

Vývoj pulzních vysokovýkonných laserů v centru HiLASE

Ondřej Novák, Martin Smrž, Michal Chyla, Siva S. Nagisetty, Hana Turčičová, Jiří Mužík, Patricie Severová, Pawel Sikocinski, Jakub Měsíček, Jaroslav Huynh, Tomáš Hambálek, Jens Linnemann, Alina Pranovich, Taisuke Miura, Akira Endo, Martin Divoký, Ondřej Slezák, Magdalena Sawicka-Chyla, Venkatesan Jambunathan, Petr Navrátil, Lucie Horáčková, David Vojna, Jan Pilař, Stefano Bonora, Antonio Lucianetti, Tomáš Mocek

Centrum HiLASE, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Za Radnicí 828, 252 41 Dolní Břežany; ondrej.novak@hilase.cz

V polovině roku 2014 začalo fungovat laserové centrum HiLASE v nové budově v Dolních Břežanech nedaleko Prahy (obr. 1). V centru jsou vyvíjeny vysokovýkonné lasery, které budou použity pro pokročilé aplikace. Čtyřletý výzkum již přinesl řadu původních výsledků a první lasery jsou již v provozu [1, 2]. V článku uvádíme přehled používaných laserových technologií, vyvíjených laserových systémů a nových diagnostických metod.

Aplikace pulzních výkonných laserů

Výkonné lasery jsou dnes běžně používány v průmyslu, např. na řezání a svařování materiálů. Pro tyto aplikace se téměř výhradně používají lasery s kontinuálním výstupním zářením. Pro přesné opracování materiálů jsou však mnohem výhodnější lasery s velmi krátkými pulzy délek v rozsahu pikosekund (10^{-12} s) nebo dokonce femtosekund (10^{-15} s). K opracování tak dochází bez tavení materiálu, které způsobuje méně přesné opracování. Velmi krátké pulzy také umožňují opracování materiálů, které jsou jinak laserovým zářením opracovatelné jen obtížně. Příkladem mohou být kompozity z uhlíkových vláken, u nichž lze očekávat široké využití, např. v leteckém průmyslu. Lasery vyvíjené v centru HiLASE budou využívány především v nových oblastech cíleného výzkumu a vývoje. Vytvrzování materiálu rázovou vlnou, která vznikne v materiálu po dopadu laserového pulzu na jeho povrchovou vrstvu, jež je prudce odpařena, zvýší odolnost namáhaných materiálů, jako jsou např. součásti turbín. Pikosekundové pulzy umožňují efektivně generovat extrémní ultrafialové záření (vlnové délky přibližně 10–100 nm). Toto záření nalezne využití v nové generaci (tzv. EUV) litografie pro výrobu polovodičových součástek s vyšší integrací nebo v mikroskopii s větším rozlišením, než umožňuje optická mikroskopie. V neposlední řadě bude umožněn další vývoj laserových technologií. Energetické pulzy umožní studovat práh

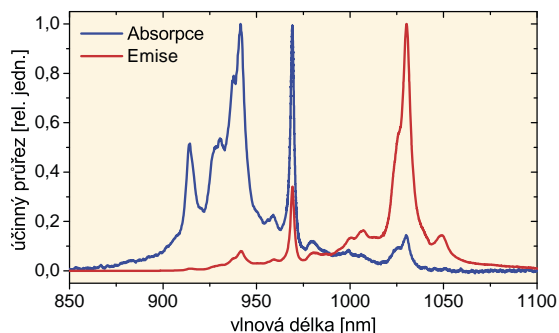


Obr. 1 Nová budova laserového centra HiLASE.

poškození optických prvků. Zvýšení prahu poškození je nutné pro další vývoj spolehlivých vysokovýkonných pulzních i kontinuálních laserů. Vyvíjené lasery mohou též sloužit k čerpání femtosekundových laserů, jejichž pulzy dosahují obrovských špičkových výkonů v řádech terawattů (10^{12} W) až petawattů (10^{15} W). Využití těchto laserů pro aplikace bude vyžadovat zvýšení průměrného výkonu a tedy i opakovací frekvence pulzů. Proto je vývoj vysokovýkonných pulzních laserů vysoce žádoucí.

