



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií



Cílené tvarování femtosekundových laserových pulsů

Bakalářská práce

Studijní program:

B3901 Aplikované vědy v inženýrství

Studijní obor:

Aplikované vědy v inženýrství

Autor práce:

Petr Elsner

Vedoucí práce:

RNDr. Karel Žídek, Ph.D.

Ústav nových technologií a aplikované informatiky





Zadání bakalářské práce

Cílené tvarování femtosekundových laserových pulsů

Jméno a příjmení: Petr Elsner
Osobní číslo: M18000111
Studijní program: B3901 Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Aplikované vědy v inženýrství
Zadávací katedra: Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Akademický rok: 2020/2021

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s problematikou ultrakrátkých pulsů a jejich tvarování pomocí tzv. 4f tvarovače pulsů.
2. Experimentální testy tvarování pulsů pomocí 1D pole tekutých krystalů (tzv. SLM) a přesných fázových destiček s cíleně navrženým zpožděním.
3. Optimalizace metod tvarování pulsů pro generaci nezávislých náhodných pulsů.
4. Ověření tvaru fázových destiček interferometrickými metodami a srovnání teoretické předpovědi s reálnými měřeními.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
30 – 40 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] Rulliere, C. (2005). *Femtosecond laser pulses*. Springer Science+ Business Media, Incorporated.
- [2] Monmayrant, A., Weber, S., & Chatel, B. (2010). A newcomer's guide to ultrashort pulse shaping and characterization. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 43(10), 103001.
- [3] Malý, P. (2008). *Optika*. Karolinum.

Vedoucí práce:

RNDr. Karel Žídek, Ph.D.
Ústav nových technologií a aplikované informatiky

Datum zadání práce:

19. října 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

16. května 2022

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

Ing. Josef Novák, Ph.D.
vedoucí ústavu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

13. května 2022

Petr Elsner

Poděkování

Chtěl bych poděkovat hlavně vedoucímu práce Karlu Žídkovi za jeho ochotnou pomoc a jeho velkou trpělivost. Dále bych chtěl také poděkovat za neocenitelnou pomoc Petře Veselé, Jiřímu Junkovi, Romanu Dolečkovi za výrobu testovacích destiček a nakonec Pavlu Hájkovi za měření povrchu testovacích destiček.

Abstrakt

Bakalářská práce pojednává o cíleném tvarování femtosekundových laserových pulzů pomocí metody 4f. Tvarování bylo uskutečněno pomocí destičky, která má speciálně upravený a zmapovaný povrch interferometrií bílým světlem. Hlavní částí práce je následné simulování femtosekundového pulzu v programu MATLAB a porovnání simulace s naměřenými daty. Experimentální data byla naměřena metodou nazývanou frekvenčně rozlišené optické hradlování (FROG). Takto získané spektrogramy a rekonstruované fáze byly porovnány se simulacemi. Simulovali jsme vliv rozlišení spektrometru, přesnost fokusace vlnových délek, použití reálné fáze pro vstupní pulz a vliv počtu výpočetních bodů. Simulované výsledky zatím z hlediska spektrogramů realitě neodpovídají, ale podobají se z hlediska fází. Program samotný je dobrým základem pro budoucí úpravy a simulace.

Klíčová slova: femtosekundové laserové pulzy, optika, tvarování pulzů, MATLAB, simulace

Abstract

This bachelor thesis deals with the targeted shaping of femtosecond laser pulses via 4f method. Shaping was realised using a plate with a specially engraved surface, characterised by white light interferometry. The main focus of this work is the simulation of femtosecond pulse shaping in MATLAB software and the comparison between the simulations and measured data. Experimental data were obtained using a method named frequency-resolved optical gating. The spectrograms and the reconstructed phases were compared with the simulations. We simulated the effect of spectrometer resolution, final focal point size, phase of the input pulse, and the number of computational points. Simulation results do not correspond with reality in terms of spectrograms, but they are similar in terms of phases. The script alone is a good base for future changes and simulations.

Key words: femtosecond laser pulses, optics, pulse shaping, MATLAB, simulation

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Teorie	11
2.1	Femtosekundové laserové pulzy	11
2.1.1	Laser	11
2.1.2	Femtosekundové lasery	12
2.2	Metoda tvarování laserových pulzů – 4f tvarovač pulzů	14
2.2.1	Fourierova transformace.....	14
2.2.2	Tvarovač pulzů 4f.....	15
2.3	Metoda měření tvaru laserových pulzů - FROG	17
2.3.1	Autokorelace	17
2.3.2	FROG	20
3	Laboratorní část.....	22
3.1	Sestavení soustavy	22
3.1.1	Prvky soustavy	24
3.2	Výroba a určování povrchu destičky.....	28
3.2.1	Výroba testovacích destiček	28
3.2.2	Určování povrchu testovacích destiček	29
3.3	Simulace pulzu.....	31
3.3.1	Vstupní puls.....	31
3.3.2	Profil destičky v místě modulace	33
3.3.3	Změna fáze při průchodu testovacím vzorkem.....	35
3.3.4	Výstupní pulz	36
3.3.5	Výpočet FROG spektrogramu	36

4	Výsledky	37
4.1	Výsledky	37
4.1.1	Test simulace pro rovný testovací povrch	37
4.1.2	Výsledky z charakterizace testovacího vzorku.....	38
4.1.3	Identifikování nejmenšího posunu s viditelnou změnou výsledků.....	38
4.1.4	Vliv korekčních proměnných	39
4.1.5	Vliv zpřesnění vstupní fáze	40
4.1.6	Vliv změny počtu výpočetních bodů N	41
4.1.7	Výsledky simulací z programu MATLAB	43
4.1.8	Porovnání simulovaných a experimentálních spektrogramů FROG	44
4.1.9	Porovnání simulovaných a experimentálních změn fází	45
4.2	Diskuze.....	47
5	Závěr	50
	Použitá literatura	52

