razvita je bila programska oprema za numerično simulacijo vlakenskih laserjev

V tesnem sodelovanju z industrijskimi partnerji so bile izdelane idejne zasnove vlakenskih laserjev (kontinuirni/kvazi kontinuirni in bliskovni).

Pregled stanja na področju bliskovnih vlakenskih laserjev

V okviru pregleda stanja na področju bliskovnih vlakenskih laserjev je bila opravljena natančna analiza komercialno dosegljivih bliskovnih vlakenskih laserjev z delovanjem v ns ps in fs območju. Rezultat študije je bilo definiranje parametrov vlakenskih laserjev, ki bodo predmet nadaljnjih raziskav v okviru tega projekta.

Razvoj programske oprema za numerično simulacijo vlakenskih laserjev

Za potrebe projekta je bila razvita programska oprema za numerično simulacijo tako bliskovnih kot tudi kontinuirnih vlakenskih laserjev. Model za numerično simulacijo temelji na zasedbenih enačbah, ki opisujejo časovne spremembe energijskih nivojih aktivnih ionov (Yb^{3+}) in števila fotonov v resonatorju in upošteva vzdolžno krajevno odvisnost. Programska oprema je zasnovana na način, da omogoča tako študij laserskih oscilatorjev kot ojačevalnikov ter v nadaljevanju prav tako omogoča kasnejšo nadgradnjo za npr. študij nekaterih ključnih procesov v aktivnih vlaknih (ojačena spontana emisija, nelinearni pojavi,...). S pomočjo omenjenega modela smo lahko v naprej preskusili nekatere kritične komponente vlakenskih laserjev, kar je pomembno za pripravo idejne zasnove posameznih sistemov.

Idejne zasnove posameznih vlakenskih laserjev.

V skladu z načrtom iz predloga projekta smo pripravili idejno zasnovo za kontinuirni/kvazi kontinuirni vlakenski sistem z izhodno močjo v območju 10W. Glede na najnovejši razvoj na področju vlakenskih laserjev ter potreb industrijskih partnerjev, ki sodelujejo na projektu smo medicinske aplikacije namesto bliskovnega vlakenskega laserja z delovanjem v območju ns pripravili zasnovo za kontinuirni sistem prilagojen za frekvenčno podvojevanje, ki temelji na konceptu: oscilator – ojačevalnik (MOPA). Prav tako smo zaradi najnovejšega razvoja na področju in potreb industrije za industrijske aplikacije pripravili idejno zasnovo za vlakenski laser z delovanjem v ps oziroma sub-ns področju. Idejne zasnove so bile ključne za uspešno izvedbo projekta.

Glavne aktivnosti v fazi 2 so bile:

Izdelava eksperimentalnega kvazi-kontinuirnega vlakenskega laserskega sistema

Izdelana sta bila dva kvazi kontinuirna laserja na osnovi aktivnega optičnega vlakna dopiranega z Yb. V prvem popolnoma integriranem primeru je bilo uporabljeno optično vlakno z dvojnimi plaščem, s premerom aktivne sredice 8 mikrometrov in premerom črpalnega plašča 125 mikrometrov. Črpalni sistem je bil izdelan iz 3 laserskih črpalnih diod sklopljenih v večrodovno vlakno, izhodne moči po 8W in valovne dolžine 915 nm. Valovna dolžina izhodne svetlobe laserja je 1064nm.

V drugem primeru je bil sistem sestavljen iz prostostojećih optičnih komponent. Uporabljeno je bilo mikro-strukturirano optično vlakno s premerom aktivne sredice 15 mikrometrov in premerom črpalnega plašča 135 mikrometrov. Uporabljena sta bila dva črpalna sistema z valovno dolžino 915 in 976 nm. Valovna dolžina izhodne svetlobe laserja je 1064nm.

V tretjem primeru je bila razvita in izdelana laboratorijska postavitve ZBLAN vlakenskega laserja z delovanjem v kvazi-kontinuirnem načinu na osnovi hitrega preklopa črpalnih diod. Laser je bil osnovan na z erbijem dopiranim aktivnim optičnim vlaknom z dvojnimi plaščem. Vršna moč, ki je bila dosežena je v času meritev predstavljala absolutni rekord za tak tip vlakenskih laserjev.

Študij delovanja eksperimentalnega sistema

Analizirali smo delovaje kvazi-kontinuirnega laserja. Analizirano je bilo delovanje črpalnih laserskih diod (izhodna moč, valovna dolžina, prag delovanja, spektralna lastnost, temperaturna odvisnost). Določena je bil izkoristek laserja nad pragom (»slope efficiency«), ki je znašal približno 75% v primeru popolnoma integriranega sistema in približno 55% v primeru sistema s prostostoječo optiko. Analizirano je bilo delovanje v primeru črpanja z 915 in 976 nm laserskimi diodami. Meritve v kontinuirnem in kvazi-kontinuirnem režimu smo primerjali z rezultati, ki smo jih dobili iz modela.

Optimizacija posameznih sklopov sistema

Optimizacija sistema se je nanašala na sistem osnovan na prostostojećih optičnih elementov. Optimiziran je bil črpalni sistem (natančna temperaturna kontrola laserskih diod, ki vpliva na izhodno moč in valovno dolžino) in resonatorski sistem v smislu prilagoditve na dano črpalno svetlobo. Izhodne moči so v skladu s pričakovanjem znašale za integriran sistem 15W (efektivno črpanje 20W) in v primeru prostostoječega sistema pa je izhodna moč znašala 8W.

Glavne aktivnosti v fazi 3 so bile:

Raziskave ns bliskovnega laserja

Postavljena je bila testna postavitve za ns bliskovni vlakenski laser. Postavitve je temeljila na na preklopniku kvalitete in aktivnem mikro-strukturiranem optičnem vlaknu. Vlakno je imelo dvojni plašč. Uporabljeno vlakno je imelo tuid zunanji ovoj za vodenje črpalne svetlobe steklen s čemer se je znatno povečala robustnost celotnega sistema. Na testni postavitvi so bile dosežene moči v območju nekaj W. Izdelan je bil tudi ustrezen črpalni sistem z valovno dolžino 976 nm, ki je omogočal ustrežno kratek resonator in s tem ustrežno dolge izhoden bliske (območje 200 ns).

Raziskave sub-ns bliskovnega laserja

Opravljen so bile raziskave ps oziroma sub-ns laserja z izhodnimi bliski okoli 900 ps. Laser je temeljil na eno-rodovnih aktivnih optičnih vlaknih s čimer je bila zagotovljena največja možna kvaliteta žarka. Zaradi majhne površine aktivnega jedra je bila vršna moč omejena na približno 1kW.

Glavne aktivnosti v fazi 4 so bile:**Nadgradnja sub-ns vlakenskega laserja za delovanje v območju vršnih moči 100 kW**

S pomočjo meritev in numeričnih simulacij so bile opravljene raziskave v smeri testne postavitve in optimizacije tudi ojačevalnega dela za ps oziroma sub-ns laser. Ojačevalec je temeljil na mikro-strukturiranem vlakno. Kljub relativno velikem preseku je vlakno zagotavljalo vodenje zgolj osnovnega rodu, kar je zagotavljalo izredno kvaliteto žarka $M^2 < 1.3$. Raziskani so bili različni načini črpanja aktivnega dela vlakna predvsem z nameno zmanjšanja ne-linearnih pojavov v samem vlaknu zaradi velikih vršnih moči. Dosežena je bila vršna moč preko 100kW in povprečna moč 12W. frekvenca ponavljana je bila v mejah od 10kHz - 1MHz. Precejšen poudarek je bil dan tudi na proučevanju možnosti za uporabo testnih postavitvev na realnih industrijskih aplikacijah v sodelovanju z industrijskimi partnerji na projektu.

