

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2015/160



ZAKLJUČNO POROČILO RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra projekta	L2-4174
Naslov projekta	Frekvenčno podvojeni bliskovni vlakenski laser za industrijo in medicino
Vodja projekta	15646 Rok Petkovšek
Tip projekta	L Aplikativni projekt
Obseg raziskovalnih ur	7523
Cenovni razred	C
Trajanje projekta	07.2011 - 06.2014
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 & ELECTRONICS d.o.o.
Raziskovalno področje po šifrantu ARRS	2 TEHNIKA 2.21 Tehnološko usmerjena fizika
Družbeno-ekonomski cilj	06. Industrijska proizvodnja in tehnologija
Raziskovalno področje po šifrantu FOS	2 Tehniške in tehnološke vede 2.11 Druge tehniške in tehnološke vede

B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

2. Povzetek raziskovalnega projekta¹

SLO

V skladu z načrtom projekta je bil cilj zasnova in testna izdelava robustnega, kompaktnega in tudi cenovno učinkovitega bliskovnega vlakenskega laserja z delovanjem v bližnjem infrardečem področju (okoli 1020-1080 nm) na osnovi preklopa ojačenja za uporabo v

industriji in medicini. Načrtovano trajanje izhodnih bliskov je bilo 20 – 90 ns, frekvenca delovanja v območju 10 KHz do približno 300 KHz ter povprečna izhodna moč okoli 10 W. Nadaljnje zahteve so bile, da je izhod polariziran in primeren za frekvenčno podvojevanje. Koncept preklopa ojačenja je bil izbran, ker v tem primeru v samem resonatorju ne potrebujemo nobenega dodatnega optičnega elementa. Zato je takšna zasnova sistema zelo enostavna, kar posledično omogoča veliko kompaktnost in robustnost.

V sklopu projekta so bili doseženi vsi zadani cilji. Razvit in nadgrajen je bil računski model, ki je služil za optimizacijo vlakenskega resonatorja. Kot en od ključnih elementov laserja s preklopom ojačenja je bilo razvitih in preskušanih več črpalnih sistemov, posebej prilagojenih za delovanje v bliskovnem načinu. Sistemi so bili optimizirani tako, da so skupaj z natančnim nadzorom temperature omogočali zahtevane izhodne parametre črpalnega sistema, kot so: hitrost preklopa, center spektra črpalne svetlobe,...Osnovni koncept črpalnega sistema temelji na povratni zanki, kar posledično omogoča izredno stabilnost izhodnih laserskih bliskov laserja s preklopom ojačenja (dosežena deviacija stabilnosti od bliska do bliska je znašala pod 1%). Nadaljnja pomembna lastnost, ki izhaja iz specifičnega načina črpanja razvitega v sklopu projekta, je tudi, da parametri izhodnega bliska (trajanje in vršna moč) niso odvisni od frekvence ponavljanja bliskov.

Poleg več testnih postavitev vlakenskega laserja s preklopom ojačenja, je bila razvita popolnoma integrirana verzija, kar pomeni, da so bile vse optične komponente laserja združene v enotno optično vlakno. Demonstrirano je bilo frekvenčno podvajanje s pomočjo PPLN kristalov in opravljeni so bili preliminarni testi v smeri potencialnih aplikacij. Eksperimentalno je bilo doseženo najkrajše trajanje laserskih bliskov 28 ns, kar predstavlja absoluten rekord za tak tip vlakenskih laserjev z delovanjem v območju valovnih dolžin 1 μ m. Dosežena vršna moč je znašala 1,4 kW v primeru izvedbe osnovane samo na resonatorju, oziroma 2,3 kW v primeru dodatnega aktivnega vlakna. Aktivno vlakno deluje na principu absorpcije odvečne črpalne svetlobe in predstavlja inovativen pristop na tem področju. V sklopu projekta so bila preizkušena in uporabljena tudi mikro-strukturirana aktivna optična vlakna, ki vodijo samo eno polarizacijo ter mikro-strukturirana paličasta vlakna z velikim razmikom med luknjicami (angl. LPF; Large Pitch Fiber). V drugem primeru je bila dosežena povprečna moč preko 40 W ter vršna moč bliskov 4,4 kW, kar za tak tip laserjev predstavlja absolutno rekordno vrednost.

ANG

In accordance with the objective of the project the goal was the design and test production of a robust, compact and cost effective pulsed fiber laser operating in the near infrared region (around 1020-1080 nm) based on gain switching for use in industry and medicine. The duration of the output pulses was planned to be 20-90 ns, the operating frequency range of 10 kHz to about 300 kHz and average output power of about 10 W. Further requirements were that the output is polarized and suitable for frequency doubling. The concept of gain switching was selected because in this case there is no need for any additional optical element in the resonator, therefore such a system design is very simple, allowing for a lot of compactness and robustness.

All the project objectives were achieved. A model was developed and upgraded, which was used for the optimization of the fiber resonator. As one of the key elements of the gain-switched lasers several

pumping systems specially adapted to operate in the pulsed mode have been developed and tested. Systems have been optimized so that, together with the precise control of temperature they allow the control of the required output parameters of the pumping system such as: switching speed and center of the pumping light spectrum ... The basic concept of the pumping system is based on a feedback loop, which in turn allows for exceptional stability of output laser pulses with gain-switching laser (achieved pulse-to-pulse deviation stability less than 1%). Another important property that arises from a specific pumping method developed in this project, is that the output pulse parameters (duration and peak power) are not dependent on the pulse repetition frequency.

In addition to several test versions of a gain-switched fiber laser a completely integrated version has been developed, which means that all the optical components of the laser were integrated into a single optical fiber. Frequency doubling was demonstrated using PPLN crystals and preliminary tests were carried out in the direction of potential applications. Experimentally, the minimum pulse duration of 28 ns has been achieved, which represents an absolute record for this type of fiber lasers to operate in the wavelength range of 1 micrometer. Peak power of 1.4 kW was achieved in the case of a laser based only on a resonator, or 2.3 kW in the case of additional active fiber, which operated on the principle of absorption of the excess pumping light, which represents an innovative approach in this field. Micro-structured active optical fibers, which lead only one polarization and micro-structured rod-type fiber with large spacing between holes (LPF Large Pitch Fiber) have been tested and used in the project. In another case, the average power more than 40 W was achieved and peak pulse power of 4.4 kW, which for this type of lasers represents an absolute record value.

3. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem projektu²

Izdelava koncepta, teoretičnega modela in izvajanje računskih simulacij

Za doseganje laserskih bliskov v nanosekundnem področju se uporabljajo sledeče izvedbe laserjev : Preklop dobrote, neposredna modulacija vzbujevalnega vira in preklop ojačenja. Slednji nudi poenostavitev laserske izvedbe in omogoča izdelavo robustnejšega sistema. Za proizvodnjo bliskov izkorišča pojav relaksacijskih oscilacij. To so prenehajo zasedenosti zgornjega laserskega nivoja, in posledično izhodne laserske moči, ki so posledica hitre spremembe stanja znotraj oscilatorja in jih imenujemo relaksacijske oscilacije. Amplituda prvih nekaj nihajev je lahko nekajkrat večja od moči v stacionarnem stanju kontinuiranega laserja , za katero je narejen laserski sistem. Tako lahko v določenih primerih pride celo do poškodb in se posledično ta pojav šteje kot nezaželen.

Za učinkovito uporabo principa preklopa ojačenja za generacijo nanosekundnih bliskov pa je pomembno poznavanje parametrov črpanja in vlakna. Za opis vpliva vršne moči in dolžine črpanja na laserske izhodne bliske je bil razvit numerični model temelječ na zasedbenih enačbah. Model in njegove rezultati so bili objavljeni v članku [1].

S pomočjo numeričnega modela je bila opravljena analiza (partnerji: UL FS, LPKF, Fotona, Optotek) izhodnih laserskih bliskov za različne dolžine aktivnega vlakna v odvisnosti od črpalne moči. V simulaciji so bile uporabljene dolžine aktivnih vlaken med 0,5 in 2 metra. V skladu s

pričakovani se je pokazalo, da krajša dolžina vlakna pomeni tudi krajše trajanje laserskega bliska. Po drugi strani pa krajšanje dolžine zmanjša absorpcijo črpalne svetlobe v vlaknu in pomeni laserske bliske z nižjo močjo.

Razvoj in testna postavitve črpalnega sistema s temperaturno kontrolo

V okviru projekta je bil razvit visoko zmogljiv črpalni sistem z možnostjo zagotavljanja moči črpanja do 360W v kontinuiranem načinu (partnerji: UL FS, LPKF, Vienna University of Technology, Fotona, Optotek). Za potrebe preklopa ojačenja pa je lahko zagotovil črpalne bliske s povprečnimi močmi v blisku do 1 kW .

Za črpalni sistem namensko razvit krmilnik laserskih črpalnih diod je omogočal dvižni čas, v območju nekaj 10 ns.

Uporabljene močnostne črpalne diode z valovno dolžino 976 nm so sklopljene v eno samo vlakno z notranjim premerom 400 um preko optičnega združevalnika s trinajstimi vhodnimi vlakni, premera sredice 105 μm. Numerična apertura izhodnega vlakna iz združevalnika je 0,22.

Diode so bile pritrjene na temperaturno stabilizirano bakreno ploščo. Aktivna stabilizacija je potekala preko termoelektričnih elementov, ki so odvajali presežek toplote na zračno hlajen hladilnik. Temperaturna kontrola črpalnega sistema je potrebna za zagotavljanje ustrezne valovne dolžine črpalnih diod. Njegova stabilizacija je potrebna, če želimo črpati v najvišjem vrhu absorpcijskega spektra iterbija pri 976 nm, katerega širina na polovični višini je 7 nm.

Razvoj in testna postavitve laserja, analiza sistema ter preliminarni testi

V okviru projekta je bil postavljen testni vlakenski sistem z uporabo iterbijeveh aktivnih vlaken in prostostojećih optičnih elementov [1]. Njegov namen je bil preveriti rezultate numeričnega modela, saj je imel možnost menjave aktivnih vlaken pri čemer je uporabljal fleksibilni črpalni vir. Na eksperimentalni ravni je bil preučen vpliv črpalne moči v blisku in dolžine vlakenskega oscilatorja na trajanje laserskega bliska. Pri primerjavi rezultatov modela z meritvami opravljenimi na eksperimentalnem sistemu je bilo ugotovljeno dobro ujemanje (partnerji: UL FS, LPKF, NKT Photonics).

Prilagodljivost numeričnega modela za opis bliskovnega delovanja doseženega s prekopom ojačenja kot s prekopom dobrote je bila preverjena na časovno multipleksiranem dvo-kanalnem laserju s preklopnikom dobrote [2].

Nadgradnja testne postavitve je bila narejena z mikrostrukturiranim optičnim vlaknom za ohranjanje polarizacije tipa PANDA (partnerji: UL FS, NKT Photonics). Preizkušene so bile tri dolžine aktivnega vlakna z namenom, da se pokaže vpliv dolžine na trajanje laserskega bliska.

Zaradi narave vlakna, ki vodi svetlobo v dveh ortogonalnih polarizacijskih oseh, je bil med mrežico in koncem vlakna nameščen polarizator, ki je preprečeval ojačevanje nezaželene polarizacije.

S tem testnim sistemom so bili doseženi bliski s trajanjem 28 ns in vršno močjo 1,4 kW, [3] kar najboljša objavljena vrednost na področju iterbijeveh vlakenskih laserjev s prekopom ojačenja. V primeru dosežene vršne moči 2 kW so bliski trajali 41 ns, saj je bilo uporabljeno daljše aktivno vlakno. Izsevana laserska svetloba je imela linearno polarizacijo s polarizacijskim kontrastom večjim od 15 dB in zelo dobro kvaliteto žarka z $M^2 < 1,1$ pri čemer je spektralna širina 0,11 nm. Eksperimentalni laser je deloval pri frekvencah 50 kHz in valovni dolžini 1030 nm.

Opravljenе analize na testnih postavitvah (partnerji: UL FS, LPKF, Fotona,

Optotek). skupaj z numeričnim modelom so pokazale potrebo po kratkih aktivnih vlaknih v oscilatorju, kar pa je pomenilo slabše izkoristke. Kot rešitev problema je bil nadgrajen osnovni sistem z dodanim aktivnim vlaknom, ki je bilo črpano smo z neabsorbirano črpalno svetlobo oscilatorja. Na ta način se je močno izboljšal izkoristek, pri čemer pa je celoten sistem še vedno ostal zelo kompakten. Prednost takšne izvedbe je tudi v tem, da je ojačevalno vlakno črpano sinhrono z oscilatorjem kar pomeni, da je možnost za nastanek ojačene spontane emisije zanemarljiva. Laserski sistem je proizvedel laserske bliske z valovno dolžino 1030 nm s širino na polovični višini 28 ns in vršno močjo 2,3 kW. Sistem je bil narejen na osnovi mikrostrukturiranega vlakna za ohranjanje polarizacije (partnerji: UL FS, NKT Photonics) in kot tak ohranil polarizacijske lastnosti testne postavitve. Inovativna rešitev povečanja izkoristka vlakenskega laserja s preklopom ojačenja je bila objavljena v članku [4].

