

Vývoj tenkodiskových laserů s vysokým průměrným výkonem v projektu HiLASE

Martin Smrž, Ondřej Novák, Michal Chýla,
Taisuke Miura, Akira Endo, Tomáš Mocek

Oddělení diodově čerpaných laserů, projekt HiLASE, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Na Slovance 2, 182 21 Praha 8; smrz@fzu.cz

Projekt HiLASE

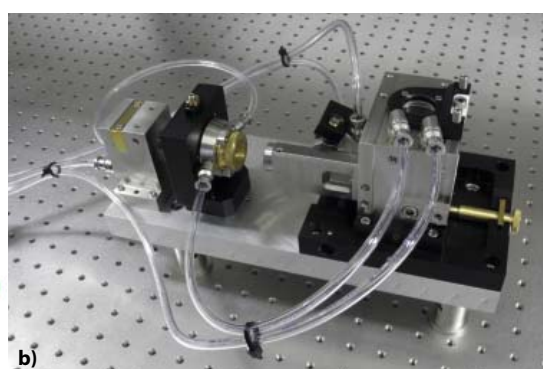
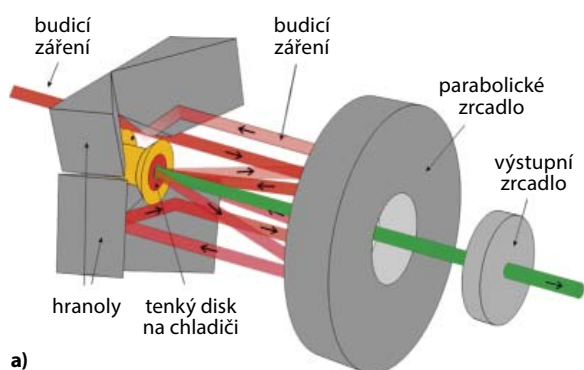
Projekt HiLASE [1] je zaměřen na vývoj nové generace pulzních diodově čerpaných pevnolátkových laserů s vysokým průměrným výkonem. Vyvinuté lasery, s délkou pulzu několika málo pikosekund, budou výkonnější a kompaktnější než zařízení, která jsou v současné době dostupná. I proto má projekt velký potenciál v komerční sféře a najde využití v high-tech průmyslu i ve výzkumných laboratořích. Budoucí aplikace vyvinutých laserů zahrnují testování prahu poškození optických prvků, které umožní vývoj nových optických prvků s vysokým prahem poškození a s vysokou trvanlivostí. V průmyslu bude využito vysokoenergetických pulzů k vytvoření rázové vlny v povrchu kovových součástí, a tím k jejich vytvrzení a zvýšení jejich odolnosti. Laserové pulzy budou použity i ve zdrojích XUV záření s vlnovými délkami jednotek až desítek nanometrů. XUV záření bude uplatněno v novém druhu litografie pro výrobu elektronických součástek s vysokou integrací či pro studium materiálů a biologických vzorků s vysokým rozlišením.

Tenkodiskové lasery

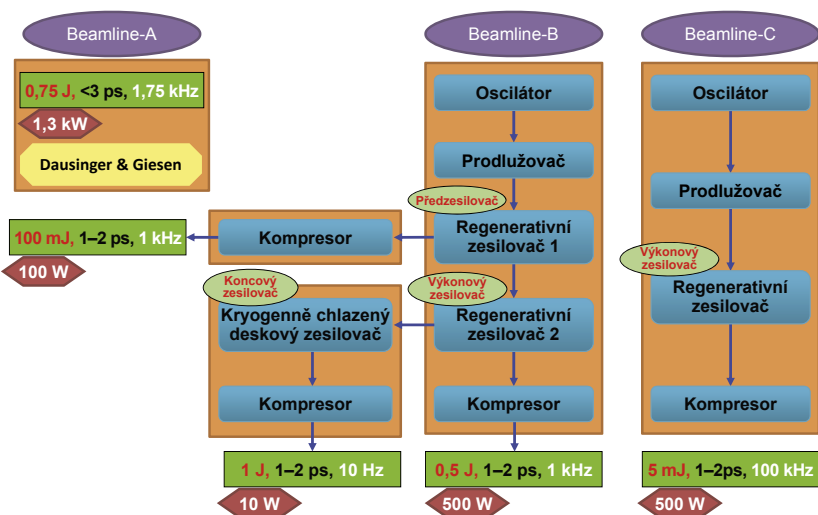
Navrhované vysokovýkonové lasery jsou založeny na progresivní technologii aktivního prostředí ve tvaru tenkého disku [2], která se v současnosti jeví jako