Seznam zkratek a symbolů použitých v textu

fs	– femtosekunda (jednotka času $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$)
nm	– nanometr (jednotka délky $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)
Hz	– hertz (jednotka frekvence)
SLM	– prostorový modulátor světla
FROG	– Frekvenčně rozlišené optické hradlování
SHG	– generace druhé harmonické
FT	– Fourierova transformace
OPL	– optická dráha
NOPA	– nekolineární optický parametrický zesilovač
WL	– bílé světlo
φ	– fáze
λ	– vlnová délka

1 Úvod

V posledních několika desítkách let zažívá laser a laserové technologie éru pokroku ve vědě i inženýrství. Figurují zde i pulzní lasery, s kterými se pak vážou pokusy o generaci co nejkratších pulzů v čase. Zvláště pak, když ultra-krátké laserové pulzy mohou najít mnohá použití v medicíně, spektrometrii nebo třeba v optických komunikačních technologiích [1]. Pro měření časově rozlišených jevů pak platí, že s kratším pulzem dostaneme přesnější měření. V každém případě je nezbytné cíleně tvarovat pulzy, což je u krátkých až ultra-krátkých pulzů obtížné. Jako příklad použití pro tvarování femtosekundových pulzů lze uvést rozsáhlé vědecké odvětví femtochemie [2]. Existuje několik metod pro tvarování [1], ale tato práce se věnuje konkrétně tvarování pulzu pomocí 4f tvarovačem pulzů s vloženou destičkou se speciálním povrchem.

Tato práce si klade za cíl vytvořit simulaci femtosekundového laserového pulzu po průchodu testovacím vzorkem, destičkou se speciálně upraveným povrchem. Podle tvaru destičky se pozmění jeho fáze a tudíž celkový tvar pulzu v čase. Při úspěšné simulaci by bylo možné navrhovat povrchy destiček pro dosažení specifického tvaru pulzu, či studovat výsledný tvar po průchodu náhodně tvarovaným vzorkem. Přesnost simulace je potom ověřena experimentálně naměřenými daty spektrogramů FROG.

První část práce, teoretická část, popisuje jevy a metody v souvislosti s femtosekundovými pulzy a jejich tvarováním. Zprvu je popsáno fungování ultra-rychlých pulzních laserů a generace femtosekundových pulzů, následované představením 4f tvarovače pulzů a nakonec metodou pro měření ultrakrátkých pulzů FROG.

Druhá část práce, laboratorní část, se zabývá popisem součástí a sestavení experimentu pro tvarování pulzů metodou 4f a metodou jejich měření FROG. Dále je popsána výroba a měření testovacího vzorku, použitého pro experimentální tvarování pulzů. Nakonec je zde popsán postup při sestavování simulace v programu MATLAB, kterou porovnáme s reálnými naměřenými daty. Práce je zakončena ukázkou výsledků v kapitole 4 a jejich zhodnocením v diskuzi a závěru.

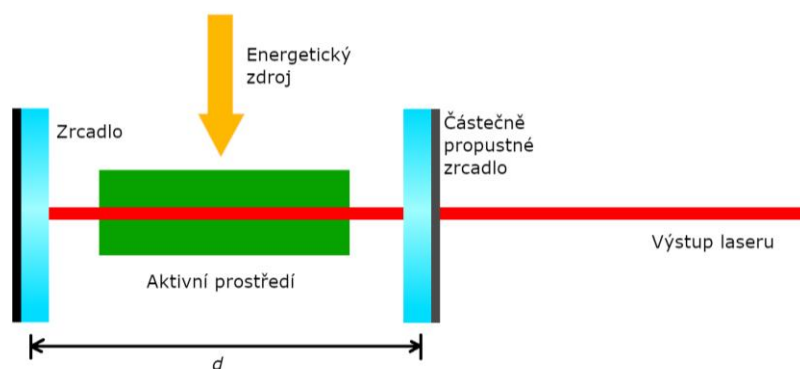
2 Teorie

Teoretická část práce má primárně za cíl oboznámit čtenáře s teorií a základními jevy ohledně femtosekundových laserů a tvarování jejich pulzů metodou 4f. Závěr této sekce je věnován měřicí metodě pro ultrakrátké laserové pulzy FROG.

2.1 Femtosekundové laserové pulzy

2.1.1 Laser

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation neboli „zesílení světla stimulovanou emisí záření“), jak už název napovídá, je zdroj koherentního světelného svazku, k jehož generaci je využívána stimulovaná emise. Princip je takový, že v aktivním prostředí budíme částice vnějším energetickým zdrojem na vyšší energetickou hladinu. Tato částice poté po nějaké době samovolně přejde zpět na nižší energetickou hladinu. Pokud je mezitím stimulována fotonem, vyvolá emisi totožného fotonu stejným směrem, a poté přechod částice na nižší energetickou hladinu. To vše se děje v optickém rezonátoru, který je vyobrazen na Obr.1. Rezonátor se většinou skládá ze dvou naproti sobě posazených zrcadel ve vzdálenosti d . Jedno ze zrcadel je potom pro generovanou vlnovou délku ideálně 100 % odrazivé, zatímco druhé, odkud se ven dostává světelný svazek, je částečně propustné. Detailnější popis principu laseru je uveden v knize Základy fotoniky [3].



Obr. 1: Obecné schéma laseru.