Precejšen del aktivnosti se je nanašal tudi na postavitve osnovano na novem tipu mikro-strukturiranega vlakna (partnerji: UL FS, NKT Photonics), ki je omogočal vodenje svetlobe s polarizacijo v samo eni polarizacijski osi vlakna. Posledično ni bilo potrebno uporabiti polarizator znotraj oscilatorja. S tem sistemom so bili doseženi laserski bliski z vršno močjo 2,3 kW in trajanjem 60 ns. Daljši čas trajanja bliska je posledica drugačnih parametrov vlakna (dopiranost, presek,...). Dosežen je pa bil tudi precej večji polarizacijski kontrast in sicer več kot 21 dB. Na podlagi novega sistema je bila narejena tudi analiza vpliva valovne dolžine delovanja laserja na parametre izhodnega laserskega bliska. Rezultati analize skupaj s teorijo in eksperimentalnim delom so predstavljeni v članku [5] objavljenem v Optics Express. Zaradi ozkega spektra in visokega polarizacijskega kontrasta je laser primeren za frekvenčno podvojevanje.

Za doseganje višjih vršnih moči je bil razvit sistem na osnovi iterbijevega paličastega vlakenskega laserja s preklopom ojačenja (partnerji: UL FS, NKT Photonics).. Analizirani so bili črpanje, izhodni bliski, spekter stabilnost energije bliskov ter vpliv repeticije na izhodne laserske bliske. Največja vršna moč laserskih bliskov je bila 4,4 kW. Ta rezultat predstavlja najvišjo objavljeno vrednost za vršno moč za enostopenjske iterbijeve laserje s preklopom ojačenja [6]. V nadaljevanju je bil tudi preučen vpliv repeticije na delovanje ter izhodne bliske iz vlakenskega laserja s preklopom ojačenja. Izpeljana je zveza med trajanjem črpalnega bliska in repeticijo. Zaključki raziskave so bili objavljeni tudi v SCI reviji [7].

V okviru projekta je bila narejena tudi popolnoma integrirana izvedba vlakenskega laserja s preklopom ojačenja (partnerji: UL FS, Fotona, Optotek in LPKF). Povprečna izhodna moč laserja je dosegala 10 W pri čemer je bila vršna moč do 1,3 kW. Laser je v osnovi deloval pri 1032 nm valovne dolžine je bil frekvenčno podvojen na 516 nm. Narejena je bila analiza spektra ter stabilnost laserskih bliskov. Standardna deviacija energije med zaporednimi laserskimi bliski je bila manj kot 1 %. Opravljen je bil tudi preliminarni test v smislu potencialnih aplikacij ter hladnega zagona laserja.

1 Reference

1. V. Agrež and R. Petkovšek, "Gain-switched Yb-doped fiber laser for microprocessing," *Appl. Opt.* **52**, 3066-3072 (2013).
2. V. Agrež, F. Bammer, B. Podobnik, and R. Petkovšek, "Influence of the retardation of the multiplexing element in a dual channel Q-switched laser," *Applied Physics B* **112**, 73-81 (2013).
3. R. Petkovšek and V. Agrež, "Single stage Yb-doped fiber laser based on gain switching with short pulse duration," *Opt. Express* **22**, 1366-1371 (2014).
4. J. Petelin, V. Agrež, B. Podobnik, and R. Petkovšek, "Short pulsed

- gain-switched fiber laser with improved efficiency utilizing unabsorbed pump recovery," *Opt. Express* **22**, 20588-20594 (2014).
5. V. Agrež and R. Petkovšek, "Gain switch laser based on micro-structured Yb-doped active fiber," *Opt. Express* **22**, 5558-5563 (2014).
 6. R. Petkovšek, V. Agrež, D. Sangla, J. Saby, R. B. Picard, and F. Salin, "Gain-switched ytterbium-doped rod-type fiber laser," *Laser Phys. Lett.* **11**, 105808 (2014).
 7. V. Agrež, R. Petkovšek, D. Sangla, J. Saby, R. B. Picard, and F. Salin, "Effect of repetition rate on gain-switched fiber laser output pulses," *Laser Phys.* **24**, 105108 (2014).

4. Ocena stopnje realizacije programa dela na raziskovalnem projektu in zastavljenih raziskovalnih ciljev³

Predložen program je bil 100% realiziran in doseženi so bili vsi cilji projekta: Izvedene so bile raziskave in razvoj vlakenskega laserja z enostavno in robustno zasnovo s preklopom ojačenja. Preskušeno je bilo več testnih postavitvev med drugim tudi popolnoma integrirana verzija pri čemer so bili doseženi sledeči parameter izhodnega laserskega bliska: trajanje bliska do 28 ns, vršna moč do 4,4 kW, povprečna moč preko 40 W ter polarizacijski kontrast približno 21 dB. Testirane so bile frekvenca ponavljanja od 10 kHz – 330 kHz in demonstrirano je bilo frekvenčno podvajanje.

5. Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine⁴

V letu 2014 je prišlo do manjših sprememb v okviru projektne skupine. Tako so v podjetju Optotek zaradi reorganizacije iz projektne skupine umaknili raziskovalec Andreja Vrečka (šifra 24276). Njegove zadolžitve v zvezi s projektom pa je prevzel Matjaž Zalar (18955), ki je že bil član projektne skupine. Pri prijavitelju projekta UL FS pa so iz projektne skupine umaknili raziskovalca Klemna Povšiča (šifra 33892) in vanjo vključili raziskovalca prof. dr. Janeza Možino (šifra 1649), ki je sicer tudi že bil član prvotne projektne skupine.

6. Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine⁵

		Znanstveni dosežek	
1.	COBISS ID	13354779	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Eno stopenjski iterbijev vlakenski laser s preklopom ojačenja s kratko dolžino izhodnega bliska
		ANG	Single stage Yb-doped fiber laser based on gain switching with short pulse duration
	Opis	SLO	Enostavna rešitev generacije nanosekundnih bliskov so vlakenski laserji s preklopom ojačenja. V tem članku predstavljamo optimiziran enostopenjski iterbijev vlakenski laser s preklopom ojačenja. Preizkušene so bile tri dolžine aktivnega vlakna z namenom, da se pokaže vpliv dolžine na trajanje laserskega bliska. Doseženi so bili bliski s trajanjem 28 ns in vršno močjo 1,4 kW. V primeru dosežene vršne moči 2 kW so bliski trajali 41 ns. Izsevana laserska svetloba ima linearno polarizacijo in zelo dobro kvaliteto žarka z $M2 < 1,1$ pri čemer je spektralna širina 0,11 nm.
		ANG	A simple solution for producing nanosecond laser pulses can be obtained using gain-switched fiber lasers. In this paper, we present an optimized single stage gain-switched ytterbium-doped fiber laser. Three fiber lengths were tested to show the impact of length on the laser output pulse. A pulse

