

Stvaranje i karakterizacija ultrakratkih pulseva u vidljivom dijelu spektra kroz nelinearno multimodno miješanje u optičkom vlaknu

Mentor: Silvije Vdović

Autor: Nikola Gredičak*

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

(Datum: 20. siječnja 2024.)

Sažetak

Prolaskom koherentnog laserskog pulsa kroz šuplje optičko vlakno ispunjeno argonom ili kriptomom, pri određenom tlaku i energiji pulsa, dolazi do proširenja spektra zbog nelinearnog optičkog Kerr efekta. U ovom seminaru se ograničavamo na vidljivi i infracrveni dio nastalog spektra pulsa te mjerimo njegova svojstva.

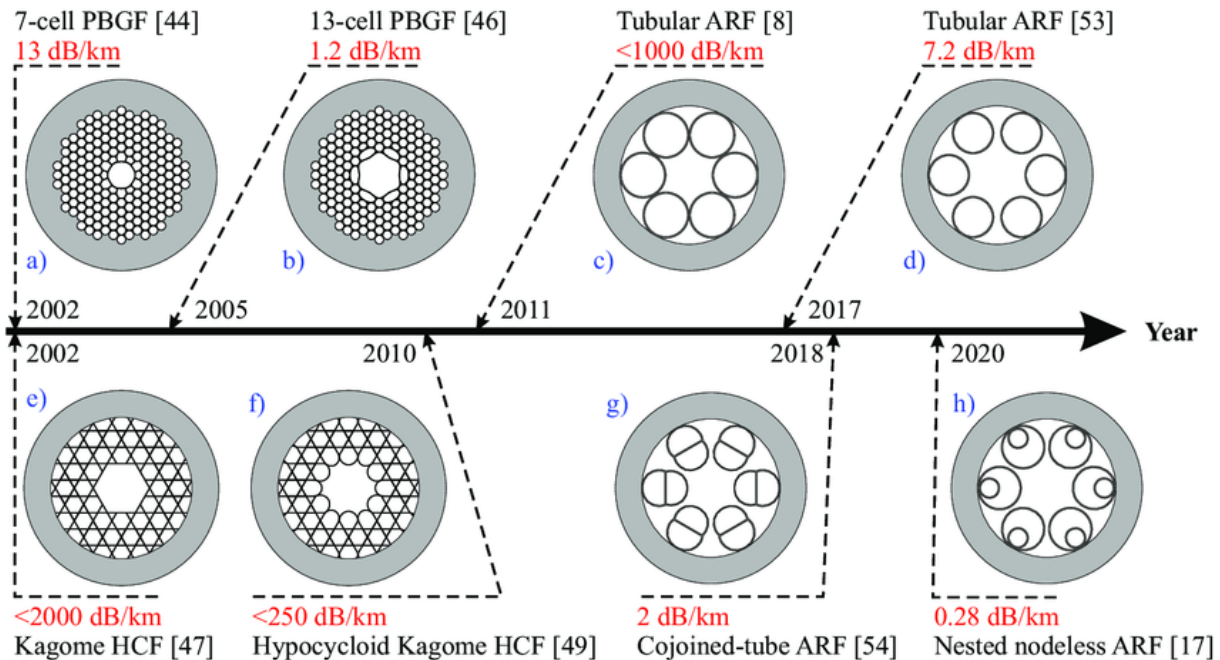
I. UVOD

Optička vlakna s šupljom jezgrom (eng. Hollow core fiber, HCF), predstavljaju transformacijski razvoj u optičkoj tehnologiji. Koncept je nastao u 1950-ima, ali praktična primjena suočavala se s izazovima sve do 1980-ih kada je postignut uspješan prijenos svjetlosti kroz šuplju jezgru [1]. Krajem 1990-ih predstavljena su optička vlakna s fotonskim kristalom (PCFs), novim dizajnom koji omogućuje napredno upravljanje svjetlom. Početkom 2000-tih pojavili su se određeni tipovi poput Kagome vlakana, idealnih za visokoenergetske lasere (Slika 1). Primjene su se proširile na telekomunikacije 2018. godine, prikazujući poboljšani prijenos podataka.

Optička vlakna s šupljom jezgrom specifičan su tip optičkih vlakana koji usmjerava svjetlost unutar šupljeg prostora, umanjujući gubitke u čvrstom materijalu, obično staklu. Standardno vođenje svjetlosti u vlaknima zahtijeva veći indeks loma jezgre od indeksa loma okolnog materijala, no u optičkom spektralnom području nije moguće postići indeks loma zraka ili vakuuma veći od indeksa loma stakla. Kako bi prevladali tu ograničenost, koriste se alternativni mehanizmi vođenja svjetlosti, poput iskorištavanja fotonskog zabranjenog pojasa u strukturama fotonskih kristalnih vlakana. Jednostavniji dizajn, poput revolver optičkih vlakana s šupljom jezgrom, uključuje uzorak silikonskih prstena oko šuplje jezgre, što pojednostavljuje proizvodnju. Unaprijeđene verzije, uključujući manje prstenove, dodatno smanjuju gubitke. Dodatne strategije, poput razdvajanja cijevi ili uvođenja "vlakana s negativnom zakrivljenošću," dodatno smanjuju gubitke optimizacijom

* ngredica.phy@pmf.hr

strukture stakla za antirezonantnost. Ovi pristupi naglašavaju inovativne načine vođenja svjetlosti i smanjenje gubitaka u optičkim vlaknima. U ovom radu proučavan je HCF koji s običnom šupljom



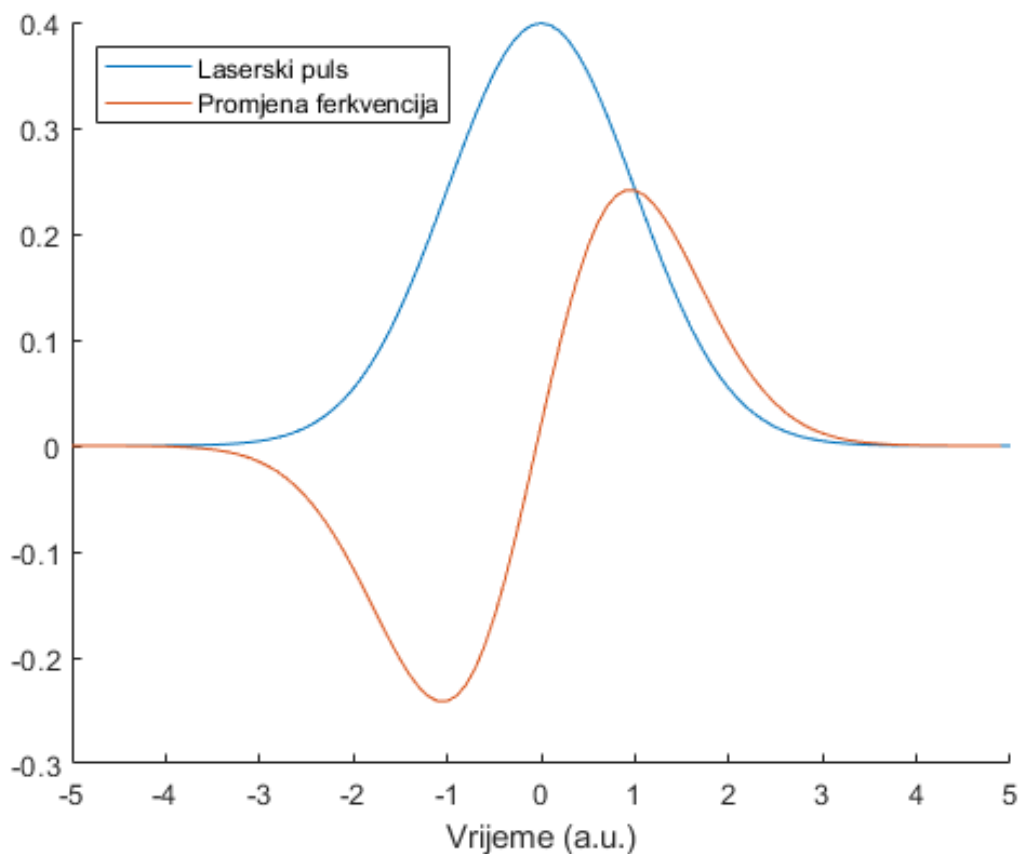
Slika 1. Razvoj HCF-a kroz vrijeme [2]. Uz svaki tip HCF-a navedena je i atenuacija na valnoj duljini od 1550nm.