2.1.2 Femtosekundové lasery

Lasery se mohou dále dělit na kontinuální a pulzní. Pro tuto práci je důležitá specifická verze laseru, která tvoří velmi krátké femtosekundové (dále fs) laserové pulzy. Důležitou vlastností je vztah mezi časovou délkou a spektrální šířkou pulzu. Uplatňuje se tu totiž jeden ze základních fyzikálních principů. Heisenbergův princip neurčitosti, který je popsán univerzální nerovností:

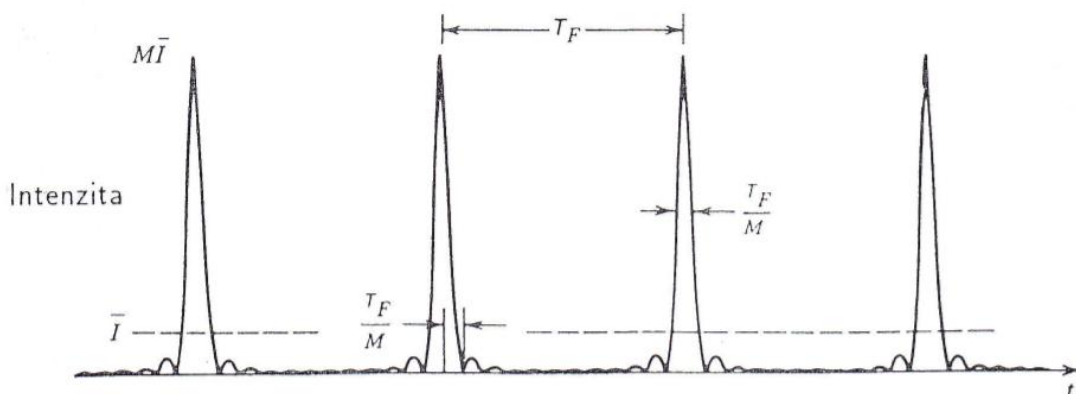
$$\Delta t \cdot \Delta \omega \geq \frac{1}{2} \quad (1)$$

kde Δt zastupuje časovou délku pulzu a $\Delta \omega$ spektrální šířku pulzu. Z rovnice (1) poté vyplývá několik důsledků pro fs pulzy. Nejdůležitějším je, že pro vytvoření časově dostatečně krátkého pulzu je nutné použít dostatečně široké spektrum. Jako příklad lze uvést úryvek z článku Zkrocené femtosekundy [4], kde 10 fs dlouhý pulz na vlnové délce 600 nm, bude mít spektrální šířku 60 nm. To je přibližně 15 % viditelné části spektra. V jednoduchosti lze tvrdit, že čím kratšího pulzu chceme dosáhnout, tím větší bude spektrální šířka pulzu. To může následně vést k problémům v průhledných prostředích, jelikož každá vlnová délka má při průchodu materiálem odlišný index lomu.

Tvoření fs pulzů lze v laseru docílit metodou modové synchronizace. Podle Saleha a Teicha [3] jsou podélné mody laseru stojaté vlny, jejichž superpozicí lze popsat libovolné vlnění uvnitř rezonátoru. Za předpokladu, že se nám podaří sfázovat například podélné mody mnohamodového laseru, který osciluje na ekvidistantně rozložených frekvencích, nám superpozicí vzniknou pulzy s periodou danou pomocí rovnice:

$$T_F = \frac{1}{f_F} = \frac{2d}{c} \quad (2)$$

která představuje vztah mezi periodou pulzů T_F , frekvenční vzdáleností sousedních modů f_F , rychlostí světla v daném prostředí c a dvojnásobnou délkou rezonátoru d .



Obr. 2: Ukázka intenzit sfázovaných modů. Převzato z knihy *Základy Fotoniky* [3], kde se nachází i kompletní popis.

Obr. 2 ukazuje periodicky opakující se pulzy, jejichž šířka závisí na počtu sfázovaných modů:

$$\tau = \frac{T_F}{M} \quad (3)$$

kde τ představuje šířku pulzu, která je rovna podílu T_F a počtu modů M .

Sfázování lze provést například velmi rychlým modulátorem ztrát (nebo fáze), či periodickou závěrkou. Kupříkladu můžeme použít pasivní závěrku, která funguje jako satureovatelné prostředí, jenž zmenšuje absorpční koeficient s vyšší intenzitou světla. Slabší pulzy absorbuje, zatímco silné propouští s relativně malou absorpcí [3]. Detailněji je modová synchronizace popsána Rulliérem [5] v aktivním i pasivním provedení.

Výsledné femtosekundové laserové pulsy je možné dále zesilovat. Například pomocí regenerativního zesilovače [6]. Také je možné vygenerované pulsy převést na potřebnou vlnovou délku pomocí nelineární optiky. Zde se nabízí například generace druhé harmonické nebo optického parametrického zesilovače [7]. Vzhledem k tomu, že jde o velmi rozsáhlé oblasti laserové optiky, které spadají mimo těžiště této práce, nebudeme se jimi blíže zabírat.

2.2 Metoda tvarování laserových pulzů – 4f tvarovač pulzů

2.2.1 Fourierova transformace

Pro pochopení principu tvarovače pulzů je důležité si zavést v optice často používanou Fourierovou transformaci. Fourierova transformace (dále v textu referováno jako FT) je nástroj, díky kterému můžeme jakoukoliv periodicky opakující se vlnu rozložit na sumu goniometrických funkcí sinus a cosinus o různých frekvencích. Můžeme tímto způsobem převést vlnu z časové do frekvenční domény, dle rovnice popsané v Základech fotoniky [3].

