

VÝKONOVÉ SYSTÉMY

Karel Jungwirth, Karel Rohlena, Jiří Ullschmied

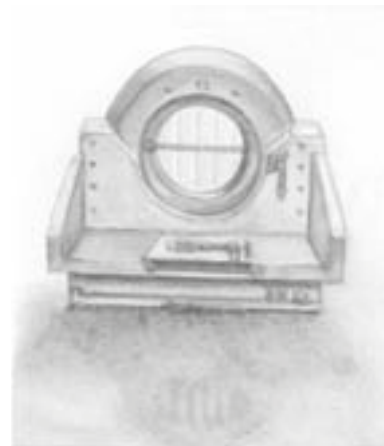
Pod pojmem „výkonové systémy“ se ve fyzice skrývají složitá zařízení, založená na využití výkonové impulzní techniky, schopná účinně koncentrovat energii v čase a v prostoru a uvolňovat ji ve formě krátkých impulzů s okamžitým výkonem na úrovni GW, TW nebo dokonce PW (10^{15} W). Mohou to být pulzní generátory svazků nabitých částic, pulzní lasery pracující na nejrůznějších vlnových délkách, lasery na volných elektronech nebo prostě generátory mohutných impulzů elektrického proudu. Taková zařízení otevírají zcela nové směry a cesty výzkumu.

Sekce výkonových systémů Fyzikálního ústavu AV ČR (FZÚ) má několik laserových programů. Jde především o vývoj a využití výkonových pulzních laserů, a to zejména laserů generujících světelné impulzy kratší než 1 ns s výkonem přesahujícím terawattovou úroveň. Takové lasery jsou jedním z neúčinnějších experimentálních nástrojů ve fyzice plazmatu a nejen tam. Jejich fokusované paprsky jsou totiž schopny přeměnit na plazma (čtvrté skupenství hmoty) jakoukoliv látku - terčik, umístěný v ohnisku speciální optické fokusační soustavy. Velmi horkého a hustého laserového (tj. laserem vytvářeného) plazmatu pak může být využito jako zdroje různých druhů záření či nabitých částic nejen ve fyzice, ale i v celé řadě dalších vědeckých a technických oborů. K celosvětově nejnáročnějším cílům přitom patří vytvořit laserové plazma o takové teplotě, aby se mohlo stát zdrojem energie v budoucích laserových termojaderných reaktorech.

V Sekci výkonových systémů se dále vyvíjí nový typ velmi účinného chemického laseru, který je schopen poskytovat výkony řádu kilowattů v prakticky nepřetržitém režimu. Nejedná se sice o výkonový laser v pravém smyslu slova, ale o velmi výkonový laser, určený pro speciální technologické využití v průmyslu. Jeho budoucí mobilní a automatizovaná verze by například mohla asistovat při likvidaci „horkých“ částí doslouživších jaderných reaktorů.

Samostatná Sekce výkonových systémů byla ve Fyzikálním ústavu ustavena zcela nedávno jako důsledek dynamicky se rozvíjejícího výzkumného programu dřívějšího Oddělení plynových laserů Sekce optiky, vedeného od r. 1991 Karlem Rohlenou. Významným novým stimulem pro práci oddělení bylo před pěti lety rozhodnutí Akademie věd České republiky o převzetí obřího evropského jódového laseru Asterix IV z německého Ústavu kvantové optiky Maxe Plancka (MPQ). Pracovníci Oddělení

plynových laserů, společně se svými kolegy z Ústavu fyziky plazmatu, mají přitom hlavní zásluhu na úspěšném přestěhování laseru do Prahy, jeho zásadní modernizaci a následném vybudování zcela nového laserového centra výzkumu - tzv. Badatelského centra PALS (Prague Asterix Laser System), společného pracoviště Fyzikálního ústavu a Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. To se pak stalo pilířem Výzkumného centra laserového plazmatu programu MŠMT, založeného společně s laserovými skupinami z FJFI a FEL Českého vysokého učení technického.



MALÉ OHLÉDNUTÍ ZPĚT

Kořeny programu výkonových laserů ve FZÚ sahají hluboko do minulosti. Jeho současný rozvoj je v jistém smyslu přirozeným vyústěním mnohaletého úsilí prakticky tří generací fyziků. Není tedy vůbec náhodou, že výzva k převzetí laseru Asterix IV přišla nakonec právě do našeho ústavu, i když zájemců byla po světě celá řada. Našel se zde totiž sehraný tým obětavých lidí připravených a také schopných takový náročný záměr uskutečnit.

Kde se vzali a kdo je vyškolil? Právě letošní 50. výročí založení FZÚ je vhodnou příležitostí trochu se ohlédnout a vzpomenout i těch, kteří jsou již na odpočinku, z různých důvodů odešli nebo byli donuceni odejít, nebo dokonce již ani nejsou mezi námi. Nebude to historicky přesná studie, spíš jen pár střípků do mozaiky. Měli jsme totiž to potěšení všechny hlavní aktéry poznat osobně, ať již jako jejich studenti, kolegové (a to i z příbuzného oboru fyziky plazmatu) nebo v poslední době jako jejich přímí spolupracovníci.

Zakladatelé oboru fyziky plazmatu v tehdejší Fyzikálním ústavu ČSAV, Luděk Pekárek a Václav Krejčí, patřili k prvním propagátorům a popularizátorům fyziky plazmatu a termojaderného výzkumu u nás. Doménu vysokoteplotního plazmatu však již od počátku 60. let minulého století obsadil tehdy nově vzniklý Ústav fyziky plazmatu, zatímco FZÚ se specializoval na nízkoteplotní plazma plynových

výbojů. Oscilační procesy a ionizační vlny (straty) v kladném sloupci doutnavých výbojů byly až do roku 1974 hlavní náplní programu Oddělení výbojů v plynech. I s tehdejší velmi skrovným experimentálním vybavením bylo vtípnou improvizací dosaženo originálních a mezinárodně uznávaných výsledků, přičemž se již v těchto pionýrských dobách výrazně uplatnili například Karel Mašek nebo Leoš Láška.

Už z prvních výsledků bylo zřejmé, že ionizační vlny nejsou běžným vlnovým jevem v plazmatu, nýbrž že se jedná o fluktuace lokální produkce iontů a metastabilních atomů. Ve svítících oblastech se ionty a metastabilní atomy přednostně rodí a v tmavých zanikají. Ačkoliv při popisu výrazně srážkového plazmatu mnohdy vystačíme s jednodušším hydrodynamickým modelem, rozpoznal tehdy Tomáš Růžička, že v daném případě je nutno řešit kinetickou Boltzmannovu rovnici pro elektronový plyn v nehomogenním plazmatu. I při velké změně hybnosti ztrácí totiž elektron při pružné srážce s těžkou částicí jen nepatrný zlomek své pohybové energie, daný poměrem jejich hmot. Elektronový plyn, a to i s velmi krátkou střední volnou dráhou elektronů, tedy může být z hlediska rozptylu energie prakticky bezsrážkový. Objev kinetických jevů v jen zdánlivě srážkovém prostředí umožnil úspěšně popsat řadu neobvyklých vlastností ionizačních vln a předpovědět některé jejich nové, teprve později i experimentálně nalezené typy.

Studium vlnových, transportních a chemických procesů ve výbojovém plazmatu v čistých plynech i různých směsích bylo v sedmdesátých letech motivováno jeho využitím jako aktivního média plynových laserů. Zejména CO₂ lasery se pak v osmdesátých letech zařadily mezi nosné programy tzv. Realizačního střediska FZÚ. Jejich vývoj byl cenným zdrojem praktických zkušeností pro celou generaci výzkumných pracovníků a techniků.

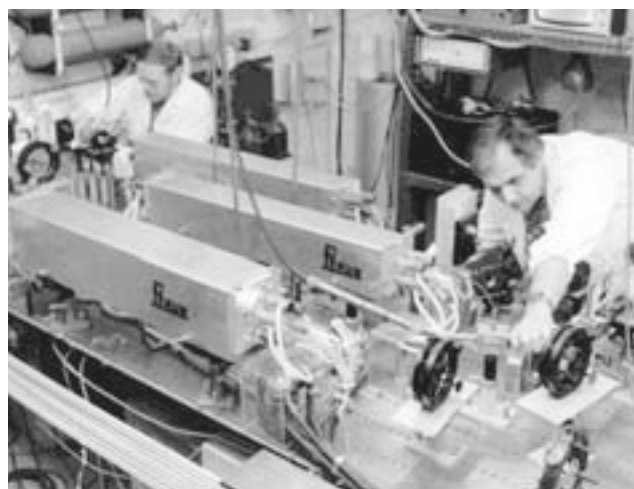
V první polovině 70. let započala také studia možnosti využití chemických procesů v plynových výbojích pro nejrůznější praktické aplikace, zejména k vytváření tvrdých a korozivzdorných vrstev např. nitridací povrchů v dusíkovém výboji. Na klíčovou roli neutrálních atomů dusíku při nitridačních procesech přitom tehdy jako první upozornil Vladimír Hermoch.