jezgrom ispunjenom zrakom ili plinom, koja ima puno manji indeks loma od omotača. Velika razlika između tih indeksa također dovodi do stvaranja velikog broja modova, koji se mogu koristiti za generiranje širokopojasnog spektra, primjerice kroz efekt četverovalnog miješanja. Modovi se odnose na specifične prostorne oblike svjetlosnih valova koji se šire kroz vlakno, a određeni su geometrijom jezgre vlakna i disperzijom materijala vlakna. Propagacija laserskih pulseva duž HCF-a može se promatrati kao učestale refleksije pod malim kutovima na površini dielektrika. Budući da gubici uzrokovani tim višestrukim refleksijama uvelike diskriminiraju više redove modova, samo se osnovni mod može širiti u dovoljno dugom HCF-u. Prostiranjem ultrakratkih laserskih pulseva velikog intenziteta kroz HCF pokazuju nelinearni optički Kerr efekt, pojavu ključnu za generiranje širenja spektra. Široki spektar generiran nelinearnim efektima se zove superkontinuum (eng. Supercontinuum). Kerrov efekt je posljedica ovisnosti indeksa loma medija o intenzitetu laserske zrake

$$(1) \quad n \approx n_0 + n_2 I,$$

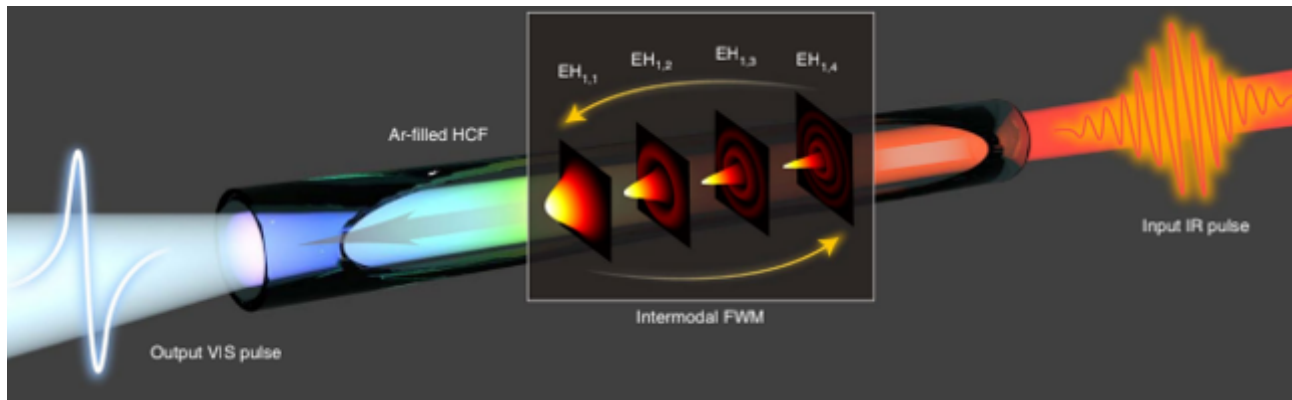
gdje je n_0 linearni indeks loma materijala, I intenzitet laserske zrake i n_2 nelinearni indeks loma. Intenzitet poprečnog presjeka zrake nije konstantan, već je intenzitet veći u centru nego li na

rubovima zrake pa dolazi do samofokusiranja zrake unutar materijala. Samofazna modulacija (SPM) je posljedica Kerrovog efekta u vremenskoj domeni gdje se propagacijom laserskog pulsa kroz medij optički spektar širi oko centralne valne duljine. Pojava SPM na pulsevima gausijanskog oblika rezultira da vodeći dio pulsa u vremenskoj domeni dobiva veće valne duljine, a prateći manje valne duljine od centralne (Slika 2). Samoustrmljenje je dodatna posljedica optičkog Kerr efekta.



Slika 2. Promjena trenutnih frekvencija unutar pulsa koju uzrokuje SPM. Vodeći dio pulsa dobiva manje frekvencije, a prateći veće frekvencije do centralne frekvencije pulsa.

Centar laserskog pulsa će inducirati nelinearni indeks loma koji se razlikuje od onog koje induciraju prateći i vodeći dio pulsa. Grupna brzina ovisi o indeksu loma te stoga centar pulsa se giba sporije zbog velikog intenziteta nego li krila pulsa. Puls se ustrmljuje prema pratećem krilu što uzrokuje širenje prema kraćim valnim duljinama. Daljnjim povećavanjem energije laserskog pulsa ili tlaka plina unutar HCF-a dolazi do dodatnog nelinearnog efekta četverovalnog miješanja (eng. Four Wave Mixing FWM). FWM je nelinearni optički fenomen u kojem tri vala međusobno djeluju kako bi proizveli novi val što je prikazano na Slici 3.



Slika 3. Vizualni prikaz generacije modova pomoću nelinearnog efekta FWM u HCF-u. Prostorna raspodjela intenziteta modova je prikazana $EH_{1,1,\dots,4}$ unutar HCF-a. $EH_{1,1}$ je nulti mod, a $EH_{1,4}$ je četvrti mod [6].

FWM je nelinearni proces trećeg reda jer proizlazi iz trećeg desnog člana

$$(2) \quad P(t) = \epsilon_0 \chi^{(1)} E(t) + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2(t) + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3(t) \dots,$$

gdje se pojavljuje nelinearni odnos između polarizacije P inducirane unutar dielektričnog medija i amplitude elektromagnetskog polja E [4]. Viši redovi modova se popunjavaju putem međumodalnog FWM duž smjera propagacije, gdje malena nesrazmjernost faza između njihovih različitih konstanti propagacije periodično mijenja smjer jačanja FWM. Rezultat je kontinuirana razmjena energije između osnovnih i viših modova na svakoj koherentnoj udaljenosti. Dok traje razmjena energije između modova (Slika 3) nove frekvencije se stvaraju unutar modova pomoću SPM-a. Viši redovi modova putuju sporije nego li niži redovi te se počinju međusobno miješati. Plave komponente na kraju bržeg moda se preklape s crvenim komponentama sporijeg moda. Tako se generiraju valne duljine u vidljivom djelu spektra. Rezultat je da se stvaranjem novih modova unutar HCF-a spektar laserskog pulsa još dodatno proširi [6].