$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-i(\omega t + \varphi)} \cdot dt \quad (4)$$

Tento proces lze uskutečnit i opačně zpětnou FT popsanou rovnicí (5), která převádí z frekvenční do časové domény:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\nu) \cdot e^{i(\omega t + \varphi)} \cdot d\nu \quad (5)$$

Kde t zastupuje čas, ν frekvenci a φ zastupuje fázový posun. Funkce $F(\nu)$ a $f(t)$ tvoří fourierovský pár, takže pokud je známa jedna, můžeme určit i druhou. Písmeno ω je úhlová frekvence daná rovnicí:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu \quad (6)$$

Fourierovu transformaci použijeme pro přechod elektrického pole E z frekvenční do časové domény a zpět. Pokud tedy budeme ovlivňovat spektrum světla ω , změníme časový tvar pulzu:

$$E(\omega) = \mathcal{F}\{E(t)\} \quad (7)$$

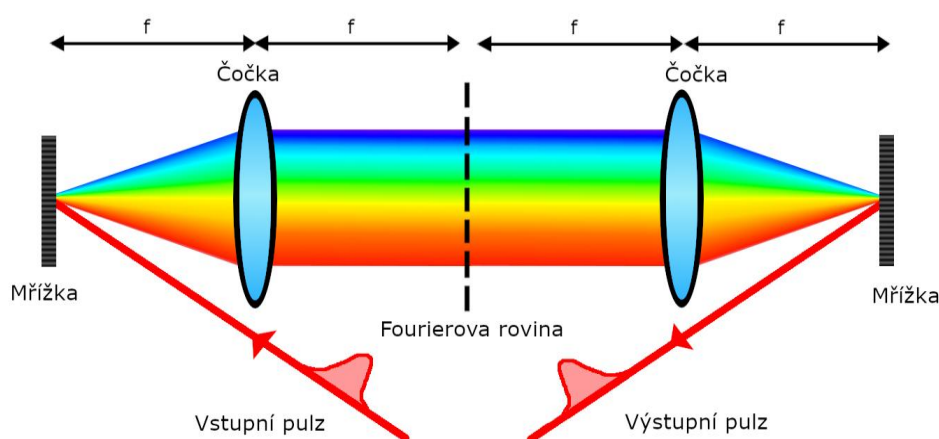
Kde $\mathcal{F}$ zastupuje FT. Pro intenzitu světla dále používanou v textu je definice pro rovinnou vlnu rovna:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot c \cdot E^2 \quad (8)$$

Kde $\epsilon_0 \approx 8,54 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ je permitivita vakua a c je rychlost světla ve vakuu.

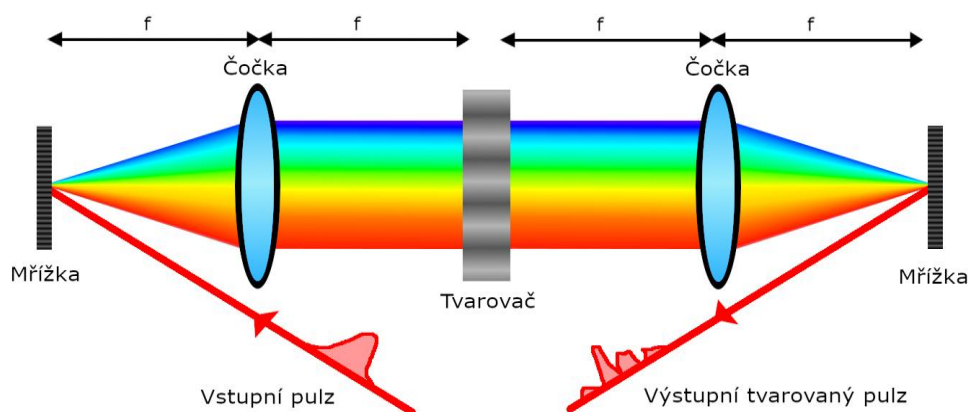
2.2.2 Tvarovač pulzů $4f$

Poté, co jsme úspěšně vygenerovali fs laserové pulzy, se můžeme zaměřit i na jejich samotné tvarování. Femtosekundové pulzy je však nemožné tvarovat přímo v čase, a proto se metody na jejich tvarování odehrávají ve spektrální doméně. V minulosti bylo vynaloženo mnoho úsilí na vytvoření všestranného programovatelného tvarovače, avšak žádný není zcela univerzální pro všechny možné případy použití. My se budeme hlavně zabývat takzvaným $4f$ tvarovačem pulzů [8]. Schéma, jak sestava vypadá a funguje, je vyobrazeno na Obr. 3.



Obr. 3: Schéma $4f$ sestavy bez tvarujícího objektu. Vstupní pulz je totožný s výstupním.

Na začátku máme vstupní fs pulz, který dopadne na difrakční mřížku. Tam se pulz prostorově spektrálně rozdělí na jednotlivé složky [9], které pokračují dále a dopadají na čočku. Jelikož se vzdálenost mezi mřížkou a čočkou rovná ohniskové vzdálenosti čočky f , jsou spektrální části ideálně fokusovány v nekonečnu a vznikne rovnoběžný svazek všech obsažených spektrálních částí. Zároveň kromě stejného rovnoběžného směru v horizontální rovině, je každá vlnová délka ideálně fokusovaná do jednoho bodu. Svazek dále prochází Fourierovou rovinou, a pokračuje dále na druhou čočku, kde se proces inverzně opakuje. Od toho také pochází název sestavy, jelikož tu jsou celkem 4 prostory s délkou ohniskové vzdálenosti f , tudíž $4f$. Pro fs pulzy se většinou používají na zaostření sférická zrcadla, aby se vyhnulo nechtěné disperzi a chromatickým aberacím vyskytujícím se u čoček. Pokud se ve Fourierově rovině nic nenachází a tvarovač pulzu je ideálně nastaven, po sjednocení spekter na druhé mřížce dostaneme výstupní pulz naprosto totožný s tím, který jsme měli na začátku.



Obr. 4: Schéma 4f tvarovače pulzů s vloženým tvarovačem pulzů ve Fourierově rovině.

Pokud do Fourierovy roviny vložíme nějaký objekt (tvarovač), jak je ukázáno na Obr. 4, můžeme pulz modifikovat pomocí ovlivnění fázového zpoždění nebo transmise jednotlivých vlnových délek, a tím změnit celkový tvar výstupního pulzu. Jako možnost se nabízí programovatelný „spatial light modulator“ (v češtině „prostorový modulátor světla“ a referovaný jako SLM dále v textu). Existuje mnoho provedení, např. pokud se jedná o přístroj s tekutými krystaly, lze počítačem měnit pomocí napětí na pixelech fázi procházejícího světla. Na každý pixel dopadá různá část spektra, tudíž pokud pro různé pixely nastavíme různé změny ve fázi, změní se konečný tvar pulzu v čase. Detailnější popis SLM udává Vojtěch Liška ve své práci [10].