Diodově čerpané pevnolátkové lasery

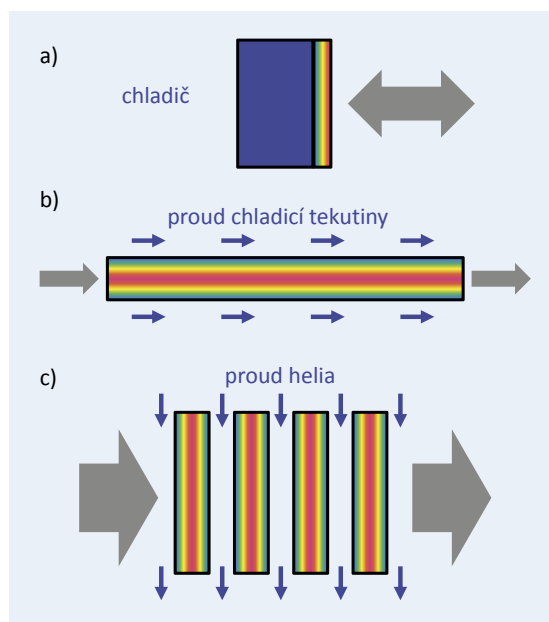
Lasery jsou založeny na stimulované emisi záření v aktivním prostředí, kdy dopadající záření vynutí přechod z vyšší na nižší energetickou hladinu aktiv-



Obr. 2 Absorpční a emisní spektrum materiálu Yb:YAG při pokojové teplotě.

ního prostředí. Dopadající záření musí mít energii fotonů odpovídající energetickému rozdílu hladin. Aktivní prostředí se musí čerpat, tj. dodávat mu energii, aby došlo k přebytku elektronů na vyšší energetické hladině účastníci se laserového přechodu. K realizaci generování laserového záření jsou ještě nutné další energetické hladiny. Přechody mezi těmito hladinami jsou nezářivé a uvolněná energie se přeměňuje na teplo.

Hojně používaným aktivním prostředím jsou pevné látky. Jde o krystaly nebo skla s příměsí různých prvků, nejčastěji kovů vzácných zemin. Čerpání je optické. Pro dosažení vysokých průměrných výkonů laserového záření je nutné jednak snížit množství generovaného tepla a pak generované teplo účinně odvést. Proto se používají materiály s malým rozdílem mezi energií čerpání a energií laserového přechodu. V laserovém centru HiLASE se používá aktivní materiál z Yb:YAG (ytterbium dopovaný krystal yttrito-hlinitého granátu). Čerpání je možné zářením o vlnové délce 940 nm nebo 969 nm. Generování a zesilování laserového záření probíhá na vlnové délce 1030 nm (obr. 2). Poznamenejme, že uvedené vlnové délky jsou v infračervené oblasti spektra.



Obr. 3 Různé geometrie laserového aktivního prostředí zajišťující efektivní odvod tepla a dosažení vysokých průměrných výkonů: a) tenký disk, b) optické vlákno, c) desky. Teplotní rozložení v laserovém aktivním prostředí je zobrazeno duhovými barvami, chlazení modrými a zesilovaný laserový svazek šedými šipkami.

Pro čerpání na uvedených vlnových délkách se používají polovodičové diodové lasery. Kvalita svazku diodových laserů je horší a neumožňuje generování krátkých pulzů. Jsou však vhodné pro čerpání laserů, které pak generují krátké pulzy a mají kvalitní svazek. Diodové lasery generují úzkospektrální záření, které se může dobře překrývat s absorpční čarou aktivního prostředí. Dříve se pro optické čerpání používaly výbojky, ty ovšem generovaly širokospektrální záření, kde se jen malá část překrývala s absorpční čarou aktivního prostředí. Tím se zhoršovala účinnost konverze a též se v aktivním prostředí generovalo více nežádoucího tepla. Výhodou výbojkového čerpání byla jeho nižší cena. Ovšem bez použití diodových laserů by nebylo možné dosáhnout vysokých průměrných výstupních výkonů laserového svazku.