SPM, samoustrmljenje i FWM su pojave koje su izuzetno važne za stvaranje superkontinuumu u HCF-u ispunjenim s plemenitim plinom. Plemeniti plin koristimo kao nelinearni medij čija svojstva određuje nelinearna susceptibilnost odnosno $\chi^{(2)}$ i $\chi^{(3)}$ o kojima ovisi efikasnost optičkog Kerr efekta i FWM. Kratki femtosekundni laserski pulsevi omogućuju precizno istraživanje molekularnih reakcija s visokom vremenskom razlučivošću, pridonoseći boljem razumijevanju bioloških, kemijskih i fizikalnih fenomena.

Vremenski oblik envelope ultrakratkih pulseva najčešće opisujemo Gaussijanom. Za takve pulseve vrijedi nejednakost

$$(3) \quad \Delta t \Delta \nu \geq \frac{2 \ln 2}{\pi} \approx 0.441,$$

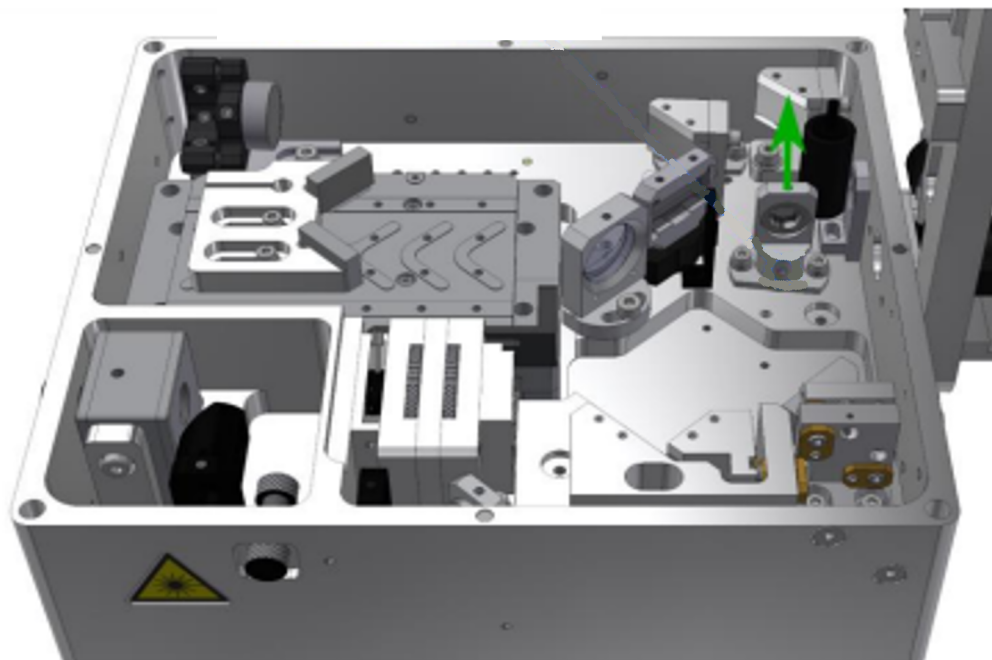
gdje vidimo da trajanje pulsa preko pune širine na pola maksimuma Δt se smanjuje dok spektralna širina pulsa $\Delta\nu$ širi. Nejednakost (3) izvorno proizlazi iz Fourierovih transformacija preko kojih dobivamo relaciju neodređenosti spektralno-vremenskog produkta. Puls teoretski ne može biti kraći nego li mu nejednakost (3) dopušta. Pulsevi ograničeni transformacijom (eng. transform-limited) su upravo granični slučaj te nejednakosti [5]. Naši ulazni pulsevi iz lasera su već ograničeni transformacijom te da bi dobili kraće pulseve moramo mu proširiti spektar. Manipuliranjem energijama laserskih pulseva te tlakom plina unutar vlakna može se kontrolirati širenje spektra. Širenje optičkog spektra u HCF-u se koristi kako bi se dobili pulsevi kraći nego li ulazni. Laserski pulsevi koji imaju proširene spektre zbog SPM-a se skraćuju s pomoću raznih tehnika kompresije laserskih pulseva (jer zbog cvrkuta više nisu ograničeni transformacijom), primjerice cvrkutnih zrcala, optičkih rešetki i prizmi. Izazovi uključuju: pravilno vođenje laserske zrake u vlakno, kontroliranje prostornih stupnjeva slobode vlakna, upravljanje visokim energijama laserskih pulseva, pravilno upravljanje tlakovima unutar HCF-a. Varijable koje mijenjamo su: energija laserskog pulsa i varijable HCF-a. Varijable HCF-a koja mijenjamo su vrste plinova kripton i argon te njihov tlak u optičkom vlaknu.

II. METODE I MATERIJALI

Korišten je, od proizvođača Few-cycle, jednomodalni HCF duljine 2.5 m, promjera šuplje jezgre nešto manje od 500 μm . Maksimalni dopušteni apsolutni tlak plina koji se nalazi u HCF-u je 3 bar. Prije svakog korištenja radila se optimalizacija geometrije vlakna kako bi propusnost laserske zrake bila najveća te kako bi se dobio stabilniji izlaz. Maksimalna efikasnost transmisije kroz HCF iznosila je oko 65%. Pulsni laser koji se koristio pri mjerenju je Light Conversion Pharos s maksimalnom energijom pulsa 500 μJ i trajanjem 170 fs na centralnoj valnoj duljini 1030 nm.

Prvo mjerenje širenja spektra kroz HCF se radilo pod različitim tlakovima argona. Širina spektra se određivala s HR4000 spektrometrom. Trajanje pulseva se mjerilo uz pomoć komercijalnog autokorelatora Light Conversion GECO koji omogućava mjerenje trajanje laserskih pulseva u rasponu od 10 fs do 20 ps (Slika 4). Raspon valnih duljina pulseva koje je moguće izmjeriti iznosi 500-2000 nm. Intenzitetska autokorelacija uz pomoć stvaranja drugog harmonika (eng. Second Harmonic Generation - SHG) je shematski prikazana Slikom 5.

