



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky



Mgr. Ľudovít Haizer

Autoreferát dizertačnej práce

NELINEÁRNE INTERAKCIE FEMTOSEKUNDOVÝCH IMPULZOV S PLYNMI PRI VYSOKÝCH VÝKONOCH POĽA

na získanie akademického titulu philosophiae doctor

**v odbore doktorandského štúdia:
4. 1. 4. Kvantová elektronika a optika**

Bratislava 2017

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre experimentálnej fyziky, Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave.

Predkladateľ: **Mgr. Ľudvík Haizer**
Katedra experimentálnej fyziky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského v Bratislave
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Školiteľ: **Mgr. Ignác Bugár, PhD.**
Photonics Institute
Vienna University of Technology
Gußhausstraße 27-29, 1040 Vienna, Austria

4.1.4. Kvantová elektronika a optika
Kvantová elektronika, optika a optická spektroskopia

Predseda odborovej komisie:
prof. RNDr. Pavel Veis, CSc.
Katedra experimentálnej fyziky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského v Bratislave
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Obsah

1	Úvod	4
2	Nelineárne šírenie ultrakrátkych impulzov v plynnom prostredí	4
2.1	Optický prieraz	4
2.2	Generácia filamentov	5
3	Experimentálna aparatúra	6
4	Namerané výsledky a ich interpretácia	8
4.1	Potvrdenie nameraných výsledkov simuláciami	12
4.2	Experiment F-SPIDER	13
5	Záver	15
6	Literatúra	16

1. Úvod

V posledných desaťročiach sa veľmi zintenzívnili záujmy o nelineárne šírenie vysoko intenzívnych femtosekundových laserových impulzov kvôli možným progresívnym aplikáciám, ako je generovanie attosekundových impulzov, optické parametrické zosilnenie, časovo rozlíšená spektroskopia a iné. Intenzívne femtosekundové impulzy umožnili rozvoj mnohých nových oblastí aplikovanej fyziky. Jeden z najzaujímavejších javov v oblasti nelineárnej optiky v plynenej fáze pri vysokých výkonoch poľa je šírenie impulzov vo filamentoch na dlhé vzdialenosti, ktoré akoby popierali zákony difrakcie.

Pri prechode intenzívnych ultrakrátkych impulzov cez ionizovateľný plyn dochádza k množstvu spektrálnych, časových a priestorových nelineárnych optických transformácií, čo často vedie k dramatickému rozšíreniu spektra a generácii superkontinua. Generácia superkontinua je považovaná za sľubnú stratégiu pre syntézu impulzov s niekoľkými osciláciami poľa, ktoré predstavujú jednu z najprogresívnejších oblastí dnešných optických technológií [1]. Komplexný dynamický popis všetkých relevantných nelineárnych javov je veľmi náročný, vzhľadom k ich vzájomnému prepojeniu a zložitému časovo-priestorovému charakteru. Preto sú veľkým prínosom v analýze teoretické modely rozvoja poľa odvodené z Maxwellových rovníc, ktoré boli vyvinuté až na úroveň kvantitatívneho ohodnotenia experimentálnych výsledkov [2]. Pri dosiahnutí hlavného cieľa práce, ktorým bolo experimentálne rozšírenie a skúmanie možností skracovania Cr:Forsteritových femtosekundových impulzov, boli využité aj výsledky dedikovaných numerických simulácií.

2. Nelineárne šírenie ultrakrátkych impulzov v plynnom prostredí

V súčasnosti je veľký progres vo výskume nelineárneho šírenia intenzívnych ultrakrátkych impulzov v atomárnych a molekulových plynch. Najväčšou motiváciou pre túto oblasť je fakt, že priniesla možnosť vytvárania attosekundových impulzov na základe generácie vysokých harmonických frekvencií.

2.1. Optický prieraz

Pri sfokusovaní vysoko intenzívnych impulzov často dochádza v dielektrikách k optickému prierazu, tento jav je spojený s deformáciou materiálu a generáciou plazmy. Vývoj materiálu pod vplyvom intenzívneho poľa vedúceho k optickému prierazu sa dá rozdeliť na dve fázy. V prvej fáze neutrálne atómy absorbujú fotóny laserového žiarenia procesom multifotónovej ionizácie a prejdú zo základného stavu do ionizovaného. Ak

vznikne dostatočný počet voľných elektrónov inicializuje sa druhá fáza, kaskádová ionizácia. V tejto fáze elektróny absorbujú energiu laserového žiarenia cez pružné zrážky s neutrálnymi atómami a počas doby medzi zrážkami sú urýchľované elektrickým poľom žiarenia. Tento proces pokračuje až kým nedôjde k prierazu, k dramatickému nárastu hustoty iónov a elektrónov a vzniku plazmy [3].

2.2. Generácia filamentov

V mnohých prípadoch dochádza k nelineárnym javom, pri ktorých impulz ovplyvňuje sám seba cez zmeny, ktoré vyvolal v prostredí. Do kategórie týchto javov patrí aj samofokusácia, ku ktorej dochádza z dôvodu intenzitne závislého indexu lomu. Pri šírení sa impulzu s Gaussovým priestorovým rozložením intenzity vníma väčší index lomu v strednej časti zväzku, ako na krajoch, a dochádza k jeho fokusácii. Proti tomuto efektu pôsobí lineárna difrakcia, ktorej vplyv je presne opačný a spôsobuje divergenciu zväzku. Keď sa efekt týchto dvoch protichodných javov vyrovná, nastane situácia, keď sa šírka zväzku počas prechodu daným prostredím nemení. Tento efekt rovnováhy má prahový charakter, a je inicializovaný keď špičkový výkon impulzu dosiahne hodnotu [4]

$$P_c = \frac{3.77\lambda^2}{8\pi n_2 n_0}, \quad (29)$$

kde λ je centrálna vlnová dĺžka impulzu, n_0 je lineárny a n_2 je nelineárny index lomu. Na základe tohto vzťahu hodnota kritického špičkového výkonu P_k pre samofokusáciu závisí iba od vlnovej dĺžky šíriaceho sa impulzu a od indexov lomov prostredia. . Keďže prah optického prierazu je nižší ako prah samofokusácie, v prípade dlhých impulzov dochádza najskôr ku generácii plazmy, ktorá postupne pohlcuje energiu impulzu a okrem toho má aj značný defokusačný charakter. Aby sme zabránili vzniku masívnej laserovej plazmy a dosiahli úroveň P_c , laserové impulzy musia byť dostatočne krátke nato, aby nedochádzalo ku kaskádovej ionizácii prostredníctvom zrážok voľných elektrónov. Pri predpoklade že vzniknutá plazma pozostáva iba z elektrónov, jej optické vlastnosti charakterizuje index lomu ktorý má tvar [5]

$$n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (30)$$

kde ω je centrálna frekvencia impulzu a $\omega_p = [4\pi e^2 N_e(t)/m]^{1/2}$ je plazmová frekvencia s časovo závislou elektrónovou hustotou $N_e(t)$ a konštantami charakterizujúcimi elektrón

(e - náboj a m – hmotnosť). Pretože vo väčšine prípadov je $\omega_p \ll \omega$ a predchádzajúci vzťah sa dá prepísať do tvaru $n = [1 - \omega_p^2/\omega^2]^{1/2} \cong 1 - \omega_p^2/2\omega^2$, na základe ktorého príspevok k celkovej zmene indexu lomu bude [5]

$$\Delta n_p \cong -\frac{\omega_p^2}{2\omega^2} = -\frac{4\pi e^2 N_e(t)}{2m\omega^2}. \quad (31)$$