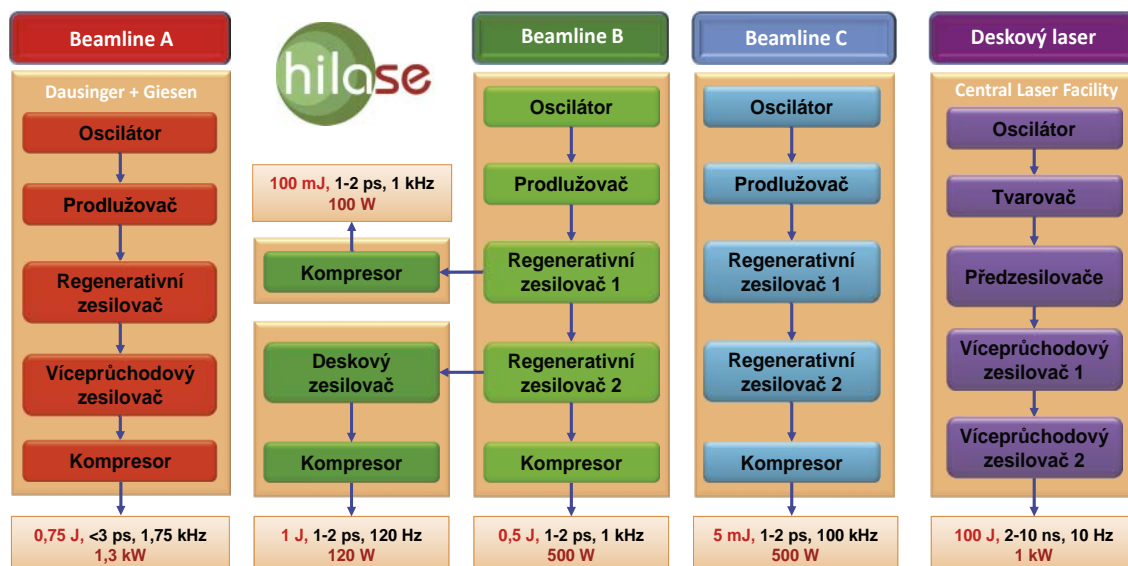
Teplo generované při laserové akci může vést k nežádoucímu pnutí materiálu, které způsobuje zhoršení kvality laserového svazku nebo dokonce poškození materiálu. Účinný odvod tepla se zajišťuje vhodným tvarem aktivního prostředí, kdy je velký poměr mezi příčným rozměrem a délkou aktivního prostředí. Odvod tepla je přes plochu související s větším z rozměrů aktivního prostředí. Několik možných geometrií s efektivním odvodem tepla je v příčném řezu zobrazeno na obr. 3. Délka tenkých disků je několik stovek mikrometrů a jejich průměr řádově centimetr. Tenké disky se používají jako aktivní zrcadla, kde přední plocha má antireflexní vrstvu a zadní plocha je vysoce odrazná. Zadní plochou, přes kterou je odváděno teplo, je disk spojen s chladičem [3]. U vláken je naopak průměr aktivního prostředí desítky až stovky mikrometrů a délka je od desítek centimetrů až po několik metrů [4]. Odvod tepla je přes vnější povrch. Poslední zde zobrazenou možností je rozdělení aktivního prostředí na několik desek o tloušťce několika málo milimetrů. Odvod tepla je přes čela desek a zajišťuje ho proud ochlazeného plynného helia [5].

Přehled laserových systémů centra HiLASE

V laserovém centru HiLASE bude k dispozici několik výkonných pulzních laserových svazků s různými parametry [1, 2]. Přehled těchto laserových systémů je na obr. 4. Systémy (Beamline A, Beamline B, Beamline C) budou generovat pikosekundové pulzy. Systém A je vyvíjen společností Dausinger + Giesen (Německo). Systémy B a C vyvíjejí vlastními silami pracovníci centra HiLASE. Deskový laser generující nanosekundové vysokoenergetické pulzy je vyvíjen v laboratoři Central Laser Facility (Spojené království) ve spolupráci s vědci z HiLASE. Detaily jednotlivých systémů jsou popsány v následujících kapitolách.

Tenkodiskové lasery

Požadovaný výstupní průměrný výkon je na úrovni kilowattu u všech tří tenkodiskových laserových systémů HiLASE. Jednotlivé systémy se liší především výstupní energií pulzu a opakovací frekvencí. Základní schéma těchto laserových systémů je stejné. Laserové pulzy o délce okolo jedné pikosekundy generované laserovým oscilátorem jsou prodlouženy 100krát až 1000krát. Pro změnu délky pulzu se používají optické prvky s velkou disperzí, tj. velkou odlišností rychlosti šíření jednotlivých spektrálních složek pulzu. Slabé pulzy jsou pak postupně zesíleny ve dvou výkonových



Obr. 4 Přehled laserových systémů, které budou k dispozici v laserovém centru HiLASE pro aplikační experimenty [1].

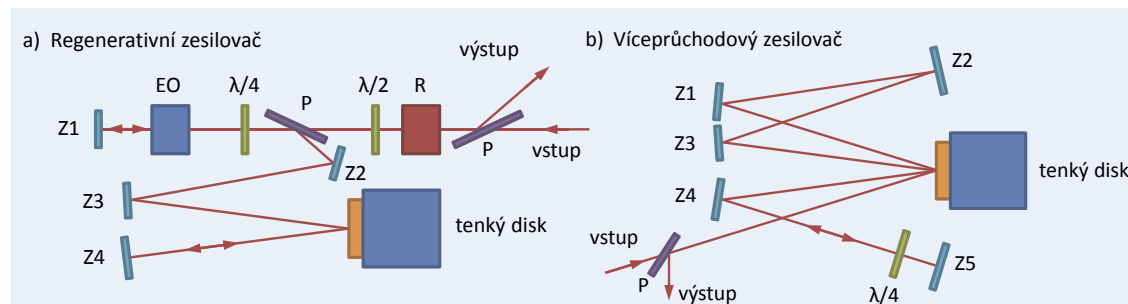
zesilovačích s tenkodiskovým aktivním prostředím. Zesilování prodloužených pulzů umožňuje vyvarovat se nežádoucím jevům zhoršujícím kvalitu svazku nebo dokonce poškození optických prvků vlivem vysoké intenzity záření. Na konci řetězce je kompresor pulzů, který zkracuje délku pulzů na původní hodnotu.