SLM tedy modifikuje pulz pomocí optické dráhy (z angličtiny OPL = optical path length), kterou pulz urazí. Ta je popsána rovnicí:

$$OPL = n \cdot l \quad (9)$$

Kde n zastupuje index lomu prostředí a l vzdálenost, kterou pulz v daném materiálu urazí. Zatímco SLM mění v rovnici n , nás zajímá možnost změny optické cesty pomocí l , čehož lze docílit vložením průhledné destičky s různě tvarovaným povrchem. To vede na různé vzdálenosti, které musí různé vlnové délky materiálem urazit.

2.3 Metoda měření tvaru laserových pulzů - FROG

I když se nám podaří fs laserové pulzy úspěšně vygenerovat a dokonce i vytvarovat, musíme být schopni je nějak měřit. „*K tomu, abychom byli schopni změřit nějaký děj probíhající v čase, potřebujeme děj kratší. Jak tedy změříme ten nejkratší?*“ Na tuto otázku se ptají v čele článku [11], který se věnuje měřicí metodě FROG (z angličtiny „frequency-resolved optical gating“, může být přeloženo jako „frekvenčně rozlišené optické hradlování“). Tento článek a související kniha [13] zároveň nabízejí řešení.

2.3.1 Autokorelace

Hlavní myšlenkou měření fs pulzů je, že se pulz měří pomocí sebe samého. Jedna z prvních metod, schopných tohoto sofistikovaného měření, byla intenzitní autokorelace [12]. Vstupní neznámý pulz rozdělíme na dva identické pomocí děliče svazků. Tyto dvě kopie pulzu se spojí v nelineárním optickém médiu, jako je například krystal SHG (z angličtiny „second-harmonic generation“, lze přeložit jako generace druhé harmonické). Zatímco lineární optika v podstatě vyžaduje, aby míjející se fotony spolu neinteragovaly, nelineární optika nám umožňuje opak. Při průchodu nelineárním médiem vhodné symetrie nám vznikne ze dvojice fotonů o frekvenci f foton jeden, který má frekvenci $2f$. Výsledná kombinace pulzů má tedy poloviční vlnovou délku a jedná se o SHG. O generaci druhé harmonické píše Saleh a Teich ve čtvrtém díle základů fotoniky [3].

Když se pulzy v čase překryjí, vznikne detekovatelné světlo, zatímco v opačném případě se na detektoru žádná intenzita neobjeví. Abychom si zajistili kompletní autokorelaci celého pulzu, je nutné je mezi sebou časově zpozdít. To lze učinit například mechanicky, kdy se mění vzdálenost dráhy jednoho pulzu, kterou musí urazit, než se dostane k nelineárnímu médiu. Elektrické pole výsledného pulzu lze poté pro SHG napsat jako rovnice popsaná Trebinem [12]:

$$E(t, \tau) \propto E_{P1}(t) \cdot E_{P2}(t) \propto E_P(t) \cdot E_P(t - \tau) \quad (10)$$

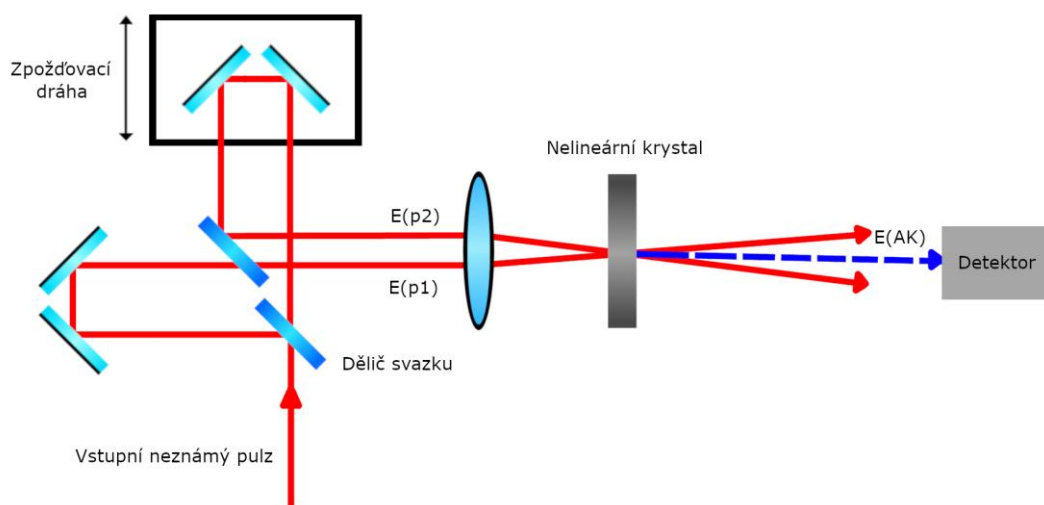
Kde pulz P1 je původní a pulz P2 je vůči P1 posunutý o τ . Z této rovnice poté vychází i rovnice pro intenzitu I:

$$I(t, \tau) \propto I_{P1}(t) \cdot I_{P2}(t) \propto I_P(t) \cdot I_P(t - \tau) \quad (11)$$

Detektory jsou však pomalé na to, aby paprsek určily v čase, a proto měří:

$$I(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_P(t) \cdot I_P(t - \tau) \cdot dt \quad (12)$$