V letech 1979-1985, kdy měl být výzkum v akademii zcela přeorientován podle hesla „výzkum-výroba-využití“, se praktické aplikace staly alfou a omegou plazmového výzkumu ve FZÚ. Hlavním protagonistou tohoto směru byl Jindřich Musil, „delimitovaný“ do FZÚ v roce 1979 z Ústavu fyziky plazmatu s celým svým nově konstituovaným Oddělením plazmových aplikací. V osmdesátých letech přišlo vedení s myšlenkou, že by FZÚ mohl být jediným pracovištěm ve světě, kde by byl soustředěn výzkum obou perspektivních typů jódových laserů - fotodisociačního a chemického. Základem pro další výzkum se měl stát vývoj pulzního jódového laseru. Ředitel ústavu a pozdější předseda ČSAV Bohumil Kvasil se totiž již v roce 1979 dohodl s profesorem N. G. Basovem, jedním ze tří laureátů Nobelovy ceny za objev laseru, o předání prvního jódového laseru z Fyzikálního ústavu Akademie věd (FIAN) v Moskvě do FZÚ. Že to byl spíš danajský dar a že tým vytrhl ruským kolegům v podstatě trn z paty? Opravdu, jódový laser z FIAN, jehož koncové zesilovače byly excitovány světelným zábleskem drátku explodujícího při silném proudovém impulzu, byl schopen pracovat spíše v režimu ojedinelých než jednotlivých impulzů a pro praktické použití byl zcela nevhodný. Přesto se ve Fyzikálním ústavu našli lidé, kteří s tímto jódovým laserem dokázali něco udělat.

Zmíněný jódový laser z FIAN byl ve své době jedním ze tří jódových laserů na světě (další se stavěly v MPQ Garching v Německu a v tajemném ruském

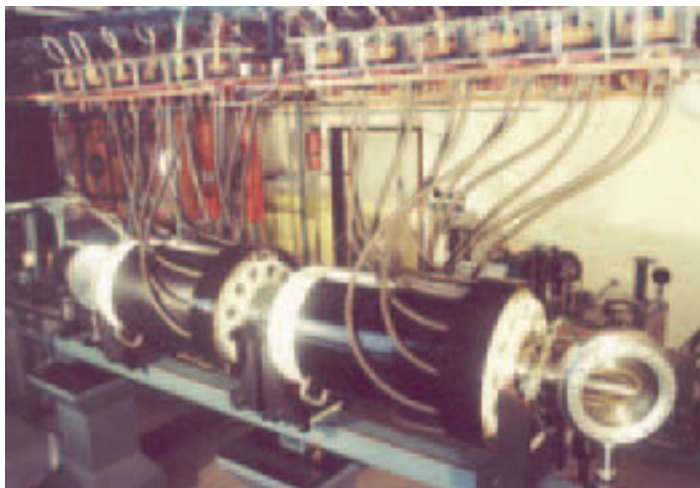


1/ Božena Králiková nastavuje zrcadla optické trasy laseru Perun (archiv B. Králikové)



2/ Jiří Skála (vlevo) a Miloš Chvojka při práci na laserovém systému Perun (archiv M. Chvojka)

Arzamasu - „počtovyj jaščik“ 16) a vlastně prvním skutečným výkonovým laserovým systémem ve FZÚ. Jeho přestěhování a instalace, které dostali na starost kolegové Miloš Chvojka a Jiří Skála spolu s osvědčeným technikem Jiřím Kovářem, byly prvním a dosti riskantním podnikem tohoto druhu ve světové historii výkonových laserů, zatímco o patnáct let později se stěhování obřích laserů stalo téměř světovou módou. Poměrně brzy, již v roce 1980, se ve spolupráci s FIAN a FTJF ČVUT podařilo uvést do provozu první část laserového zesilovacího řetězce - oscilátor a první zesilovač (výstupní energie 300 mJ ve 20 ns impulzu), další dva zesilovače pak po dvou letech (9,9 J, 1,5 ns). První modul posledního výkonového zesilovače byl dokončen v roce 1984 a celý systém s proklamovaným výkonem 100 GW byl pod názvem PERUN I (prý podle Perunova „ne a nebudu hřmít...“ z Havlíčkova Křtu sv. Vladimíra) dostavěn pod vedením Leoše Lásky až v roce 1985.



3/ *Koncový výkonový zesilovač laseru Perun I*
(foto R. Louvarová, FZÚ)

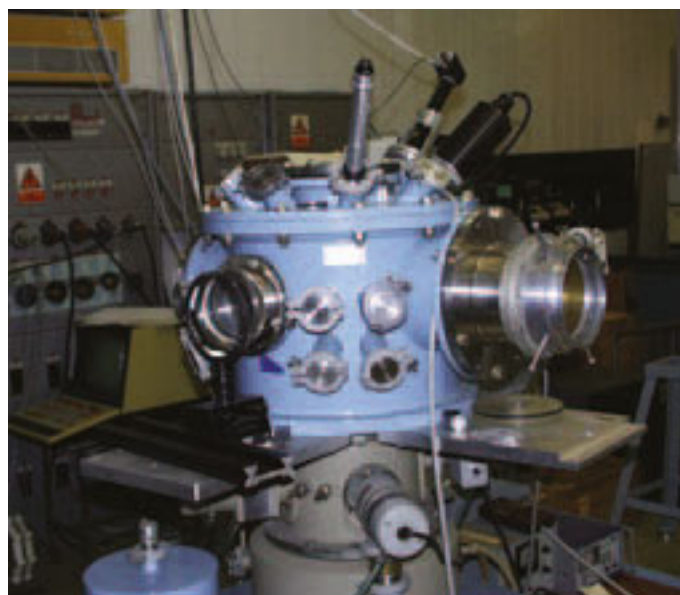
Během stavby se totiž ukázalo, že je nutno zásadním způsobem předělat celou koncepci laseru. Zejména musel být změněn způsob excitace (čerpání) laserového média v laserových zesilovačích. Původní velmi nepraktické čerpání explodujícími drátky bylo nahrazeno fotodisociačním čerpáním ultrafialovým světlem xenonových výbojek, navržených a zkonstruovaných Vladimírem Hermochem ve spolupráci s Hanou Urbánkovou (provd. Turčičovou) a vyrobených Jiřím Mocem v tehdy proslavené sklářské dílně FZÚ. Inspirací přitom byl jódový fotodisociační laser Asterix III, provozovaný od roku 1975 v Ústavu kvantové optiky (MPQ) v německém Garchingu. Tím se původní ruský laser změnil téměř k nepoznání. Za výsledek šestileté práce na vývoji zařízení Perun I byla skupině pracovníků Oddělení výbojů v plynech udělena v roce 1986 Cena ČSAV. Takto poctěn však už nebyl Otto

Štirand, který předtím vedl Oddělení výbojů v plynech FZÚ téměř patnáct let.

Přítom možná právě první krátká návštěva Otto Štiranda v MPQ v Garchingu (a byla to tenkrát v roce 1980 taková událost, že stála za zmínku i ve výroční zprávě ústavu!) dala základ oboustranně prospěšným vědeckým kontaktům s MPQ (např. Vladimír Hermoch pomohl Garchingu vyřešit problém symetrizace výboje v čerpacích xenonových výbojkách) a byla jedním z prvních podnětů pro další vývoj programu výkonových laserů ve FZÚ, jež nakonec vyvrcholily přestěhováním Asterixu IV do Prahy v roce 1998.

Ale vraťme se ještě na chvíli zpět do 80. let minulého století. Práce na vývoji jódového laserového systému s výbojkovým čerpáním pokračovaly dalších pět let a v roce 1990 byl v nové laboratoři, vzniklé přestavbou původního výpočetního střediska, uveden do provozu modernizovaný laserový systém PERUN II s energií 50 J v impulzu délky 300 ps. Kmenovými pracovníky laserové skupiny v té době již byli i Božena Otáhalová (provd. Králíková) a Miloš Novák. Skutečné terčíkové experimenty pak umožnila nová interakční komora z Polska. Intenzivní vědecké kontakty s varšavským Ústavem fyziky plazmatu a laserové mikrofúze (IFPLM), které tehdy zahájil Josef Krása, ostatně trvají dodnes. Teoretické zázemí výzkumu se od samého počátku soustřeďovalo kolem Karla Rohleny, který se v roce 1991 stal vedoucím oddělení, přejmenovaného mezitím na Oddělení plynových laserů.