Využívají se dvě různá uspořádání zesilovačů, regenerativní a víceprůchodový zesilovač (obr. 5). V regenerativním zesilovači je svazek uzavřen v optickém rezonátoru, který je tvořen vysoce kvalitními zrcadly a ve kterém je zároveň umístěno aktivní laserové prostředí. Zakřivení a uspořádání zrcadel umožňuje při každém oběhu rezonátorem svazek reprodukovat sám na sebe, což vede k zachování vysoké kvality svazku. Zároveň to umožňuje poměrně snadno dosáhnout velkého počtu oběhů, které jsou nutné pro dosažení vysokého zesílení. Počet oběhů je řízen elektrooptickým prvkem se speciálním krystalem opatřeným elektrodami. Přivedením vysokonapětového pulzu na elektrooptický spínač se mění polarizace optického pulzu procházejícího krystalem, čímž se optický pulz uzavře v rezonátoru. Délka vysokonapětového pulzu určuje počet oběhů optického pulzu v rezonátoru. Při vypnutí vysokého napětí pak optický pulz rezonátor opustí. Rezonátor může mít lineární uspořádání, kdy se svazek odráží tam a zpět mezi dvěma koncovými zrcadly (obr. 5a). K oddělení vstupního a výstupního laserového svazku se použije optický rotátor, který změni polarizaci zpětně jdoucího svazku, a tím je umožněno jeho vyvázání odrazem od polarizačního

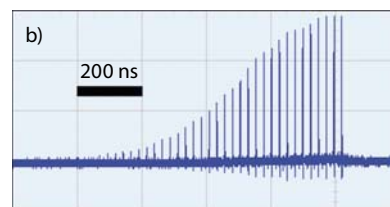
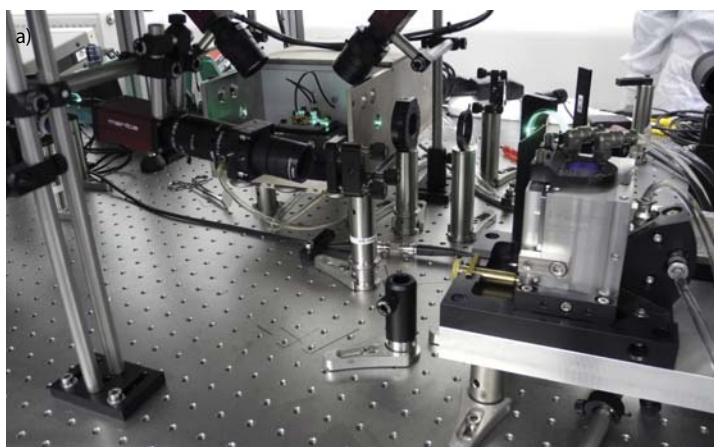
děliče. Jinou možností je kruhový rezonátor, kdy svazek obíhá v rezonátoru dokola v jednom směru a kdy vstupní a výstupní svazek svírá nenulový úhel umožňující jejich snadné oddělení. U kruhového rezonátoru odpadá nutnost použít optický rotátor, který má horší teplotní vlastnosti, takže omezují jeho použití jen do výkonů svazků okolo 100 W. Regenerativní zesilovače se používají především pro malé svazky, tj. svazky s průměrem do 1 cm. Použití pro větší svazky je omezeno jednak zhoršující se stabilitou rezonátorů se zvětšujícím se průměrem svazku, a pak nedostupností velkých elektrooptických spínačů a rotátorů. Proto se pro větší svazky používá víceprůchodový zesilovač (obr. 5b), kdy se více průchodů aktivním prostředím dosahuje postupnými odrazy od různých zrcadel. Díky tomu není potřeba speciální prvek pro vyvázání svazku. Nevýhodou ovšem je poměrně složitá dráha svazku a složitější nastavování zesilovače, především při velkém počtu zrcadel, kterých bývá až několik desítek.

Beamline A

Pikosekundového pulzu o největší energii má být dosaženo v systému označovaném jako Beamline A. Energie prodloužených pulzů generovaných vláknovým oscilátorem je nejdříve zvýšena v regenerativním zesilovači na 150 mJ [6]. Další zvýšení energie vyžaduje svazek o průměru okolo 2 cm. Proto je koncový zesilovač víceprůchodového typu. Energie výstupního pulzu má dosahovat až 750 mJ při délce méně než 3 ps a opakovací frekvenci v rozsahu 1–1,75 kHz.



Obr. 5 Schéma a) regenerativního zesilovače s lineárním uspořádáním rezonátoru a b) víceprůchodového zesilovače s aktivním prostředím ve tvaru tenkého disku. Z – zrcadlo, EO – elektrooptický spínač, P – polarizátor, R – rotátor, $\lambda/4$ a $\lambda/2$ – čtvrtvlnová a půlvlnová destička.



Obr. 6 a) Pohled na část regenerativního zesilovače Beamline B. Vpravo je laserová hlavice, ve které je tenký disk. Vzadu uprostřed zeleně svítící je elektrooptický spínač. b) Záznam z osciloskopu sledující postupně zesilování laserového pulzu při jednotlivých obězích rezonátorem.