		as short as 28 ns at 1.4 kW peak power and a maximum peakpower of nearly 2 kW at 41 ns pulse duration was achieved. The laser possess a linear polarized output, very good beam quality of $M2 < 1.1$, and a spectral bandwidth of 0.11 nm.
	Objavljeno v	Optical Society of America; Optics express; 2014; Vol. 22, iss. 2; str. 1366-1371; Impact Factor: 3.525; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.087; A': 1; WoS: SY; Avtorji / Authors: Petkovšek Rok, Agrež Vid
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
2.	COBISS ID	13806107 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Iterbijev paličasti vlakenski laser s preklopom ojačenja
		<i>ANG</i> Gain-switched ytterbium-doped rod-type fiber laser
	Opis	<i>SLO</i> Članek predstavlja delovanje iterbijevega paličastega vlakenskega laserja s preklopom ojačenja. Analizirani so črpanje, izhodni bliski, spekter in stabilnost energije bliskov. Dva ključna parametra laserskih bliskov dosežena iz enostopenjskega sistema s preklopom ojačenja sta 43 ns trajanje bliska in 4,4 kW vršna moč. Slednja je po našem vedenju najvišja dosežena vrednost s enostopenjskim iterbijevim vlakenskim laserjem s preklopom ojačenja. Poleg tega je bila ugotovljena zelo dobra stabilnost energije med posameznimi bliski, kjer je standardna deviacija znašala manj kot 1%.
		<i>ANG</i> The operation of a gain-switched ytterbium-doped rod-type fiber laser is presented in this paper. The pumping, output pulses, spectrum, and energy stability are analyzed. The two key parameters of the laser pulse achieved from the single-stage gain-switched system are a 43 ns pulse duration and a peak power of 4.4 kW. This is to our knowledge the highest peak power obtained from single stage gain switched Yb-doped fiber laser. Further a very good pulse-to-pulse stability with standard deviation of less than 1% was achieved.
	Objavljeno v	Wiley-VCH; Laser physics letters; 2014; Vol. 11, nr. 10; f. 105808-1-105808-4; Impact Factor: 2.964; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.087; A': 1; Avtorji / Authors: Petkovšek Rok, Agrež Vid, Sangla Damien, Saby Julien, Picard Reynald Boula
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
3.	COBISS ID	13637659 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Vpliv repeticije na laserske bliske iz vlakenskega laserja s preklopom ojačenja.
		<i>ANG</i> Effect of repetition rate on gain-switched fiber laser output pulses
	Opis	<i>SLO</i> Preučen je vpliv repeticije na delovanje ter izhodne bliske iz vlakenskega laserja s preklopom ojačenja. Izpeljana je zveza med trajanjem črpalnega bliska in repeticijo. Zveza nudi vpogled v parametre laserja kot so absorbirana črpalna moč in notranje izgube. Pomerjena sprememba trajanja laserskega bliska pri različnih repeticijah je zanemarljiva. Narejena je primerjava teorije z eksperimentalnimi rezultati dobljenimi z iterbijevim paličastim vlakenskim laserjem.
		<i>ANG</i> We investigate the influence of repetition rate on the operation and output of a gain-switched fiber laser. We derive an equation relating pump pulse duration to repetition rate, which provides insight into the parameters of the operating laser such as absorbed pump power and internal losses. The change in laser pulse duration with varying repetition rate is measured and found to be negligible. Finally, the derived theory is compared to experimental results obtained using a ytterbium-doped rod type fiber laser.
		Interperiodica Publishing; Laser physics; 2014; Vol. 24, nr. 10; str. 1-5;

	Objavljeno v	Impact Factor: 1.025;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.087; WoS: SY, UB; Avtorji / Authors: Agrež Vid, Petkovšek Rok, Sangla D., Saby Julien, Picard R. B., Salin Francois	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
4.	COBISS ID	12826395	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Iterbijev vlakenski laser s preklopom ojačenja za mikroprocesiranje
		ANG	Gain-switched Yb-doped fiber laser for microprocessing
	Opis	SLO	Vlakenski laserji s preklopom ojačenja predstavljajo enostavne sisteme med bliskovnimi laserji v nanosekundnem področju. Prav tako so zelo robustni zaradi česar so primerni za industrijske aplikacije in nekatere vrste mikroprocesiranja. Pri načrtovanju takšnih laserjih moramo paziti na ključne parametre da lahko dosežemo zelene parametre laserskih bliskov (vršna moč in trajanje). S tega vidika je razvit numerični model za opis časovnih in krajevnih sprememb v vlaknu. Z modelskim opisom preklopa ojačenja je preučen vpliv črpalne moči v blisku in dolžine vlakenskega oscilatorja na trajanje laserskega bliska. Pri primerjavi rezultatov modela z meritvami opravljenimi na eksperimentalnem sistemu je bilo ugotovljeno dobro ujemanje.
		ANG	The gain-switched fiber laser presents the simplest construction among pulsed lasers in the nanosecond region and consequently is also very robust. These properties make it potentially appropriate for industrial applications, especially in some types of microprocessing. However, careful design of such lasers is important in order to reach the required pulse parameters (peak power and pulse duration). To design and optimize a gain-switched fiber laser for microprocessing, a numerical model using time and spatial dependencies was developed and reported in this paper. The effects of pump power and laser length on the pulse duration and peak power were investigated by modeling gain-switched operation. Further, the results of modeling were compared to data from an experimental setup based on a Yb3-doped gain-switched fiber laser, revealing good agreement.
	Objavljeno v	Optical Society of America; Applied optics; 2013; Vol. 52, no. 13; str. 3066-3072; Impact Factor: 1.649;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.087; WoS: SY; Avtorji / Authors: Agrež Vid, Petkovšek Rok	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
5.	COBISS ID	12825115	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Vpliv retardacije v multipleksiranem dvo-kanalnem laserju s preklopom dobrote.
		ANG	Influence of the retardation of the multiplexing element in a dual channel Q-switched laser
	Opis	SLO	Predstavljamo eksperimentalno in numerično analizo vpliva odstopanj retardacije multiplekserja na izhodno moč časovno multipleksiranega dvo-kanalnega laserja. Laser ima dva ločena ojačevalna kanala, ki sta časovno multipleksirana s kristalnim foto-elastičnimi modulatorjem. To omogoča podvojitev repeticije in izhodne moči laserja. Ker je multipleksiranje izvedeno s spreminjanjem polarizacije, mora biti fazna zakasnitev modulatorja znotraj določenih meja. Delovno okno, v katerem so izgube zaradi fazne zakasnitve najmanjše, je bilo določeno z meritvami in teoretično analizo. Ta je bila narejena za dve konfiguraciji laserske postavitve in sicer z ter brez $\lambda/4$ ploščice.
			We present an experimental and numerical analysis, how deviations of the multiplexer-retardation influence the output power of a time-multiplexed dual channel laser. The laser has two different channels, each one with its