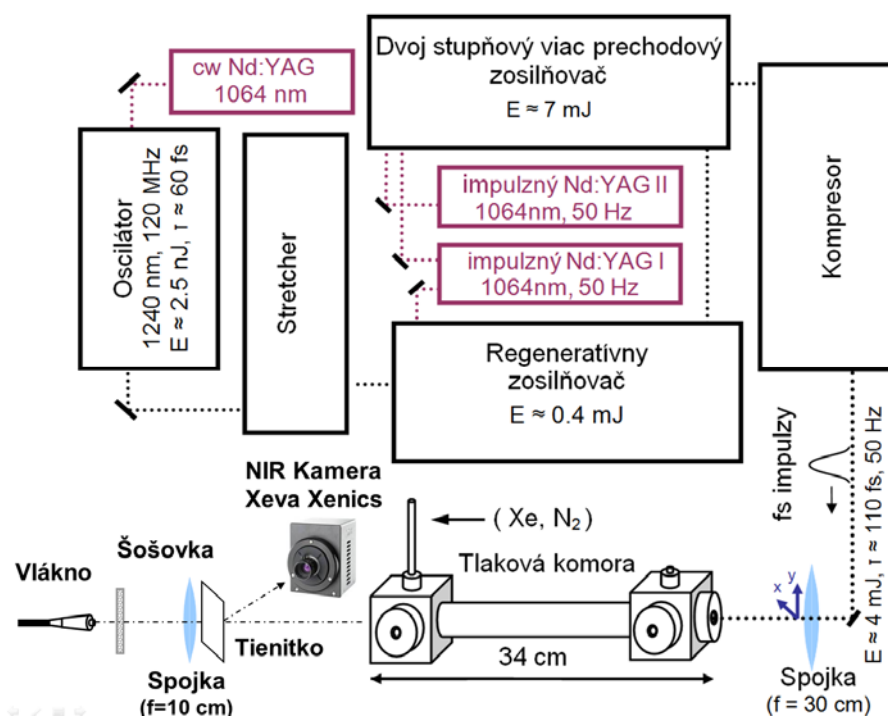
Zmena indexu lomu od plazmy je vždy záporná a preto dochádza k zmenšovaniu indexu lomu spôsobiacu defokusáciu zväzku. Výsledná zmena indexu lomu, ktorá bude pôsobiť v plynnom prostredí na impulz bude $n = n_0 + n_2 I - 4\pi e^2 N_e(t)/(2m\omega^2)$. Tento vzťah, ktorý charakterizuje index lomu pri šírení sa ultrakrátkych impulzov s vysokým výkonom v plynch, určuje aj podmienku rovnováhy pre vznik filamentu. V tomto prípade sa členy Kerrovej a plazmovej zmeny indexu lomu musia vyrovnať $n_2 I = 4\pi e^2 N_e(t)/(2m\omega^2)$, čiže impulzy v sumáre vnímajú počas šírenia sa vo filamentoch iba lineárny index n_0 . Táto podmienka určuje aj maximálnu intenzitu, ktorá sa môže v danom prostredí vo filamente šíriť. Dôsledkom toho je, že intenzita vo vnútri filamentu už nemôže viacej narastať a pri mnohonásobnom prekročení hodnoty kritického výkonu P_c sa filament rozpadne na viacero ďalších kanálov. Preto sa hovorí, že vo filamente je uväznená určitá hodnota intenzity (intensity clamping). [6]

V prípade filamentov je teda ešte potrebné odlišiť režim filamentácie, v ktorom sa príslušná intezita môže šíriť buď v jednom filamente alebo vo viacerých. Podľa toho rozdeľujeme režim single filamentácie a multifilamentácie. K multifilamentácii dochádza, ak sa niekoľko násobne prekročí kritická hranica samofokusácie P_c . Taktiež k procesu multifilamentácie prispieva zlá kvalita profilu zväzku, ktorá vedie ku vzniku viacerých filamentov. Pri šírení sa v režime single filamentácii dochádza k najúčinnejšej nelineárnej interakcii ultrakrátkych impulzov s plynom pozdĺž celej dĺžky filamentu s maximálnou (uväznenou) intenzitou.

3. Experimentálna aparátúra

Experimenty boli realizované v laboratóriu SIMS Medzinárodného laserového centra disponujúcim unikátnym Cr:Forsteritovým femtosekundovým laserovým systémom s centrálnou vlnovou dĺžkou 1240 nm. Základom laserového systému bol oscilátor CrF 65-P od firmy AVESTA na báze chrómom dopovaného forsteritového kryštálu ($\text{Cr:Mg}_2\text{SiO}_4$) [7]. Tento typ laserového oscilátora umožňuje generáciu 60 fs impulzov s energiou 2,5 nJ pri opakovacej frekvencii 120 MHz. Femtosekundové impulzy z oscilátora boli najskôr zosilnené

v regeneratívnom zosilňovači a potom v dvoch viacprechodových zosilňovačoch. Nakoniec impulzy na výstupe z laserového systému dosahovali energiu až 4 mJ, dĺžku 110 fs pri opakovacej frekvencii 50 Hz a s centrálna vlnovou dĺžkou impulzov 1240 nm (obr. 3.1).



Obr. 3. 1. Schéma femtosekundového Cr:Forsteritového laserového systému s dráhou šírenia impulzov interagujúcich pri prechode tlakovou komorou a dopadajúcich na registračné zariadenie

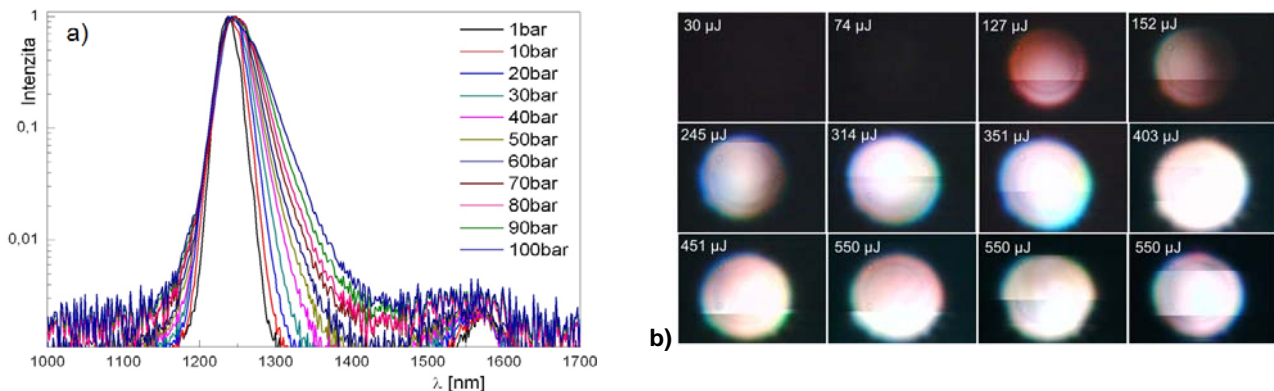
Okrem nekonvenčného laserového zdroja s vlnovou dĺžkou v oblasti nízkej disperzie optických materiálov, bola súčasťou experimentálnej aparatury aj unikátna tlaková komora. Táto vysokotlaková plynová komora pozostávala z masívnych hláv spojených 20 cm nerezovou oceľovou trúbkou a bola vybavená so samozarezávajúcimi vákuovými spojmi umožňujúce jej natlakovanie až na úroveň 100 barov (10 MPa, 1 bar = 100kPa). Každá hlava okrem ventilov pre prívod plynu obsahuje dve optické okienka jedno na bočné monitorovanie a druhé slúžiace na vstup a výstup impulzov v priamom smere šírenia sa laserového zväzku. V závislosti od hrúbky použitých skiel bolo možné natlakovať plynovú komoru až na jej hraničný tlak 100 barov. Ultrakrátke 110 fs impulzy boli pomocou dvoch zrkadiel zavedené do tlakovej komory tak, aby prechádzali jej stredom. Na dosiahnutie intenzity podľa potrebnej ku generácii plazmy vo vysokotlakovom plyne, bola pred komoru umiestnená spojná šošovka, ktorá využívala posuvný stojan umožňujúci posuv v oboch osiach x, y v kolmom smere na smer šírenia sa impulzov. Vzdialenosť od vstupného okna komory bola optimalizovaná, tak aby zväzok nebol orezaný na vstupe do komory, ale aby ani nedochádzalo k nelineárnemu ovplyvneniu pri prechode cez vstupné sklo [8]. Spoločným prvkom pri zaznamenávaní bol pri