Počátkem 90. let začal výzkum využití laserového plazmatu jako zdroje měkkého rentgenového záření. Již v prvních experimentech s vytvářením plazmatu fokusovaným laserovým svazkem na hliníkových,



4/ *Polská interakční komora laseru Perun II*
(foto J. U.)

měděných a tantalových rovinných terčících jsme změřili rentgenová spektra záření laserového plazmatu i závislost jeho intenzity na poloze ohniska a ve spolupráci s Všeruským jaderným střediskem v Sarově (RFNC, dříve Arzamas 16) jsme uskutečnili první experimenty zaměřené na vyhlazování nehomogenit laserového plazmatu způsobených nerovnoměrným ozářením terčičku. Teoreticky byly dokonce připravovány experimenty s rentgenovými lasery, využívajícími laserového plazmatu jako aktivního média. Pro jejich realizaci byl však i výkon laseru PERUN II stále ještě příliš nízký. Naopak pod vedením Leoše Lásky byl úspěšně nastartován rozsáhlý program využití laserových zdrojů mnohonásobně nabitých těžkých iontů, který se stal základem nové plodné spolupráce s IFPLM ve Varšavě a s evropským jaderným střediskem CERN v Ženevě. Díky svým kontaktům na americké, německé, polské a ještě částečně utajené ruské laboratoře se Praha stala jakýmsi neformálním centrem výzkumu a využití jódových laserů a organizátorem pravidelných mezinárodních seminářů s tímto tématem. Úrodná půda byla připravena a v roce 1996 do ní sjel blesk z čistého nebe ve formě tehdy ještě nepříliš vážně míněné otázky Karla Rohleny: „Nenašlo by se 10 milionů na laserovou halu? Němci by možná byli ochotni přenechat nám svůj v korunách stamilionový obří laser Asterix IV za jednu jedinou marku.“

TERAWATTOVÝ LASEROVÝ SYSTÉM PALS

Začneme pro změnu citátem z roku 2000: „*I believe that PALS will become comparable with the laser centre at Rutherford Appleton - at least within the next few years - and therefore one of the most significant places for laser work in Europe.*“ (Věřím, že PALS se stane srovnatelným laserovým

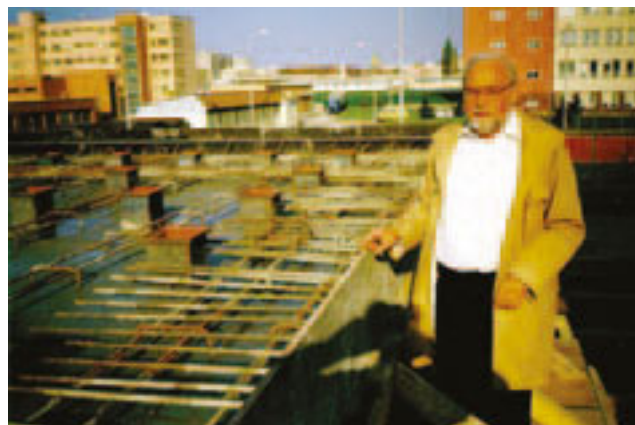
střediskem s Rutherfordovou Appletonovou laboratoří - alespoň v průběhu několika málo příštích let - a tudíž jedním z nejvýznamnějších míst pro práci s lasery v Evropě, prohlásil australský profesor (*University of New South Wales*) německého původu Heinrich Hora v Opto & Laser Europe č. 80, prosinec 2000). Příliš fantastické? Tak tedy ještě jeden, z roku 2001: „*As the Director General for Research of the European Commission I am proud we can consider this Institute among the top centres of excellence in Europe. Congratulations*“ (Jako generální ředitel pro výzkum v Evropské komisi jsem hrdý, že můžeme tento ústav zařadit mezi špičková evropská centra. Gratuluji. Tolik zápis Achillea Mitsose v návštěvní knize PALSu ze září 2001).

A to ještě v roce 1997 se zdál být nápad instalovat v Praze jeden z největších laserů v Evropě zcela fantastickým nejen lidem nezúčastněným, ale i těm, kteří se na realizaci této myšlenky měli podílet. Nejdříve to nebrali příliš vážně, spíše jako žert, který se velice záhy změnil ve výzvu dokázat něco, co se v první chvíli zdálo téměř nemožné. Rozhodující úlohu přitom sehrálo vlastně jen pár lidí. Vladimír Dvořák, tehdejší ředitel FZÚ, který se po jistém váhání rozhodl výzvu přijmout a plně se pak za projekt postavil, ředitel ÚFP Pavel Šunka a jeho dnešní nástupce Pavel Chráska, kteří podpořili výstavbu potřebné nové laserové haly na teritoriu ÚFP. Celý projekt si vzali za své autoři tohoto článku, kteří pro něj získali podporu řady klíčových osobností a institucí doma i v zahraničí a iniciovali založení nového laserového badatelského centra. Při konkrétní realizaci projektu je od samého začátku statečně a nezištně podporovalo celé osazenstvo Oddělení plynových laserů i jejich nejbližší kolegové a další zaměstnanci z FZÚ i ÚFP.

Obří laserový systém PALS není české fyzikální obci zcela neznámý. Ostatně je v provozu, a to velmi úspěšném, již třetím rokem. O tom, jak jsme vlastně k němu přišli, jak se stěhoval z německého



5/ Celkový pohled na laserový systém Perun II - stav v roce 1996 (foto J. U.)



6/ Karel Jungwirth na stavbě laserové haly PALS v dubnu 1998 (foto J. U.)

Garchingu a rekordním tempem znovu instaloval v Praze, se napsalo již poměrně dost [viz např. J. Ullschmied, Čs. čas. fyz. **51**, 264 (2001); B. Rus, K. Rohlena, J. Skála a kol. *Laser and Particle Beams* **17**, 2 (1999); K. Jungwirth, A. Cejnarová, L. Juha a kol.; *Physics of Plasma* **8**, 2495 (2001)]. Navíc je na internetové stránce PALSu - www.pals.cas.cz - k dispozici průběžně doplňovaná obrazová i textová informace o samotném laseru, o principu jeho funkce i o výsledcích výzkumných projektů na něm realizovaných, včetně seznamu publikací. Takže jen velice stručně, pro připomenutí: Laser PALS je jednosvazkový jódový pulzní laserový systém. Využívá záření excitovaných atomů jódu, uvolněných při fotodisociaci organického alkylijodidu účinkem ultrafialového záření xenonových pulzních výbojek. Laser pracuje v jednotlivých impulzech délky přibližně 400 ps, generovaných zhruba jednou za dvacet minut. Elektrická energie pro výbojky se vždy několik minut před výstřelem hromadí v obřích kondenzátorových bateriích. V jednom impulzu je PALS schopen dodat až 1 kJ světelné energie, a to na infračervené vlnové délce 1315 nm. Jeho impulzní výkon tedy dosahuje několika terawattů. Mohutný výstupní laserový paprsek (průměr 290 mm!) lze fokusační optikou soustředit na ohniskovou plošku o průměru menším než 0,1 mm. Plošná hustota světelného výkonu v ohnisku pak může dosáhnout hodnot převyšujících stěží představitelných 10^{16} W/cm².

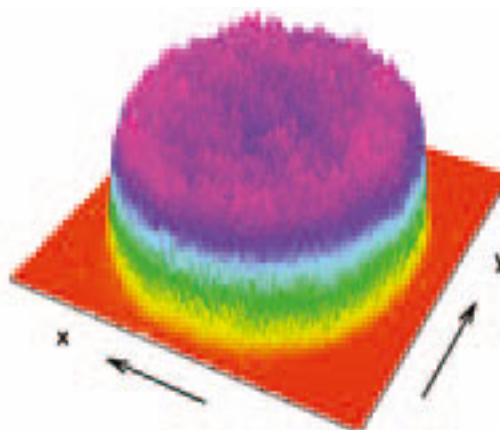
PALS je nyní jedním z trojice největších evropských laserů, spolu s laserem Vulcan v *Rutherford Appleton Laboratory* (RAL) v Británii a s laserem LULI2000 v *Laboratoire pour l'Utilisation des*



7/ Jiří Skála u koncového zesilovače laseru PALS, květen 2003 (foto J.U.)

Lasers Intenses (LULI) ve Francii. Velikostí energie soustředěné v jednom laserovém svazku drží PALS dokonce evropský primát. Navíc má na rozdíl od obou jmenovaných neodýmových laserů plynné - tedy opticky téměř nezničitelné - médium, což mu dává řadu jedinečných vlastností: velmi kvalitní laserový svazek s téměř ideálně homogenním příčným profilem intenzity, vysoký kontrast impulzu, vysokou stabilitu nastavení směrovosti svazku, velmi dobrou reprodukovatelnost výstřelů a v neposlední řadě relativně levný provoz. Výhodou jednosvazkové konfigurace je i možnost měnit výstupní energii laseru v rozmezí dvou řádů prakticky beze změny geometrie svazku.

Proto je laser PALS mimořádně vhodný pro výzkum interakce laserového záření s hmotou, pro studium laserového plazmatu a pro ověřovací testy jeho nejrůznějších praktických aplikací. Od svého spuštění doznal PALS řady zásadních změn a vylepšení a laseroví specialisté Božena Králiková a Jiří Skála s dalšími kolegy, studenty a týmem techniků vedených Jiřím Kovářem intenzivně pracují na dalších inovacích.



8/ Příčný profil intenzity výstupního svazku laseru PALS, sejmутý infračervenou CCD kamerou a zpracovaný analyzátořem Lepas 11 (Spiricon). Průměr svazku 29 cm.

Souběžně s instalací laseru byl vybudován i originálně koncipovaný interakční prostor. Jeho základem je světově unikátní dvojitá vakuová interakční komora, jejímiž duchovními otci jsou spolu s Bedřichem Rusem (prémie Otty Wichterle 2002) francouzský šéfkonstruktor Jean Claude Lagron z *Université Paris Sud* v Orsay a nedocenitelný Miroslav Hudeček, náš dlouholetý konstruktor par excellence. Přitom nelze nezmínit, že podstatná část těchto komor i ostatních systémů interakční části zařízení byla vyrobena českými „high-tech“ firmami a že špičkovou práci odvedli i pracovníci dílen FZÚ pod vedením Miroslava Soukupa.