Raziskave kontinurnega vlakenskega laserja z zelo ozkim spektrom za uporabo v medicini:

V skladu z načrtom so bile za potrebe uporabe v medicini opravljene raziskave in izdelana je bila laboratorijska postavitvev kontinuiranega laserja z delovanjem pri 1064 nm. Postavitvev temelji na frekvenčno stabilizirani vzbujevalni diodi in enostopenjskem močnostnem ojačevalniku na osnovi mikro-strukturiranih aktivnih optičnih vlaken. Za potrebe optičnega črpanja je bil razvit in izdelan namenski hladilni sistem, ki zagotavlja ustrezno temperaturno kontrolo in hlajenje laserskih črpalnih diod. Sistem izkazuje dobro kratko-časovno in dolgo-časovno stabilnost izhodne moči in je glede na parametre izhodnega žarka primeren za frekvenčno podvojevanje: Izhodna moč: 10 W, spektralna širina: < 0.07 nm in polariziran izhod ($PER > 15$ dB).

5. Ocena stopnje realizacije programa dela na raziskovalnem projektu in zastavljenih raziskovalnih ciljev⁴

V skladu z predlogom projekta in ob upoštevanju manjših sprememb, ki so bile predlagane s strani sofinancerjev in pobudnikov projekta, so bile vse naloge uspešno opravljene.

6. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine⁵

Kot je že bilo opisano ob prvem in drugem delnem poročilu glede na najnovejši razvoj na področju vlakenskih laserjev ter aplikacij v industriji ter medicini, ki so bile ugotovljene v študiji bliskovnih vlakenskih laserjev, ki je bila opravljena v okviru faze 1 tega projekta, se na pobudo sofinancerjev uvede manjše spremembe v cilje ter sam potek izvajanja projekta. Spremembe se nanašajo na razvoj laserja za uporabo v medicini ter razvoj bliskovnega laserja za uporabo v industriji. Za uporabo v medicini se vire iz razvoja bliskovnega laserja v IR področju preusmeri na razvoj vlakenskega laserja s kontinuirnim delovanjem, ki bi bil primeren za frekvenčno podvojevanje. Za uporabo v industriji se preusmeri vire iz razvoja ns laserja z visoko izhodno vršno močjo v razvoj laserja z delovanjem v ps območju.

Utemeljitev sprememb:

Na področju preciznih industrijskih obdelav se je pokazalo, da v najnovejšem času vlada izredno zanimanje za razvoj industrijskih bliskovnih laserskih sistemov, ki bi delovali v ps območju. Tako na primer se je pokazalo, da bo možno v izredno pomembni in hitro razvijajoči industriji fotovoltaičnih solarnih celic, dvigniti raven proizvodnje samo za uporabo novih laserskih sistemov za obdelavo substratov. Ti sistemi bodo morali

zagotavljali dovolj veliko hitrost delovanja ob hkratni veliki natančnosti. Pokazalo se je da bo mogoče doseči le z uvedbo laserskih sistemov, ki delujejo v ps področju. Zato je na pobudo industrijskih partnerjev cilj projekta delno preusmerjen na raziskave vlakenskih laserjev velike vršne moči z delovanjem v ps območju. Ppo drugi strani se je tudi pokazalo, da so za uporabo v medicini precej bolj aktualni kontinuirni laserji primerni za frekvenčno podvojevanje, kot pa npr pulzni ns laserji z nizko frekvenco ponavljanja, katere je mogoče zadovoljivo izvesti tudi s klasično tehnologijo.

Opis sprememb:

Glede na predviden potek dela iz predloga projekta se predlaga delna prerazporeditev (virov) nalog iz faze 2 v fazo3 in posledično se predlagajo spremembe ciljev v fazi 4.

Spremembe v fazi 2:

Aktivnosti v fazi 2 se zmanjšajo. Predvidena je ukinitvev nekaterih detaljnih raziskav glede vpliva posameznih sestavnih delov na kontinuirno delovanje sistema uporabljen bo samo en tip resonatorskih zrcal oziroma Braggovih mrežic ter en način črpanja s pomočjo združevalnika žarka.

Spremembe v fazi 3:

Povečajo in delno spremenijo se aktivnosti fazi 3:

Poleg postavitve enega bliskovnega laserja v ns področju se izgradi dodaten sistem z delovanjem v ps področju (uporaba v industriji). V ta namen bo nabavljen oscilator na osnovi aktivnih optičnih vlaken z delovanjem v ps območju.

Spremembe v fazi 4:

- Za visoke vršne izhodne moči (100kW) se prilagodi laser z delovanjem v ps območju (glej predlagano spremembo v fazi 3).
- Študija za prilagoditev vlakenskega laserja za delovanje v medicini se na pobudo sofinancerja spremeni (Optotek in Fotona):

Namesto študije laserskega sistema z delovanjem v bliskovnem načinu se cilj spremeni v študijo sistema z nizko izhodno močjo in kontinuirnem delovanju, ki bi bil primeren za frekvenčno podvojevanje (parametri: polariziran izhod z izhodno močjo v območju nekaj W).

7.Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine⁶

Znanstveni dosežek			
1.	COBISS ID	2330980	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Diodno črpani bliskovni Er:ZBLAN vlakenski laser visoke moči
		ANG	High-power pulsed diode-pumped Er:ZBLAN fiber laser
	Opis	SLO	Predstavljene so delovanje in karakteristike Er:ZBLAN vlakenskega laserja s preklopom ojačanja z aktivnim krmiljenjem bliskovnega delovanja diodnega črpalnega sistema. Dobljeni laserski bliski dosegajo visoke vršne moči, pri čemer se ohranita visoka povprečna moč in izkoristek, ki sta sicer značilnosti kontinuirnega laserskega delovanja. Izmerjene dolžine bliskov znašajo cca. 300 ns, in so praktično neodvisne