Beamline B

Laserový systém s opakovací frekvencí pulzů 1 kHz je označován jako Beamline B. Délka pulzu vygenerovaného laserovým oscilátorem je zvětšena z 1 ps na 500 ps v prodlužovači pulzů se dvěma reflexními difrakčními mřížkami. První regenerativní zesilovač s lineárním rezonátorem obsahuje tenký disk z materiálu Yb:YAG o tloušťce 220 μm . Čerpání disku zajišťují laserové diody vlnové délky 969 nm. S tímto systémem byly zkoumány výhody pulzního čerpání. Místo kontinuálního čerpání bylo voleno pulzní čerpání o různé střídě. Maximální účinnosti a vysoké kvality laserového svazku bylo dosaženo pro střídu 50 %, tj. délku pulzu 500 μs . Při tomto pulzním čerpání o průměrném výkonu 233 W dosahoval výstupní zesílený pulz 45 mJ s účinností konverze 19 % [7]. Fotografie části regenerativního zesilovače a nárůst energie pulzu jsou zobrazeny na obr. 6. Navýšení výstupní energie pulzu z prvního zesilovače na více než 100 mJ bude dosaženo zvětšením prodloužení pulzu a přidáním druhého tenkého disku do zesilovače. Přidáním druhého tenkého disku se zvýší zesílení na jeden oběh zesilovačem, čímž dojde k potlačení některých nežádoucích jevů.

Dosažení výkonu 0,5 kW vyžaduje přidání koncového zesilovače, jehož testování momentálně probíhá s kontinuálním výstupním zářením. Pro zkrácení pulzů na několik pikosekund bude použit kompresor pulzů se dvěma reflexními difrakčními mřížkami. Do budoucna připravujeme další zvýšení energie pulzu, ovšem při nižší opakovací frekvenci.

Beamline C

Laserový systém označovaný jako Beamline C se vyznačuje vysokou opakovací frekvencí 100 kHz a energií pulzu má dosahovat 5 mJ. Nižší energie, související s menším průměrem svazku, umožňuje, aby tento systém byl kompaktnější, a to především v použitých zařízeních pro prodloužení a kompresi pulzu.

K prodloužení pulzů laserového oscilátoru z 1 ps na 500 ps je tentokrát použita objemová braggovská mřížka s rostoucí periodou, která způsobuje, že se dlouhovlnné spektrální složky pulzu odrazí v menší hloubce mřížky než krátkovlnné složky. Jedná se o kvádr skla, ve kterém je ve směru šíření svazku s periodou ve stovkách μm mírně modulován index lomu. Délka objemové mřížky je 50 mm. Srovnatelný tradiční prodlužovač z dvojice difrakčních mřížek by zabíral plochu $0,3 \times 1,5\text{m}$. Kromě kompaktnosti se objemové mřížky snadno nastavují a jsou mnohem stabilnější

vzhledem k fluktuacím prostředí. Prodloužené pulzy jsou vedeny do prvního regenerativního zesilovače s lineárním rezonátorem.

Bylo provedeno srovnání čerpání laserovými diodami o vlnové délce 940 nm a 969 nm. Potvrdily se výhody čerpání na vlnové délce 969 nm. Oproti čerpání na vlnové délce 940 nm je při použití čerpání s vlnovou délkou 969 nm menší rozdíl vlnových délek čerpacího a zesilovaného (1 030 nm) záření, a proto je při stejném čerpacím výkonu generováno menší množství tepla. Měření povrchové teploty tenkého disku termovizní kamerou odhalila pro čerpání na 940 nm výrazné rozdíly mezi režimem, kdy dochází k zesilování svazku a kdy je tenký disk pouze čerpán, aniž by zesiloval záření. Rozdíly v teplotách mezi těmito dvěma režimy byly při čerpání 969 nm velmi malé. To je důležité z hlediska bezpečnosti provozu zesilovače. Pokud zesilovač přestane zesilovat laserové záření, např. vlivem jeho rozladění nebo poruchy oscilátoru, při čerpání na 940 nm může skokově vzrůst teplota disku a dojít k překročení povolené teploty, kdy dojde k jeho poškození. Při použití čerpání na 969 nm se toto riziko výrazně snižuje [8].

Model použitého regenerativního zesilovače je na obr. 7a. Při čerpání tenkého disku laserovými diodami o vlnové délce 969 nm a výkonu 320 W dosahoval zesílený svazek výkonu 110 W. Účinnost optické konverze byla 34 %. Svazek byl komprimován ve stejném typu objemové braggovské mřížky s proměnnou periodou, ovšem do mřížky vstupoval z opačného směru, tzn. dopadal ze strany vyšší periody, a proto se tentokrát krátkovlnné složky odrazí v menší hloubce. Komprimovaný pulz měl nejkratší délku 2 ps a svazek vykazoval vysokou kvalitu (obr. 7b).