Díky všem zmíněným má dnešní PALS pro studium interakce laserového záření s hmotou zřejmě

jednu z nejmodernějších vakuových komor v Evropě, umožňující i tak náročné experimenty, jako je realizace a praktické využití plazmového rentgenového laseru. Kontrolu nad veškerým děním v oblasti interakce postupně převzal od Bedřicha Ruse Eduard Krouský, který s Oldřichem Rennerem zajišťuje i diagnostiku rentgenového záření laserového plazmatu. Ve velině od samého počátku kraluje a celou automatickou kontrolu experimentu včetně sběru dat stále zdokonaluje Miroslav Pfeifer.



9/ Vedoucí interakční sekce Eduard Krouský při jednom z výstupů na terčíkové komoru PALSu (foto J.U.)

Kromě hlavního laserového svazku jsou dnes k dispozici i pomocný a diagnostický svazek. Všechny pak lze velkoplošnými nelineárními optickými krystaly velmi účinně konvertovat na druhou (červenou - 658 nm) i třetí (modrou - 438 nm) harmonickou frekvenci. Vloni se podařila dokonce i konverze do čtvrté (ultrafialové - 329 nm) harmonické. Připravuje se další vylepšení vlnoplochy laserového paprsku s využitím metod adaptivní optiky, vyvíjejí se nové typy oscilátorů. Hlavní úsilí a nejvíce prostředků však směřuje na přípravu zásadní dlouhodobé inovace PALSu. Vydali jsme se totiž na dosud ve světě jen velmi málo probádanou, ale o to lákavější cestu jménem OPCPA. V sázce je přitom hodně - šance mít v Praze v historicky krátké době laser až petawattového výkonu.

OPCPA, CESTA K PETAWATTŮM

Původně jsme o dalším podstatném zvyšování

výkonu PALSu neuvažovali. Na rozdíl od častějších neodymových výkonových laserů je spektrum plynového jódového laseru velmi úzké, jódové laserové zesilovače jsou tudíž úzkopásmové a z principu nemohou přenést impulzy kratší než zhruba 100 ps. Na jaře roku 1998 nám však tuto „poklidnou“ představu narušil nápad z anglické Rutherford Appleton Laboratory. Jde o využití metody parametrického zesilování ultrakrátkých impulzů (OPCPA) pro generaci vysokovýkonových femtosekundových impulzů u výkonových laserů. V listopadu téhož roku realizovali Bedřich Rus a Petr Matoušek, jeho bývalý spolužák žijící nyní v Británii, počítačovou simulaci aplikace metody OPCPA na jódový laser a jejich výsledky daleko předčily původní očekávání [P. Matousek, B. Rus, I. N. Ross, IEEE J. Quant. Electron. **36**, 158 (2000)]. PALS se tak přes noc stal kandidátem na nejvýkonnější laser na světě.

Co je vlastně podstatou metody OPCPA? Je to šikovná kombinace dvou principů dávno známých pod zkratkami CPA a OPA. Prvního z nich - CPA (z anglického Chirped Pulse Amplification) - se již dlouho využívá k dosažení velkých impulzních výkonů v mikrovlnné technice, např. pro zvýšení dosahu radarů. Vždy je totiž technicky jednodušší zesilovat dlouhý impuls, ten před vysláním komprimovat a odražený impuls před detekcí opět dekomprimovat. K časové kompresi se hodí například frekvenčně modulované impulzy, zejména takové, u nichž se frekvence v průběhu impulsu mění lineárně s časem. V optické oblasti se krátký impuls mění na delší frekvenčně modulovaný v tzv. rozmítáči (stretcher), který lze vytvořit např. ze dvou difrakčních mřížek. K rozmítnutí dojde tím, že světlo různých barev absolvuje různě dlouhé optické dráhy. Po zesílení klasickým laserovým zesilovačem lze pak rozmítnutý impuls opět zkomprimovat jiným (inverzním) párem mřížek, tzv. kompresorem.

Druhá technika - OPA (z anglického Optical Parametric Amplification) - je rovněž již delší dobu běžně používané parametrické zesílení signálů. V klasických soustředěných parametrických zesilovačích je zesílení jednoho signálu řízeno signálem jiným (čerpacím), kterým se mění určitý parametr zesilovacího obvodu. V optických parametrických zesilovačích se využívá změny disperzních vlastností nelineárního optického prostředí, tvořeného např. dvojlomnými krystaly, účinkem silné (čerpací) světelné vlny. Ta se v důsledku nelineární interakce s prostředím rozpadá na dvě nové vlny s větší vlnovou délkou (označované z historických důvodů jako signálová a jalová). Frekvence a vlnové vektory všech tří vln jsou přitom svázány rezonančními podmínkami (tj. zákony zachování energie a hybnosti tří fotonů zúčastněných na interakci).

Kombinace technik OPA + CPA, tedy OPCPA, může posloužit k podstatnému zesílení i velmi

krátkého - femtosekundového - laserového impulsu s využitím energie výkonového laseru s impulzem mnohem delším. Potřebujeme k tomu však dva lasery: kromě výkonového čerpacího laseru s dlouhým impulzem ještě pomocný femtosekundový laser s energií řádově třeba jen desítky nJ. Impulz pomocného laseru rozmítneme na délku impulsu čerpacího laseru a současně jej lineárně frekvenčně modulujeme („chirpujeme“). Oba laserové impulsy, čerpací i rozmítnutý, přivedeme současně na vstup nelineárního krystalu. Výstupní zesílený signálový impuls je pak rovněž „chirpovaný“ a můžeme jej mřížkovým kompresorem opět stáhnout na původní délku impulsu pomocného laseru. Tímto způsobem lze získat femtosekundové impulsy s velkou energií, a tedy výkonem mnohonásobně převyšujícím impulzní výkon čerpacího laseru. A právě jódový laser typu našeho PALSu je - zejména díky vysoké kvalitě svazku, malé spektrální šířce záření a velké energii v jednom svazku - pro aplikaci techniky OPCPA mimořádně příhodný. Modelové výpočty předpovídají pro PALS možnost zkrácení impulsu až na délku několika desítek fs, při výstupním výkonu řádu několika petawattů, tedy vyšším než bylo dosud kdekoli v laboratoři dosaženo. Samozřejmě, že si nechceme dát takovou příležitost ujít. Samotné odhodlání však nestačí, a proto jsme se rozhodli aplikaci OPCPA techniky pro jódový laser vyzkoušet nejprve na menším zařízení.

Využití pro pilotní OPCPA experiment bývalý laser PERUN se přímo nabízelo. Nejprve však musel projít důkladnou rekonstrukcí, stejně jako dnes již nevyhovující prostory původní laserové laboratoře. Nebylo to zdaleka jednoduché a vše navíc probíhalo souběžně s plným provozem PALSu.

Obrovský kus práce zde vedle Hany Turčičové, Petra Straky, oceněného v této souvislosti premií Ottý Wichterle, a dalších badatelů PALSu odvedla skupina techniků pod vedením Jiřího Kováče. „Starý dobrý“ PERUN se tak změnil k nepoznání a v r. 2002 na originální hybridní laserový systém nazvaný SOFIA.

LASEROVÝ SYSTÉM SOFIA

Pro vybudování laseru SOFIA byl ještě jeden závažný důvod. Původní jódový oscilátor laseru PALS neumožňuje dostatečnou variabilitu délky a tvaru laserového impulsu, opakovací frekvence jeho impulsů je relativně nízká. Bylo tudíž zapotřebí vyzkoušet na nezávislém experimentu možnost jeho nahrazení optickým parametrickým oscilátorem s prvky na bázi pevné fáze. Takových oscilátorů je dnes celá řada. Využívají nelineárních optických krystalů i prvků vláknové optiky, ale ještě nikdo je nepoužil jako generátor vstupních impulsů pro plynový jódový laser. Ve spojení s výkonovými jódovými zesilovači tak vznikl originální laserový systém



10/ Porada v laboratoři SOFIA (zleva: Petr Straka, Hana Turčičová, Jiří Kováč, Jiří Zeman)

Solid-State Oscillator Followed by Iodine Amplifiers (SOFIA). Celý systém byl v průběhu roku 2002 sestaven, postupně ožívován a v dubnu 2003 byl 10 mJ vstupní laserový svazek úspěšně zesílen výkonovými jódovými zesilovači na výstupní energii 30 J.

To je však jen první krok. Na laseru SOFIA nás ještě čeká optimalizace laserového svazku a jeho konverze do 3. harmonické frekvence, která bude využita pro čerpání krystalových parametrických zesilovačů OPCPA systému. Petr Straka se svými spolupracovníky nyní v laboratoři SOFIA paralelně připravují pro OPCPA klíčové prvky trasy signálového svazku: femtosekundový Ti:safírový oscilátor (10 fs, 10 nJ), mřížkový rozmítač a mřížkový kompresor. Prvním cílem je dosáhnout po zpětné kompresi impulsu na délku 50 fs nejprve úrovně výkonu řádu 10 TW a postupně jej v průběhu roku 2004 dále zvyšovat. Na cestě k petawattům tak vývoj laseru SOFIA zpočátku dovolí i nadále využívat PALSu pro tolik žádané experimenty. Navíc i při řádově menší energii poskytne možnost uskutečnit experimenty při mnohonásobně vyšších impulzních výkonech.