všetkých meraniach spektrometer Ocean Optics NIR 512. Spektrálny rozsah tohto spektrometra pokrýva oblasť od 900 nm až do 1700 nm s rozlíšením 3 nm (FWHM). Pri zaznamenávaní spektier bola pred zberným vláknom spektrometra umiestnená matnica cez ktorú bol výstupný zväzok zafokusovaný na vstupné čelo vlákna. Takýmto spôsobom bol zabezpečený integrálny záznam spektier pokrývajúci celý prierez zväzku. Kvôli lepšej analýze získaných spektier bolo súčasťou zaznamenávania aj monitorovanie výstupného zväzku po prechode tlakovou komorou pomocou profesionálnej NIR kamerou Xenics Xeva-1.7-320. Záznamová plocha kamery je zložená z InGaAs detektorov so spektrálnou citlivosťou v oblasti 900 - 1700 nm a je chladená termoelektrickými článkami, čím je uspôsobená aj na registráciu slabých signálov s dynamickým rozsahom 2^{12} . Okrem toho poskytuje aj možnosť externej synchronizácie s laserovým systémom čím umožňovala zaznamenávanie výsledného priestorového profilu po jednotlivých impulzoch. Počas realizácie dizertačnej práce sa experimentálna schéma vyvíjala aj z hľadiska techniky zaznamenávania výstupu z komory, aj z hľadiska laserového systému. Laserový systém prešiel úpravou a došlo k zaradeniu tretieho stupňa zosilnenia a tým zvýšeniu výstupnej energie impulzov z 600 μJ na unikátne 4 mJ. Jednotlivé experimenty boli preto realizované v závislosti od aktuálneho dobudovania experimentálnej aparatury na jej výsledný schému popísanú vyššie.

4. Namerané výsledky a ich interpretácia

Prvé oboznámenie s experimentálnou aparaturou bolo realizované v úvodnom experimente, kde bol využitý pôvodný laserový systém iba s dvomi stupňami zosilnenia a profil výstupného zväzku sa zaznamenával pomocou web kamery. Táto séria experimentov slúžila na získanie prvotných poznatkov o femtosekundovom nelineárnom šírení v molekulárnom dusíku a vo vzácnom plyne, v xenóne. Počas experimentov sa ukázalo, že v prípade dusíka nebola energia v impulzoch dostatočná, lebo pri maximálnom tlaku 100 barov a pri fokusácii s ohniskovou vzdialenosťou 20 cm, nebol dosiahnutý prah optického prierazu na generovanie plazmy. Na druhej strane sa podarilo overiť lineárnu závislosť miery spektrálneho rozšírenia (obr. 4.1a), ktorá potvrdzuje lineárnu závislosť nelineárneho indexu lomu od tlaku [9, 10]. Odhalil sa aj dôležitý vplyv čirpu impulzov laditeľný pomocou mikrometrickej skrutky v kompresore zosilňovača, preto v prípade každého ďalšieho experimentu bolo prevedené nastavenie mikrometrickej skrutky ako súčasť justáže. Ďalším skúmaným plynom v rámci tejto série bol xenón, ktorý vykazuje nižší ionizačný potenciál

a zároveň aj vyšší nelineárny index lomu. To sa prejavilo pozorovaním generácie plazmy pri vyšších tlakoch už pri prvom stanovení tlakovej závislosti. Pomocou kamerových záznamov a závislosti od vstupnej energie impulzov bol určený kritický výkon 1,15 GW (energia 127 μJ v impulze) optického prerazu pri maximálnom tlaku 49 barov (obr. 4.1b). Ďalej sa podarilo ukázať dominantný vplyv samomodulácie fázy na spektrálne rozšírenie na základe symetrie spektier.

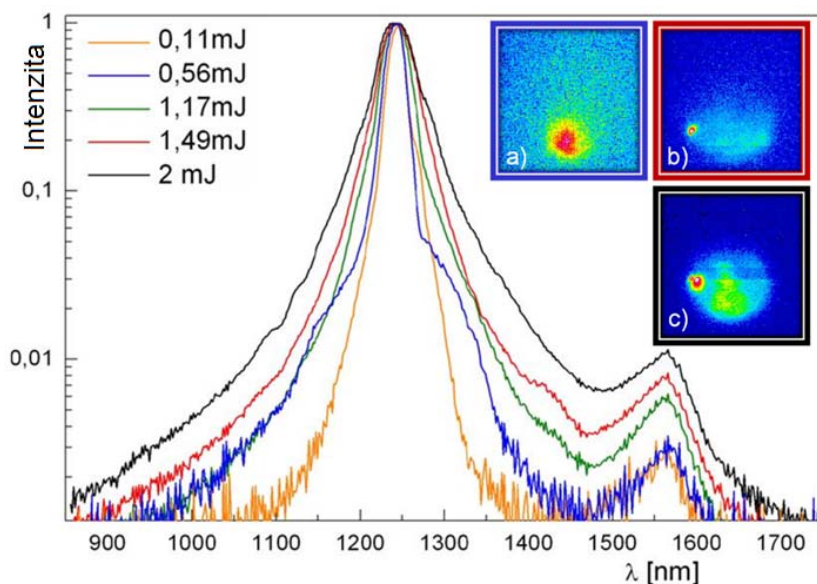


Obr. 4.1. a) Porovnanie spektier získaných pri použití šošovky s ohniskovou vzdialenosťou 20 cm a 30 cm v xenóne pri tlaku 45 barov indukovaných približne rovnakými energiami; b) Kamerové záznamy získané pri sérii energetickej závislosti v xenóne.

Podstatný pokrok v experimentálnom bádani prinieslo dobudovanie druhého stupňa zosilnenia vo viacprechodovom zosilňovači, čím laserové impulzy pri zachovaní opakovacej frekvencie a ich dĺžky, dosahovali energiu 4 mJ. Výsledkom toho bola veľmi intenzívna generácia plazmy v xenóne, čo viedlo k rozhodnutiu predĺžiť ohniskovú vzdialenosť fokusačnej optiky. Pri tlaku 45 barov boli porovnané výstupné vlastnosti impulzov pri použití spojky s ohniskovou vzdialenosťou 20 cm a 30 cm. Merania jednoznačne ukázali výhodu dlhšej ohniskovej vzdialenosti s väčšími spektrálnymi šírkami, lebo intenzita ionizačnej nelinearity sa stala podstatne menšou pri súčasnom zväčšení vplyvu Kerrovej nelinearity. Pri meraniach bolo identifikované maximálne rozšírenie pri energii 1,95 mJ, ktoré prinieslo zdvojnásobenie šírky spektra dosahujúcej hodnotu 54 nm vo FWHM.