Zraka prolazi kroz djelitelj snopa BS (eng. beam splitter) gdje dobivamo dva identična snopa. Koristimo translator da zakasnimo puls jedne zrake te ju preklopimo na nelinearnom beta-barij borat (BBO) kristalu. U slučaju kada se pulsevi u vremenu preklope na nelinearnom kristalu

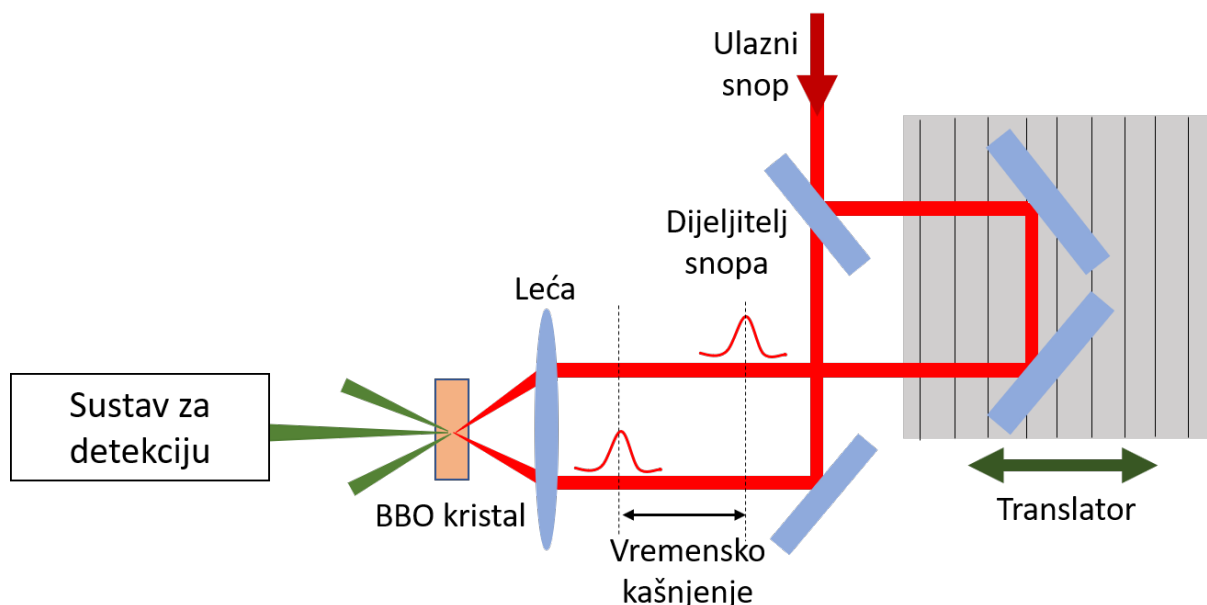


Slika 4. GECO uređaj za mjerenje karakterizacije pulseva korištenjem metode SHG autokorelacije i FROG-a [3].

dobiva se treći puls na valnoj duljini drugog harmonika upadnog zračenja. Smjer trećeg pulsa je u smjeru zbrajanja impulsa prva dva pulsa te mu intenzitet ovisi o njihovom vremenskom preklopu. Intenzitet bilježi fotodioda za jedan pomak translatora pa se s novim pomakom ponovi mjerenje te time dobivamo vremensku ovisnost. Za mjerenje gdje trebamo dobiti potpunu karakterizaciju laserskih pulseva koristimo spektrometar kao sustav za detekciju (Slika 5) te takvu metodu zovemo FROG (eng. Frequency Resolved Optical Gating). FROG metodom moguće je odrediti električno polje pulsa iz čega je lako dobiti intenzitet te spektar pulsa odnosno potpuno karakterizirati puls u vremenskoj i spektralnoj domeni.

Kroz HCF pod određenim tlakom kriptona su se puštali laserski pulsevi različitih energija. Za mjerenje spektralne širine koristio se Ocean Optics S2000 spektrometar koji nešto bolje pokriva infracrveni dio spektra do 1100nm. Za mjerenje karakterizacije pulseva kod HCF-a punjenog kriptonom su korišteni niskopropuštajući filteri od proizvođača Thorlabs FESH0700 (propuštaju 400-700nm) i FESH0800 (propuštaju 500-800 nm) prije ulaska u autokorelator. Mjerenjima vezanih uz kripton želimo dobiti karakterizaciju pulseva, u vidljivom dijelu spektra nastalog zbog FWM, te njihov spektralno-vremenski produkt (3) koji će biti indikator je su li pulsevi ograničeni

transformacijom ili se mogu još bolje kompresirati. Vidljivi dio spektra kod kriptona dobivamo zbog većeg $\chi^{(3)}$ koeficijenta što povećava utjecaj efekta FWM-a [8]. Zbog relativno niske efikasnosti međumodalnog miješanja tj. malog intenziteta vidljivog dijela spektra naspram osnovnog spektralno proširenog pulsa centriranoga u infracrvenom dijelu spektra oko 1030 nm filtri su bili nužni kako se ne bi prekoračio maksimalni intenzitet upadnog zračenja u autokorelator koji iznosi $5 \mu J$. Razlog korištenja FROG-a (Slika 5) kod HCF-a punjenog kriptonom je taj da dobivamo

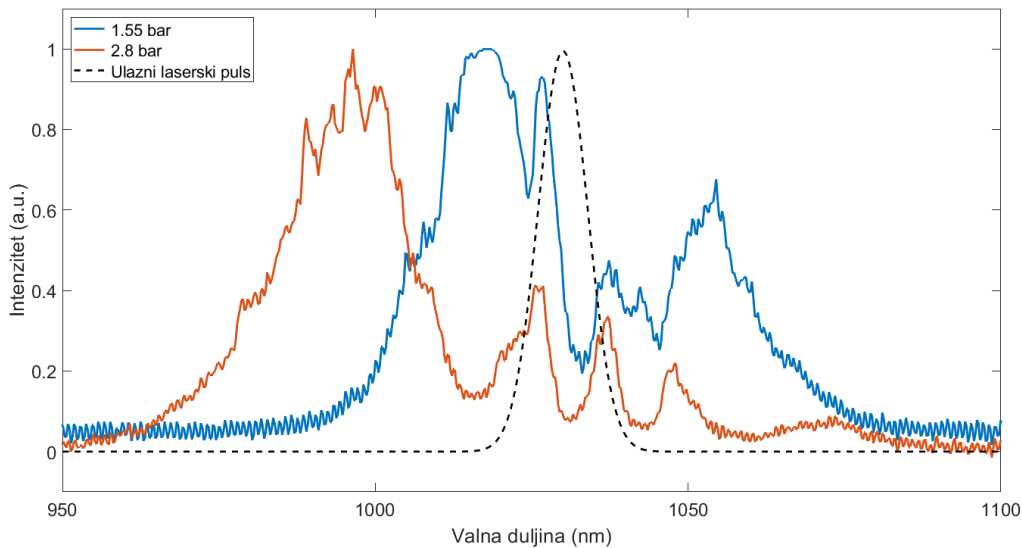


Slika 5. Shematski prikaz autokorelacijske i FROG metode. U slučaju FROG metode sustav za detekciju je spektrometar, a za autokorelaciju je fotodioda.

sveobuhvatnu karakterizaciju laserskog pulsa. FROG koristi sofisticirane iterativne algoritme za rekonstrukciju oblika impulsa iz dobivenih FROG mjerenja. Mjerenje karakteristika pulseva se radilo s pomoću GECO optičkog uređaja povezan optičkim vlaknom na spektrometar HR4000. Podaci su obrađeni na računalu s pomoću programa Frog 3 od Femtosoft Technologies. Program na računalu pogađa zakašnjelo električno polje pulsa te pomoću Fourier transformacija prevodi puls u frekventijsku domenu. Program izmjereni intenzitet u frekventijskoj domeni inverznim Fourierovim transformacijama prevodi u vremensku te uzima najsličnije električno polje izmjerenog pulsa koje prevodi natrag Fourierovim transformacijama u frekventijsku domenu. Naposljetku program uspoređuje pogodeno i najsličnije izmjereno električno polje u frekventijskim domenama. Iz usporedbe uzima grešku te ako je greška velika program ponovno pogađa električno polje [7].