V další fázi bude nekomprimovaný svazek zaveden do regenerativního zesilovače s kruhovým rezonátorem, který je již vybudován. Při jeho testování byl úspěšně generován kontinuální svazek o výkonu 560 W. Proto je při zesilování pulzů očekáváno dosažení požadovaného výkonu po kompresi okolo 500 W.

Konverze vlnových délek

Některé aplikace mají výrazně vyšší účinnost při použití jiných vlnových délek, než mají lasery v centru HiLASE. Např. pro řezání kovů nebo uhlíkových kompozitů, pro emisi fotoelektronů z fotokatody v systémech urychlovačů částic je výhodnější použít kratších vlnových délek v ultrafialové oblasti spektra. Pro laserové urychlování elektronů v dielektrických

strukturách, modifikace dielektrik nebo opracování plastů je naopak výhodnější použít vlnové délky ze střední infračervené oblasti spektra (2–8 μm). Ovšem dosáhnout výkonného, krátkopulzního a kvalitního laserového svazku přímo z laseru v požadované spektrální oblasti není vždy možné. Vlnová délka intenzivního koherentního záření laserů se konvertuje v opticky nelineárních krystalech, které využíváme pro konverzi záření jak ke kratším vlnovým délkám, tj. do viditelné a ultrafialové oblasti spektra, tak k delším vlnovým délkám, tj. do střední infračervené oblasti.

Svazek pulzů délky okolo 4 ps s opakovací frekvencí 100 kHz a středním výkonem 60 W byl konvertován z vlnové délky 1 030 nm do svazku s poloviční vlnovou délkou (515 nm) s celkovou účinností přes 60 %. Tento svazek byl dále konvertován do ultrafialové oblasti. Vygenerovaný svazek má vlnovou délku 257,5 nm, tedy čtvrtinu vlnové délky původního svazku. Dosahovaná účinnost konverze je okolo 20 %. Celková účinnost konverze z infračerveného svazku do ultrafialového je okolo 10 %. Generovaný výkon přes 6 W představuje vysoce intenzivní zdroj koherentního UV záření, které je dostatečné pro mnohé aplikace.

Se stejným laserovým svazkem o opakovací frekvenci 100 kHz probíhá i testování generování vlnových délek ve střední infračervené oblasti v rozsahu mezi 1,6 a 3 μm . Požadovaný výstupní výkon je 10 W.

Vícedeskový laser

Za účelem testování laserovým zářením vyvolaného poškození optických materiálů a vytvrzování materiálů rázovou vlnou bude v centru HiLASE provozován vysokoenergetický laser. Nanosekundové pulzy z laserového oscilátoru jsou nejdříve upraveny a pak zesíleny na energii 150 mJ v zesilovačích provozovaných při pokojové teplotě. Pro další zesílení na 10 J a 100 J s opakovací frekvencí 10 Hz jsou již použity vícedeskové zesilovače z materiálu Yb:YAG. Chlazení zajišťuje proud helia ochlazeného na teplotu $-120\text{ }^\circ\text{C}$ [9]. Použití kryogenních teplot účinně zvyšuje odvod tepla, protože se snižující se teplotou obvykle roste koeficient tepelné vodivosti.

Odborníci z HiLASE podpořili vývoj tohoto laseru zejména detailními numerickými simulacemi ze-

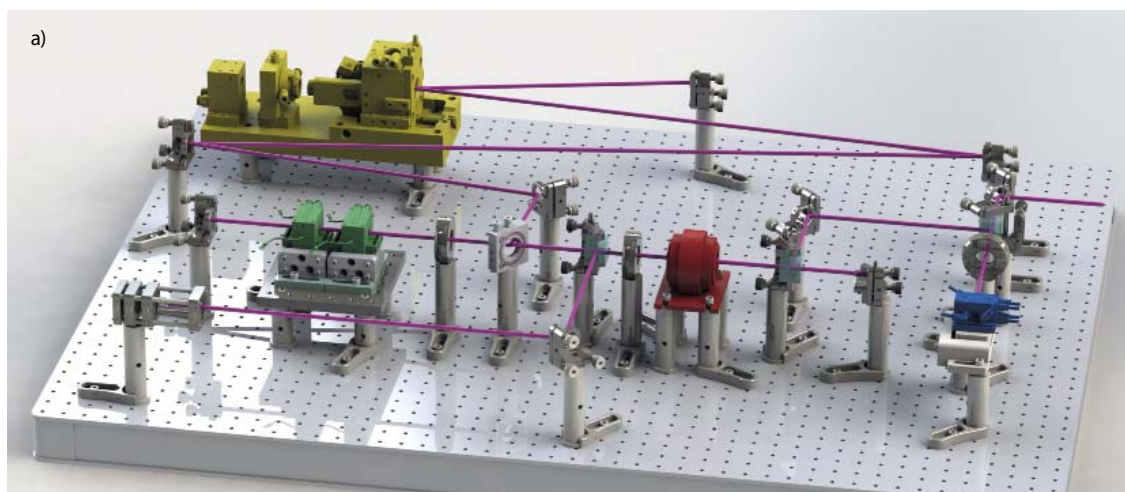
silujícího prostředí [10, 11] a vývojem adaptivně optického systému pro korekci vlnoplochy laserového svazku [12]. Numerické simulace umožnily optimalizaci zesilujícího řetězce a zahrnují výpočet rozložení tepla, teploty, mechanických deformací v aktivním prostředí, zisku, deformace vlnoplochy svazku a depolarizace svazku [13, 14]. Ukázka výpočtu rozložení hustoty tepelného výkonu a teploty v desce zesilovače je na obr. 8.