	ANG	own gain medium. The channels are timemultiplexed by a single crystal photo-elastic modulator. It enables to double the repetition rate and output power of the laser. However, as multiplexing is based on polarization-switching, the retardation of the modulator should be kept within certain limits. By experimental measurement and theoretical analysis, we determine the operational window within which the retardation should be kept to avoid additional losses into the resonator. The analysis was done for two configurations of the laser setup, namely with and without a quarter-wave plate.
Objavljeno v		Springer; Applied physics. B, Lasers and optics; 2013; Vol. 112, issue 1; str. 73-81; Impact Factor: 1.634; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.087; WoS: SY, UB; Avtorji / Authors: Agrež Vid, Bammer Ferdinand, Podobnik Boštjan, Petkovšek Rok
Tipologija		1.01 Izvirni znanstveni članek

7. Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati projektne skupine⁶

	Družbeno-ekonomski dosežek	
1.	COBISS ID	13647387 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Izboljšanje izkoristka vlakenskega laserja s preklopom ojačenja in kratkimi bliski z uporabo neabsorbirane črpalne svetlobe. ANG Short pulsed gain-switched fiber laser with improved efficiency utilizing unabsorbed pump recovery
	Opis	SLO Predstavljena je enostavna rešitev za povečanje izkoristka nad pragom vlakenskega laserja s preklopom ojačenja. Z dodano vlakensko ojačevalno stopnjo v kateri se porabi neabsorbirana črpalna svetloba iz oscilatorja dobimo nezanemarljivo povečanje izkoristka. Laserski bliski svetlobe z valovno dolžino 1030 nm imajo širino na polovični višini 28 ns in vršno moč 2,3 kW. ANG A simple solution for increasing the slope efficiency of a gain-switched fiber laser based on Yb-doped active fiber is presented. By adding a fiber amplifier stage, which recovers the unabsorbed pump light from the gain-switched oscillator, a significant increase in slope efficiency is achieved. The pulses at 1030-nm wavelength have an FWHM of 28 ns and a peak power of 2.3 kW.
	Šifra	F.01 Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin
	Objavljeno v	Optical Society of America; Optics express; 2014; Vol. 22, iss. 17; str. 20588-20594; Impact Factor: 3.525; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.087; A': 1; WoS: SY; Avtorji / Authors: Petelin Jaka, Agrež Vid, Podobnik Boštjan, Petkovšek Rok
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
2.	COBISS ID	13369371 Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO Mikrostrukturirani vlakenski laser s preklopom ojačenja dopiran z iterbijem ANG Gain switch laser based on micro-structured Yb-doped active fiber
	Opis	SLO Članek predstavlja enostopenjski iterbijev vlakenski laser delujoč v bližnjem infrardečem področju z visoko vršno močjo. Izhodni laserski bliski imajo vršno moč 2,3 kW in trajajo 60 ns. Vpliv parametrov delovanja na trajanje laserskega bliska je opisan s pomočjo meritve in teoretičnega izračuna. Uporaba fleksibilnega mikrostrukturiranega vlakna za vodenje ene polarizacije omogoča visok polarizacijski kontrast. Zaradi ozkega spektra laser primeren za frekvenčno podvojevanje.

	ANG	In this paper a near infrared gain-switched fiber laser based on oscillator stage only design with high peak power is presented. Output pulses reached 2.3 kW of peak power and duration of less than 60 ns. The dependence of the laser pulse duration on operation parameters was measured and theoretically explained. As the setup is based on flexible micro structured single polarization fiber, the laser output exhibits high polarization extinction ratio. Due to the narrow output spectrum the setup is suitable for second harmonic generation.
Šifra	F.01	Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin
Objavljeno v	Optical Society of America; Optics express; 2014; Vol. 22, no. 5; str. 5558-5563; Impact Factor: 3.525; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.087; A': 1; WoS: SY; Avtorji / Authors: Agrež Vid, Petkovšek Rok	
Tipologija	1.01	Izvirni znanstveni članek

8. Drugi pomembni rezultati projektne skupine²

9. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine⁸

9.1. Pomen za razvoj znanosti⁹

SLO

V okviru projekta je bil razvit in nadgrajen nov numerični model temelječ na zasedbenih enačbah. S pomočjo modela je možno napovedati vpliv vršne moči in trajanje črpalnega bliska na laserske izhodne bliske, s čimer je bilo možno uspešno optimizirati eksperimentalne postavitev. Model in njegovi rezultati so bili objavljeni v članku [1], kjer se za opis tako časovnih kot krajevnih odvisnosti integrira samo po času. Velika prilagodljivost numeričnega modela se je izkazala tudi pri opisu tako bliskovnega delovanja doseženega s preklopom ojačenja kot s preklopom dobrote. Opis je bil preverjen na časovno multipleksiranem dvo-kanalnem laserju s preklopnikom dobrote [2].

Pomen numeričnega modela za razvoj znanosti se kaže tudi v dejstvu, da je omogočil poglobljeno razumevanje dinamičnih procesov v vlakenskih laserjih, kar je pripeljalo do sledečih pomembnih rezultatov, prav tako pomembnih za razvoj znanosti. Uspeli smo dokazati, da je možno tudi s pomočjo vlakenskih laserjev dopiranih z aktivnimi ioni Yb doseči bliske s trajanjem v območju pod 50 ns, kar je zanimivo za industrijske in medicinske aplikacije. Dosežene so bile rekordne vrednosti v smislu trajanja izhodnih bliskov z dolžino 28 ns pri vršni moči 1,4 kW [3] oziroma ob nadaljnji nadgradnji z absorpcijo odvečne črpalne svetlobe celo 2,3 kW [4]. Opravljena je bila tudi poglobljena teoretična in eksperimentalna analiza glede vpliva valovne dolžine izhodnega bliska [5]. Pomemben rezultat za razvoj znanosti prav gotovo predstavlja tudi uspešna demonstracija laserskega sistema s preklopom ojačenja na osnovi iterbijevega mikro-strukturiranega paličastega aktivnega vlakna, ki omogoča močno delokalizacijo višjih rodov v jedru. Največja vršna moč laserskih bliskov je v tem primeru znašala 4,4 kW in predstavlja rekordno vrednost za enostopenjske iterbijeve laserje s preklopom ojačenja [6] [7].