nejvhodnější pro vývoj vysokorepetičních laserů s vysokou energií v pikosekundovém pulzu a dobrou kvalitou laserového svazku. Ve spojení s buzením pevnolátkového laseru kontinuálním nebo kvazikontinuálním zářením z laserových diod lze v optimální konfiguraci dosáhnout optické účinnosti 30 až 40 % a celkové účinnosti 10 až 15 %.

Technologie laseru s aktivním prostředím ve tvaru tenkého disku byla navržena již v roce 1991 na univerzitě ve Stuttgartu [2] s cílem dosáhnout vysokého výstupního výkonu kontinuálně emitujícího laseru a vysoké kvality gaussovského svazku laseru. Základem laseru je monokrystal s typickým průměrem 1 cm a tloušťkou pouze 0,2 mm, který je vložen do rezonátoru laseru jako tzv. aktivní zrcadlo. Proto je na přední stěnu krystalu nanесena antireflexní dielektrická vrstva pro budící i emitované laserové záření a na zadní stěnu dielektrická vrstva s vysokou reflexí pro tytéž vlnové délky záření. Zadní stěna krystalu je připevněna k chladiči, jehož vnitřní část je chlazená vodou. Velký poměr průměru krystalu k jeho tloušťce zvyšuje účinnost chlazení, převažující axiální tepelný tok a teplotní gradient jen minimálně ovlivňují prostorovou kvalitu laserového svazku. Malá radiální složka teplotního gradientu sice existuje u tenkodiskových laserů s vysokým výkonem, ale vliv jím způsobené tepelné čočky a me-



Obr. 1 a) Optická soustava umožňující efektivní buzení tenkodiskového laseru pomocí několika desítek průchodů budícího svazku tenkým diskem [2]; b) Komerčně dostupná laserová hlavice tenkodiskového laseru, produkt firmy Dausinger & Giesen, GmbH [7].



Obr. 2 Konceptní schéma a cílové parametry jednotlivých vysokovýkonových tenkodiskových laserů projektu HiLASE. Systém A bude dodán firmou Dausinger & Giesen, GmbH [7]. Systémy B (vysokoenergetický) a C (vysokorepetiční) jsou vyvíjeny pracovníky HiLASE. Pro svazek B počítáme i s vývojem kryogenně chlazeného deskového zesilovače pro dosažení energie pulzu 1 J.

chanické deformace disku na prostorovou kvalitu laserového svazku je díky malé tloušťce disku rovněž malý. Podobně pozitivní efekt má tloušťka krystalu na eliminaci vlivu indukovaných nelineárních jevů. Slabinou tenkodiskového laseru je nízká absorpce budícího laserového záření na jeho jeden průchod. Protože po prvním průchodu budícího svazku tenkým krystalem bude absorbován pouze zlomek budícího výkonu, byl autorem této koncepce navržen systém skládající se z optických hranolů a parabolického zrcadla, který zajistí až několik desítek průchodů budícího svazku laserovým krystalem a absorpci více než devadesátiprocent budícího záření (obr. 1a).