Keďže najširšie spektrá boli registrované pri menšej energii vstupných impulzov ako maximálna, dalo sa predpokladať, že pri vyšších energiách dochádza k neefektívnemu šíreniu v komore. Z tohto dôvodu prebehla dôkladná analýza súčasných spektrálnych záznamov a záznamov CMOS kamery. Hoci CMOS kamera nie je citlivá v oblasti 1240 nm, vďaka rôznym nelineárnym spektrálnym transformáciám bola postačujúca na identifikáciu troch režimov šírenia: a) bez prítomnosti filamentov, b) vznik iba jedného filamentu (single filamentácia) a c) multifilamentácia [11, 12] (počiatočný filament sa rozpadne na viacero

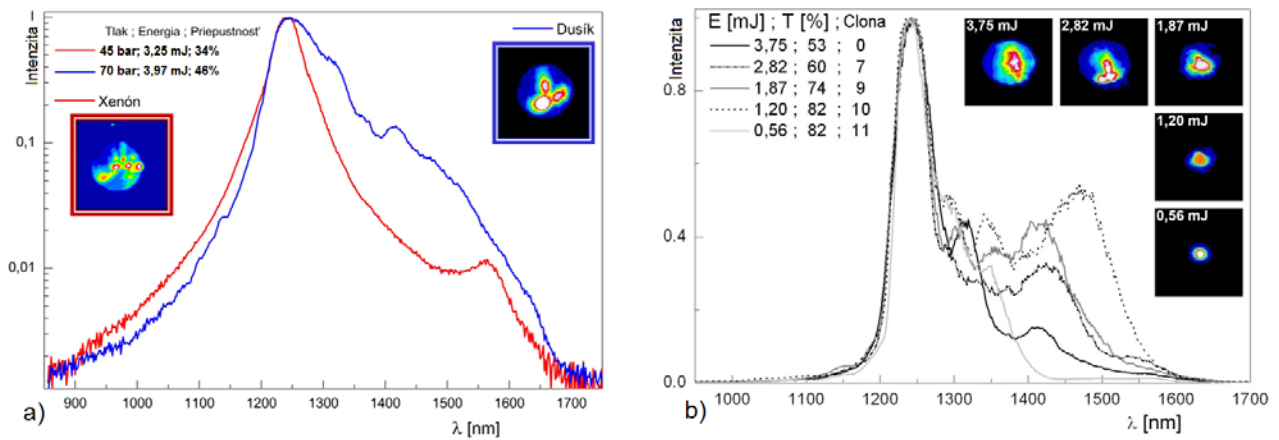
sekundárnych filamentov). Práve k tomuto režimu dochádzalo pri energiách nad 2 mJ, predstavujúc menej efektívne šírenie v komore aj z hľadiska spektrálnej šírky aj z hľadiska strát. Generácia jedného filamentu sa začínala okolo hodnôt 1,17 mJ a preto maximálne rozšírenie bolo namerané pri 1,95 mJ kedy ešte nebol dosiahnutý prah multifilamentácie (obr. 4.2).



Obr. 4.2. Závislosť výstupného spektra od vstupných energií impulzov pri použití šošovky s ohniskovou vzdialenosťou 30 cm a pri tlaku xenónu 45 barov. Vstupné energie pri ktorých boli priestorové profily zaznamenané sú znázornené farbami prislúchajúcich spektrálnych kriviek (a – 0,56 mJ, b – 1,49 mJ, c – 2 mJ).

Ďalším potvrdením režimu single filamentácie bolo meranie priepustnosti, ktorá pri multifilamentácii bola rádovo nižšia ako v režime generácie iba jedného filamentu. Výhodou režimu single filamentácie je interakcia s plynom s rovnakou intenzitou na celej dĺžke filamentácie. Intenzita žiarenia, ktorá je vo filamente uväznená vedie k najefektívnejšiemu nelineárnemu rozšíreniu spektra. Pri posledných meraniach bola na zaznamenávanie profilov zväzkov už využitá profesionálna NIR kamera Xenics Xeva so spektrálnou citlivosťou 900 - 1700 nm, ktorej záznamy prispeli tiež k rozoznaniu rozdielov medzi režimami single filamentácie a multifilamentácie. Ako výsledok xenónových experimentov boli vymedzené podmienky podporujúce single filamentáciu stanovením tlakovej a energetickej závislosti a ladením fázovej charakteristiky pomocou skrutky kompresora. Aby sa dosiahli čo najväčšie spektrálne šírky bolo potrebné znížiť tlak alebo energiu vzhľadom na ich maximálne hodnoty. Preto sa rozhodlo pokračovať pri totožných experimentálnych podmienkach s molekulárnym plynom dusíka so značne odlišnými nelineárnymi parametrami. Cieľom experimentov pri použití dusíka bolo dosiahnutie lepšieho spektrálneho rozšírenia než v xenóne pri plnej

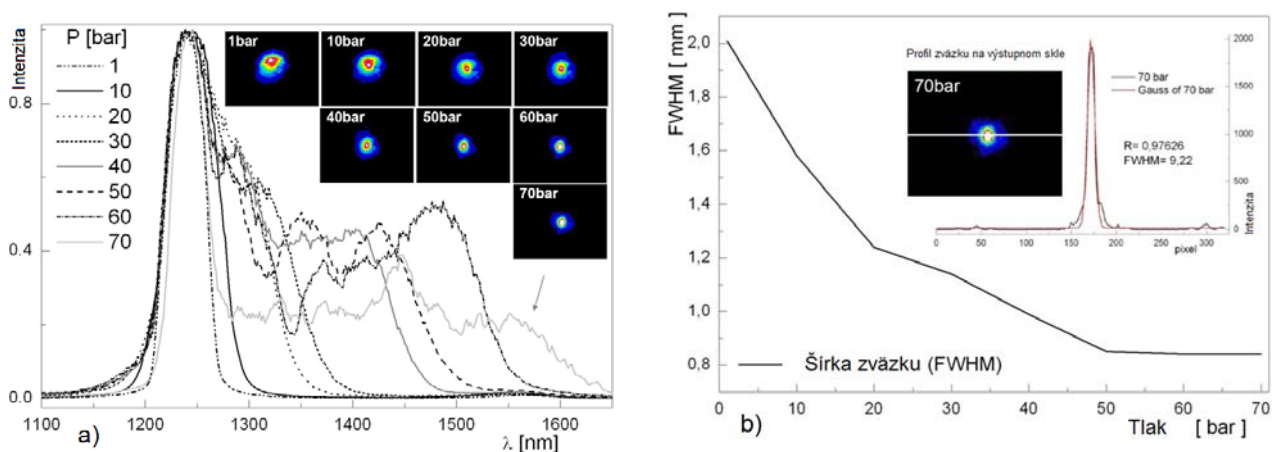
energii impulzov. Pri maximálnom možnom tlaku 70 barov (vzhľadom na použité 2mm sklá v tlakovej komore) dochádzalo aj v dusíku k procesu multifilamentácie (obr. 4.2a).



Obr. 4.2. a) Porovnanie rozšírenia spektra Cr:Forsteritových femtosekundových impulzov v dusíku a v xenóne pri maximálnych dostupných tlakoch a pri maximálnej energii impulzov; b) Rozširovanie spektra impulzov v dusíku pri 70 barov spolu so zodpovedajúcimi profilmi výstupného zväzku v závislosti od miery privretia irisovej clony

Šírka nameraného spektra prevýšila hodnoty získané v prípade xenónu, preto bola posledná etapa experimentálnej činnosti venovaná vyšetrovaniu tohto plynu.

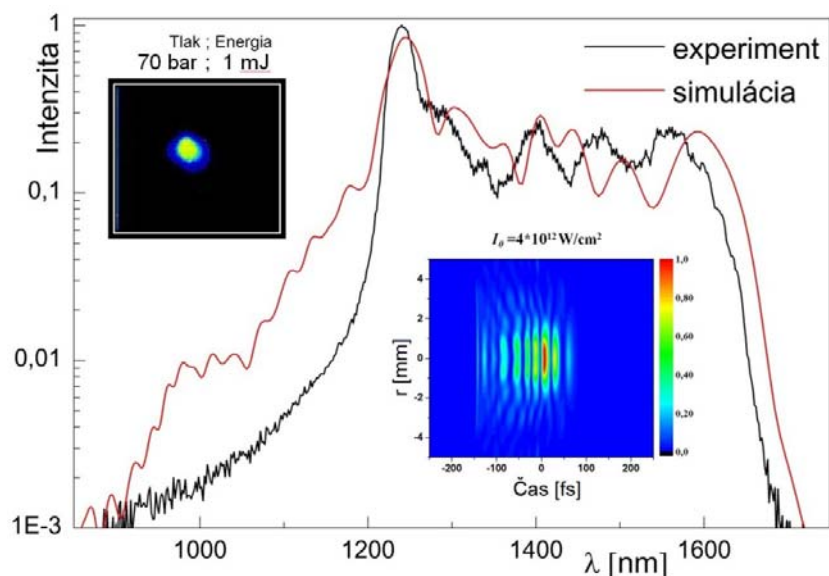
Ďalším krokom bolo tvarovanie vstupného zväzku pomocou irisovej clony. Postupné zatváranie clony vylepšilo profil vstupného zväzku pri súčasnom znižovaní energie impulzov (obr. 4.2b). Napriek tomu sa dosiahli výrazne väčšie výstupné spektrálne šírky ako pri použití neobmedzeného zväzku a maximálnej energie. Maximálne spektrálne rozšírenie bolo pozorované pri rozmere štrbiny 2 mm, ktorému zodpovedala energia 1,2 mJ a záznamy z infračervenej kamery potvrdili generáciu iba jedného filamentu.