Pro PALS se současně připravuje ještě jiný typ vstupní části (front end) jódového laserového zesilovačského řetězce. Na vývoji celého komplikovaného systému se podílejí pracovníci Oddělení telekomunikačních systémů ÚŘE AV ČR Praha (J. Kaňka, M. Karásek, P. Honzátko) a Oddělení koherentní optiky ÚPT AV ČR Brno (J. Lazar, O. Číp, P. Jedlička). Shodou okolností je v optoelektronice donedávna preferovaná vlnová délka 1310 nm velmi blízká vlnové délce jódového laseru. I při maximálním využití komerčních optoelektronických a telekomunikačních prvků však jde o mimořádně náročnou úlohu a naši kolegové museli odvést úctyhodný kus práce, aby se celé zařízení mohlo již



11/ Výkonové zesilovače nového hybridního laserového systému SOFIA - květen 2003 (foto J. U.)

v současné době (květen 2003) testovat přímo na PALSu.

PALS A SOFIA - CO BUDE DÁL?

V delším časovém horizontu se nabízejí v podstatě dvě varianty dalšího vývoje. Jednou z nich je zabudovat celý OPCPA systém laseru SOFIA i na PALS a zařadit jej za předposlední laserový zesilovač. Současně s hlavním výkonovým nanosekundovým impulzem by pak byl na PALSu k dispozici i krátký 100TW femtosekundový impulz. Laser SOFIA by pak dále sloužil jako zkušební jódový laser, nezbytný tak jako tak pro další vývojové práce. Kombinace



12/ Petr Straka u zárodků optického kompresoru pro OPCPA v laboratoři SOFIA - květen 2003 (foto J. U.)

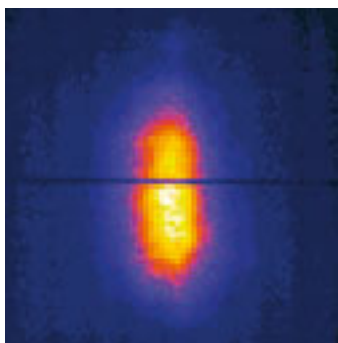
dlouhého a krátkého laserového (ns a fs) impulzu by na PALSu umožnila vedle unikátních interakčních experimentů např. i studium dějů v laserovém plazmatu s velkým časovým rozlišením.

V optimální, ale daleko náročnější (mj. i finančně) variantě, by byl na základě zkušeností získaných na systému SOFIA postaven nový OPCPA modul, využívající plné výstupní energie laseru PALS. Výše uvedené počítačové simulace, provedené ve spolupráci s Rutherford Appleton Laboratory, naznačují možnost dosažení výkonu až 5 PW, v komprimovaném impulzu délky ~20 fs s energií ~100 J. Při fokusaci svazku na terčík by to znamenalo docílit rekordních plošných hustot výkonu přesahujících 10^{21} W/cm². Otevřela by se tak cesta ke zcela novým výzkumům za hranicí současného poznání a to nejen ve fyzice plazmatu, ale i např. ve výzkumu lasery iniciovaných jaderných reakcí, relativistických efektů v silných polích nebo nových metod urychlování částic. Něco podobného zatím nemůže svým uživatelům nabídnout ani žádný zahraniční laser. Snad se podaří získat právě pro tuto ambiciózní variantu i potřebné prostředky a to především z domácích zdrojů. Na zahraniční podporu nelze totiž příliš spoléhat, chceme-li v tvrdé mezinárodní konkurenci uspět.

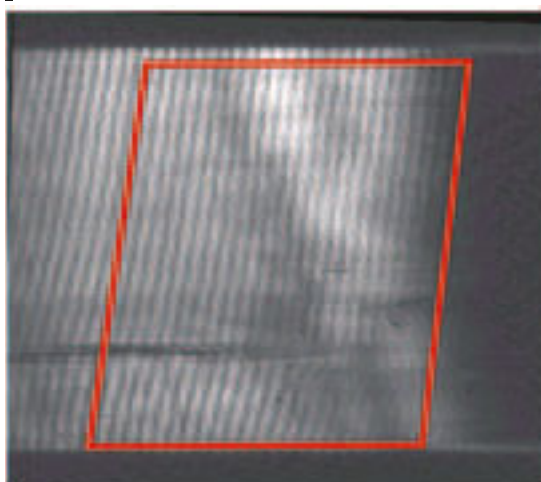
Zatím se nám to daří. Vzniklo unikátní laserové pracoviště PALS, vybudované v době tak krátké a s náklady tak nízkými, že to naši zahraniční kolegové považovali za nemožné. Dnes funguje naše laserová laboratoř tak, jako by měla za sebou mnohaletou tradici. Přestože je jedinou evropskou uživatelskou laserovou laboratoř v nově přidružených zemích EU, může se navíc pochlubit výborným vysvědčením v rámci pravidelného hodnocení výzkumných infrastruktur Evropskou komisí. Přístup na dnes už skutečně český obří laser je neméně žádaný, než je tomu u druhých dvou již zmíněných největších evropských laserových zařízení. Jeho atraktivitu zvyšuje nejvýkonnější a nejstabilnější rentgenový laser na světě, realizovaný již ve druhém roce existence laboratoře. Výsledkem je mj. dlouhá řada vyžádaných přednášek pracovníků PALSu na zahraničních konferencích a univerzitách, prestižní publikace, přes sto deset tisíc přístupů na internetové stránky PALSu během jediného (posledního) roku. PALS je atraktivní nejen pro zahraniční návštěvy, ale každoročně přitahuje i stovky zejména mladých návštěvníků z celé republiky. Současně je zdrojem moderního technologického know-how s nezanedbatelným potenciálem pro český průmysl optiky a jemné mechaniky. Formálního ocenění doma se PALSu dostalo v roce 2001, kdy mu Inženýrská akademie České republiky udělila cenu za vynikající realizované inženýrské dílo. V té době jsme však již měli i řadu nových vědeckých výsledků.

SATUROVANÝ RENTGENOVÝ LASER

Zinkový saturovaný rentgenový laser na vlnové délce 21,2 nm, realizovaný skupinou Bedřicha Ruse v červnu 2001 a dále zdokonalený v listopadu 2002, byl již podrobně popsán v předchozích číslech tohoto časopisu [B. Rus, Čs. čas. fyz. **51**, 272 (2001) a B. Rus, T. Mocek, M. Kozlová a kol. Čs. čas. fyz.,



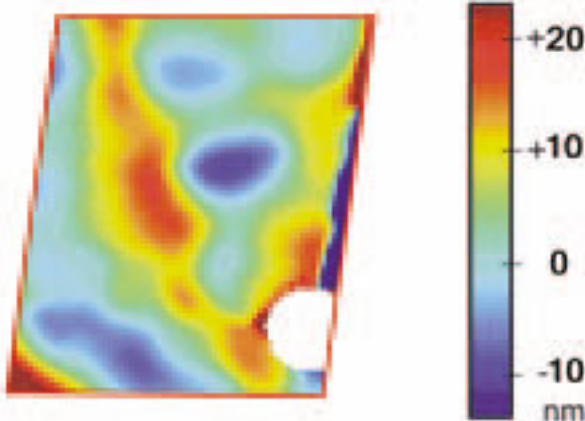
13/ Stopa svazku optimalizovaného zinkového rtg. laseru s rekordní divergencí 1x4 mrad a energií až 10 mJ (PALS listopad 2002, archiv B. Rus).



14/ Unikátní rentgenový interferogram povrchu Nb katody, deformované silným elektrickým polem o intenzitě 50 MV/m (vlevo) a odpovídající nanometrový reliéf povrchu (PALS červenec 2001, archiv B. Rus).

pod vedením Gérarda Jamelota a Henri Safy se podařilo vůbec poprvé studovat jevy předcházející elektrickému průrazu supravodivých elektrod ve vysokém vakuu. Tímto experimentem jsme se připojili k úsilí vyřešit jeden z klíčových problémů budoucí generace velkých urychlovačů částic, u kterých zmenšování rozměrů a tedy snižování ceny brání právě elektrické průrazy jejich vakuových urychlovacích systémů.

Vynikající vlastnosti našeho rentgenového laseru současně svědčí i o mimořádných kvalitách samotného laseru PALS - zejména co do stability, fokusovatelnosti a energie jeho laserového svazku, bez kterých by realizace tohoto špičkového zařízení nebyla myslitelná. Jeho další vývoj a využití ve FZÚ je záležitostí nově konstituovaného Oddělení rentgenových laserů. V centru pozornosti bude nejen využití svazku rentgenového laseru v základním výzkumu, např. k interferometrii a holografii ve fyzice plazmatu, optice a materiálových vědách, ale také pro budoucí nanotechnologie, např. pro ablační obrábění povrchů nebo pro řízenou modifikaci povrchové struktury látek.