Diagnostické metody při vývoji výkonných laserů

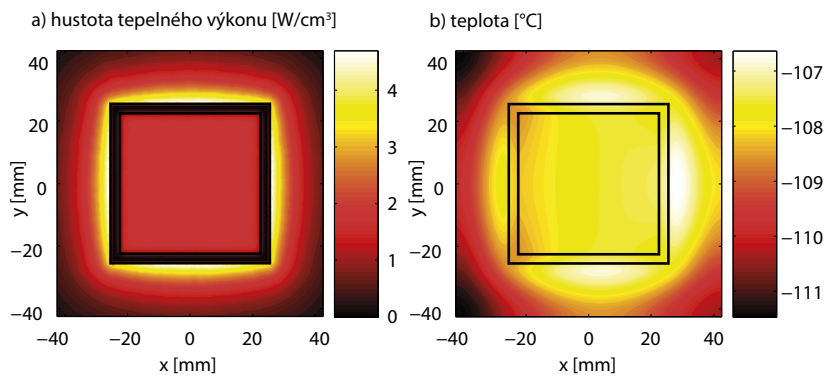
Vývoj nových vysokovýkonných laserů vyústil rovněž ve vývoj pokročilých diagnostických metod, které tento vývoj usnadňují. Pomáhají při hledání nových perspektivních ytterbium dopovaných aktivních prostředí, návrhu uspořádání zesilovače a měření kvality laserového svazku.

Spektroskopie laserových materiálů

Klíčové parametry pro návrh laserového zesilovače jsou účinným průřezem absorpce a emise záření v závislosti na vlnové délce. Ty mimo jiné určují, jaká má být vlnová délka čerpacího záření a jaká bude vlnová délka emitovaného laserového záření. Účinné průřezy lze určit ze spektroskopických měření daných materiálů. V centru HiLASE lze spektrometrem s vysokým rozlišením 15 pm změřit absorpční a emisní spektrum



Obr. 7 a) Model prvního regenerativního zesilovače Beamline C. Svazek do zesilovače vstupuje vlevo dole a vystupuje vpravo uprostřed. Barevně jsou zvýrazněny klíčové součásti, žlutě – laserová hlavice s tenkým diskem, zeleně – elektrooptický spínač, červeně – rotátor, modře – kompresor pulzů. b) Profil hustoty energie výstupního svazku z prvního regenerativního zesilovače Beamline C.



Obr. 8 Ukázka výpočtu rozložení a) hustoty tepelného výkonu a b) teploty v příčném řezu středem jedné desky vícedeskového zesilovače. Vnitřní čtverec označuje čerpanou oblast a vnější čtverec ohraničuje oblast absorbující parazitní záření. Proud helia je zleva doprava.

studovaných materiálů. Protože jsou účinné průřezy závislé na teplotě materiálu, je možné měnit jeho teplotu v rozsahu od -263 °C do 70 °C . Nově byla změněna spektra nového ytterbiem dopovaného materiálu označovaného jako Yb:YAG, který by měl umožnit generovat výrazně kratší laserové pulzy než obvyklý materiál Yb:YAG [15].

Měření deformací tenkého disku

Přestože je u tenkého disku velmi efektivní odvod tepla, dochází při intenzivním čerpání ke zvýšení teploty disku, což způsobuje změnu jeho zakřivení. V regenerativních zesilovačích, kdy se svazek má při každém průchodu reprodukovat sám na sebe, může změna křivosti disku způsobit, že se svazek nebude reprodukovat a zesilovač pak nebude fungovat. Pro známý rozsah deformací disku lze navrhnout rezonátor regenerativního zesilovače tak, že bude funkční pro všechna zakřivení disku. Křivost disku pro různé výkony čerpání je měřena senzorem vlnoplochy. Toto měření je jednodušší a odolnější vůči fluktuacím prostředí oproti jindy používaným interferometrickým měřením. Kromě změny poloměru křivosti lze rovněž určit vyšší řády deformací, které souvisejí se zhoršením kvality laserového svazku [16].