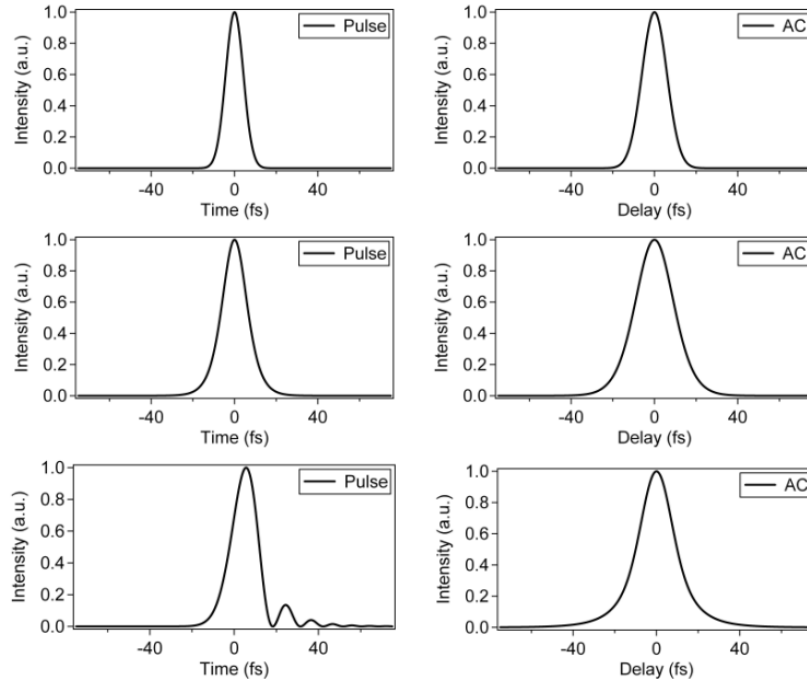
Při znalosti tvaru pulzu lze odvodit vztah mezi šířkou autokorelace a pulzu. Např. pro gaussovský pulz je šířka autokorelace v polovině jejího maxima rovna 1,41 násobku šířky pulzu.



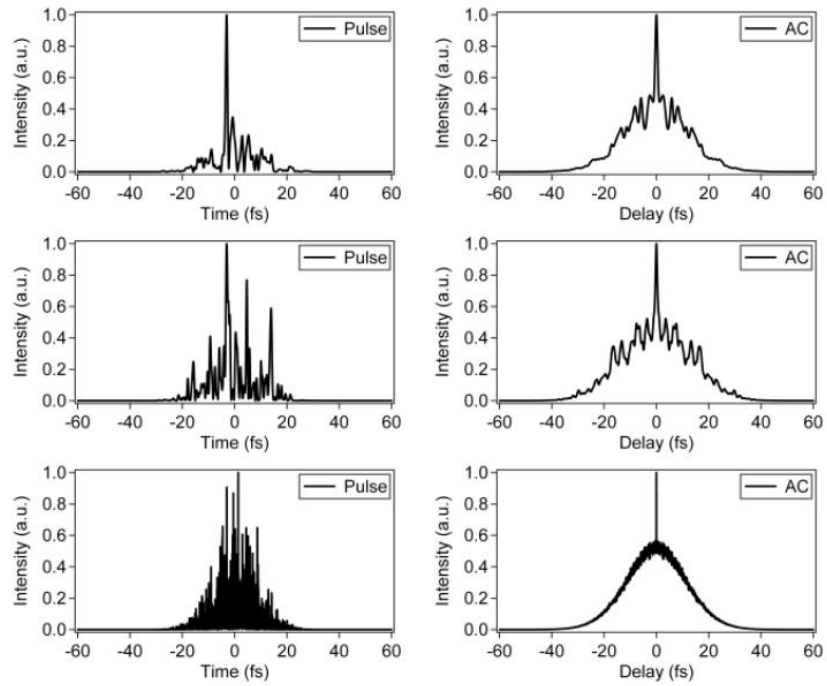
Obr. 5: Schéma sestavy intenzitní autokorelace.

Na Obr. 5 je ukázaná sestava používaná pro intenzitní autokorelaci, kde $E_{(AK)}$ zastupuje výsledné elektrické pole autokorelace po projití nelineárním médiem. Detektor může být například fotodioda či fototranzistor [3].

Použití autokorelace by se tedy nabízelo, jenže tu vyvstává několik problémů. Pokud bychom chtěli zjistit přesný tvar složitějšího pulzu v čase, při použití autokorelace se ztrácejí detaily pulzu. Dokonce to zachází tak daleko, že čím komplexnější pulz, tím jednodušší je jeho autokorelace. Různé pulzy tedy mohou mít stejnou autokorelaci. Abychom dostali přesnější výsledky, museli bychom znát alespoň přibližný tvar v čase a fázi daného pulzu. I tak bychom pravděpodobně nenalezli správný výsledek. Nevýhody autokorelace jsou dobře popsány v knize napsané Rickem Trebinem [13].



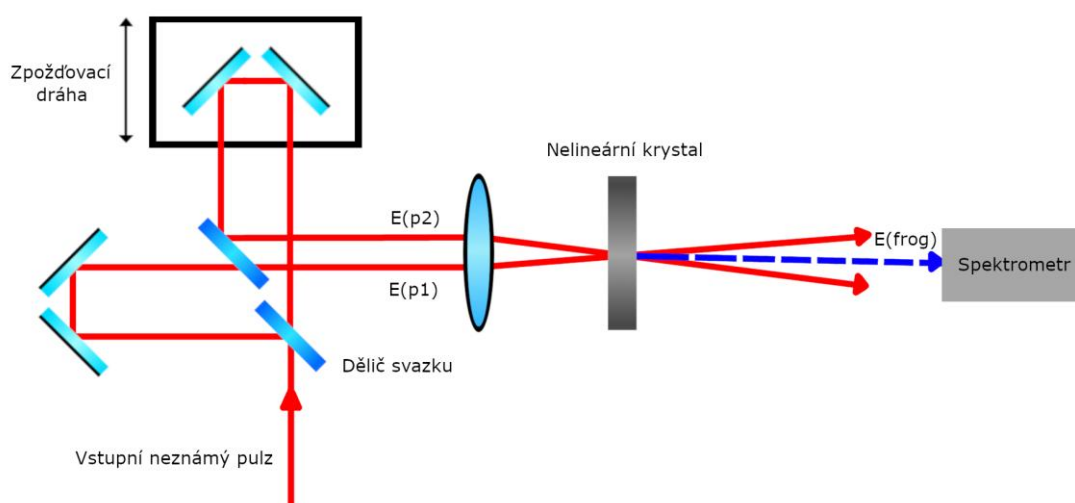
Obr. 6: Ukázka ztráty detailů při autokorelaci. Převzato z [12].