Obr. 4.3 a) Závislosť výstupných spektier impulzov a profilu výstupného zväzku od tlaku dusíka v optimalizovaných podmienkach pri priemere irisovej clony 2 mm; b) Tlaková závislosť priemeru profilu zväzku na výstupe z tlakovej komory pri priemere irisovej clony 2 mm spolu s profilom zväzku a jeho prierezom pre tlak 70 barov.

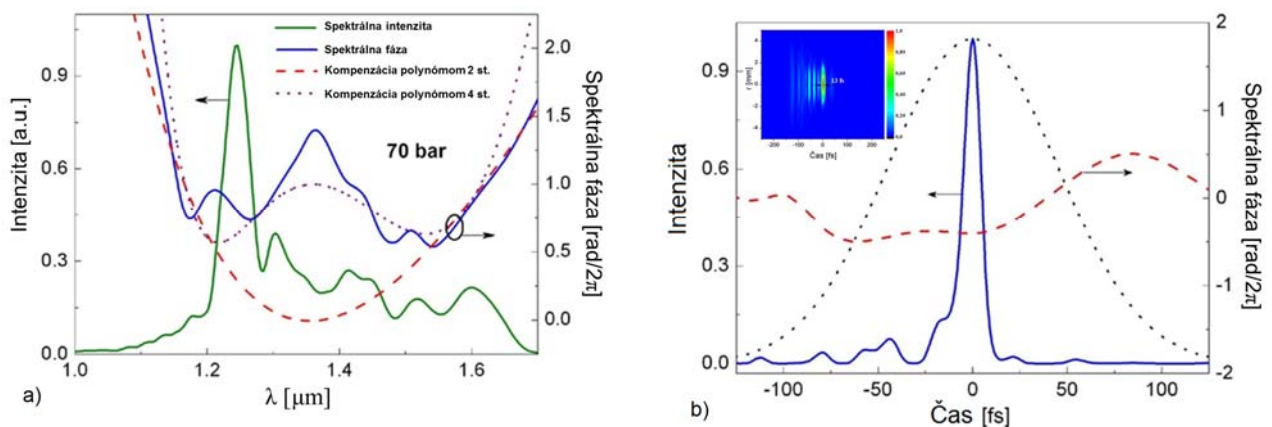
Následne bola vykonaná optimalizácia kompresorovej skrutky a pri šírke clony 2 mm realizovaná tlaková závislosť. Pri maximálnom tlaku 70 barov boli dosiahnuté podmienky pri ktorých spektrálne rozšírenie impulzov nadobúdalo takmer plochý asymetrický profil pokrývajúci oblasť 1100 -1600 nm s dominanciou a miernou moduláciou na červenej strane spektra (obr. 4.3a). Spektrálne štruktúry na červenej strane spektra sa vytvárali postupne a posúvali sa monotónne v smere k väčším vlnovým dĺžkam so zvyšujúcim sa tlakom resp. energiou impulzov. Tieto pozorovania naznačujú vplyv stimulovaného Ramanovho rozptylu na rotačnej energetickej štruktúre dusíka rozvíjajúcej sa kaskádovito počas vývoja filamentu. Tento koncept je v súlade so zaznamenanými profilmi výstupného zväzku a tiež s výsledkami iných autorov za podobných experimentálnych podmienok, pozorujúc spomínaný kaskádovitý efekt [13, 14, 15]. V rámci tejto práce popri monotónnom rozširovaní spektra v smere do infračervenej oblasti bolo zistené aj monotónne zužovanie výstupného profilu zväzku, pričom tento trend sa zastavil v rozsahu tlakov 50 – 70 barov (obr. 4.3b). Táto anomália môže súvisieť so skracovaním dĺžky filamentu kvôli nárastu ionizačných strát resp. v dôsledku disperzného rozširovania, pričom oba javy sa stávajú výraznejšími pri vyšších tlakoch. Skúmané deje v procese filamentácie sa týkali najmä analýzy rozširovania spektier s dôrazom na následné skracovania impulzov, ktorému zámeru boli venované aj numerické simulácie spolupracujúcich skupín [1].

4.1. Potvrdenie nameraných výsledkov simuláciami



Obr. 4.4. Porovnanie numerických simulácií s experimentálne nameranou spektrálnou intenzitou. V ľavom hornom rohu je priestorový profil zodpovedajúci nameranému spektru a v centre obrázka je vypočítaný časovo-priestorový priebeh impulzu na výstupe z komory.

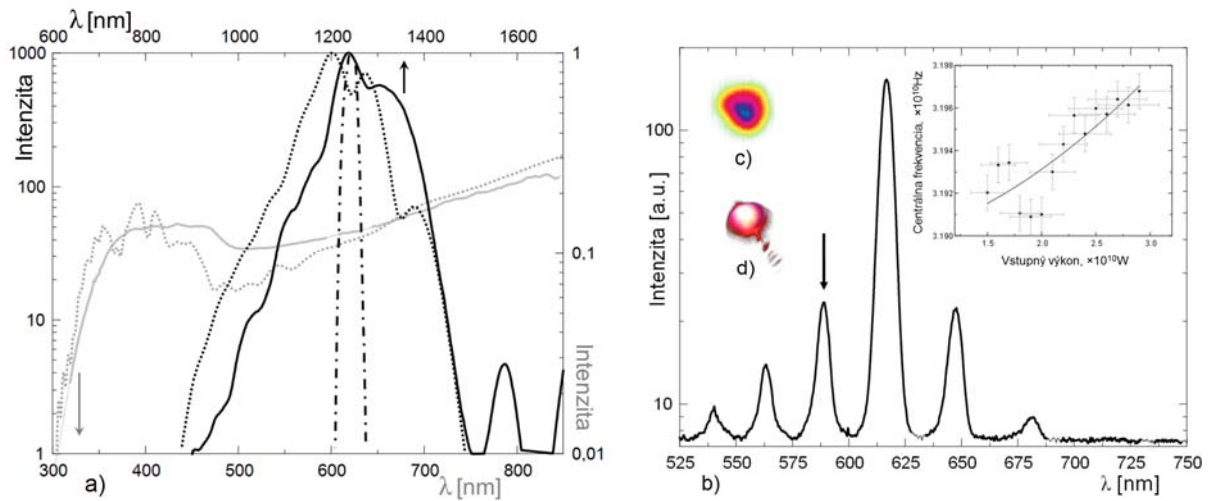
Experimentálne získané spektrá boli simulované pomocou priblíženia SEWA (slowly evolving wave approximation) na základe v priestore sa vyvíjajúceho optického poľa [3, 16, 17] a bola dosiahnutá veľmi dobrá zhoda (obr. 4.4). Numerická metóda potvrdila aj koncept filamentácie s dĺžkou filamentu 12 cm v súlade so získanými kamerovými záznamami, ktoré ukázali podstatne širšie zväzky na výstupe z komory ako predpokladaná hodnota šírky filamentu na úrovni 100 μm . Okrem spektrálneho a časového charakteru poľa výstupu numerických simulácií odhaľujú komplexný obraz o výstupnom impulze aj z hľadiska časového priebehu intenzity a fázy (obr. 4.5a). Tento aspekt numerických simulácií bol využitý na analýzu potenciálu skrátenia výsledného poľa v smere šírenia impulzov na úroveň niekoľkých oscilácií. Zistilo sa, že pri kompenzácii kvadratickej závislosti fázovej charakteristiky je možné skrátiť pôvodné 110 fs-ové impulzy až na úroveň 13 fs (obr. 4.5b), čo je pomerne jednoducho realizovateľné pomocou mriežkových kompresorov. Cestou kompenzácie fázovej charakteristiky až do výšky 4 rádu, čo je dosiahnuteľné pomocou špeciálne navrhnutých čirpovaných zrkadiel sa dá dostať dokonca až na úroveň 2,2 cyklu okolo centrálnej vlnovej dĺžky 1360 nm čo činí v prepočte 9 fs. Ďalšou možnosťou je nájsť podmienky filamentácie, v ktorých by sa impulz počas nelineárnej interakcie skrátil sám.