III. REZULTATI I DISKUSIJA

Mjerenja izvršena na HCF-u ispunjenim argonom pod apsolutnim tlakovima 1.55 bar i 2.8 bar daju rezultat prikazan na Slici 6. Može se vidjeti značajnije širenje spektra s povećavanjem tlaka za koju je odgovorna SPM pojava. Može se zaključiti da nelinearni koeficijent indeksa loma ovisi proporcionalno o tlaku. Primjećujemo i veće širenje spektra u smjeru manjih valnih duljina za koju je odgovorna pojava ustrmljenja [4]. Ovo je prikaz linearnog širenja spektra pomoću Kerrovog efekta.

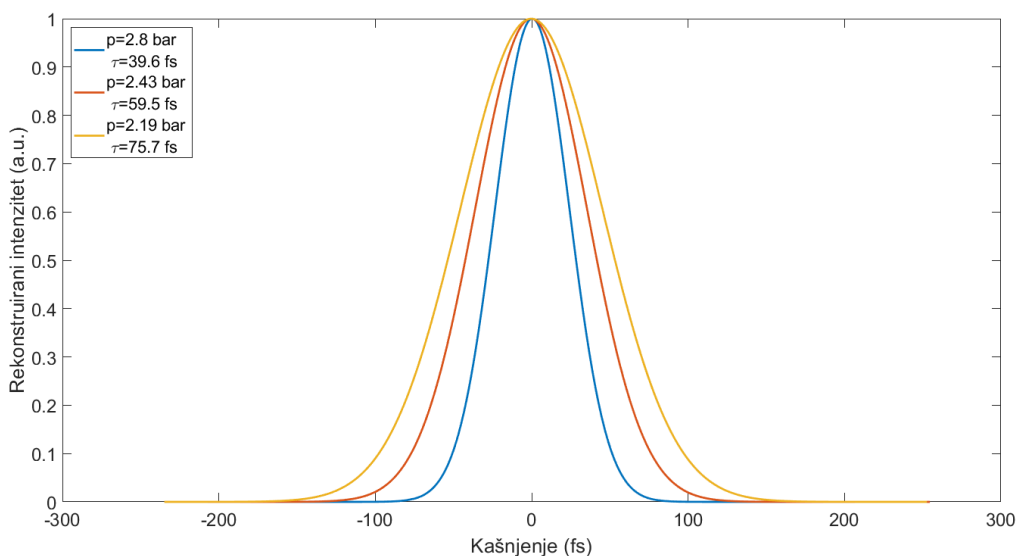


Slika 6. Optički spektar izlaznog pulsa iz HCF-a ispunjenog argonom na apsolutnim tlakovima 1.55 bar i 2.8 bar. Energija ulaznog laserskog pulsa u oba slučaja je $500 \mu J$ sa centralnom valnom duljinom 1030 nm.

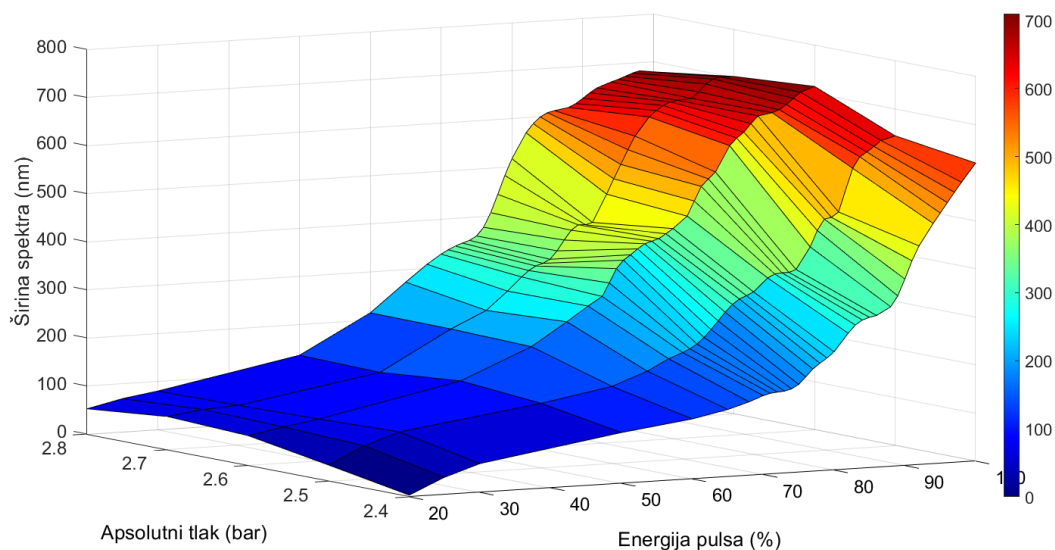
Kasnije se s pomoću metode autokorelacije mjerilo trajanje pulseva s gausijanskom aproksimacijom u vremenskoj domeni. Na slici 7 prikazani su rezultati mjerenja autokorelacije pulseva ograničenih Fourier transformacijom koji su nakon izlaska iz HCF-a kompresirani s cvrkutnim zrcalima. Iz Slike 7 primjećuje se da proširivanjem spektralne širine pulsa možemo pomoću kompresora dobiti kraće trajanje pulseva na što upućuje relacija (3).

Za proučavanje vidljivog dijela spektra uvodimo plin kriptona koji ima veći koeficijent $\chi^{(3)}$ od argona te time dolazi do izražaja efekt FWM [8].

Rezultat mjerenja širine spektra o ovisnosti o apsolutnom tlaku kriptona i energiji laserskog pulsa su dani na Slici 8. Kao mjera proširenja spektra u vidljivom dijelu koristila se razlika ulazne centralne valne duljine laserskog pulsa 1030 nm i najniža valna duljina izmjenjenog spektra. Tamno narančasto i crveno pobojani dijelovi na grafu (Slika 8) pokazuju kada je spektar dovoljno širok da