			od frekvence repeticije. Najvišja dosežena vršna moč 68W, po našem vedenju predstavlja najvišjo poročano vršno moč za diodno črpani Er:ZBLAN laser. Nadalje, predstavlja dobljena moč 2 W pri repeticijski frekvenci 100 kHz za 2 velikostna razreda boljši dosežek glede na predhodno objavljene rezultate. Izkoristek laserskega sistema nad pragom znaša 34%.
	ANG		Abstract: We report on the operation and performance of a gain-switched Er:ZBLAN fiber laser based on an active pulsed diode pump system. The produced laser pulses offer high peak powers while retaining the high average powers and efficiency of the cw regime. The measured pulse duration was about 300 ns and nearly independent of the pump repetition frequency. The maximum obtained 68 W of peak power is the highest reported, to our knowledge, for diodepumped Er:ZBLAN fiber lasers, and the 2 W of average power at the repetition frequency of 100 kHz is 2 orders of magnitude higher than previously reported average power in a pulsed regime. The obtained slope efficiency was 34%.
	Objavljeno v	Optical Society of America.; Optics letters; 2011; Vol. 36, issue 5; str. 1923-1925; Impact Factor: 3.399;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.856; A': 1; Avtorji / Authors: Gorjan Martin, Petkovšek Rok, Marinček Marko, Čopič Martin	
	Tipologija	1.03 Kratki znanstveni prispevek	
2.	COBISS ID	11998747	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Pomnoževanje izhodne moči s časovnim multipleksiranjem s fotoelastičnim modulatorjem v večkanalnem laserju z akustooptičnim preklopom dobrote
		ANG	Power scaling of AOM-switched lasers with SCPEM-based time-multiplexing
	Opis	SLO	V članku je predstavljen postopek pomnoževanja izhodne moči laserja s preklopom kvalitete, ki je prilagojen za frekvenčno podvojevanje v resonatorju. Dvig moči je dosežen z uporabo dveh ojačevalnih kanalov z aktivnim elementom Nd:YVO4, ki sta izmenično aktivirana z uporabo fotoelastičnega modulatorja. Oba kanala sta združena preko polarizatorja in si delita izhodno zrcalo ter akustooptični modulator. Fotoelastični modulator preklaplja polarizacijsko stanje žarka, s čimer se izmenično aktivira posamezni ojačevalni kanal, akustooptični modulator pa je uporabljen za prekllop kvalitete resonatorja. Predstavljeni postopek omogoča doseganje skoraj podvojene povprečne moči oz. frekvence repeticije pulzov pri nespremenjeni osnovni obliki resonatorja.
		ANG	Power Scaling of a Q-switched laser designed for internal frequency conversion is demonstrated by combining two Nd:YVO4-gain-channels with a time-multiplexing scheme based on a single crystal photo elastic modulator (SCPEM). Both channels are coupled with a polarizer and share an output-coupler and acousto-optic modulator (AOM). In order to combine two channels by time multiplexing, the single crystal photo elastic modulator is used which switches between two channels, while the acousto-optic modulator conducts the Q-switching. This allows almost to double the average output power and repetition rate within a given laser resonator design.
	Objavljeno v	Optical Society of America; Optics express; 2011; Vol. 19, iss. 21; str. 19855-19860; Impact Factor: 3.587;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.856; A': 1; Avtorji / Authors: Petkovšek Rok, Novak Vid, Bammer Ferdinand, Možina Janez, Podobnik Boštjan	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	

3.	COBISS ID	12069403	Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Kontinuirani vlakenski laser za frekvenčno podvojevanje	
		<i>ANG</i> CW fiber laser for second harmonic generation	
	Opis	<i>SLO</i> Predstavljena je poenostavljena postavitve kontinuirnega, diodno vzbujanega vlakenskega laserja tipa oscilatorjačevalnik z enostopenjskim iterbijevim mikrostrukturiranim vlakenskim ojačevalnikom. Obravnavani laser ima transversalno enorodovni, ozkopasovni, polarizirani izhod z močjo do 7,5 W, ki je primeren za frekvenčno podvojevanje. Uporabljeni pristop omogoča nadaljnji dvig dosegljive izhodne moči.	
		<i>ANG</i> We report on a reduced-complexity laser-diode-seeded master-oscillator-power-amplifier setup of a continuous wave fiber laser, with a single-stage ytterbium doped photonic crystal fiber amplifier. The laser is capable of generating up to 7.5 W single-transverse-mode, narrow-linewidth, polarized output suitable for second harmonic generation. The approach used possesses a further power scaling potential.	
	Objavljeno v	Zveza strojnih inženirjev in tehnikov Slovenije [et al.] = Association of Mechanical Engineers and Technicians of Slovenia [et al.]; Strojniški vestnik; 2011; Vol. 57, no. 11; str. 789-798; Impact Factor: 0.398; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.056; Avtorji / Authors: Novak Vid, Petkovšek Rok, Podobnik Boštjan, Možina Janez	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
4.	COBISS ID	2298724	Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Spektralna dinamika bliskovnega Er-dopiranega fluoridnega vlakenskega laserja črpanega z laserskimi diodami	
		<i>ANG</i> Spectral dynamics of pulsed diode-pumped erbium-doped fluoride fiber lasers	
	Opis	<i>SLO</i> V članku je predstavljena eksperimentalna in računska preiskava dinamike bliskovno črpanih fluoridnih vlakenskih laserjev z dvema ovojema, ki so dopirani z erbijem oziroma v kombinaciji z erbijem in prazeodimom. Valovna dolžina črpalne svetlobe je 975 nm. Meritve, ki vključujejo časovno odvisno spreminjanje moči laserja in spektra, kažejo delovanje pri večih valovnih dolžinah z izrazitim skokom na začetku laserskega bliska za erbijevno vlakno. V obeh vlaknih pa je prisotno nihanje izhodne moči in nestabilni spekter. Posledično je preiskan vpliv homogene in nehomogene razširitve črte na lasersko delovanje z uporabo numerične simulacije na osnovi zasedbenih enačb, pri čemer se zanemarijo termični efekti. Rezultati simulacije pokažejo preskok med delovnimi valovnimi dolžinami v časih, ki ustrezajo meritvam tako za homogen kot nehomogen model. Najboljše ujemanje se pokaže za model, ki upošteva nehomogeno razširitev in neodvisno sevanje dveh različnih tipov ionov.	
		<i>ANG</i> We present an experimental and computational investigation of the dynamics in singly Er-doped and Er/Pr-codoped double-clad fluoride fiber lasers that are pulse-pumped with diode at 975 nm. Measurements that include time-dependent laser power and spectrum show multi-line operation with distinct initial line jumping in the Er fiber and spectral and power fluctuations in both fibers. Thermal effects are dismissed as the cause and the effects of homogeneous and inhomogeneous broadenings on the laser operation are studied by using a simulation that is based on the rate-equations. Simulation results show line jumping with accurate timing in both homogeneous and inhomogeneous models, and the best match with the experiment is achieved with the inhomogeneous model assuming independent lasing of two distinct ion classes.	
		The Society; Journal of the Optical Society of America. Series B, optical physics.; 2010; Vol. 27, issue 12; str. 2784-2793; Impact Factor:	

Objavljeno v	2.095; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.753; A': 1; Avtorji / Authors: Gorjan Martin, Marinček Marko, Čopič Martin
Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek

8. Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati projektne skupine⁷

	Družbeno-ekonomski dosežek		
1.	COBISS ID	2330980	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Bliskovni vlakenski laser osnovan na Er:ZBLAN aktiven optičnem vlaknu ANG Pulsed fiber laser based on Er:ZBLAN active optical fiber.	
	Opis	SLO Razvoj Er:ZBLAN vlakenskega laserja z delovanjem v kvazi-kontinuirnem načinu na osnovi hitrega preklopa črpalnih diod. Vršna moč, ki je bila dosežena v času izvajanja eksperimenta, je takrat predstavljala absolutni rekord za tak tip vlakenskih laserjev. Er:ZBLAN vlakenski laserji so še posebej pomembni, ker gre v tem primeru za izhodno valovno dolžino v območju 3μm, kjer ima voda močno absorpcijo. Takšni laserji so izredno pomembni predvsem za uporabo v medicini, kjer je zaželena absorpcija v bioloških vzorcih (tkivih). V današnjem času je to območju še vedno pokrito takorekoč izključno s klasični trdninskimi laserji, z npr Er:YAG kot aktivnim sredstvom in posledično s prostostoječo optiko. Preprosta integracija v optično vlakno v tem primeru žal ni možna. Standardna optična vlakna, ki so izdelana iz kvarčnega stekla (SiO₂) svetlobo v tem območju namreč močno atenuirajo in zato niso primerna za uporabo. Trenutno naj bolj obetavna so optična vlakna osnovana na ZBLAN, ki jih je moč tudi dopirati z aktivnimi ioni erbij. Žal pa se izkaže, da gre v tem primeru za zelo občutljivo vlakno tako termično kot mehansko. Postaviti je bilo potrebno posebne tehnološke postopke tako za samo obdelavo aktivnega optičnega vlakna kot tudi za samo optično črpanje. Del raziskave, ki je relevanten za znanost je bil objavljen »Optics Letters«: z naslovom »High-power pulsed diode-pumped Er:ZBLAN fiber laser«. ANG Development of Er: ZBLAN fiber laser operating in quasi-continuous mode based on fast switching of diode pumping. Peak power reached in the experiment at that time represented absolute record for this type of fiber lasers. Er: ZBLAN fiber lasers are particularly important, because their output wavelength is in the range 3μm, where water has a strong absorption peak. Such lasers are extremely important especially for medical applications, where absorption in biological samples (tissues) is desired. Today the area is still covered, so to speak exclusively with classic solid state lasers, such as the Er:YAG as active material and, consequently, free standing optics. Easy integration of optical fiber is not possible in this case. Standard optical fibers which are made of quartz (SiO₂) light strongly attenuate light in this region and are therefore not suitable. Most promising at present are optical fibers based on ZBLAN, which can also be doped with active erbium ions. Unfortunately, it turns out that in this case the fiber is thermally and mechanically very sensitive. It was necessary to employ special technological processes both for the treatment of active optical fibers as well as for optical pumping. Part of this research, which is relevant to science was published "Optics Letters": entitled "High-power pulsed diode-pumped Er: ZBLAN laser".	
	Šifra	F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj
	Objavljeno v	Optical Society of America.; Optics letters; 2011; Vol. 36, issue 5; str. 1923-1925; Impact Factor: 3.399; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.856; A': 1; Avtorji / Authors: Gorjan Martin, Petkovšek Rok, Marinček Marko, Čopič Martin	

	Tipologija	1.03 Kratki znanstveni prispevek	
2.	COBISS ID	12069403	Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i>	Kontinuirani vlakenski laser za frekvenčno podvojevanje
		<i>ANG</i>	Single frequency CW fiber laser for second harmonic generation
	Opis	<i>SLO</i>	V okviru raziskave je bil razvit prototip kontinuirnega, diodno vzbujanega, vlakenskega laserja tipa oscilator-ojačevalnik z enostopenjskim, iterbijevim, mikro-strukturiranim vlakenskim ojačevalnikom. Razviti laser ima transverzalno enorodovni, ozkopasovni, polarizirani izhod z močjo do 7,5 W, ki je primeren za frekvenčno podvojevanje. Frekvenčno podvojeni izhod se nahaja v vidnem delu spektra, pri 532 nm, in je primeren za obdelavo tankih plasti v mikro-obdelovalnih postopkih v elektroniki ter za uporabo v medicini.
		<i>ANG</i>	A laser-diode-seeded continuous wave fiber laser, based on a master-oscillator-power-amplifier design has been developed. A single-stage ytterbium doped photonic crystal fiber amplifier has been used to amplify a polarized, single-transverse-mode, narrow-linewidth seed. The laser is capable of generating up to 7.5 W of output suitable for second harmonic generation that produces light in the green part of the visible spectrum. Such a light can be employed in various industrial applications such as thin-film micro-processing, as well as in medical applications.
	Šifra	F.01 Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin	
	Objavljeno v	Zveza strojnih inženirjev in tehnikov Slovenije [et al.] = Association of Mechanical Engineers and Technicians of Slovenia [et al.]; Strojniški vestnik; 2011; Vol. 57, no. 11; str. 789-798; Impact Factor: 0.398; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 1.056; WoS: IU; Avtorji / Authors: Novak Vid, Petkovšek Rok, Podobnik Boštjan, Možina Janez	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
3.	COBISS ID		Vir: vpis v poročilo
	Naslov	<i>SLO</i>	Sub-ns vlakenski ojačevalnik na osnovi mikrostrukturiranih vlaken
		<i>ANG</i>	Sub-ns microstructured-fiber-based amplifier
	Opis	<i>SLO</i>	V sklopu raziskav je bil postavljen sistem za ojačevanje 900ps bliskov. Za ojačevalnik je bilo uporabljeno mikrostrukturirano vlakno, ki ponuja večjo površino sredice vlakna ob nespremenjeni kvaliteti žarka, s čimer je možno doseči večje vršne moči na izhodu iz ojačevalnika. Na ta način so bile dosežene vršne moči okoli 100kW. Na izhodu iz laserja sta bila postavljena tudi sistem za izločanje posameznih bliskov s pomočjo akustooptičnega modulatorja.
		<i>ANG</i>	A 900ps fiber amplifier was developed for the needs of the research. A microstructured fiber was used as the main amplifier fibre. A microstructured fiber can have a larger diameter core, which enables higher peak powers of such amplifiers. Power levels in excess of 100 kW were achieved using this setup. A additional AOM was used for pulse picking at the output of an amplifier.
	Šifra	F.04 Dvig tehnološke ravni	
	Objavljeno v	Interno gradivo.	
	Tipologija	2.14 Projektna dokumentacija (idejni projekt, izvedbeni projekt)	
4.	COBISS ID		Vir: vpis v poročilo
	Naslov	<i>SLO</i>	Vlakenski laser s preklopom kvalitete
		<i>ANG</i>	Q-switched fiber laser
			Predmet raziskav je razvoj vlakenskega laserja s preklopom kvalitete

	Opis	SLO	resonatorja. Za preklon kvalitete je bil uporabljen enokristalni fotoelastični modulator na osnovi kristala LiTaO3. Modulator se je izkazal kot učinkovit, enostaven in cenovno dostopen način preklapljanja kvalitete, saj je za svoje delovanje potreboval le 4.4V električne napetosti. Pokazalo se je, da se je povprečna moč laserja po vstavitvi fotoelastičnega modulatorja v resonator zmanjšala za manj kot 1%. Tako so bili s takšno postavitvijo dobljeni laserski bliski dolžine 120ns, z energijo okoli 26μJ in visokim izkoristkom nad pragom (do 60%) .	
		ANG	The research was focused on development of a Q-switched fiber laser. Single-crystal photoelastic modulator (SCPEM) based on a LiTaO3 crystal was used as a Q-switch, which lead to a very simple and efficient Q-switching as the applied voltage to the crystal at resonant frequency was only 4.4V. Average power of the laser only decreased by about 1% after the SCPEM was introduced into the laser resonator. Laser pulses with duration of 120ns, energy levels around 26μJ and high slope efficiency (up to 60%) were achieved using this setup.	
	Šifra	F.01 Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin		
	Objavljeno v	Interno gradivo.		
	Tipologija	4.00 Sekundarno avtorstvo		
5.	COBISS ID			Vir: vpis v poročilo
	Naslov	SLO	Črpalni laserski sistem za ojačevalnike na osnovi aktivnih optičnih vlaken	
		ANG	Pump laser system for fiber-based optical amplifiers	
	Opis	SLO	V okviru raziskave je bil razvit črpalni sistem za ojačevalnike na osnovi aktivnih optičnih vlaken. Kot izvor črpalne svetlobe je bila uporabljena temperaturno in tokovno krmiljena laserska dioda z izhodom, sklopljenim v vlakno. Izhod diode je voden po pasivnem optičnem vlaknu in nato kolimiran z uporabo sistema za natančno pozicioniranje vlakna in kolimacijske leče. Izvedena je bila tudi optična izolacija, ki zagotavlja zaščito diode pred povratnim vdorom svetlobe. Sistem je namenjen za uporabo kot črpalni izvor v eksperimentalnih postavitvah vlakenskih optičnih ojačevalnikov, kjer je potreben kompakten, ozkopasovni črpalni vir z visokim elektro-optičnim izkoristkom.	
		ANG	A pump laser system for fiber-based optical amplifiers has been developed. A temperature- and current-controlled, fiber-coupled, semiconductor laser diode has been used as the pump source. The diode's fiber-guided output has been collimated using a precision positioning stage and a collimator lens. An optical isolator has been implemented as well in order to protect the diode from backward propagating light. The system is being used as a compact, narrowband, pump source for optical fiber amplifier test bench setups with a high electric-to-optical efficiency.	
	Šifra	F.01 Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin		
	Objavljeno v	Interno gradivo.		
Tipologija	2.14 Projektna dokumentacija (idejni projekt, izvedbeni projekt)			