Reference:

1. V. Agrež and R. Petkovšek, "Gain-switched Yb-doped fiber laser for microprocessing," Appl. Opt. 52, 3066-3072 (2013).
2. V. Agrež, F. Bammer, B. Podobnik, and R. Petkovšek, "Influence of the retardation of the multiplexing element in a dual channel Q-switched laser," Applied Physics B 112, 73-81 (2013).
3. R. Petkovšek and V. Agrež, "Single stage Yb-doped fiber laser based on gain switching with short pulse duration," Opt. Express 22, 1366-1371 (2014).
4. J. Petelin, V. Agrež, B. Podobnik, and R. Petkovšek, "Short pulsed gain-switched fiber laser with improved efficiency utilizing unabsorbed pump recovery," Opt. Express 22, 20588-20594

(2014).

5. V. Agrež and R. Petkovšek, "Gain switch laser based on micro-structured Yb-doped active fiber," *Opt. Express* 22, 5558-5563 (2014).

6. R. Petkovšek, V. Agrež, D. Sangla, J. Saby, R. B. Picard, and F. Salin, "Gain-switched ytterbium-doped rod-type fiber laser," *Laser Phys. Lett.* 11, 105808 (2014).

7. V. Agrež, R. Petkovšek, D. Sangla, J. Saby, R. B. Picard, and F. Salin, "Effect of repetition rate on gain-switched fiber laser output pulses," *Laser Phys.* 24, 105108 (2014).

ANG

In the framework of the project a numerical model based on rate equations was designed and developed. With the help of the model it is possible to predict the impact of peak power and duration of the pumping pulse on the laser output so it was possible to successfully optimize the experimental layout. The model and its results were published in the paper [1], where the description of such time and local dependencies is done by time integration only. Great flexibility of the numerical model which was demonstrated also in the description of pulsed operation achieved by gain switching as well as Q switching has been tested in the case of time multiplexed two-channel Q switched laser [2].

The significance of the numerical model for the development of science is also reflected in the fact that it enabled a deeper understanding of dynamic processes in fiber lasers, which have led to the following significant results, which are also important for the development of science. We were able to demonstrate that it is possible with fiber lasers doped with active ions Yb to achieve pulses in the range of less than 50 ns duration, which is interesting for industrial and medical applications. Record values have been achieved in terms of the short duration of the output pulses, namely 28 ns with peak power of 1.4kW [3] while with further upgrading by absorption of the excess pumping light even 2.3 kW [4]. In-depth theoretical and experimental analysis was also carried out regarding the influence of the wavelength of the output pulse [5]. An important result for the development of science is certainly a successful demonstration of a Q switched laser system based on ytterbium micro-structured rod-like active fibers, which enables a strong delocalisation of higher modes in the core. Maximum peak power of laser pulses in this case was 4.4 kW and represents a record value for a single-stage ytterbium Q switched [6] [7].

References:

1. V. Agrež and R. Petkovšek, "Gain-switched Yb-doped fiber laser for microprocessing," *Appl. Opt.* 52, 3066-3072 (2013).

2. V. Agrež, F. Bammer, B. Podobnik, and R. Petkovšek, "Influence of the retardation of the multiplexing element in a dual channel Q-switched laser," *Applied Physics B* 112, 73-81 (2013).

3. R. Petkovšek and V. Agrež, "Single stage Yb-doped fiber laser based on gain switching with short pulse duration," *Opt. Express* 22, 1366-1371 (2014).

4. J. Petelin, V. Agrež, B. Podobnik, and R. Petkovšek, "Short pulsed gain-switched fiber laser with improved efficiency utilizing unabsorbed pump recovery," *Opt. Express* 22, 20588-20594 (2014).

5. V. Agrež and R. Petkovšek, "Gain switch laser based on micro-structured Yb-doped active fiber," *Opt. Express* 22, 5558-5563 (2014).

6. R. Petkovšek, V. Agrež, D. Sangla, J. Saby, R. B. Picard, and F. Salin, "Gain-switched ytterbium-doped rod-type fiber laser," *Laser Phys. Lett.* 11, 105808 (2014).

7. V. Agrež, R. Petkovšek, D. Sangla, J. Saby, R. B. Picard, and F. Salin, "Effect of repetition rate on gain-switched fiber laser output pulses," *Laser Phys.* 24, 105108 (2014).

9.2. Pomen za razvoj Slovenije¹⁰

SLO

V sklopu projekta so bila osvojena številna nova znanja in tehnologije s področja vlakenskih laserjev, ki so pomembna za razvoj Slovenije in še posebej za slovenske proizvajalce laserskih sistemov za medicino in industrijo (Fotona, Optotek in LPKF). Ključna znanja, ki so pomembna za nadaljnji razvoj, so povezana s poglobljenim poznavanjem dinamičnih procesov v vlakenskih

laserjih. Prav tako so pomembni novi inovativni pristopi v primeru laserskih črpalnih sistemov, ki so lahko uporabni tudi širše, ne zgolj za vlakenske, ampak tudi za ostale npr. trdninske laserje. V nadaljevanju so pomembne tudi izkušnje, ki so si jih nabrali raziskovalci pri izdelavi popolnoma integriranih vlakenskih laserjev (ti. all fiber laser). Osvojitev tehnologije vlakenskih laserskih sistemov za uporabo v industriji in medicini je tako ključnega pomena za nadaljnji razvoj slovenskih visokotehnoloških podjetij, ki delujejo na področju laserskih sistemov. Vlakenski laserji namreč na mnogih področjih že nadomeščajo obstoječe laserske sisteme (predvsem trdninske laserje), zato je za slovenska podjetja pomembno, da obvladujejo to novo tehnologijo in si s tem potencialno izboljšajo položaj na trgu. Prav tako rezultati projekta predstavljajo dobro osnovo za dolgoročno bolj poglobljeno sodelovanje tako med samimi podjetji, kot tudi z raziskovalci s Fakultete za strojništvo, Univerze v Ljubljani. V prihodnosti so močno izboljšujejo kompetence raziskovalne skupine in s tem možnosti za pridobivanje nadaljnjih raziskovalnih projektov, predvsem iz industrije in sredstev iz evropskega programa »Obzorje 2020«.

ANG

In the course of the project a great amount of new knowledge and technologies in the field of fiber lasers was won, which are important for the development of Slovenia and especially for the Slovenian manufacturers of laser systems for medicine and industry (Fotona, Optotek and LPKF). The key skills that are important for further development are associated with in-depth knowledge of the dynamic processes in fiber lasers. Equally important are the new innovative approaches regarding laser pumping systems, which may be of wider use not only for fiber lasers in but also for other types, for example solid-state lasers. Also important is the experience the researchers have accumulated in the design of fully integrated fiber lasers (ie. all fiber laser).