Obr. 4.5. a) Výsledky simulácii výstupného spektra (zelená čiara) na konci filamentu spolu so spektrálnou fázou (modrá čiara) vzniknutého superkontinua. Aproximácia spektrálnej fázy (červená / prerušovaná čiara) polynómom druhého rádu a (fialová / bodkovaná čiara) polynómom štvrtého rádu; b) Výsledky numerických simulácii skrátenia vstupného impulzu (modrá/bodkovaná čiara) po procese filamentácie: skrátený impulz (modrá/bodkovaná čiara) po kompenzácii spektrálnej fázy druhého rádu $\varphi^{(2)}$ (červená/prerušovaná čiara na obrázku 2.20). Červená/prerušovaná čiara zobrazuje reziduálnu fázovú charakteristiku skráteného impulzu po kompenzácii.

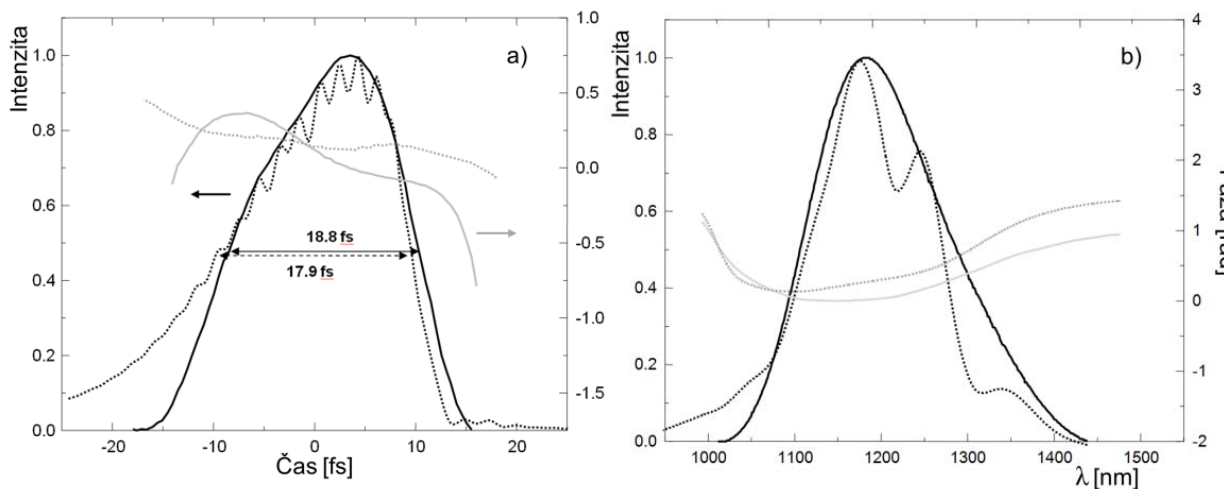
4.2. Experiment F-SPIDER

S týmto zámerom bol realizovaný posledný experiment nazvaný F-SPIDER, ktorý v plyne SF₆ zmiešaval fundamentálnu vlnovú dĺžku z laserového systému s jeho druhou harmonickou (obr. 4.6a) s cieľom komplexnej diagnostiky výstupného poľa [18, 19, 20].



Obr 4.6. a) Rozširovanie spektra po prechode vysokotlakovou komorou pri tlaku 16 barov (čierna krivka) spolu so vstupným spektrom z lasera (bodkočiarkovaná krivka). Modré krídlo rozšíreného spektra siahajúce až do viditeľnej oblasti (šedá krivka). Príslušné bodkované krivky zodpovedajú simuláciám pomocou metódy GUPPE; b) Interferenčný obrazec je výsledkom interakcie základnej vlnovej dĺžky lasera a jeho druhej harmonickej pri šírení sa v režime single filamentu. Profil zväzku zaznamenaný (c) infračervenou kamerou; (d) kamerou vo viditeľnej oblasti. Závislosť frekvenčného posunu bočného píku prvého rádu (označený šípkou) od výkonu je vložená v pravom hornom rohu.

Interferenčný spektrálny obraz (obr. 4.6b) bol rekonštruovaný softvérom EFRAT, vyvinutým pre komplexnú diagnostiku ultrakrátkych impulzov metódou SPIDER. V tomto experimente bola nelineárna interakcia v plyne SF₆ využitá na splnenie podmienok frekvenčného posunu medzi interferujúcimi impulzmi. Aby sme si overili správnosť takéhoto postupu bol celý experiment simulovaný pomocou numerickej metódy GUPPE a výsledky priniesli veľmi dobrú zhodu s experimentálne zisteným charakterom výstupného impulzu. Dĺžka impulzu 18 fs, ktorá sa podarila pomocou rekonštrukcie z interferenčného obrazu získať, bola potvrdená aj výpočtami z numerickej simulácii (obr. 4.7).



Obr. 4.7 SPIDER rekonštrukcia (a) časového priebehu resp. (b) spektra impulzu (čierna krivka) na výstupe z vysokotlakovej komory spolu s (a) časovou resp. (b) spektrálnou fázou (šedá krivka). Bodkované sú vykreslené zodpovedajúce simulácie pomocou rovnice GUPPE

Je to pozoruhodný výsledok aj z hľadiska toho, že na diagnostiku impulzov bol využitý proces filamentácie bez potreby ďalšieho špeciálneho zariadenia, ale aj proces skrátenia prebehol bez použitia prídavných mriežok alebo čirpovaných zrkadiel. Sú to ojedinelé pozorovania na domácej pôde fotonického výskumu v oblasti generácie veľmi krátkych a energetických impulzov hodné ďalšieho vyšetovania.

5. Záver

Dizertačná práca bola venovaná problematike šírenia sa vysokoenergetických femtosekundových impulzov v plynných prostrediach, ktorá predstavuje jednu z najprogressívnejších oblastí aktuálneho vývoja laserových zdrojov. Nelineárne rozširovanie spektra impulzov a ich následné skrátenie je široko aplikovateľnou technikou pre syntézu impulzov s niekoľkými osciláciami poľa, ktorých základom sú generácie attosekundových impulzov cez proces generácie vysokých harmonických frekvencií. Je všeobecne známe, že s nárastom vlnovej dĺžky generujúceho poľa spektrálna šírka vysoko harmonických frekvencií v oblasti hlbokého UV žiarenia rastie a tým aj jeho potenciál pre prípravu ešte kratších attosekundových impulzov. Preto sa vo všeobecnosti hľadajú nové alternatívy vysokoenergetických femtosekundových zdrojov s dlhšími vlnovými dĺžkami v porovnaní s klasickým Ti:Zafírovým prístupom. Z tohto pohľadu štúdium spektrálneho rozširovania Cr:Forsteritových femtosekundových impulzov je vysoko aktuálnou problematikou s potenciálom skúmania mnohých fundamentálnych otázok dlhovlnnej femtosekundovej nelineárnej optiky.