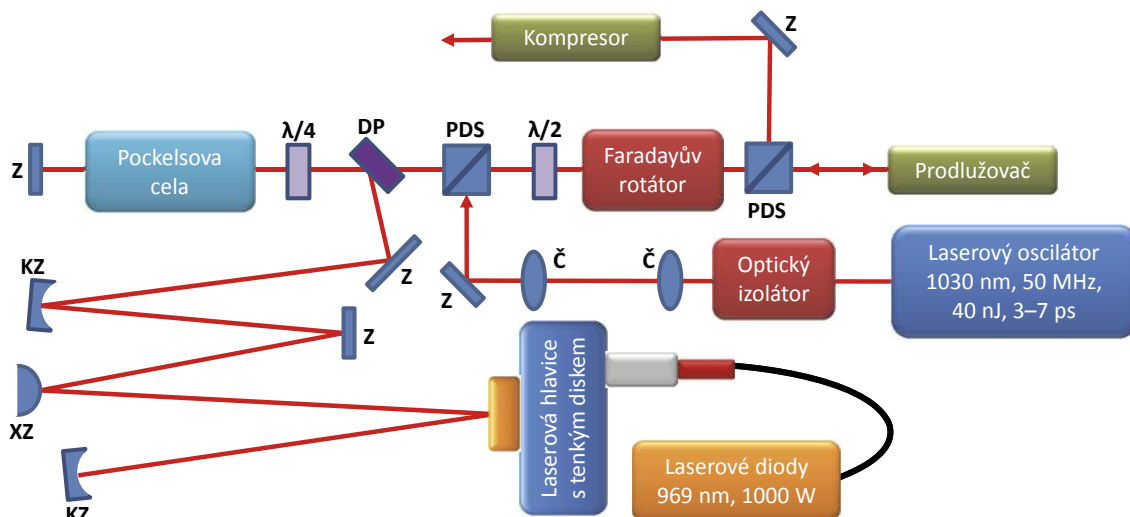
Projekt HiLASE je zaměřen na pulzní lasery, věnuje proto pozornost klíčovým efektům spojeným se zesilováním krátkých laserových pulzů. Tenkodiskový systém slouží jako zesilovač pulzů s velmi malou energií, které jsou generovány laserovým oscilátorem. Protože rozsah energií zesílených pikosekundových pulzů bude ležet v rozmezí 5 mJ až 0,5 J, nelze tyto pulzy zesilovat přímo. Vysoký špičkový výkon krátkých pulzů by vedl k destrukci použitých optických

komponent včetně samotného laserového krystalu. Vysoké zesílení krátkých pulzů bylo umožněno objemem techniky zesilování čerpovaných pulzů (CPA, chirped pulse amplification) v roce 1985 [3]. Zesilovaný pulz je disperzním optickým systémem prodloužen při zachování šířky optického spektra pulzu tak, aby jeho špičkový výkon po zesílení byl nižší než prahy poškození optických prvků. Zesílený pulz je následně stlačen soustavou s opačnou disperzí na původní délku pulzu. Efekt prodloužení délky pulzu využívá řízené rozfázování jednotlivých spektrálních složek optického pulzu, např. vlivem jejich rozdílné grupové rychlosti v prostředí, nebo geometrickým rozdílem jejich trajektorií v optických systémech s úhlovou disperzí (difrakční mřížky)[4–5]. Pro projekt HiLASE počítáme s prodloužením subpikosekundových pulzů na délky 0,2 až 3 ns podle konkrétního zesilovače (obr. 2).

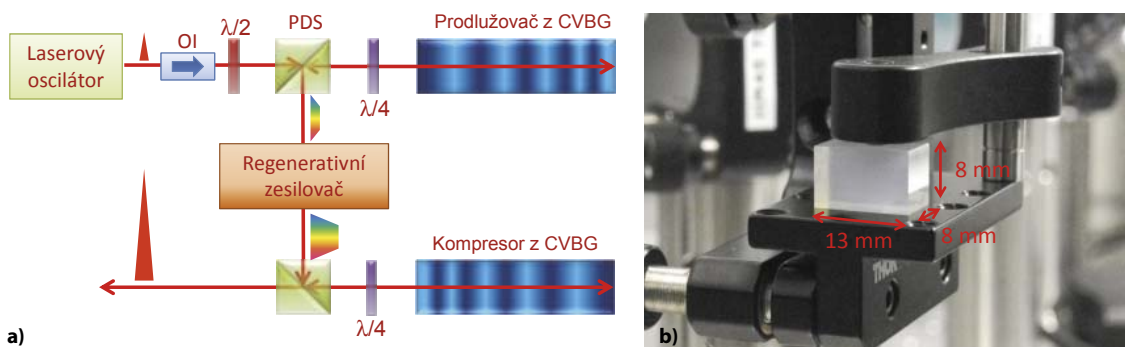
Podobný efekt, jakým je malá absorpce budícího záření na jeden průchod budícího laserového svazku, existuje i pro zesilování laserového pulzu, který projde laserovým krystalem (aktivním zrcadlem). Výrazné zesílení pulzu vyžaduje mnoho průchodů zesilujícím prostředím, čehož lze dosáhnout např. v regenerativním zesilovači [6]. Zesilování v regenerativním zesilovači má několik výhod. Pulz v regenerativním zesilovači je uzavřen v rezonátoru, tj. během tohoto procesu zůstává zachována vysoká prostorová kvalita laserového svazku. Dále pak regenerativní zesilovač umožňuje vysoký počet průchodů zesilovaného pulzu aktivním prostředím a účinně vyčerpá v něm uloženou energii. Pulz je v rezonátoru zesilovače uzavřen Pockelsovou celou, která po jeho vstupu do systému otočí jeho lineární polarizaci o 90 stupňů. Po realizování dostatečného počtu průchodů pulzu aktivním prostředím je polarizace Pockelsovou celou opět otočena a zesílený pulz je z rezonátoru uvolněn. Základní schéma regenerativních zesilovačů v tenkodiskových systémech projektu HiLASE ukazuje obr. 3.