52, 9 (2002)] i v zahraniční odborné literatuře [např. B. Rus, T. Mocek, A. R. Prág a kol., Phys. Rev. A **66**, 063806 (2002) a B. Rus, T. Mocek, A. R. Prág a kol., Plasma Phys. Control. Fusion **44**, B207 (2002)]. Jde bezesporu o jeden z největších dosavadních úspěchů PALSu na mezinárodním poli. Svým okamžitým výkonem řádově 100 MW a energií impulsu cca 10 mJ se zařadil ve své kategorii na první místo na světě a současně patří k nejintenzivnějším soudobým laboratorním zdrojům měkkého rentgenového záření vůbec. Bezprostředně po svém zrodu byl úspěšně využit pro rentgenovou interferometrii povrchů za extrémních podmínek. Ve spolupráci s francouzskými kolegy z Université Paris Sud v Orsay a z divize urychlovačů CEA Saclay

COIL

Práce na chemickém kyslík-jódovém laseru (COIL z anglického Chemical Oxygen-Iodine Laser) byly ve FZÚ zahájeny v roce 1985. COIL na rozdíl od fotodisociačního jódového laseru využívá k excitaci jódového atomu energie elektronově excitovaného molekulárního (tzv. singletového) kyslíku, který je produkován chemickou cestou [J. Kodymová, Čs. čas. fyz. **44**, 103 (1994)]. Poměr „chemické“ energie vložené do výroby singletového kyslíku k energii generovaného laserového záření dosahuje až 30 %, což je v laserových systémech účinnost ojedinělá. To je také jedním z důvodů, proč je využití COILu dnes ve světě věnována značná pozornost. Vývoj

chemicky čerpaného jódového laseru COIL směřuje k mobilnímu výkonovému laserovému zařízení, vhodnému pro nejrůznější praktické aplikace. K nesporným přednostem COILu patří např. možnost zvyšování výstupního výkonu až na desítky kW při uchování dobré kvality laserového svazku, jakož i schopnost pracovat jak v kontinuálním, tak v impulzním režimu. COIL má ve srovnání s běžně používanými technologickými lasery (CO_2 , Nd:YAG) rovněž mnohem větší celkovou účinnost. Navíc má proti CO_2 laseru podstatně kratší vlnovou délku umožňující přenos svazku k místu aplikace optickými vlákny. Velmi účinná absorpce infračerveného záření jódového laseru běžnými materiály předurčuje jeho budoucí využití pro speciální materiálové technologie. Jedním z aplikačních záměrů je využití COILu při likvidaci zastaralých kontaminovaných součástí jaderných zařízení, doslouživších plavidel, ve vojenství, při výzkumech v oboru laserové chemie, fotochemie či fotofyziky.

Dlouhá doba života singletového kyslíku v plynném

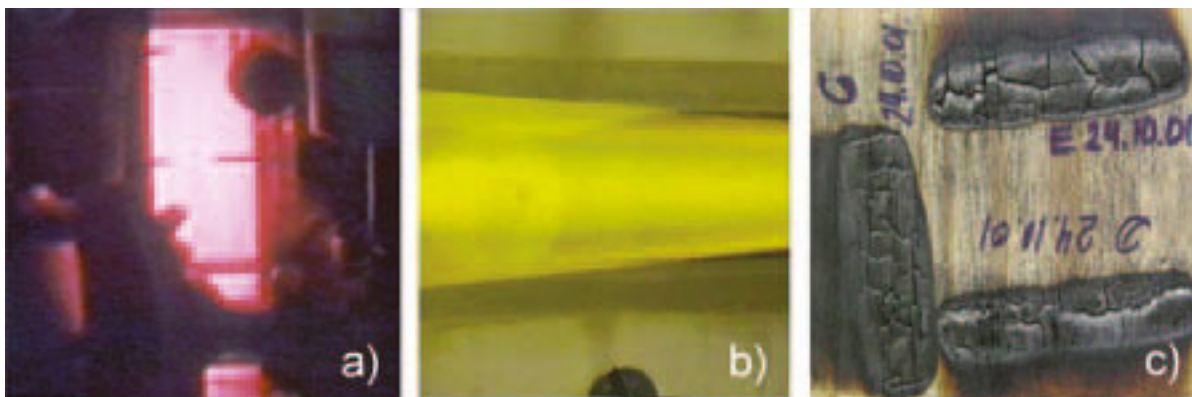
stavu (řádově desítky minut) umožňuje jeho oddělenou přípravu ve speciálním zařízení - generátoru. Odtud je plynule odváděn do aktivní zóny laseru, kde dochází k čerpání atomárního jódu na laserovou hladinu téměř rezonančním přenosem energie. V roce 1989 dokončila Jarmila Kodymová, dnešní vedoucí Oddělení chemických laserů, s Otomarem Špalkem a dalšími členy skupiny stavbu celého laserového systému čerpaného generátorem originální konstrukce, ve kterém singletový kyslík vzniká přesně řízenou chemickou reakcí mezi plynným chlórem a alkalickým roztokem peroxidu vodíku. V tzv. podzvukovém režimu proudění pracovních plynů dosahoval tento kontinuální laser výstupních výkonů do 100 W.

V souladu s celosvětovým trendem ve vývoji COILu směrem k výkonnějším a kompaktnějším systémům s kvalitnějším laserovým svazkem jsme další výzkumnou práci laboratoře zaměřili na vývoj laseru se supersonickým prouděním. První nadzvuková verze COILu byla ve FZÚ realizována v roce 2000. Dnes je řada originálních výsledků získaných v laboratoři COIL [viz např. V. Jirásek, O. Špalek, J. Kodymová a kol., Chem. Phys. **269**, 167 (2001); O. Špalek, V. Jirásek, M. Čenský a kol., Chem. Phys. **282**, 147 (2002)] využívána při vývoji mnoha COIL systémů ve světě a je chráněna českými i zahraničními patenty.

Tím se ale vývoj zdaleka nezastavil, spíše naopak. Například od nového originálního způsobu generování atomárního jódu z plynných reagens přímo v laseru očekáváme další výrazné zvýšení energetické účinnosti. Výsledky prvních laserových experimentů na úrovni výkonu do 300 W jsou velmi slibné a zdá se, že klíčem ke konečnému úspěchu je již „jen“ nalezení nejvhodnějšího způsobu injektáže všech plynných reakčních složek a minimalizace vlivu nežádoucích vedlejších reakcí v aktivní oblasti laseru. Podrobnější a názornější informace o me-



15/ Jarmila Kodymová se členy svého týmu v laboratoři COIL. Zleva: O. Špalek, J. Jirásek, J. Kodymová, M. Čenský (foto J. U.)



16/ Charakteristické barevné efekty doprovázející činnost chemicky čerpaného jódového laseru:

- a) červené záření v generátoru singletového kyslíku,
- b) žlutá emise doprovázející disociaci molekulárního jódu,
- c) černé „ožehové“ obrazce na dřevěném terči.

chanismu činnosti COILu, o jeho vlastnostech, výhodách, potenciálních aplikacích a o vědeckých výsledcích práce Oddělení chemických laserů nalezne čtenář na internetové adrese www.fzu.cz/departments/chemlaser.

NEJSME SAMI

Zejména v posledních dvou desetiletích jsme svědky bouřlivého vývoje kvantových generátorů záření, od mikrovlnných maserů až po rentgenové lasery. Vývoj jde na jedné straně směrem k vyšším výkonům v kratších - až attosekundových - impulzech, na druhé straně k zařízením s vyšším středním výkonem při rostoucí opakovací frekvenci či délce impulzů. Sekce výkonových systémů FZÚ udržuje úzké kontakty s celou řadou zahraničních partnerů, bez nichž by realizace celého jejího rozsáhlého výzkumného programu ani nebyla možná. Přirozenými partnery pro laboratoře PALS a SOFIA jsou specializovaná evropská i „zámořská“ výzkumná laserová centra. Vlastně již samotný nápad přestěhovat laser Asterix do Prahy by vůbec nevznikl bez úzkých vědeckých kontaktů dřívějšího Oddělení plynových laserů FZÚ se skupinou prof. K. J. Witte v MPQ Garching. Interakční komora PALSu, rentgenový laser PALS a předběžné simulační studie aplikace OPCPA techniky na PALSu jsou zase plodem velmi výhodné spolupráce s LULI a Universitě Paris Sud ve Francii a s RAL ve Velké Británii.

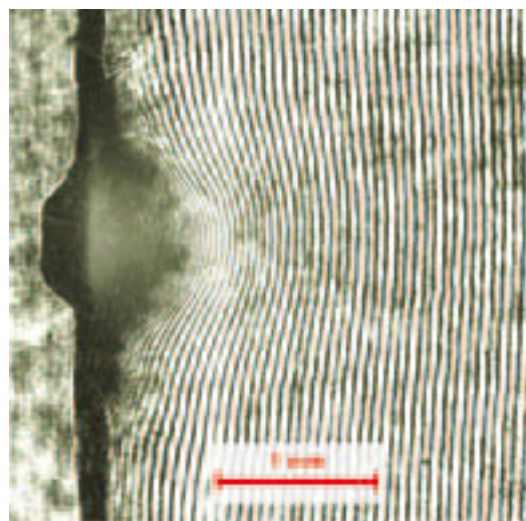
Od svého vzniku je laboratoř PALS členem tzv. evropského Lasernetu, sdružujícího dnes celkem 15 dalších evropských laserových laboratoří (MBI Berlin, ARMINES-LOA Paříž, CNRS-LULI a CELIA, CEA-SLIC a CESTA, CCLRC-CLF Oxfordshire, FIZ Chemie Berlin, FORTH Heraklion, FSU Jena, GSI Darmstadt, LENS Florencie, LLC Lund, POLIMI-CUSBO Milán, PIVUT Vídeň, VULRC Vilnius, LCVU Amsterdam) se sedmnácti různě velkými a výkonnými laserovými zařízeními rozmanitých typů, z nichž však jen dva jsou svou velikostí srovnatelné s laserovým systémem PALS.