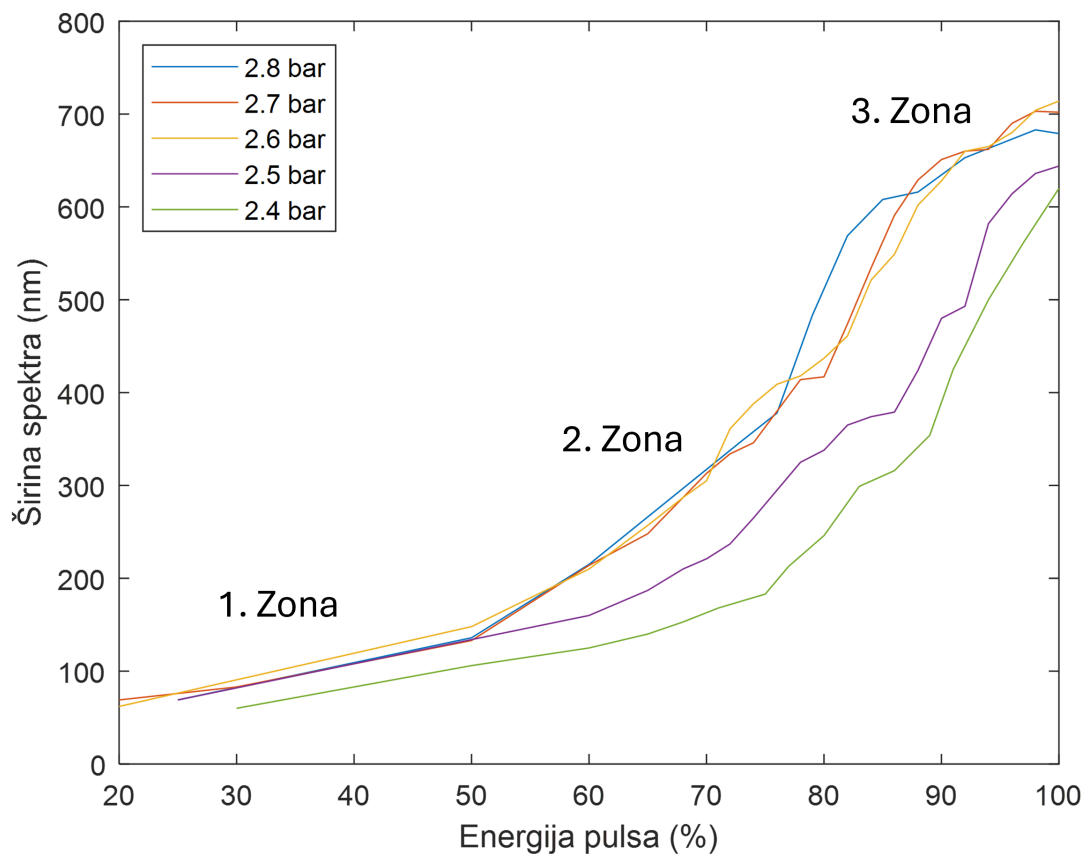
Slika 7. Vremensko trajanje pulseva nakon kompresije s cvrkutnim zrcalima. Apsolutni tlakovi argona u HCF-u su označeni s p , a izmjereno trajanje pulseva je označeno s τ . Trajanje ulaznog pulsa je 170 fs.



Slika 8. Širina spektra za manje valne duljine od centralne ulazne 1030 nm. Energija pulsa je izražena u postocima maksimalne energije pulsa koja iznosi $500 \mu J$.

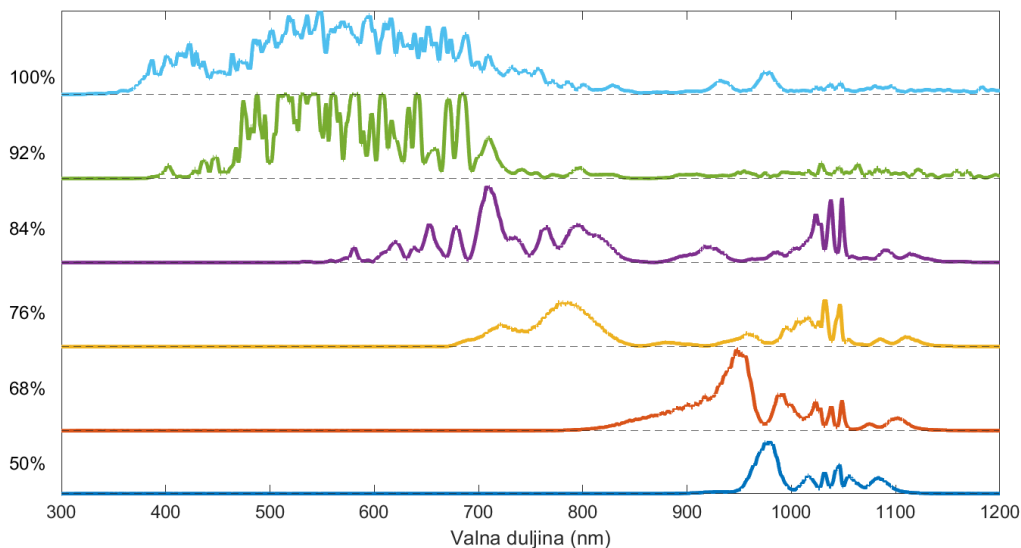
pokriva cijeli vidljivi dio spektra. Zone širenja spektra su zornije prikazane na Slici 9.

U prvoj zoni širenje spektra se odvija linearno s energijom laserskog pulsa te uglavnom prevladava SPM. U drugoj zoni prevladava širenje spektra pomoću stvaranja novih modova mehanizmom FWM. U trećoj zoni laserski pulsevi gube dio spektra apsorpcijom od strane kriptona, točnije efekt



Slika 9. Prikaz zona u kojima se odvijaju važni nelinearni efekti. Energija pulsa je izražena u postocima maksimalne energije pulsa koja iznosi $500 \mu J$.

apsorpcije spektra je snažniji nego li efekt širenja spektra FWM-om [9]. FWM u trećoj zoni počinje stvarati visoke modove koji nisu primjereni za jednomodalno optičko vlakno pa se zbog učestalih refleksija na površini dielektrika diskriminiraju visoki modovi, a time se stvaraju gubici u cjelokupnoj energiji pulsa. Podizanjem tlaka se krivulje pomiču u lijevo te se treća zona proširuje. Za manje tlakove primjerice 2.4 bar treća zona se ne primjećuje. Isto tako možemo primijetiti da na 2.6 bar apsolutnog tlaka kriptona i $500 \mu J$ energije ulaznog pulsa se dobiva najširi spektar čak i do ultraljubičastog područja što je vidljivo na Slici 10.



Slika 10. Optički spektar izlaznog pulsa iz HCF-a ispunjenog kriptomom na apsolutnom tlaku 2.6 bar. Energija pulsa je izražena u postocima maksimalne energije pulsa koja iznosi $500 \mu J$.

Usporedbom spektara (Slika 10) primjećuje se puno veće širenje prema manjim valnim duljinama nego li prema većim. Takav efekt objašnjavamo s pojavama samoustrmljenja i SPM-a. Između 84% i 100% vidimo naglo proširenje spektra gdje prevladava FWM.

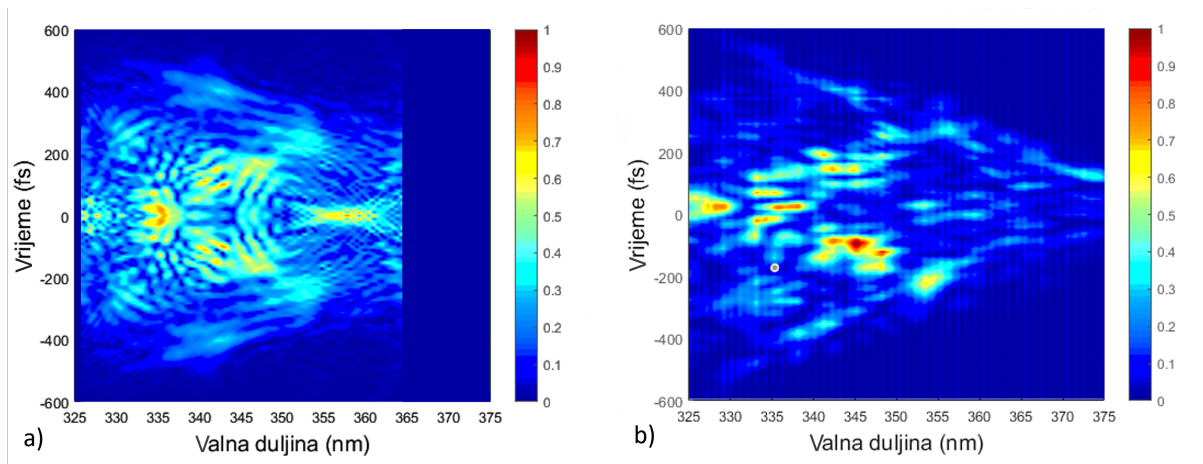
Povećavanjem nelinearnosti, točnije povećavanjem tlaka unutar HCF-a, dolazi do stvaranja novih modova laserskih pulseva u optičkom vlaknu, koje je optimizirano za jedan mod, izaziva nestabilnost u spektru. Prerano stvaranje superkontinuuama unutar ultraljubičastog i vidljivog dijela spektra za vrijeme prolaska laserskog pulsa kroz HCF, dovodi do apsorpcije dijela pulsnog spektra dok laserski puls putuje kroz medij kriptonu. Prema tome idealno bi bilo stvaranje ultraljubičastog dijela superkontinuuama na izlazu iz HCF-a te bi time smanjili gubitke dok laserski puls putuje kroz HCF [6].