9. Drugi pomembni rezultati projektne skupine⁸

Razvoj programske opreme za numerično modeliranje vlakenskih laserjev in ojačevalnikov
Cilj raziskav je razvoj programske opreme za numerično modeliranje vlakenskih laserjev, s katerim je možno optimizirati različne komponente laserskega resonatorja ali ojačevalnika. Razvit je bil model oscilatorja na osnovi zasedbenih enačb, ki upošteva intrinzične lastnosti uporabljenih materialov, temperaturne zasedenosti energijskih nivojev, lastnosti samega resonatorja, odbojnosti in prepustnosti uporabljenih zrcal itd. Rezultati modela izkazujejo dobro ujemanje z eksperimentalnimi meritvami in ga je med drugim možno uspešno uporabljati za

optimizacijo prepustnosti izhodnega zrcala vlakenskega laserja.

10. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine⁹

10.1. Pomen za razvoj znanosti¹⁰

SLO

Glavni rezultati projekta pomembni za razvoj znanosti se na nanašajo na:

1. Bliskovno delovanje Er:ZBLAN vlakenskega laserja z izhodno valovno dolžino v območju 2,8 μm , ki je še posebej zanimiva za medicinske aplikacije zaradi absorpcije v vodi. Vršna moč, ki je bila dosežena, je v času objave predstavljala absolutni rekord za tak tip vlakenskih laserjev. Raziskava je bila objavljena v prispevku: Diodno črpani bliskovni Er:ZBLAN vlakenski laser visoke moči (High-power pulsed diode-pumped Er:ZBLAN fiber laser) – objavljeno v »Optics Letters«.
2. Izveden je bil uspešen poskus preklopa dobrote s pomočjo foto-elastičnega modulatorja in mikro-strukturiranega aktivnega optičnega vlakna. Z enakim tipom modulatorja smo uspeli tudi demonstrirati povečanje moči (power scaling) laserja s preklpom dobrote, pri čemer se je izhodna moč ob podvojeni frekvenci ponavljanja skoraj podvojila. Del raziskave je bil financiran tudi s strani EU projekta ALPINE. Objavljena je bila v članku: Pomnoževanje izhodne moči s časovnim multipleksiranjem s foto-elastičnim modulatorjem v več-kanalnem laserju z akusto-optičnim preklpom dobrote (Power scaling of AOM-switched lasers with SCPEM-based time-multiplexing) objavljeno v Optics Letters. Delno poročilo pa je bilo sprejeto v objavo v revijo Applied Physics B (Influence of the retardation of the multiplexing element in a dual channel Q-switched laser).
3. Poročilo o laboratorijski postavitvi Kontinuiranega vlakenskega laserja z ozkim spektrom in visoko stopnjo polarizacije, ki je primeren za frekvenčno podvojevanje, je bilo objavljeno v članku z naslovom: Kontinuirani vlakenski laser za frekvenčno podvojevanje (CW fiber laser for second harmonic generation) objavljeno v Stojniškem vestniku.
4. V okviru raziskav Er-dopiranega vlakenskega laserja je bila objavljena študija: Spektralna dinamika bliskovnega Er-dopiranega fluoridnega vlakenskega laserja črpanega z laserskimi diodami (Spectral dynamics of pulsed diode-pumped erbium-doped fluoride fiber lasers) objavljeno v Journal of the Optical Society of America. Series B, optical physics.

ANG

The main results of the project that are important for the development of science are:

1. Pulsed operation of Er:ZBLAN fiber laser with a wavelength in the range of 2.8 μm , which is particularly interesting for medical applications because of its absorption of water. Peak power achieved at the time of publication represented an absolute record for this type of fiber lasers. The research was published in the article: High-power pulsed diode-pumped Er:ZBLAN fiber laser - published in "Optics Letters".
2. A successful attempt of Q-switching using a photo-elastic modulator and active micro-structured optical fibers was performed. With the same type of modulator we were able to demonstrate the increase in power (power scaling) of a Q-switched laser, while the output power at the double repetition frequency was almost doubled. Part of this research was also financed by the EU project ALPINE. It was published in the article: Power scaling of AOM-switched lasers with SCPEM-based time-multiplexing - published in Optics Letters. Partial report was accepted for publication by Applied Physics B (Influence of the retardation of the multiplexing element and a dual channel Q-switched laser).
3. The report on laboratory setup of a continuous fiber laser with a narrow spectrum and a high degree of polarization, which is suitable for frequency doubling was published in the article: CW fiber laser for second harmonic generation in Journal of Mechanical Engineering.
4. A study was published regarding the research of Er-doped fiber laser: Spectral dynamics of pulsed diode-pumped erbium-doped fluoride fiber lasers - published in the Journal of the Optical Society of America. Series B, optical physics.

10.2. Pomen za razvoj Slovenije¹¹

SLO

Rezultati projekta že imajo in bodo še imeli neposreden in posreden vpliv na bodočo proizvodnjo laserskih sistemov v Sloveniji predvsem pri proizvajalcih, ki so neposredno sodelovali pri projektu (LPKF, Fotona, Optotek). Pričakujemo predvsem uvajanje novih rešitev predvsem v primeru sistemov za mikro-obdelave v industriji, kjer aktivnosti že potekajo, in na področju terapevtskih laserskih sistemov za uporabo v medicini. Takšne rešitve bodo prispevale k boljši kakovosti in večji tehnološki dovršenosti omenjenih sistemov na globalnem trgu. Z uvedbo novih virov, ki temeljijo na tehnologiji aktivnih optičnih vlaken, v naslednjih letih pričakujemo, da se bo povečala kvaliteta, zanesljivost in življenjska doba instrumentov na področju medicinskih aplikacij in s tem povečala učinkovitost terapije zdravljenja bolezenskih stanj v medicini. Prav tako pričakujemo, da se bodo z uvedbo novih laserskih sistemov temelječih na aktivnih vlaknih za uporabo v industriji, odprle možnosti za nove aplikacije in s tem povečala konkurenčnost slovenske industrije laserskih sistemov.