Zcela samostatnou kapitolou je účast laboratoře PALS na evropském programu *Transnational Access to Major Research Infrastructures* (5. rámcový program EU), v jejímž rámci Evropská komise částečně dotuje provoz našeho laseru a financuje k němu přístup vybraným evropským výzkumným týmům. Na evropském „laserovém trhu“ je PALS velmi žádaným zbožím, jeho kapacita nestačí poptávce. Od září 2000 do dubna 2003 se u nás vystřídal 98 zahraničních výzkumných pracovníků z Německa, Francie, Itálie, Polska a Nizozemí, kteří zde uskutečnili 26 několikátýdenních sérií experimentů a strávili na PALSu celkem 1178 dnů. Od letošního roku je PALS zapojen též do evropského programu

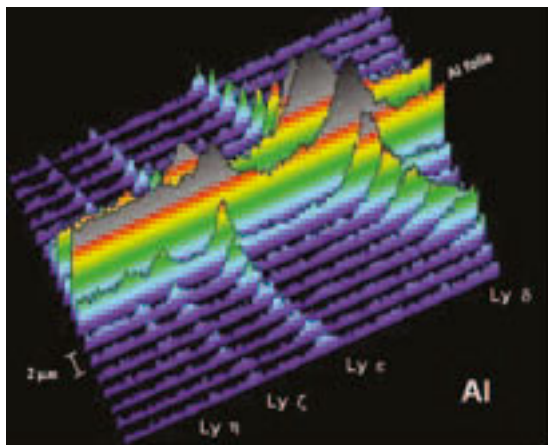
INTAS, zaměřeného na podporu spolupráce s Ruskem a dalšími zeměmi bývalého SSSR.

Většina z dosavadních uživatelských projektů doporučených k realizaci na PALSu mezinárodní výběrovou komisí (tzv. User Selection Panel) sleduje dva hlavní směry: vývoj a využití intenzivních laserových zdrojů měkkého rentgenového záření, včetně rentgenových laserů, a vývoj a využití laserových zdrojů mnohonásobně nabitých iontů. Hlavní motivací jsou přitom rýsuující se aplikace takovýchto zdrojů v řadě vědních oborů i nových pokročilých technologiích. K tomu je samozřejmě nezbytná důkladná znalost samotného zdroje, tj. laserového plazmatu. A právě vývoj speciálních metod diagnostiky laserového plazmatu, od laserové interferometrie přes rentgenovou dozimetrii až po rentgenovou spektroskopii, je náplní třetí velké skupiny uživatelských projektů. Zbývající projekty jsou pak zaměřeny na studium rázových vln generovaných laserovým svazkem v rozmanitých terčích.

Základem i doplňkem zahraničních uživatelských projektů na PALSu jsou domácí projekty zaměřené jednak na další vývoj a zdokonalování laseru samotného a jeho diagnostických systémů, na optimalizaci rentgenového laseru, na aplikace laserových rentgenových zdrojů, ale též např. na již zmíněné termální vyhlazování nehomogenit laserového plazmatu či na studium fotochemických procesů v laserem iniciovaných výbojích ve směsích plynů. Vedle pracovníků PALSu se na nich podílejí naši kolegové z celé řady českých vysokoškolských i akademických pracovišť (FJFI a FEL ČVUT, ÚFCHE, ÚRE, ÚPT a ÚJF AV ČR), nemluvě o ÚFP AV ČR, který patří díky společnému pracovišti PALS přímo „do rodiny“. Podrobnější informace o jed-



17/ Interferogram laserového plazmatu v počátečním stadiu expanze (diagnostický laserový svazek 3ω , zpoždění 6 ns, fóliový Al terčik, $E = 95$ J, PALS v. 4953). Rozměry zobrazené oblasti 3,3 x 3,3 mm.



18/ Prostorově rozlišené rtg. spektrum Al plazmatu (foliový terčik, čáry Lymanovy serie, PALS v. 2715)

notlivých projektech, aktualizované seznamy publikací a výroční zprávy a další informace jsou umístěny na internetových stránkách sekce (www.fzu.cz/struktura/sekce/vykonsys.html), laboratoře PALS (www.pals.cas.cz) a výzkumného centra laserového plazmatu (www.pals.cas.cz/lprc). Proto zde uvedeme jen pár příkladů.

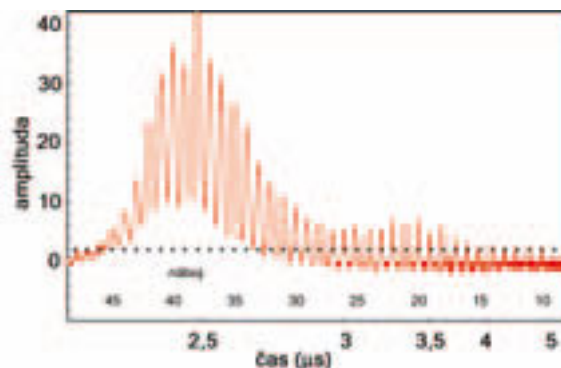
Skupina bodových laserových zdrojů nekoherentního rentgenového záření v oblasti energií desítek až stovek eV nachází své uplatnění mj. i v rentgenové mikroskopii biologických objektů nebo v rentgenové litografii, která se má vbrzku stát základní metodou výroby nové generace mikročipů v elektronickém průmyslu. Tento směr sledovaly zejména společné experimenty s polskou skupinou Henryka Fiedorowicze z MUT ve Varšavě, založené na využití plynového laserového terčiku generovaného originální polskou dvojitou supersonickou tryskou. U plynového terčiku na rozdíl od pevného nedochází k rozletu jeho rozprášených zbytků (debris), což umožňuje realizovat čistý rentgenový zdroj, ideální pro studium interakce rentgenového záření s hmotou [L. Juha, J. Krása, A. Präg a kol., *Surf. Rev. Lett.* **9**, 347 (2002)]. V experimentech s holandskou skupinou Fredericka Bijkerka z FOM Rijnhuizen se využívá možnosti studovat na PALSu generování rentgenového záření při různých harmonických frekvencích laserového svazku, od infračervené až po ultrafialovou oblast. Skupina Andrey Bernardinello z University Milano-Bicocca zase na PALSu získala pozoruhodné kontaktní rentgenogramy vnitřní struktury různých živých mikroorganismů [viz např. D. Batani, C. Botto, M. Moret a kol., *Eur. Phys. Jour. D* **21**, 167 (2002)], mj. i červa *Caenorhabditis elegans*, jehož výzkum byl v jiné souvislosti nedávno odměněn Nobelovou cenou.

Iontový program patří u nás již k tradičním směrům výzkumu. Jeho celosvětovým cílem je vyvinout universální iontové zdroje jednak pro průmyslovou iontovou implantaci, jednak jako

injektory velkých urychlovačů částic. Laserové iontové zdroje jsou totiž schopny generovat ionty s prakticky libovolným atomovým číslem a s energií dosahující desítek MeV, těžší ionty pak s velmi vysokým nábojem ($Z > 50$). Vysoké energie generovaných iontů, velké proudové hustoty a částečná směrovost iontových toků činí laserové iontové zdroje velmi atraktivními, a to jak v konkurenci s klasickými iontovými zdroji, tak v kombinaci s nimi.

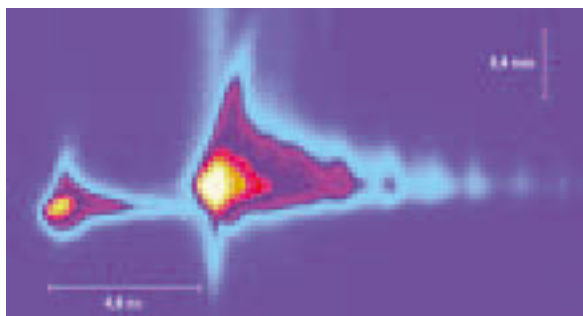
Hlavním zahraničním partnerem v této oblasti a současně předkladatelem několika uživatelských projektů pro PALS je varšavský IFPLM, jmenovitě skupiny Jerzyho Wołowského a Tadeusze Pisarczyka. Iontových experimentů na PALSu se zúčastňují rovněž italské kolegyně Lorenzo Torrisi z university v Messině a Santo Gammino z INFN-LNS v Catanii. Stálou teoretickou inspiraci jim poskytuje i neúnavný Heinrich Hora. Výsledkem velmi podrobných iontových měření jsou informace o vlastnostech iontů generovaných při interakci laserového svazku různých energií a barev v závislosti na podmínkách fokusace, zejména na poloze ohniska laserového svazku vůči povrchu kovových (Al, Mo, Ta, Cu, Ag, Au) i polymerních (PMMA, PTFE, PET) pevných terčiků [J. Wolowski, J. Badziak, F. P. Boody a kol., *Plasma Phys. Control. Fusion* **44**, 1277 (2002); J. Krasa, L. Laska, K. Rohlena a kol., *Laser and Particle Beams* **20**, 109 (2002)]. Cenný srovnávací materiál poskytují experimenty s generací iontů prováděné na neodymových laserech s velmi krátkými ps impulzy v IPPLM ve Varšavě a v LNS Catania. Konečnými zájemci o nové iontové zdroje jsou jednak laboratoře provozující velké urychlovače částic (např. evropské jaderné středisko CERN, GSI Darmstadt, DESY Hamburg) a jednak soukromé firmy vyrábějící implantátory, zastoupené v iontovém programu na PALSu např. firmou Ion Light Technologies z německého Bad Abbachu.