Obr. 7: Ukázka autokorelace pro složitější fs pulzy. Převzato z [12].

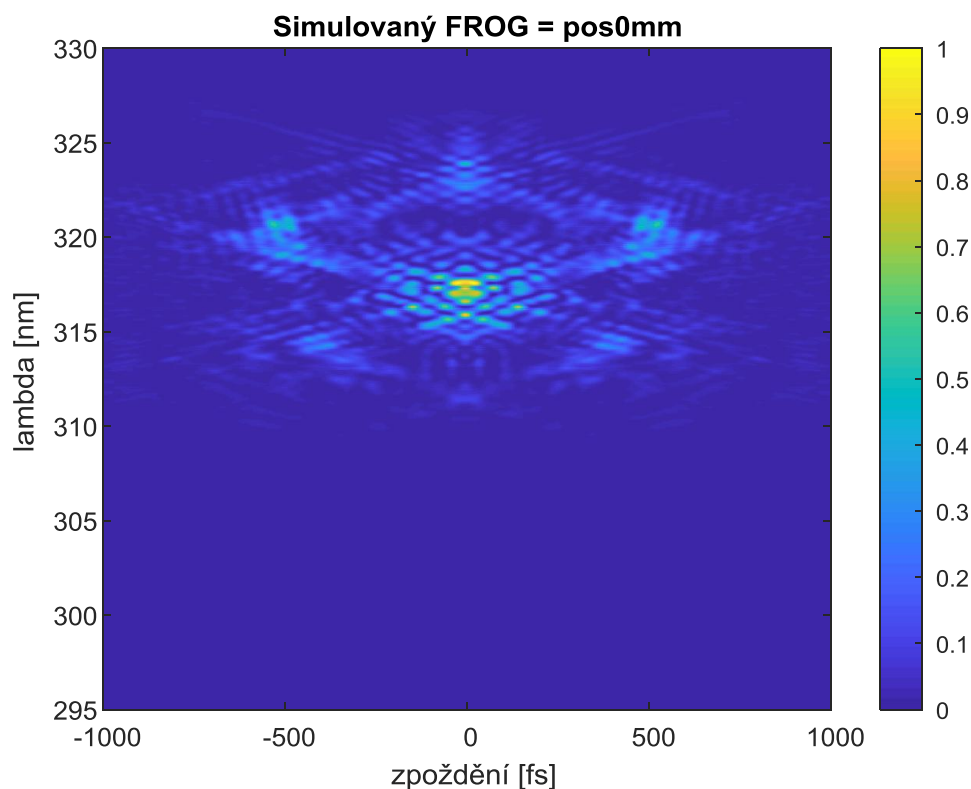
2.3.2 FROG

FROG je nástupcem autokorelace, se kterou zároveň sdílí svůj základní princip. Liší se však od svého předchůdce hlavně tím, že nám zajistí kromě intenzity i spektrum pulzu pro každé zpoždění. My se budeme hlavně zajímat o nejvyužívanější verzi FROGu, kde se pracuje s generací druhé harmonické, neboli SHG FROG. Sestava, která měření umožňuje, je vyobrazena na Obr. 8.



Obr. 8: Schéma sestavy SHG FROG.

Stejně jako u autokorelace však nejsme schopni získat přesný tvar pulzu přímým měřením. Rozdílem je, že z FROGu máme všechny potřebné informace, abychom jej mohli určit. Jelikož pro každý specifický pulz existuje jedinečný FROG, můžeme naměřit reálný FROG spektrogram a pokusit se za pomoci počítače najít vhodný tvar pulzu, který by ho replikoval. Je zvolen přibližný odhad pulzu a pomocí iteračních algoritmů se odhad zdokonaluje, aby se rekonstruovaný spektrogram co nejvíce podobal reálnému naměřenému. Pokud se nám to podaří, můžeme z algoritmu získat všechna potřebná data a získat přesný tvar pulzu, konkrétně jeho amplitudu a fázi.



Obr. 9: Ukázka výstupu simulace metody SHG FROG. Data byla odečtena při nastavení posunu svazku 0 mm, tedy na okraji testovacího vzorku. Barevná škála je intenzita světla, normovaná v maximu na 1.

Příklad SHG FROG spektrogramu, je ukázaný na Obr. 9. Vlnové délky na ose y jsou poloviční vůči vlnové délce laseru kvůli použití SHG.

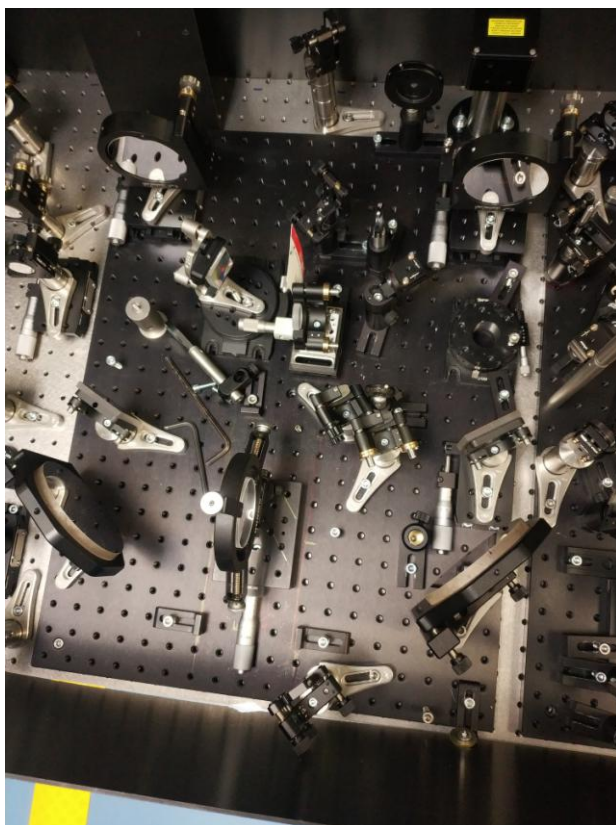
Téma FROG je velice rozsáhlé a jelikož je tato metoda použita pouze jako prostředek k ověření výsledků, nebudeme se jí dále v této práci zabývat. Dodatečné informace lze dohledat v tutoriálu o FROGu [11] a v další dostupné literatuře.