Vysokorepetiční tenkodiskový laser

Cílem projektu vysokorepetičního tenkodiskového laseru (Beamline C) je vyvinout kompaktní průmyslově použitelný systém emitující záření na vlnové délce 1 030 nm se středním výstupním výkonem 500 W s opakovací frekvencí 100 kHz a délkou pulzu 1 ps. Bu-



Obr. 3 Obecné schéma tenkodiskového laseru s regenerativním zesilovačem (Z – rovinné zrcadlo, KZ/XZ – konkávní/konvexní kulové zrcadlo, Č – čočka, DP – dielektrický polarizátor, PDS – polarizační dělič svazku, $\lambda/4$ a $\lambda/2$ – čtvrtvlnová a půlvlnová destička).



Obr. 4 a) Schéma kompaktního vysokorepeticívního tenkodiskového laseru – Beamline C (OI – optický izolátor, CVBG – čerpaná objemová Braggovská mřížka, PDS – polarizační dělič svazku, $\lambda/4$ a $\lambda/2$ – čtvrtvlnová a půlvlnová destička); b) Prodlužovač Beamline C z CVBG mřížky. Rozměry mřížky jsou charakteristické pro maximální dostupné velikosti těchto mřížek [9].

doucí aplikace tohoto laseru vyžadují vysoce kvalitní svazek, jehož divergence má být nejvýše 1,2násobek divergence gaussovského svazku. Kvůli kompaktnosti systému bude použit prodlužovač a kompresor pulzu ve formě čerpaných objemových braggovských mřížek (obr. 4) [8, 9] a jeden zesilovač s Yb:YAG tenkým diskem buzeným laserovými diodami generujícími záření na vlnové délce 940 nebo 969 nm. V budoucnu zvažujeme i další inovativní řešení, např. použití Yb:YAG keramiky místo monokrystalu, nový typ diod pro buzení s vyšší účinností na vlnové délce 969 nm atd. Výzvou je rovněž použití krystalu BBO v Pockelsově cele se čtvrtvlnovým napětím 9 kV při opakovací frekvenci ≥ 100 kHz.

V současné době již bylo na prototypu systému dosaženo stabilního středního výstupního výkonu 50 W při opakovací frekvenci 100 kHz, tj. energie pulzu 0,5 mJ [10] a pulz byl komprimován čerpanou objemovou braggovskou mřížkou s difrakční účinností 88 %. Kvalitní výstupní optický svazek má profil intenzity velmi podobný základnímu gaussovskému módu (obr. 5a). Optická účinnost systému v pulzním provozu je zatím $< 20\%$, ovšem výrazné zvýšení očekáváme po použití kvalitnějšího krystalu Pockelsových cel, čímž se výrazně sníží ztráty v rezonátoru. I malé ztráty hrají při devadesáti průchodech pulzu rezonátorem velkou roli (obr. 5b). Dalšího zvýšení výstupního výkonu bude dosaženo zvětšením čerpané oblasti a zesilovaného svazku na tenkém disku.