Okrem aktuálnej problematiky generácie attosekundových impulzov ďalšie rôzne nelineárne optické procesy môžu byť buď výhodnejšie, pri vlnovej dĺžke 1240 nm. Laserová filamentácia je typickým príkladom, lebo vo femtosekundovom filamente môže byť uväznená väčšia energia a môže siahať na dlhšie vzdialenosti pri posune budiacej vlnovej dĺžky od 800 nm smerom k infračervenej oblasti. Výskum v oblasti filamentácie je zaujímavý nielen z hľadiska rozširovania spektra, ale aj z hľadiska spektroskopického, respektíve prenášania vysokých laserových energií na veľké vzdialenosti. Preto sú výsledky extenzívneho výskumu laserovej filamentácie Cr:Forsteritových impulzov získaných počas realizácie tejto práce cennými poznatkami aj pre tieto smery. Porovnávali sa pri tom rôzne režimy filamentačného procesu pre prípad molekulárneho plynu dusíka a atomárneho plynu xenónu a to v rozsahu tlakov málo prebádanej oblasti vďaka použitiu špeciálnej vysokotlakovej komory.

Ďalším dôležitým aspektom práce bola aj jej lokalizácia v kontexte medzinárodnej spolupráce externého školiaceho pracoviska. Vďaka realizácii dizertačného projektu sa udržiaval kontakt s inštitútom MPQ Garching pre Kvantovú optiku a ďalšími pracoviskami, ktoré podporovali experimentálnu činnosť dedikovanými numerickými simuláciami. Ciele práce ohľadom experimentálneho štúdia nelineárneho šírenia Cr:Forsteritových femtoaekundových impulzov s dôrazom na proces filamentácie boli splnené a dosiahol sa značný pokrok aj v oblasti komplexnej diagnostiky výstupného poľa, ktorý predstavoval posledný cieľ práce. Plánovaná analýza potenciálneho skracovania impulzov s nelineárne rozšíreným spektrom bola obohatená vďaka výsledkom numerických simulácií, ktoré vykazovali veľmi dobrú zhodu s experimentálne nameranými spektrami. V sumáre prezentovaná výskumná činnosť priniesla mnohé nové poznatky, ktoré sú hodné ďalšieho bádania a sú dobrým podkladom pre rozvoj tejto progresívnej oblasti laserovej fyziky na Slovensku.

6. Literatúra

- [1] E. E. Serebryannikov, E. Goulielmakis, A. M. Zheltikov: Generation of supercontinuum compressible to single-cycle pulse widths in an ionizing gas, *New Journal of Physics*, Vol. 10, 093001, September 2008.
- [2] N. Aközbek, A. Becker, S. L. Chin: Propagation and Filamentation of Femtosecond Laser Pulses in Optical Media, *Laser Physics*, Vol. 15, No. 4, pp. 607-615, 2005.
- [3] A.W. Mizolek, V. Palleschi, I. Schechter, *Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)*, Cambridge University Press, 2006.
- [4] W. Liu, S. L. Chin: Direct measurement of critical power of femtosecond Ti:sapphire laser pulse in air, *OPTICS EXPRESS*, Vol. 13, No. 15, 2005.
- [5] S. L. Chin: *Femtosecond Laser Filamentation*, Springer, New York, 2010.
- [6] A. Becker, N. Aközbek, K. Vijayalakshmi, E. Oral, C. M. Bowden, S. L. Chin, Intensity clamping and re-focusing of intense femtosecond laser pulses in nitrogen molecular gas, *Appl. Phys. B* 73, pp. 289-290, 2001.
- [7] K. A. Subbotin, V. V. Slavkina, D. A. Lis, O. N. Lis and E. V. Zharikov, Evolution of Cr⁴⁺, Cr³⁺ and Cr²⁺ contents in Cr:Mg₂SiO₄ crystals during those oxidizing annealing, *2016 International Conference Laser Optics (LO)*, St. Petersburg, pp. R1-52-R1-52, 2016.
- [8] Haizer, E., Bugár, I., Lorenc, D., Buczynski, R., Uherek, F.: Nonlinear spectral broadening of femtosecond Cr:Forsterite laser pulses in multicomponent glasses, *Jemná mechanika a optika* . - Roč. 56, č. 3, pp. 67-71, 2011.

- [9] X. Qi, C. Ma, and W. Lin. Pressure effects on the femtosecond laser filamentation. *Optics Communications*. Vol. 358, pp. 126 – 131, 2016.
- [10] D. Kartashov, S. Ališauskas, A. Pugžlys, A. Voronin, A. Zheltikov, M. Petrarca, P. Bédot, J. Kasparian, J.-P. Wolf, and A. Baltuška, *Opt. Lett.* 38, pp. 3194-3197, 2013.
- [11] A. C. Englesbe, Z. He, J. A. Nees, A. G. R. Thomas, A. Schmitt-Scody, and K. Krushelnick. Control of the configuration of multiple femtosecond filaments in air by adaptive wavefront manipulation. *Optics Express*, Vol. 24, No. 6, pp. 6071 – 6082, 2016.
- [12] G. Point, E. Thouin, A. Mysyrowicz, and A. Houard. Energy deposition from focused terawatt laser pulses in air undergoing multifilamentation. *Optics Express*, Vol. 24, No. 6, pp. 6271 – 6282, 2016.
- [13] J. H. Odnher, E. T. McCole, and R. J. Levis. Filament-Driven Impulsive Raman Spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry A*, Vol. 115, pp. 13407 – 13412, 2011.
- [14] D. Uryupina, N. Panov, M. Kurilova, A. Mazhorova, R. Volkov, S. Gorgutsa, O. Kosareva, and A. Savel'ev. 3D Raman bullet formed under filamentation of femtosecond laser pulses in air and nitrogen. *Applied Physics B*, Vol. 110, pp. 123 – 130, 2013.
- [15] X. Chen, P. Polynkin, and M. Kolesik. Raman effect in self-focusing of few-cycle laser pulses in air. *Optics Letters*, Vol. 38, No. 12, pp. 2017 – 2019, 2013.
- [16] L. Bergé, S. Skupin, R. Nuter, J. Kasparian, and J. P. Wolf, Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media, *Rep. Prog. Phys.* 70, 1633, 2007.
- [17] A. Couairon and A. Mysyrowicz, Femtosecond filamentation in transparent media, *Physics Reports* 441, pp. 47-189, 2007.
- [18] Y. Nomura, H. Shirai, K. Ishii, N. Tsurumachi, A.A. Voronin, A.M. Zheltikov, T. Fuji, *Opt. Express* 20, p. 24741, 2012.
- [19] A. A. Voronin, Y. Nomura, H. Shirai, T. Fuji, A. Zheltikov, *Appl. Phys. B*, 117, 611, 2014.
- [20] T. Fuji, Y. Nomura, H. Shirai, N. Tsurumachi, A.A. Voronin, A. Zheltikov, „Phase-stable sub-single-cycle mid-infrared pulses generated through filamentation, *Research in Optical Sciences*, OSA Technical Digest ,Optical Society of America, paper HW3C.3, 2012.

Výskumné projekty

Ultrakrátké laserové impulzy s vysokými výkonmi v oblasti NIR
UK/632/2012, 2012. Grant Univerzity Komenského (1000€)
Hlavný riešiteľ: Mgr. Ľudovít Haizer

Práce

Haizer, Ľ.: Vlastnosti laserom indukovanej plazmy. Diplomová práca (Mgr.). Univerzita Komenského, 2009.

Haizer, Ľ.: Spektroskopia laserom indukovanej plazmy. Bakalárska práca (Bc.). Univerzita Komenského, 2007.

Zoznam publikácií

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (30%) - Bugár, Ignác (10%) - Serebryannikov, E. E. (30%) - Lorenc, Dušan (5%) - Uherek, František (5%) - Goulielmakis, Eleftherios (10%) - Zheltikov, Aleksei M. (10%): Intense Cr:forsterite-laser-based supercontinuum source
Lit. 32 zázň.