Rychlé měření kvality svazku

Standardně se kvalita svazku měří sejmutím a vyhodnocením příčných profilů svazků za spojnou čočkou v mnoha pozicích podél osy jeho šíření, což obvykle trvá několik minut. Pro rychlé měření a posouzení změn kvality svazku v čase byl vyvinut originální systém, který je schopen změřit kvalitu svazku ve zlomku sekundy. Svazek se pošle do prostředí, které vlivem dopadajícího svazku fluoreskuje. Tato fluorescence se kamerou sejme kolmo na směr šíření svazku. Vyhodnocením jediného snímku lze získat informace o průběhu svazku a velmi rychle vyhodnotit jeho kvalitu [17].

Závěr

Vývoj laserů dosahujících průměrných výkonů na úrovni kilowattu je vyžadován náročnými průmyslovými a vědeckými aplikacemi. Lasery vyvíjené v centru HiLASE se těmito parametry blíží. V průběhu realizace projektu HiLASE (2011–2015) byly získány cenné poznatky o chování aktivního prostředí tenkodiskových laserů a byly vyvinuty nové diagnostické metody a laserové systémy.

<http://ccf.fzu.cz>

Poděkování

Vývoj diodově čerpaných laserů je podporován Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky z projektů HiLASE (CZ.1.05/2.1.00/01.0027), DPSSLasers (CZ.1.07/2.3.00/20.0143) a Postdok (CZ.1.07/2.3.00/30.0057), které jsou spolufinancovány Evropským fondem regionálního rozvoje, Evropským sociálním fondem a rozpočtem České republiky.

Literatura

- [1] Novák a kol.: „Status of the high average power diode-pumped solid state laser development at HiLASE“, Appl. Sci., *(během korektur doplníme)* (2015).
- [2] M. Divoky a kol.: „Overview of the HiLASE project: high average power pulsed DPSSL systems for research and industry“, High Power Laser Sci. Eng. 2, e14 (2014).
- [3] A. Giesen a kol.: „Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers“, Appl. Phys. B 58, 363 (1994).
- [4] D. J. Richardson a kol.: „High power fiber lasers: current status and future perspectives“, J. Opt. Soc. Am. B 27, B63 (2010).
- [5] A. Bayramian a kol.: „Compact, Efficient Laser Systems Required for Laser Inertial Fusion Energy“, Fusion Sci. Technol. 60, 28 (2011).
- [6] M. Larionov, J. Neuhaus: „Regenerative thin disk amplifier with a pulse energy of 120 mJ at 1 kHz“, in: *Proceedings of ASSL*. Shanghai, China, November 2014, s ATh2A.51.
- [7] M. Chyla a kol.: „Optimization of beam quality and optical-to-optical efficiency of Yb:YAG thin-disk regenerative amplifier by pulsed pumping“, Opt. Lett. 39, 1441 (2014).
- [8] M. Smrž a kol.: „Suppression of nonlinear phonon relaxation in Yb:YAG thin disk via zero phonon line pumping“, Opt. Lett. 39, 4919 (2014).
- [9] P.D. Mason a kol.: „DiPOLE100: A 100 J, 10 Hz DPSSL using cryogenic gas cooled Yb:YAG multi slab amplifier technology“, *Proceedings of SPIE*, Prague, Czech Republic, April 2015, s. 951302-1.
- [10] M. Sawicka a kol.: „Modeling of amplified spontaneous emission, heat deposition, and energy extraction in cryogenically cooled multislabs Yb³⁺:YAG laser amplifier for the HiLASE Project“, J. Opt. Soc. Am. B 29, 1270 (2012).
- [11] M. Sawicka a kol.: „Effect of amplified spontaneous emission and parasitic oscillations on the performance of cryogenically-cooled slab amplifiers“, Laser Part. Beams 31, 553 (2013).
- [12] J. Pilar a kol.: „Design and optimization of an adaptive optics system for a high-average-power multi-slab laser (HiLASE)“, Appl. Opt. 53, 3255 (2014).
- [13] O. Slezak a kol.: „Optimization of wavefront distortions and thermal-stress induced birefringence in a cryogenically-cooled multislabs laser amplifier“, IEEE J. Quantum Electron. 49, 960 (2013).
- [14] O. Slezak a kol.: „Efficient ASE management in disk laser amplifiers with variable absorbing clads“, IEEE Journal of Quantum Electronics 50, 1052 (2014).
- [15] V. Jambunathan a kol.: „Spectroscopic and lasing characteristics of Yb:YAG ceramic at cryogenic temperatures“, Opt. Mater. Express 5, 1289 (2015).
- [16] T. Miura a kol.: „In-situ optical phase distortion measurement of Yb:YAG thin disk in high average power regenerative amplifier“, *Proceedings of SPIE*, San Francisco, USA, February 2013, s. 860303-1.
- [17] T. Miura, S. S. Nagisetty, T. Mocek: „Zařízení pro jednokrokové měření parametru kvality M2 laserového svazku“, patent CZ305256-B6, uděleno 20. 5. 2015.