Tak bychom mohli pokračovat dále, od experi-



19/ Nábojové spektrum Ta iontů registrované elektrostatickým iontovým analyzátozem (poměr $E/Z = 30$ keV/nábojové číslo, časová osa lineární v nábojovém čísle, PALS v. 5251)

mentů s rázovými vlnami skupiny Dimitri Bataniho z University Milano-Bicocca (studium stavových rovnic materiálů při vysokých tlacích [Batani D., Tomasini M., Olivotto C. a kol., Phys. Rev. Lett., bude publikováno a simulace astrofyzikálních procesů typu výbuchů supernov) přes laserovou interferometrii a simulaci impaktů meteoritů skupiny Tadeusze Pisarczyka z IPPLM [A. Kasperczuk, P. Pisarczyk, T. Pisarczyk a kol., Czech. Jour. Phys. **52**, 395 (2002)], rentgenovou dozimetrii rozvíjenou pracovníky PALSu ve spolupráci s polským kolegou Leszkiem Ryčem [J. Krása, A. Cejnarová, L. Juha a kol., Radiation Protection Dosimetry **100**, 429 (2002)] až po rentgenová spektroskopická studia vlnových procesů v laserovém plazmatu, prováděná Frankem Rosmejem a jeho spolupracovníky z Technické university v Darmstadtu [F. B. Rosmej, O. Renner, E. Krouský a kol., Laser and Particle Beams **20**, 555 (2002)] či týmem Eckharta Förstera z University Fridricha Schillera v Jeně [O. Renner, F. B. Rosmej, E. Krouský a kol., Jour. of Quantit. Spectroscopy & Radiation Transfer **71**, 623 (2001)].



20/ Časový průběh prostorového rozložení XUV záření expandujícího tantalového plazmatu generovaného dvěma laserovými pulzy. Vodorovně časová osa (odstup pulzů 4,6 ns), svisle prostorová souřadnice podél osy laserového svazku. Snímek pořízen rentgenovou streakovou kamerou Kentech.

Jako příklad mezioborového projektu zde uvedme naši spolupráci se skupinou Svatopluka Civiše z ÚFCH JH AV ČR. Jde při ní o výzkum chemických projevů laserových jisker indukovaných v různých směsích molekulárních plynů jednotlivými pulzy (~ 100 J) PALSu. Tyto mohutné jiskry nám slouží jako laboratorní modely dějů o vysoké hustotě energie (atmosférických výbojů, dopadů mimozemských těles atd.), probíhající v rané zemské atmosféře. Složení exponovaných směsí řídíme dle různých teorií jejího vzniku a vývoje, na čemž spolupracujeme se skupinou Jana Jehličky z katedry geochemie PŘF UK. Klíčovou otázkou pro nás je, jaké složení by musela atmosféra mít, aby v ní zmíněné děje mohly iniciovat chemické procesy vedoucí k molekulám potřebným pro vznik prvních živých soustav. Prakticky na všech výše uvedených experimentech



se kromě našich pracovníků podílely někdy i velmi rozsáhlé týmy spolupracovníků z mnoha členských i nově přidružených států

Evropské unie a z dalších zemí. S rostoucím mezinárodním renomé našich laserových laboratoří současně roste i zájem zahraničních badatelů o dlouhodobější pobyty u nás. Skutečnost, že se PALS stal nedávno oficiálním školicím pracovištěm doktorandů z EU a nově asociovaných zemí v rámci programu Marie Curie Training Sites, je ovšem pozoruhodná i tím, že stipendia zahraničních doktorandů hrazená Bruselům budou značně převyšovat platy jejich zdejších školitelů - našich nejlepších badatelů. Ale aby si evropští stipendisté také „něco užili“, budou zřejmě muset podstupovat obdobnou kalvárii jako například náš spolupracovník z německého Erlangenu Dr. Ansgar Präg, když se každoročně již po několik let vždy znovu pokouší obnovovat pracovní povolení, aby mohl dál pracovat ve FZÚ, ovšem za našich platových podmínek. Přitom budoucnost všech laserových zařízení Sekce výkonových systémů je nepochybně v dalším posílení evropské integrace. Evropský Lasernet jako celek, tedy i náš PALS, zcela nedávno se ctí uspěl s integrovaným projektem pro 6. evropský rámcový program, zahrnující jak společné výzkumné a vývojové práce na laserových zařízeních, tak koordinované uživatelské experimenty na nich. PALS se významnou měrou podílí na vývoji a využití rentgenových laserů a na vývoji nových vysoce výkonných laserových systémů. V rámci plánovaných uživatelských aktivit, které budou pokračováním programu Access, pak budeme moci zúročit čtyřleté zkušenosti s poskytováním laserového času pro experimenty evropských uživatelů v 5. evropském rámcovém programu. Pracoviště sdružená v Lasernetu se budou rovněž společně podílet i na formování evropské výzkumné strategie v oblasti výkonových laserů, laserového plazmatu a jejich využití jako součásti budování společného evropského výzkumného prostoru (ERA).

Obdobně i budoucnost laboratoře COIL spočívá v široké zahraniční spolupráci. Již dnes jsou jejími partnery pracoviště zabývající se vývojem obdobných chemických laserů v USA, Německu, Japonsku, Rusku, Izraeli, Číně, Indii a Koreji. Velmi těsnou spolupráci se podařilo navázat zejména s US Air Force Research Laboratory, Kirtland Base NM, finančně podporovanou prostřednictvím USAF EOARD (European Office of Aerospace Research and Development) v Londýně. Od roku 1998 se v Praze pravidelně pořádají specializované mezinárodní COIL R&D workshopy pod záštitou právě EOARD. Další vítanou příležitostí prezentovat nové originální výsledky bude pak XV Gas Flow and

Chemical Laser & High Power Lasers Conference (GCL-HPL 2004), která se bude konat příští rok v Praze pod záštitou FZÚ a za předsednictví Jarmily Kodymové.

CO ZBÝVÁ DODAT

Snad jen ještě podotknout, že další vývoj Sekce výkonových systémů je stále více v rukou nastupující, již čtvrté vědecké generace, jejíž výchova je dnes sice formálně záležitostí našich vysokých škol, ale prakticky věcí nás všech. Ačkoliv téměř všichni dnešní pracovníci sekce jsou absolventy odpovídajících oborů ČVUT nebo UK, badatelé se z nich stali na pracovištích akademie. Se svými kolegy na mateřských fakultách však stále udržují velmi čilé kontakty, které přivádějí do sekce řadu nových mladých spolupracovníků z řad studentů, dok-

torandů a postdoktorandů.

Velkým příslibem do příštích let jsou naši dnes již osvědčení badatelé středního věku, jako je Libor Juha, Tomáš Mocek, Bedřich Rus, Petr Straka a Michal Stupka nebo třeba Gabriela Kuhnová, Michaela Kozlová, Patricie Severová, Michal Bittner, Miroslav Čenský, Martin Divoký, Jan Dostál, Vít Jirásek, Jan Knyttl, Martin Mašek, Martin Smrž - to abychom také jmenovali alespoň některé z těch nejmladších. Kam až v budoucnu dovedou náš laserový výzkum lze dnes jen velmi těžko předvídat, ale nepochybně si povedou dobře. Podstatné je, aby jim i do budoucna Sekce výkonových systémů, ať už se jedná o PALS, SOFII či COIL, mohla nabídnout takové podmínky k práci, aby své zkušenosti, získané doma i v předních zahraničních laboratořích, mohli uplatňovat a rozvíjet právě u nás.

ČASOPISY VYDÁVANÉ VE FZÚ AV ČR

ČESKOSLOVENSKÝ ČASOPIS PRO FYZIKU

Založen v roce 1951.

vedoucí redaktor:

RNDr. Zdeněk Chvoj DrSc.

technická redaktorka:

Ing. Andrea Cejnarová Ph.D.

CZECHOSLOVAK JOURNAL OF PHYSICS

Založen v roce 1952.

vedoucí redaktor:

Ing. Pavol Pavlo, CSc.

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

Založen roku 1956 a od r. 1995 vydáván ve spolupráci s *The International Society for Optical Engineering* (SPIE).

vedoucí redaktor:

Ing. Jaroslav Nevřala