Ključni rezultati projekta, ki bodo imeli največji vpliv, so:

1. Razvoj Er:ZBLAN vlakenskega laserja z delovanjem v kvazi-kontinuirnem načinu na osnovi hitrega preklopa črpalnih diod. Vršna moč, ki je bila dosežena v času izvajanja eksperimenta, je takrat predstavljala absolutni rekord za tak tip vlakenskih laserjev. Er:ZBLAN vlakenski laserji so še posebej pomembni, ker gre v tem primeru za izhodno valovno dolžino v območju $3\mu\text{m}$, kjer ima voda močno absorpcijo. Takšni laserji so izredno pomembni predvsem za uporabo v medicini, kjer je zaželena absorpcija v bioloških vzorcih (tkivih). V današnjem času je to območju še vedno pokrito takorekoč izključno s klasični trdninskimi laserji, z npr Er:YAG kot aktivnim sredstvom in posledično s prostostoječo optiko. Preprosta integracija v optično vlakno v tem primeru žal ni možna. Standardna optična vlakna, ki so izdelana iz kvarčnega stekla (SiO_2) svetlobo v tem območju namreč močno atenuirajo in zato niso primerna za uporabo. Trenutno naj bolj obetavna so optična vlakna osnovana na ZBLAN, ki jih je moč tudi dopirati z aktivnimi ioni erbija. Žal pa se izkaže, da gre v tem primeru za zelo občutljivo vlakno tako termično kot mehansko. Postaviti je bilo potrebno posebne tehnološke postopke tako za samo obdelavo aktivnega optičnega vlakna kot tudi za samo optično črpanje. Del raziskave, ki je relevanten za znanost je bil objavljen »Optics Letters«: z naslovom »High-power pulsed diode-pumped Er:ZBLAN fiber laser«.

2. Za uporabo v medicini in s tem za slovenske proizvajalce medicinskih laserskih sistemov je pomemben tudi kontinuirani vlakenski laser z ozkim izhodnim spektrom in polariziranim izhodom primernim za frekvenčno podvojevanje. V okviru raziskave je bil razvita laboratorijska postavitve kontinuirnega, diodno vzbujanega, vlakenskega laserja tipa oscilator-ojačevalnik z enostopenjskim, iterativnim, mikro-strukturiranim vlakenskim ojačevalnikom. Laser je pripravljen za frekvenčno podvojevanje, pri čemer je možno dobiti izhod z valovno dolžino 532 nm, ki je zanimiv z uporabo v medicini.

3. Za uporabo v industrijskih procesih pa je najpomembnejša postavitve sub-ns vlakenski ojačevalnik na osnovi mikro-strukturiranih vlaken. V sklopu raziskav povezanih s to laboratorijsko postavitvijo so bila pridobljena številna znanja, ki bodo posredno in tudi neposredno uporabljena za izdelavo prototipa, ki ga namerava podjetje LPKF zasnovati kot visokozmogljiv ps laserja za mikro-procesiranje v industrijskih aplikacijah.

ANG

The results of the project already have and will continue to have direct and indirect impact on future production of laser systems in Slovenia, particularly for manufacturers, who are directly involved in the project (LPKF, Fotona, Optotek). Above all we expect the introduction of new solutions especially in the case of systems for micro-processing industry, where activities are already under way, and in the field of therapeutic laser systems for medical applications. Such solutions will contribute to improvements in quality and technological sophistication of these systems in the global market. With the introduction of new sources, based on the technology of active optical fiber in the years to come, we expect increase in the quality, reliability and service life of instruments in the field of medical applications, thereby increasing the effectiveness of therapy treatment of disease conditions in medicine. We also expect that with the introduction of new laser systems based on active fibers for use in industry, possibilities will be opened for new applications and thereby increasing the competitiveness of Slovenian industry laser systems.

Key results of the project, which will have the greatest impact are:

1. Development of Er: ZBLAN fiber laser operating in quasi-continuous mode based on fast switching of diode pumping. Peak power reached in the experiment at that time represented

absolute record for this type of fiber lasers. Er: ZBLAN fiber lasers are particularly important, because their output wavelength is in the range 3µm, where water has a strong absorption peak. Such lasers are extremely important especially for medical applications, where absorption in biological samples (tissues) is desired. Today the area is still covered, so to speak exclusively with classic solid state lasers, such as the Er:YAG as active material and, consequently, free standing optics. Easy integration of optical fiber is not possible in this case. Standard optical fibers which are made of quartz (SiO₂) light strongly attenuate light in this region and are therefore not suitable. Most promising at present are optical fibers based on ZBLAN, which can also be doped with active erbium ions. Unfortunately, it turns out that in this case the fiber is thermally and mechanically very sensitive. It was necessary to employ special technological processes both for the treatment of active optical fibers as well as for optical pumping. Part of this research, which is relevant to science was published "Optics Letters": entitled "High-power pulsed diode-pumped Er: ZBLAN laser".

2. Important for use in medicine and thus for Slovenian manufacturers of medical laser systems is also continuous fiber laser with narrow output spectrum and polarized output suitable for frequency doubling. In the research a laboratory setup was developed of a continuous, pulsed diode pumped fiber laser of oscillator-amplifier type with single-stage, ytterbium, micro-structured fiber amplifier. The laser is ready for frequency doubling where it is possible to get the output wavelength of 532 nm, which is attractive for use in medicine.

3. For use in industrial processes, the most important setup is the sub-ns fiber amplifier based on micro-structured fibers. The research associated with this laboratory setup many skills were acquired that will be indirectly and directly used for construction of the prototype, which the company LPKF intends to designed as a high performance ps laser for micro-processing in industrial applications.

11. Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!

Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni

Cilj		
F.01	Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih
F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.03	Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.04	Dvig tehnološke ravni	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih
F.05	Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE

	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.06	Razvoj novega izdelka	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen bo v naslednjih 3 letih
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih
F.07	Izboljšanje obstoječega izdelka	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.08	Razvoj in izdelava prototipa	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen bo v naslednjih 3 letih
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih
F.09	Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih
F.10	Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.11	Razvoj nove storitve	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.12	Izboljšanje obstoječe storitve	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.13	Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
	Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih	

F.14	procesov	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.15	Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.16	Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.17	Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen bo v naslednjih 3 letih
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih
F.18	Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	Delno
F.19	Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.20	Ustanovitev novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.21	Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.22	Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	

	Uporaba rezultatov	
F.23	Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.24	Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.25	Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.26	Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.27	Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščine	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.28	Priprava/organizacija razstave	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.29	Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.30	Strokovna ocena stanja	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen
	Uporaba rezultatov	V celoti
F.31	Razvoj standardov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE

	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.32	Mednarodni patent	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.33	Patent v Sloveniji	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.34	Svetovalna dejavnost	
	Zastavljen cilj	☒ DA ☐ NE
	Rezultat	Dosežen bo v naslednjih 3 letih
	Uporaba rezultatov	Uporabljen bo v naslednjih 3 letih
F.35	Drugo	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☒ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	

Komentar

12.Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!
Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja

	Vpliv	Ni vpliva	Majhen vpliv	Srednji vpliv	Velik vpliv	
G.01	Razvoj visokošolskega izobraževanja					
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	☒	☐	☐	☐	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	☒	☐	☐	☐	
G.01.03.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.02	Gospodarski razvoj					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	☒	☐	☐	☐	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	☒	☐	☐	☐	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	☒	☐	☐	☐	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	☒	☐	☐	☐	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	☒	☐	☐	☐	
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	☒	☐	☐	☐	