Karakterizaciju vidljivog dijela spektra od izlaznog laserskog pulsa iz HCF-a dobivamo pomoću FROG metode. Rezultati su prikazani u Tablici I. Na 79% , 82% i 88% maksimalne energije pulsa izmjereno trajanje izlaznog pulsa je kraće nego li trajanje ulaznog pulsa. Na $E < 85\%$ zbog smanjenja intenziteta spektra na vidljivom dijelu superkontinuuama rezultira smanjenom detekcijom SHG-a na FROG-u te je time informacija je izgubljena unutar šuma. Rezultat je da su trajanja laserskih pulseva na manjim energijama kraća nego li realni pulsevi u vidljivom dijelu spektra. Time smo potvrdili da se s pomoću HCF-a mogu dobiti, pod određenim tlakom i ulaznom energijom pulsa, pulsevi u vidljivom dijelu spektra koji su kraći nego li ulazni pulsevi. Spektralno-vremenski

E (%)	trajanje pulsa (fs)	greška modela	spektralno-vremenski produkt
100	339	0.0349	6.49
97	360	0.0418	11.19
94	319	0.0326	6.30
91	260	0.0609	7.68
88	131	0.0394	1.99
85	273	0.0477	5.93
82	114	0.0244	0.69
79	96	0.0181	0.73

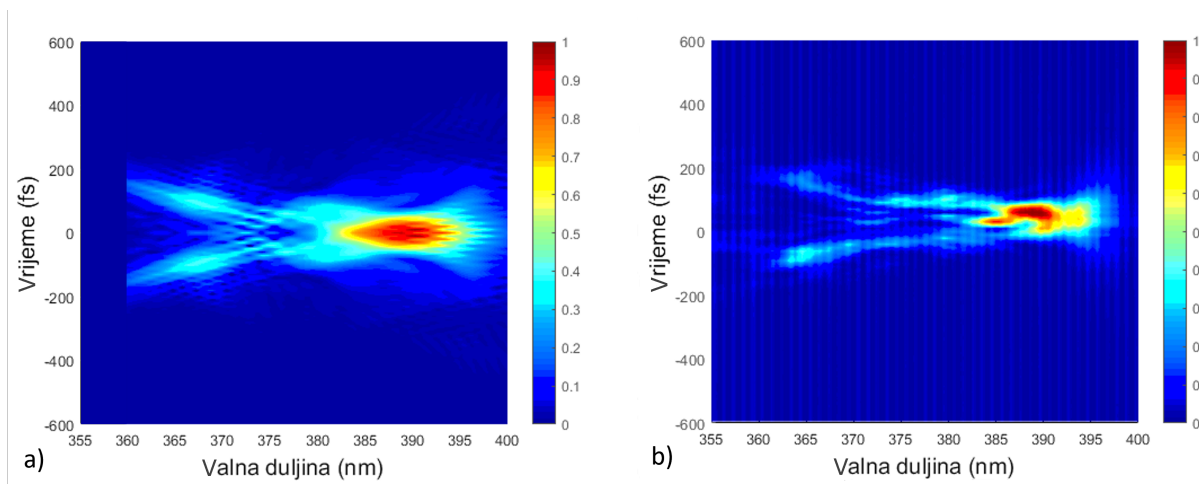
Tablica I. Mjerenja duljine trajanja vidljivog dijela pulseva FROG metodom. Mjerenja su vršena na 2.8 bar apsolutnog tlaka kriptona. Energija pulsa E je izražena u postocima maksimalne ulazne energije pulsa koja iznosi $500 \mu J$. Trajanje ulaznog pulsa je 170 fs.

produkt iz jednadžbe (3) za gausijanske pulseve ograničene transformacijom iznosi 0.441. Svi pulsevi navedeni u Tablici I imaju vremensko-spektralni produkt veći od 0.441 te se mogu svi dodatno skratiti s kompresijskim metodama. FROG rezultati nisu u potpunosti pouzdani zbog velike greške u FROG analizi koja je posljedica vrlo kompleksnih pulseva (vremenski i spektralno) te ograničenja GECO uređaja koji mjeri pulseve do 500 nm što je uvjetovano faznim usklađivanjem (phase matching) BBO kristala. Izgledi pulseva kraćih od 88% mjerenih na FROG-u i rekonstruirani FROG spektrogrami dani su na Slikama 11 i 12.



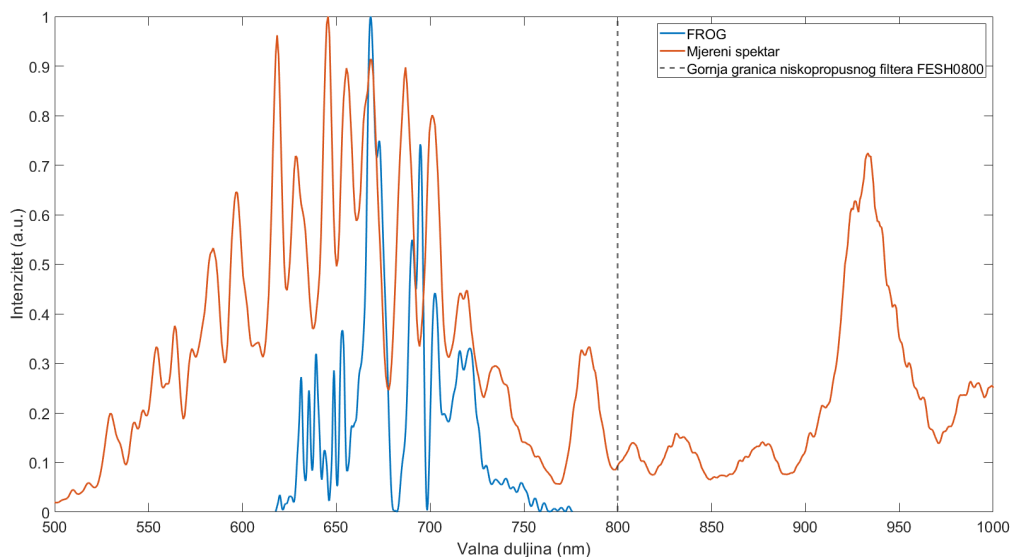
Slika 11. Usporedba izmjerenog FROG-a b) i rekonstruiranog FROG-a a) za izlazni puls iz HCF-a ispunjenog kriptonom na apsolutnom tlaku 2.8 bar i 85% maksimalne energije ulaznog pulsa.