Mastering the technology of fiber laser systems for use in industry and medicine is crucial for the further development of Slovenian high-tech companies operating in the field of laser systems. Fiber lasers are in many areas already replacing existing laser laser systems (especially solid-state lasers), so it is important for Slovenian companies to master this new technology and thus potentially improve their position in the market. The results of the project provide a good basis for more in-depth long-term cooperation both between the companies, as well as with the researchers from the Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana. In the future the competence of the research group is greatly improved and thus the chances of winning further research projects in industry and funding from the European program "Horizon 2020".

10. 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	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
F.03	Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>

F.04	Dvig tehnološke ravni	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
F.05	Spodobnost za začetek novega tehnološkega razvoja	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
F.06	Razvoj novega izdelka	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.07	Izboljšanje obstoječega izdelka	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.08	Razvoj in izdelava prototipa	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
F.09	Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	Dosežen <input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	V celoti <input type="text"/>
F.10	Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.11	Razvoj nove storitve	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.12	Izboljšanje obstoječe storitve	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.13	Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE

	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.14	Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.15	Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.16	Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.17	Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso	
	Zastavljen cilj	<input checked="" type="radio"/> DA <input type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text" value="Dosežen bo v naslednjih 3 letih"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text" value="Uporabljen bo v naslednjih 3 letih"/>
F.18	Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.19	Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.20	Ustanovitev novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.21	Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.22	Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>

	Uporaba rezultatov	<input type="text" value=""/>
F.23	Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text" value=""/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text" value=""/>
F.24	Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text" value=""/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text" value=""/>
F.25	Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text" value=""/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text" value=""/>
F.26	Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text" value=""/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text" value=""/>
F.27	Prispevek k ohranjanju/varovanju naravne in kulturne dediščine	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text" value=""/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text" value=""/>
F.28	Priprava/organizacija razstave	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text" value=""/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text" value=""/>
F.29	Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text" value=""/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text" value=""/>
F.30	Strokovna ocena stanja	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text" value=""/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text" value=""/>
F.31	Razvoj standardov	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text" value=""/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text" value=""/>

F.32	Mednarodni patent	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.33	Patent v Sloveniji	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.34	Svetovalna dejavnost	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>
F.35	Drugo	
	Zastavljen cilj	<input type="radio"/> DA <input checked="" type="radio"/> NE
	Rezultat	<input type="text"/>
	Uporaba rezultatov	<input type="text"/>

Komentar

--

11.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	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.01.03.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02	Gospodarski razvoj					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.02.07.	Večji delež izvoza	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.08.	Povečanje dobička	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.09.	Nova delovna mesta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

G.02.11.	Nov investicijski zagon	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.02.12.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03	Tehnološki razvoj					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
G.03.04.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04	Družbeni razvoj					
G.04.01.	Dvig kvalitete življenja	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.04.06.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
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	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.03.	Energetska infrastruktura	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.07.04.	Drugo:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
G.08.	Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva					
G.09.	Drugo:					

Komentar

--

12.Pomen raziskovanja za sofinancerje¹¹

	Sofinancer		
1.	Naziv	Fotona proizvodnja optoelektronskih naprav d.d.	
	Naslov	Stegne 7, 1000 Ljubljana	
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:	39.395	EUR
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:	10	%
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja	Šifra	
	1.	Eno stopenjski iterbiljev vlakenski laser s preklopom ojačenja s kratko dolžino izhodnega bliska	F.01

	2.	Vpliv repeticije na laserske bliske iz vlakenskega laserja s preklopom ojačenja.	F.01
	3.	Razvoj novih tipov črpalnih sistemov za vlakenske in trdninske laserje	F.01
	4.		
	5.		
Komentar	Rezultat pod zaporedno številko 1 in 2 je predstavljen v dveh ločenih znanstvenih člankih		
Ocena	V podjetju Fotona se strinjamo, da so bile raziskave v okviru projekta »Frekvenčno podvojeni bliskovni vlakenski laser za industrijo in medicino« izvedene v skladu s predlogom projekta. Kot ključne dosežke smatramo uspešno demonstracijo vlakenskega laserja s preklopom ojačenja primerne za frekvenčno podvajanje s izhodnimi bliski v območju 30 ns. Prav tako menimo, da je bil dosežen pomembne napredek pri razvoju črpalnih sistemov. Nadaljnje je za nas pomembna izdelava oziroma nadgradnja teoretičnega modela, ki omogoča natančen opis dinamike vlakenskih in tudi trdninskih laserjev. Menimo, da bodo izsledki raziskav pomembno vplivali na možnost nadaljnjega razvoja podjetja na področju novih laserskih sistemov.		
2.	Naziv	OPTOTEK razvoj in proizvodnja optične in laserske opreme d.o.o.	
	Naslov	Tehnološki park 21, 1000 Ljubljana	
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:	39.395	EUR
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:	10	%
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja		Šifra
	1.	Izboljšanje izkoristka vlakenskega laserja s preklopom ojačenja in kratkimi bliski z uporabo neabsorbirane črpalne svetlobe.	F.01
	2.	Eno stopenjski iterbijev vlakenski laser s preklopom ojačenja s kratko dolžino izhodnega bliska	F.01
	3.	Razvoj novih tipov črpalnih sistemov za vlakenske in trdninske laserje	F.01
	4.		
	5.		
Komentar	Rezultat pod zaporedno številko 1 in 2 je predstavljen v dveh ločenih znanstvenih člankih		
Ocena	V podjetju OPTOTEK menimo, da so bile raziskave v okviru projekta »Frekvenčno podvojeni bliskovni vlakenski laser za industrijo in medicino« izvedene v skladu s predlogom projekta. Kot ključne dosežke smatramo uspešno demonstracijo vlakenskega laserja s preklopom ojačenja primerne za frekvenčno podvajanje. Prav tako menimo, da je bil dosežen pomembne napredek pri razvoju črpalnih sistemov še posebej elektronskih krmilnikov, ki omogočajo hiter preklop velikih tokov in se lahko uporabijo za različne tipe črpalnih laserskih diod. Ocenjujemo, da bodo rezultati projekta neposredno in tudi posredno vplivali na nadaljno krepitev možnosti za nadaljni razvoj v podjetju.		
3.	Naziv	LPKF LASER & ELECTRONICS d.o.o.	
	Naslov	Polica 33, SI-4202 Naklo	
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:	39.431	EUR

Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:		10	%
Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja			Šifra
	1.	Izboljšanje izkoristka vlakenskega laserja s preklopom ojačenja in kratkimi bliski z uporabo neabsorbirane črpalne svetlobe.	F.01
	2.	Vpliv frekvence ponavljanja na laserske bliske iz vlakenskega laserja s preklopom ojačenja.	F.01
	3.	Razvoj novih tipov črpalnih sistemov za vlakenske in trdninske laserje	F.01
	4.		
	5.		
Komentar	Rezultat pod zaporedno številko 1 in 2 je predstavljen v dveh ločenih znanstvenih člankih.		
Ocena	Ocenjujemo, da so bile raziskave v sklopu projekta »Frekvenčno podvojeni bliskovni vlakenski laser za industrijo in medicino« končane v skladu z dogovorom in našim pričakovanji. Za pomembnejše ocenjujemo rezultate, ki izhajajo iz raziskav izboljšanje izkoristka vlakenskega laserja s preklopom ojačenja in kratkimi bliski z uporabo neabsorbirane črpalne svetlobe. Pav tako so za nas pomembni rezultati v okviru raziskave na področju novih tipov črpalnih sistemov za vlakenske in trdninske laserje. Prepričani smo, da bodo rezultati raziskav pomembno vplivali na nadaljnjo krepitev podjetja na področju razvoja in proizvodnje novih laserskih virov.		