G.02.07.	Večji delež izvoza					
G.02.08.	Povečanje dobička					
G.02.09.	Nova delovna mesta					
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih					
G.02.11.	Nov investicijski zagon					
G.02.12.	Drugo:					
G.03	Tehnološki razvoj					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti					
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti					
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij					
G.03.04.	Drugo:					
G.04	Družbeni razvoj					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja					
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja					
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave					
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti					
G.04.05.	Razvoj civilne družbe					
G.04.06.	Drugo:					
G.05.	Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete					
G.06.	Varovanje okolja in trajnostni razvoj					
G.07	Razvoj družbene infrastrukture					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura					
G.07.02.	Prometna infrastruktura					
G.07.03.	Energetska infrastruktura					
G.07.04.	Drugo:					
G.08.	Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva					
G.09.	Drugo: 					

Komentar

13.Pomen raziskovanja za sofinancerje¹²

	Sofinancer		
1.	Naziv	LPKF Laser & Elektronika d.o.o.	
		Polica 33	

	Naslov		SI-4202 Naklo Slovenija	
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:		18.132,87	EUR
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:		9	%
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja			Šifra
		1.	Sub-ns vlakenski ojačevalnik na osnovi mikrostrukturiranih vlaken	F.01
		2.	Črpalni laserski sistem za ojačevalnike na osnovi aktivnih optičnih vlaken	F.01
		3.	Kontinuirani vlakenski laser za frekvenčno podvojevanje	F.02
		4.	Razvoj programske opreme za numerično modeliranje vlakenskih laserjev in ojačevalnikov	F.01
		5.		
	Komentar			
	Ocena		V podjetju LPKF ocenjujemo, da je delo na projektu končano v skladu z dogovori in našim pričakovanjmi. Za pomembnejše dosedanje dosežke štejemo raziskave na področju sub-ns ojačevalnikov na osnovi mikrostrukturiranih vlaken. Prav tako je za nas pomembna izdelava teoretičnega modela, ki po eni strani pomembno vpliva na bolj poglobljeno razumevanje delovanja vlakenskih laserjev po drugi strani pa omogoča tudi nadaljno optimizacijo vlakenskih ojačevalnikov. V nadaljevanju smatramo za pomemben korak raziskave na področju črpalnih sistemov za ojačevalnike na osnovi aktivnih optičnih vlaken z dvojnimi plaščem ter vlakenskih laserjev primernih za frekvenčno podvojevanje. Na osnovi rezultatov iz projekta smo v podjetju že pričeli z aktivnostmi za izdelavo visoko zmogljivega prototipa ps vlakenskega laserja. Prepričani smo, da bodo rezultati raziskav laserskih virov tudi sicer pomembno vplivale na nadaljnjo krepitev podjetja na področju laserskih sistemov za natančne mikro-obdelave.	
2.	Naziv		FOTONA proizvodnja optoelektronskih naprav d.d	
	Naslov		Stegne 7 1210 Ljubljana SLOVENIJA	
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:		18.132,87	EUR
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:		8	%
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja			Šifra
		1.	Diodno črpani bliskovni Er:ZBLAN vlakenski laser visoke moči	F.02
		2.	Kontinuirani vlakenski laser za frekvenčno podvojevanje	F.02
		3.	Sub-ns vlakenski ojačevalnik na osnovi mikrostrukturiranih vlaken	F.01
		4.		
		5.		
	Komentar			
			V podjetju Fotona d.d. menimo, da so zaključene aktivnosti na projektu pripomogle, k razumevanju osnovnih tehnologij in znanj potrebnih za razvoj novih vrst vlakenskih laserjev osnovanih na mikro-strukturiranih	

	Ocena	optičnih vlaken z dvojnim plaščem. Za podjetje je še posebej pomembna testna postavitvev kavzi kontinuiranega vlakenskega laserja z iizhodno valovno dolžino 2,8 um osnovanega na Er:ZBLAN tipu optičnega vlakna. Prav tako vidimo poseben pomen v razvoju kontinuiranega vlakenskega laserja s polariziranim izhodom, ki je primeren za frekvenčno podvojevanje in ki je osnovan na mikro-strukturiranem optičnem aktivnem vlaknu. Menimo, da bodo izsledki raziskav vlakenskih laserjev iz projekta pomembno vplivai na nadaljni razvoj podjetja na področju laserskih sistemov za uporabo v medicini.			
3.	Naziv	OPTOTEK razvoj in proizvodnja optične in laserske opreme d.o.o.			
	Naslov	Tehnološki park 21 1000 Ljubljana Slovenia			
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:		18.132,87	EUR	
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:		8	%	
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja			Šifra	
		1.	Kontinuirani vlakenski laser za frekvenčno podvojevanje		F.02
		2.	Črpalni laserski sistem za ojačevalnike na osnovi aktivnih optičnih vlaken		F.01
		3.			
		4.			
		5.			
Komentar					
Ocena	Najpomembnejši rezultat za podjetje OPTOTEK razvoj in proizvodnja optične in laserske opreme d.o.o.predstavlja testna postavitvev kontinuirnega vlakenskega laserja na osnovi mikro-strukturiranih aktivnih optičnih vlaken z dvojnim plaščem. Takšen sistem podjetju potencialno omogoča razvoj novega koagulatorskega terapevtskega sistema osnovanega na vlakenskem laserskem izvoru. Poleg je za podjetje pomebno sub-ns vlakenski ojačevalnik na osnovi mikrostrukturiranih vlaken ter črpalni laserski sistem za ojačevalnike na osnovi aktivnih optičnih vlaken laserskih diod, ki za podjetje predstavljajo novost. Na ta način je pomembna tudi osvojitev potrebnega osnovnega znanja, ki ga bomo lahko spridoma uporabili pri nadaljnh razvojnih aktivnostih tako na področju vlakenskih laserskih izvorov kot tudi za implementacijo v ostale laserske sisteme (tako v obstoječe kot tudi v novo razvite). V podjetju ocenjujemo da so bile vse aktivnosti na projektu uspešno zaključene v skladu z dogovori in načrtom ter našimi pričakovanji.				

14.Izjemni dosežek v letu 2012¹³**14.1. Izjemni znanstveni dosežek**

--

14.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek

Razvoj Er:ZBLAN vlakenskega laserja z delovanjem v kvazi-kontinuirnem načinu na osnovi hitrega preklopa črpalnih diod. Vršna moč, ki je bila dosežena je v času izvajanja eksperimenta predstavljala absolutni rekord za tak tip vlakenskih laserjev. Er:ZBLAN vlakenski laserji so še posebej pomembni, zaradi izhodne valovne dolžine v območju 3μm, kjer ima voda močno

absorpcijo in so zato zanimivi za uporabo v medicini. V današnjem času je to območju še vedno pokrito tako-rekoč izključno s klasični trdninskimi laserji, z npr Er-YAG kot aktivnim sredstvom in posledično s prostostoječo optiko. Alternativa so optična vlakna osnovana na ZBLAN, ki jih je moč tudi dopirati z aktivnimi ioni erbij. Ker gre za poseben tip vlakna je bilo potrebno v sklopu projekta izdelati posebne tehnološke postopke tako za samo obdelavo aktivnega optičnega vlakna kot tudi za samo optično črpanje. Del raziskave je bil objavljen »Optics Letters«: z naslovom »High-power pulsed diode-pumped Er:ZBLAN fiber laser«