In: Optics Letters. - Vol. 39, No. 19 (2014), s. 5562-5565

Ohlasy (2):

[o1] 2015 Trunov, V. I. - Frolov, S. A. - Pestryakov, E. V.: Generation and parametric amplification of femtosecond radiation up to terawatt power in the mid-infrared. In: 21st International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics -Atmospheric Physics. Bellingham : SPIE, 2015, Art. No. 96803N - SCI ; SCOPUS

[o1] 2016 Mareev, E. - Bagratashvili, V. - Minaev, N. - Potemkin, F. - Gordienko, V.: Generation of an adjustable multi-octave supercontinuum under near-IR filamentation in gaseous, supercritical, and liquid carbon dioxide. In: Optics Letters, Vol. 41, No. 24, 2016, s. 5760-5763 - SCI ; SCOPUS

ADC02 Gregová Trenčanová, Marianna [UKOPRCFZ] (35%) - Szöcs, Vojtech [UKOPRCUS] (5%) - Halászová, Soňa [UKOPRCFZ] (5%) - Jerigová, Monika [UKOPRCFZ] (5%) - Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (5%) - Velič, Dušan [UKOPRCFZ] (35%) - Jáné, Eduard [UKOPRCFZ] (10%): Fluorescence Dynamics of Monocyclodextrin- and Bis(thiol-cyclodextrin)-Coumarin C153 Complexes

Lit. 37 zázň., 6 obr., 1 tab.

In: ChemPhysChem. - Vol. 16, No. 11 (2015), s. 2466-2473

Registrované v: scopus

Indikátor časopisu:

IF (JCR) 2015=3,138 [2014-3,419]

Kvartil Q:

wos-jcr -- Q2 [chemistry, physical] ; Q1 [physics, atomic, molecular and chemical] -- 2014

ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

ADF01 Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (20%) - Bugár, Ignác [UKOMFKEF] (20%) - Lorenc, Dušan (20%) - Buczynski, Ryszard (20%) - Uherek, František (20%): Nonlinear spectral broadening of femtosecond Cr:Forsterite laser pulses in multicomponent glasses
Lit. 9 zázň., 7 obr., 3 tab.
In: Jemná mechanika a optika. - Roč. 56, č. 3 (2011), s. 67-71

AFG Abstrakty príspevkov zo zahraničných vedeckých konferencií

AFG01 Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (30%) - Bugár, Ignác [UKOMFKEF] (30%) - Lorenc, D. (20%) - Uherek, František (5%) - Zheltikov, Aleksei M. (5%) - Goulielmakis, Eleftherios (5%) - Krausz, F. (5%): Ionization assisted nonlinear spectral broadening off femtosecond Cr: forsterite pulses in high pressure gas media
Lit. 3 zázň.
In: 20th International Laser Physics Workshop [elektronický zdroj]. - Sarajevo : University of Sarajevo, 2011. - nestr. [1 s.] [CD-ROM]
[LPHYS 2011 : International Laser Physics Workshop. 20th, Sarajevo, 11.-15.7.2013]

AFG02 Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (30%) - Bugár, Ignác [UKOMFKEF] (30%) - Lorenc, Dušan (20%) - Uherek, František (20%): Nonlinear spectral broadening of femtosecond Cr: Forsterite pulses in high pressure gas media
Lit. 3 zázň.
In: 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics Book of Abstracts. - Olomouc : Palacky University, 2012. - S. 62. - ISBN 978-80244-3193-2
[CPS 2012 : Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics. 18th, Ostravice, 3.-7.9.2012]

AFG03 Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (30%) - Bugár, Ignác [UKOMFKEF] (30%) - Lorenc, Dušan (10%) - Uherek, František (10%) - Goulielmakis, Eleftherios (10%) - Zheltikov, Aleksei M. (10%): Nonlinear spectral broadening of femtosecond Cr: Forsterite pulses in high pressure atomic and molecular gas
Lit. 3 zázň.
In: ECONOS Conference CARS Workshop Abstract Booklet and General Information. - Aberdeen : University of Aberdeen, 2012. - S. 30
[ECONOS 2012 : European Conference on Nonlinear Optical Spectroscopy. Aberdeen, 8.-11.7.2012]
[CARS Workshop 2012. Aberdeen, 8.-11.7.2012]

AFH Abstrakty príspevkov z domácich vedeckých konferencií

AFH01 Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (50%) - Bugár, Ignác [UKOMFKEF] (20%) - Lorenc, D. (20%) - Buczynski, Ryszard (5%) - Uherek, František (5%): Nonlinear spectral broadening of femtosecond Cr: forsterite laser pulses in glasses
Lit. 2 zázň.
In: 17th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics. - Žilina : EDIS, 2010. - S. 57. - ISBN 978-80-554-0238-3
[Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics 2010. 17th, Liptovský Ján, 6.-10.9.2010]

AFH02 Slušná, Lenka [UKOPRCFZd] (20%) - Noskovičová, Eva [UKOPRCFZd] (20%) - Balogh, Róbert (10%) - Végħ, Daniel (5%) - Milata, Viktor (5%) - Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (10%) - Lorenc, Dušan (20%) - Velič, Dušan [UKOPRCFZ] (10%): Optická charakterizáciapolymérov založených na benzo[1,2-b;4,5-b']ditiófen derivátoch na prípravu fotovoltických článkov
Lit. 2 zázň.
In: Interaktívna konferencia mladých vedcov 2016. Zborník abstraktov [elektronický zdroj]. - Bratislava : Preveda, 2016. - Abstract No. 1386 [1 s.] [online]. - ISBN 978-80-972360-0-7
[Interaktívna konferencia mladých vedcov 2016 : Preveda. 8., Bratislava, 5.5.-6.6.2016]
URL: <http://www.preveda.sk/conference/article/id=1386/>

AFH03 Slušná, Lenka [UKOPRCFZd] (20%) - Noskovičová, Eva [UKOPRCFZd] (20%) - Balogh, Róbert (10%) - Vég, Daniel (5%) - Milata, Viktor (5%) - Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (10%) - Lorenc, Dušan (20%) - Velič, Dušan [UKOPRCFZ] (10%): Optical characterization of polymer based on benzo[1,2-b;4,5-b']dithiophene derivatives for photovoltaic applications
In: 20th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics [elektronický zdroj]. - Žilina : University of Žilina, 2016. - S. 117 [USB kľúč]. - ISBN 978-80-554-1238-2 [Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics 2016. 20th, Jasná, 5.-9.9.2016]

BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

BDF01 Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (34%) - Bugár, Ignác [UKOMFKEF] (33%) - Lorenc, Dušan (33%):
Spektrálne rozšírenie femtosekundových impulzov pri vysokých tlakoch
Lit. 6 záz., 2 obr.
In: ChemZi. - Roč. 8, č. 1 (2012), s. 16

BDF02 Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (100%) : Nevídané vlastnosti svetla
In: Quark. - Roč. 21, č. 4 (2015), s. 47

BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

BEF01 Bugár, Ignác (20%) - Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (30%) - Stajanča, Pavol [UKOMFKEFd] (20%) - Čurilla, Ľubomír [UKOMFKEFd] (20%) - Lorenc, Dušan (5%) - Velič, Dušan (5%): Ultrarýchle spektroskopické procesy v molekulách a mikroštruktúrnych optických vláknach
Lit. 5 záz., 3 obr.
In: Fotonika 2013. - Bratislava : STU, 2013. - S. 51-54. - ISBN 978-80-970493-5-5
[Fotonika 2013 : výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. 8., Senec, 14.-15.2.2013]

BEF02 Bugár, Ignác (20%) - Haizer, Ľudovít [UKOMFKEFd] (40%) - Stajanča, Pavol [UKOMFKEFd] (40%):
Lineárna a nelineárna interakcia svetla s mikro- a nanoštruktúrnou látkou
Lit. 6 záz., 3 obr.
In: Fotonika 2013. - Bratislava : STU, 2013. - S. 11-14. - ISBN 978-80-970493-5-5
[Fotonika 2013 : výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. 8., Senec, 14.-15.2.2013]

Štatistika kategórií (Záznamov spolu: 13):

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch (2)
ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch (1)
AFG Abstrakty príspevkov zo zahraničných vedeckých konferencií (3)
AFH Abstrakty príspevkov z domácich vedeckých konferencií (3)
BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch (2)
BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných) (2)

Štatistika ohlasov (2):

[o1] Citácie v zahraničných publikáciách registrované v citačných indexoch (2)

31. 5. 2017