Vysokoenergetický tenkodiskový laser

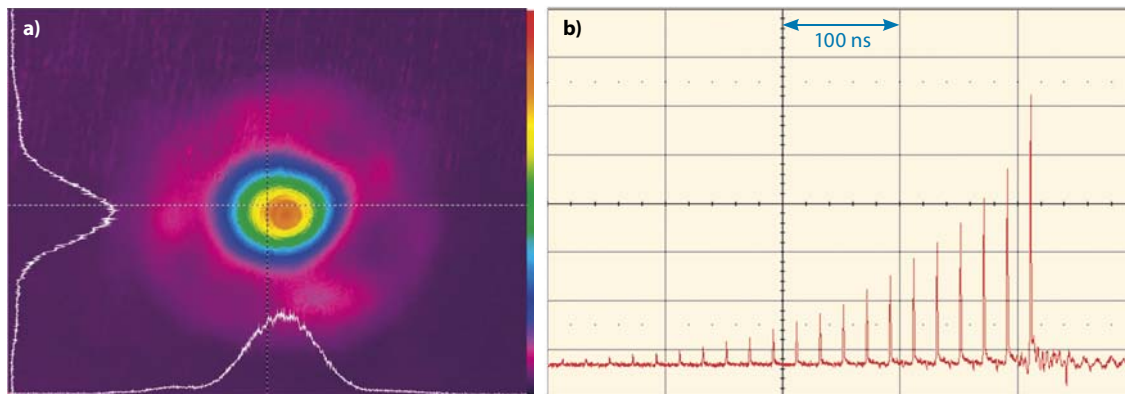
Cílem vývoje vysokoenergetického laseru (Beamline B) je získat svazek o průměrném výkonu 500 W a dél-

ce pulzu 2 ps ve dvou regenerativních zesilovačích při jejich opakovací frekvenci 1 kHz. První zesilovač má lineární uspořádání rezonátoru, kdy se v něm zesilovaný pulz pohybuje po stejné dráze tam a zpět. Výstupní výkon má být 130 W. Uspořádání následujícího zesilovače je kruhové, pulz se tedy pohybuje dokola jen v jednom směru, což např. umožňuje snazší oddělení vstupních a výstupních pulzů. V tomto zesilovači budou výstupní pulzy dosahovat energie 640 mJ. Kompresor pulzů z difrakčních mřížek bude dosahovat účinnosti 78 % a komprimovaný pikosekundový pulz bude mít požadovanou energii 500 mJ.

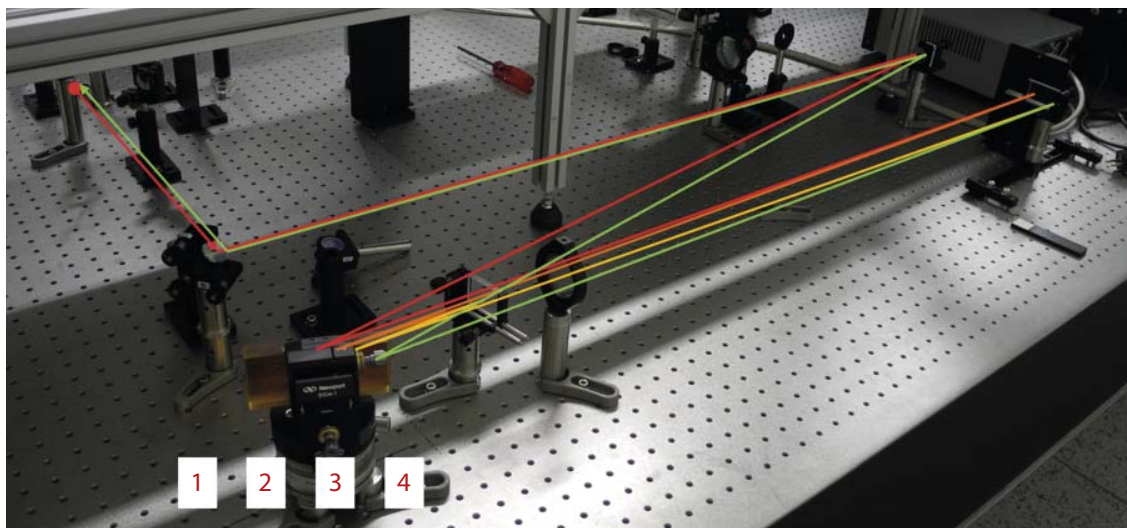
V rámci vývoje tohoto laseru byl vybudován mřížkový prodlužovač, který prodlužuje délku pulzu z 5 ps na 500 ps. Dále byl postaven první regenerativní zesilovač. V ověřovacích experimentech bylo dosaženo energie pulzu 45 mJ při opakovací frekvenci 1 kHz. Vyšších energií pulzů bude dosaženo zlepšením překrytí svazku z oscilátoru se základním módem rezonátoru regenerativního zesilovače a zvýšením velikosti čerpané oblasti a zesilovaného svazku na tenkém disku. V blízké době bude dokončen kompresor pulzů a bude započata stavba druhého regenerativního zesilovače.