C. IZJAVE

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja ter obdelavo teh podatkov za evidence ARRS
- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v pisni obliki
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

Podpisi:

*zastopnik oz. pooblaščen oseba
raziskovalne organizacije:*

in

vodja raziskovalnega projekta:

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za
strojništvo

Rok Petkovšek

ŽIG

Kraj in datum:

Ljubljana	12.3.2013
-----------	-----------

Oznaka prijave: ARRS-RPROJ-ZP-2013/57

¹ Opredelite raziskovalno področje po klasifikaciji FOS 2007 (Fields of Science). Prevajalna tabela med raziskovalnimi področji po klasifikaciji ARRS ter po klasifikaciji FOS 2007 (Fields of Science) s kategorijami WOS (Web of Science) kot podpodročji je dostopna na spletni strani agencije (<http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/sifranti/preslik-vpp-fos-wos.asp>). [Nazaj](#)

² Napišite povzetek raziskovalnega projekta (največ 3.000 znakov v slovenskem in angleškem jeziku) [Nazaj](#)

³ Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja, rezultate in učinke raziskovalnega projekta in njihovo uporabo ter sodelovanje s tujimi partnerji. Največ 12.000 znakov vključno s presledki (približno dve strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

⁴ Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikost pisave 11) [Nazaj](#)

⁵ V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine v zadnjem letu izvajanja projekta, napišite obrazložitev. V primeru, da sprememb ni bilo, to navedite. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

⁶ Navedite znanstvene dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Raziskovalni dosežek iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A'' ali A'. [Nazaj](#)

⁷ Navedite družbeno-ekonomske dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Družbeno-ekonomski rezultat iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A'' ali A'.

Družbeno-ekonomski dosežek je po svoji strukturi drugačen kot znanstveni dosežek. Povzetek znanstvenega dosežka je praviloma povzetek bibliografske enote (članka, knjige), v kateri je dosežek objavljen.

Povzetek družbeno-ekonomskega dosežka praviloma ni povzetek bibliografske enote, ki ta dosežek dokumentira, ker je dosežek sklop več rezultatov raziskovanja, ki je lahko dokumentiran v različnih bibliografskih enotah. COBISS ID zato ni enoznačen, izjemoma pa ga lahko tudi ni (npr. prehod mlajših sodelavcev v gospodarstvo na pomembnih raziskovalnih nalogah, ali ustanovitev podjetja kot rezultat projekta ... - v obeh primerih ni COBISS ID). [Nazaj](#)

⁸ Navedite rezultate raziskovalnega projekta iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 7 in 8 (npr. ker se ga v sistemu COBISS ne vodi). Največ 2.000 znakov, vključno s presledki. [Nazaj](#)

⁹ Pomen raziskovalnih rezultatov za razvoj znanosti in za razvoj Slovenije bo objavljen na spletni strani: <http://sicris.izum.si/> za posamezen projekt, ki je predmet poročanja [Nazaj](#)

¹⁰ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹¹ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹² Rubrike izpolnite / prepisite skladno z obrazcem "izjava sofinancerja" <http://www.arrs.gov.si/sl/progproj/rproj/gradivo/>, ki ga mora izpolniti sofinancer. Podpisan obrazec "Izjava sofinancerja" pridobi in hrani nosilna raziskovalna organizacija – izvajalka projekta. [Nazaj](#)

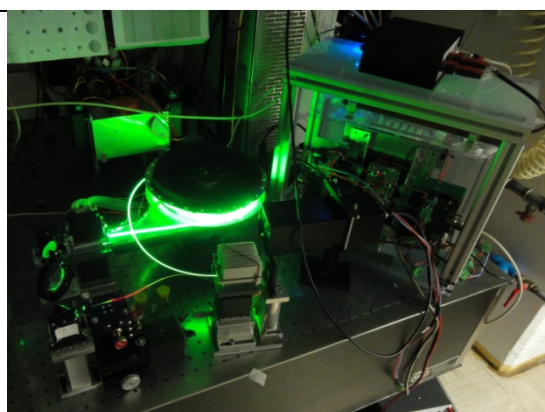
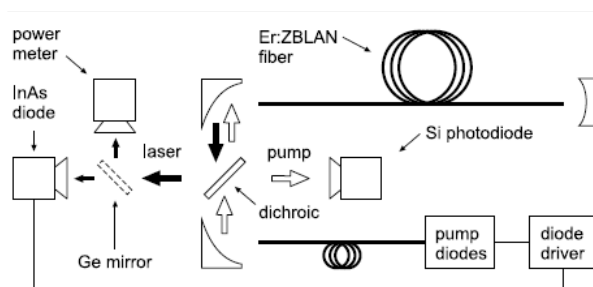
¹³ Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega projekta v letu 2012 (največ 1000 znakov, vključno s presledki). Za dosežek pripravite diapozitiv, ki vsebuje sliko ali drugo slikovno gradivo v zvezi z izjemnim dosežkom (velikost pisave najmanj 16, približno pol strani) in opis izjemnega dosežka (velikost pisave 12, približno pol strani). Diapozitiv/-a priložite kot priponko/-i k temu poročilu. Vzorec diapozitiva je objavljen na spletni strani ARRS <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/>, predstavitev dosežkov za pretekla leta pa so objavljena na spletni strani <http://www.arrs.gov.si/sl/analize/dosez/>. [Nazaj](#)

Obrazec: ARRS-RPROJ-ZP/2013 v1.00
CD-C4-A4-2C-DB-F7-88-BC-9E-BA-FA-CD-E4-E4-67-4D-61-4C-0E-0B

TEHNIKA

Področje: 2.21 – Tehnološko usmerjena fizika

Dosežek 1: Er:ZBLAN vlakenskega laserja z delovanjem v kvazi-kontinuirnem načinu



Opis dosežka oziroma učinka:

Razvoj Er:ZBLAN vlakenskega laserja z delovanjem v kvazi-kontinuirnem načinu na osnovi hitrega preklopa črpalnih diod. Vršna moč, ki je bila dosežena v času izvajanja eksperimenta je takrat predstavljala absolutni rekord za tak tip vlakenskih laserjev. Er:ZBLAN vlakenski laserji so še posebej pomembni, ker gre v tem primeru za izhodno valovno dolžino v območju $3\mu\text{m}$, kjer ima voda močno absorpcijo. Takšni laserji so izredno pomembni predvsem za uporabo v medicini, kjer je zaželena absorpcija v bioloških vzorcih (tkivih). V današnjem času je to območju še vedno pokrito tako-rekoč izključno s klasični trdninskimi laserji, z npr Er-YAG kot aktivnim sredstvom in posledično s prostostoječo optiko. Preprosta integracija v optično vlakno v tem primeru žal ni možna. Standardna optična vlakna, ki so izdelana iz kvarčnega stekla (SiO_2) svetlobo v območju namreč močno atenuirajo in zato niso primerna za uporabo. Trenutno naj bolj obetavna so optična vlakna osnovana na ZBLAN, ki jih je moč tudi dopirati z aktivnimi ioni erbij. Žal pa se izkaže, da gre v tem primeru za zelo občutljivo vlakno tako termično kot mehansko. Postaviti je bilo potrebno posebne tehnološke postopke tako za samo obdelavo aktivnega optičnega vlakna kot tudi za samo optično črpanje. Del raziskave, ki je relevanten za znanost je bil objavljen »Optics Letters«: z naslovom »High-power pulsed diode-pumped Er:ZBLAN fiber laser«