13. Izjemni dosežek v letu 2014¹²

13.1. Izjemni znanstveni dosežek

V okviru projekta je bil narejen pomemben korak v razvoju iterbijeveh vlakenskih laserjev s preklopom ojačenja. Delo je bilo predstavljeno v več znanstvenih člankih predstavlja novo rešitev za povečanje izkoristka nad pragom vlakenskega laserja s preklopom ojačenja. Dosežek združuje v okviru projekta pridobljeno znanje o specifičen delovanju laserjev s preklopom ojačenja in na inovativen način odpravi problem nižje absorpcije v primeru kratkih bliskov. Z dodano vlakensko ojačevalno stopnjo v kateri se uporabi neabsorbirana črpalna svetloba iz oscilatorja dobimo pomembno povečanje izkoristka. Doseženi so bili laserski bliski svetlobe z valovno dolžino 1030 nm s trajanjem 28 ns in vršno moč 2,3 kW. Trajanje bliskov je za časa objave predstavljala najkrajše bliske dosežene s takšnim tipom laserjem. Laser je temeljil na mikrostrukturiranem vlaknu, ki ohranja polarizacijo. Rezultati so primer učinkovitega sodelovanja med akademsko sfero in industrijskimi partnerji.

13.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek

--

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

11.3.2015

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2015/160

¹ Napišite povzetek raziskovalnega projekta (največ 3.000 znakov v slovenskem in angleškem jeziku) [Nazaj](#)

² 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](#)

³ Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikost pisave 11) [Nazaj](#)

⁴ 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](#)

⁵ 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](#)

⁶ 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](#)

⁷ Navedite rezultate raziskovalnega projekta iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 6 in 7 (npr. ni voden v sistemu COBISS). Največ 2.000 znakov, vključno s presledki. [Nazaj](#)

⁸ 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](#)

⁹ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

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

¹¹ 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](#)

¹² Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega projekta v letu 2014 (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/2015 v1.00a

16-28-4F-AF-AA-4E-E1-1F-09-0B-93-90-58-5E-32-0C-71-39-66-2E

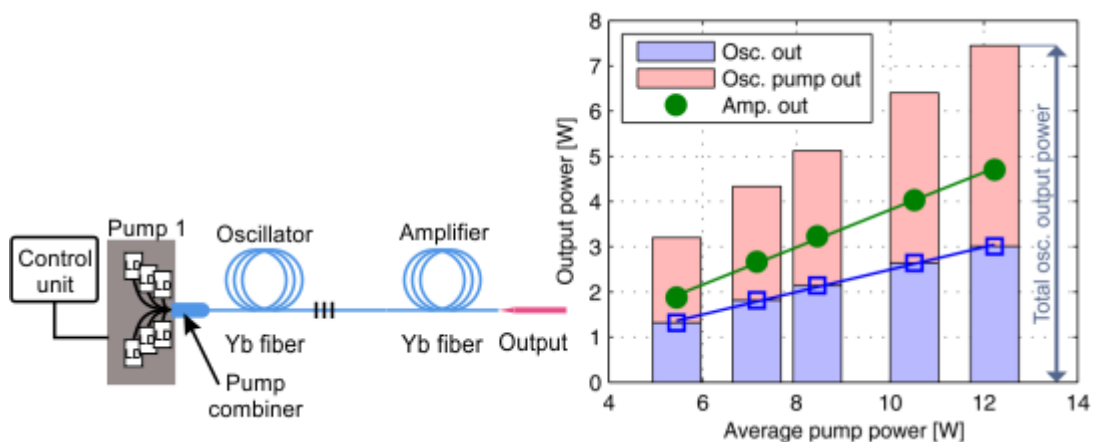
Priloga 1

TEHNIKA

Področje: 2.21 - Tehnološko usmerjena fizika

Dosežek 1: Izboljšanje izkoristka vlakenskega laserja s preklopom ojačenja in kratkimi bliski z uporabo neabsorbirane črpalne svetlobe.

Vir: J. Petelin, V. Agrež, B. Podobnik, and R. Petkovšek, "Short pulsed gain-switched fiber laser with improved efficiency utilizing unabsorbed pump recovery," Opt. Express 22, 20588-20594 (2014).



Shema vlakenskega sistema s preklopom ojačenja in dodano stopnjo

Izhodna moč iz oscilatorja in dodanega ojačevalca

V okviru projekta je bil narejen pomemben korak v razvoju iterbijevih vlakenskih laserjev s preklopom ojačenja. Delo je bilo predstavljeno v več znanstvenih člankih predstavlja novo rešitev za povečanje izkoristka nad pragom vlakenskega laserja s preklopom ojačenja. Dosežek združuje v okviru projekta pridobljeno znanje o specifičnem delovanju laserjev s preklopom ojačenja in na inovativen način odpravi problem nižje absorpcije v primeru kratkih bliskov. Z dodano vlakensko ojačevalno stopnjo v kateri se uporabi neabsorbirana črpalna svetloba iz oscilatorja dobimo pomembno povečanje izkoristka. Doseženi so bili laserski bliski svetlobe z valovno dolžino 1030 nm s trajanjem 28 ns in vršno moč 2,3 kW. Trajanje bliskov je za časa objave predstavljala najkrajše bliske dosežene s takšnim tipom laserjem. Laser je temeljil na mikro-strukturiranem vlaknu, ki ohranja polarizacijo. Rezultati so primer učinkovitega sodelovanja med akademsko sfero in industrijskimi partnerji.

Z dosežkom je bilo pokazalo, da je mogoče doseči kratke ns bliske s preklopom ojačenja, v iterbijevih vlaknih s preklopom ojačenja. Narejen je bil pomemben korak v razvoju učinkovitega in enostavnega laserja primerne za industrijo in medicino.

Diapozitiv 1

PR1 Petkovšek, Rok; 09.3.2015