Poděkování

Vývoj tenkodiskových laserů v rámci sekce výkonových systémů Fyzikálního ústavu 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. Výzkum je dále podpořen grantem RVO 68407700.



Obr. 5 a) Příčný profil hustoty energie výstupního svazku vysokorepeticívního regenerativního zesilovače se středním výkonem 50 W; b) Zesilování pulzu v rezonátoru regenerativního zesilovače v závislosti na rostoucím počtu průchodů pulzu tenkým diskem.

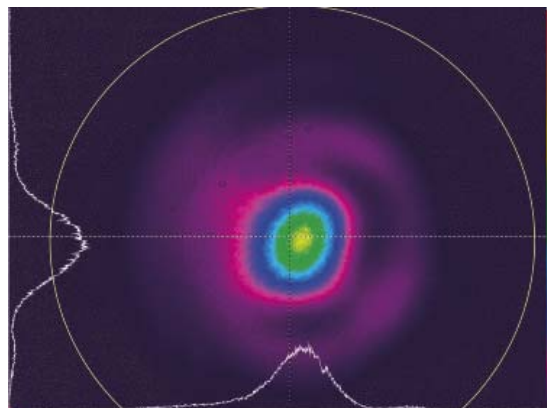


Obr. 6 Obrázek prodlužovače pulzů s vyznačením jednotlivých průchodů svazku. Kvůli většímu průměru svazku energetického laseru nelze použít kompaktní prodlužovač pulzů jako v případě vysokorepetičního laseru.

Literatura

- [1] Projekt HiLASE: <http://www.hilase.cz/>.
- [2] A. Giesen a kol.: „Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers“, *Appl. Phys. B* **58**, 363 (1994).
- [3] D. Strickland, G. Mourou: „Compression of amplified chirped optical pulses“, *Opt. Commun.* **56**, 219 (1985).
- [4] E. B. Treacy: „Optical pulse compression with diffraction gratings“, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-5, 454 (1969).
- [5] O. E. Martínez a kol.: „Negative group-velocity dispersion using refraction“, *J. Opt. Soc. Am. A* **1**, 1003 (1984).
- [6] J. E. Murray, W. H. Lowdermilk: „Nd:YAG regenerative amplifier“, *J. Appl. Phys.* **51**, 3548 (1980).
- [7] firma Dausinger & Giesen, GmbH: <http://www.dausinger-giesen.de/>.
- [8] G. Chang a kol.: „Femtosecond Yb-fiber chirped-pulse-amplification system based on chirped-volume Bragg gratings“, *Opt.Lett.* **34**, 2952 (2009).
- [9] firma OptiGrate Corp.: <http://optigrate.com>.

- [10] M. Smrž a kol.: „Advantages of zero-phonon line pumping in 100kHz Yb:YAG thin-disk regenerative amplifier“, *IEEE Photonics Conference*, Seattle (2013).



Obr. 7 Profil hustoty energie výstupního laserového svazku vysokoenergetického zesilovače.

**JEDEN DEN
S FYZIKOU**

6. 2. 2014

Matematicko-fyzikální fakulta
Univerzity Karlovy v Praze

Prožijte den s fyzikou.

mff.cuni.cz/jdf