Kod SHG FROG autokorelacije trebali bi dobivati simetrične rezultate s obzirom na valne duljine što programski model pretpostavlja, ali mjerenja prikazuju asimetričnost. Razlog se vjerojatno

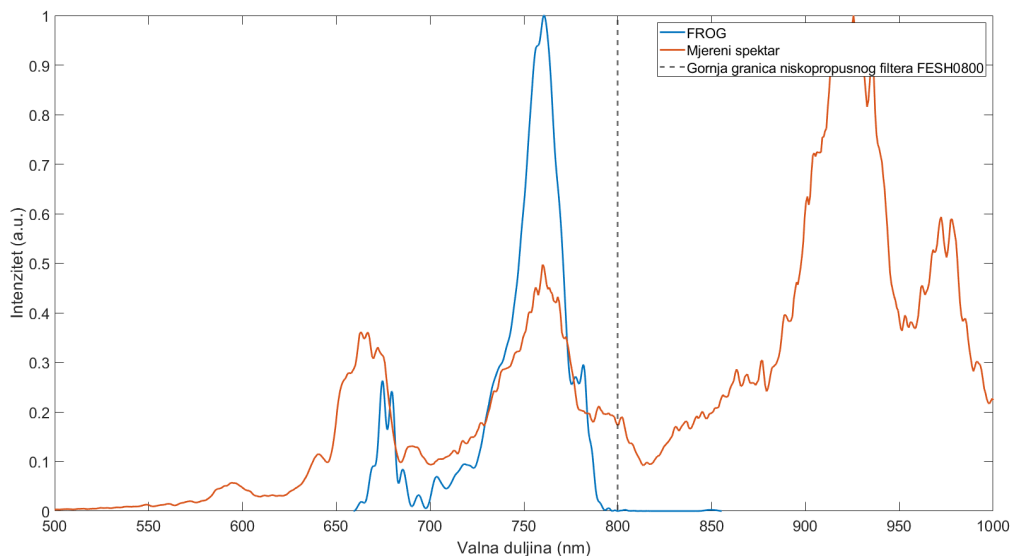


Slika 12. Usporedba izmjerenog FROG-a b) i rekonstruiranog FROG-a a) za izlazni puls iz HCF-a ispunjenog kriptonom na apsolutnom tlaku 2.8 bar i 79% maksimalne energije ulaznog pulsa.

nalazi u nedovoljnom prostornom preklopu laserskih zraka u BBO kristalu. Na Slici 12 može se primijetiti da je spektar odrezan na 400 nm. Razlog toga je niskopropuštajući filter FESH0800 koji ne propušta valne duljine duže od 800 nm odnosno SHG signal na valnim duljinama većima od 400 nm. Usporedba spektara izmjerenih pulseva dobiveni iz FROG mjerenja sa nezavisno izmjerenim spektrima na ulasku u autokorelator prikazani su na Slikama 13 i 14.



Slika 13. Usporedba optičkog spektra i rekonstruiranog optičkog spektra FROG-a izlaznog pulsa iz HCF-a ispunjenog kriptonom na apsolutnom tlaku 2.8 bar i 85% maksimalne energije ulaznog pulsa.



Slika 14. Usporedba optičkog spektra i rekonstruiranog optičkog spektra FROG-a izlaznog pulsa iz HCF-a ispunjenog kriptonom na apsolutnom tlaku 2.8 bar i 79% maksimalne energije ulaznog pulsa.

IV. ZAKLJUČAK

Unutar HCF-a, punjenog kriptonom ili argonom, prolaskom ultrakratkog laserskog pulsa dolazi do optičkog Kerrovog efekta. Rezultat HCF-a punjen argonom je širenje spektra što odgovara pojavi SPM-a s značajnijim širenjem u smjeru manjih valnih duljina te je objašnjeno samoustrmljenjem pulsa. Pokazali smo za HCF ispunjenim argonom da je proširivanjem optičkog spektra moguće dobiti kraće pulseve korištenjem cvrkutnih zrcala. U HCF-u napunjenim kriptonom kod većih energija dolazi do izražaja efekt FWM gdje se stvaraju novi prostorni modovi. S novim modovima dolazi do naglog širenja spektra u vidljivi dio spektra. HCF punjen kriptonom dao je superkontinuum u vidljivom dijelu spektra već na 2.4 bar apsolutnog tlaka i $500 \mu J$ energije pulsa. Najširi spektar eksperimentalno smo dobili na 2.6 bar i $500 \mu J$ energije pulsa. Spektri na tlakovima većim od 2.6 bar su bili uži zbog efekata apsorpcije dijela spektra prolaskom laserskog pulsa kroz plin kripton. Primijećeno je da na apsolutnom tlaku od 2.8 bar i 88% maksimalne energije korištenog pulsa dobivamo pulseve u vidljivom dijelu spektra koji su kraći nego li ulazni pulsevi. Prema tome sam HCF se može koristiti za skraćivanje femtosekundnih laserskih pulseva pri određenim uvjetima. Izmjereni izlazni pulsevi iz HCF-a punjenog kriptonom se mogu dodatno skratiti s kompresijskim optičkim metodama. Uz pomoć HCF-a moguće je generiranje ultrakratkih laserskih pulseva u vidljivom dijelu spektra koji se koriste u raznim spektroskopskim tehnikama za

analizu kemijskih ili bioloških uzoraka primjerice 2D spektroskopija na 2D materijalima .

V. ZAHVALE

Zahvaljujem mentoru dr. sc. Silviju Vdoviću na uloženom trudu i vremenu pri izradi ovog seminarskog rada. Zahvaljujem se Vedranu Brusaru na danim savjetima prilikom rada u laboratoriju.

-
- [1] Poletti, F. (2014). Nested antiresonant nodeless hollow core fiber. *Optics Express*, 22(20), 23807.
- [2] Suslov, D., Zvánovec, S., Dousek, D., & Komanec, M. (2020). Hollow-Core Optical Fibers. *Radioengineering*, 29(3), 417–430.
- [3] Geco-V3 Scanning Autocorrelator USER'S MANUAL
- [4] Forjan, M. Ultrabrza tranzijentna apsorpcija fotokemijskih reakcija. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2018.
- [5] Brusar, V. Tranzijentna apsorpcija rodamina B. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2020.
- [6] Piccoli, R., Brown, J. N., Jeong, Y., Rovere, A., Zanutto, L., Gaarde, M. B., Legaré, F., Couairon, A., Travers, J. C., Morandotti, R., Schmidt, B. E., & Razzari, L. (2021). Intense few-cycle visible pulses directly generated via nonlinear fibre mode mixing. *Nature Photonics*, 15(12), 884–889.
- [7] FROG algorithm: K. W. DeLong and R. Trebino, *Journ.* (1994). *Optical Society of America A*, 11, 2429.
- [8] Gosnell, T. R., Taylor, A. J., & Greene, D. P. (1990). Supercontinuum generation at 248 nm using high-pressure gases. *Optics Letters*, 15(2), 130.
- [9] Levchenko, A. B., Ustinovski, N. N., & Zvorykin, B. D. (2010). Absorption spectra of e-beam-excited Ne, Ar, and Kr, pure and in binary mixtures. *The Journal of Chemical Physics*, 133(15).