3 Laboratorní část

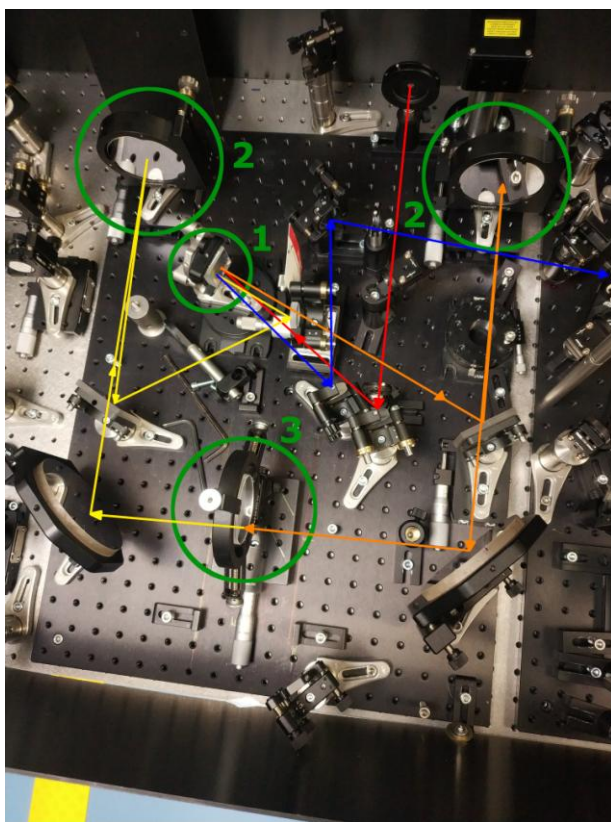
Laboratorní část má za úkol čtenáři přiblížit postup získání experimentálních a nasimulovaných dat, která se ve výsledku mezi sebou porovnávala. Nejprve je popsán experiment, použitý k měření dat, a jeho prvky. Dále je popsán způsob výroby a upravení povrchu testovacího vzorku (destičky), následován měřením reálného povrchu pomocí souřadnicového měřicího stroje a WL interferometru. V poslední části je popsán MATLABovský program, který simuluje změnu pulzu při průchodu vzorkem. Program lze považovat za jádro a nejdůležitější část práce, ke které vše směřuje.

3.1 Sestavení soustavy

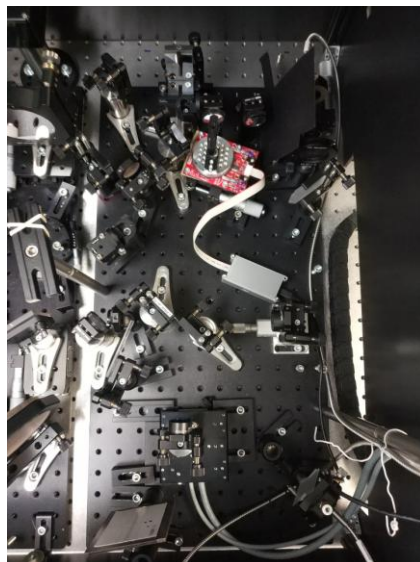
Abychom si mohli ověřit schopnost algoritmu simulování reálného děje, musíme nejprve určit, jak takový děj ve skutečnosti probíhá. K tomu použijeme 4f tvarovač pulzů, který je ukázán na Obr. 10 a Obr. 11 podle kapitoly 2.2. Abychom ušetřili místo a jednu mřížku, je svazek veden pomocí zrcadel zpátky na stejnou mřížku. Následně je svazek světla veden do optické soustavy měřicí FROG, kde se uplatňují principy z kapitoly 2.3.2. Vzhled soustavy FROGu je uveden na Obr. 12.



Obr. 10: Ukázka sestavy bez popisků.



Obr. 11: Ukázka sestavy tvarovače pulzů s popisky. Jednička zastupuje mřížku, dvojka sférická zrcadla a trojka zvýrazňuje destičku postavenou ve Fourierově rovině. Červená ukazuje cestu od laseru k mřížce. Oranžová cestu od mřížky přes sférické zrcadlo k tvarovači pulzu, což nám dává první polovinu 4f tvarovače pulzů. Žlutá zobrazuje druhou polovinu 4f tvarovače a modrá cestu od mřížky k sestavě FROGu.



Obr. 12: Ukázka sestavy pro měření spektrogramu FROG.

3.1.1 Prvky soustavy

Většina použitých prvků, jako jsou zrcadla, stojany na aparaturu apod. jsou standardní výrobky firmy Thorlabs.

Laser

Laserová sestava se skládá z dvojice výrobků firmy Light Conversion. První je fs laser typu Pharos, který je schopen generovat pulzy dlouhé od 20 ps (pikosekund) do 100 fs s maximální energií pro jeden pulz 3 mJ. Naše použitá verze generuje pulzy 230 fs s frekvencí 10 kHz s energií pro jeden pulz 100 μ J. Datasheet poskytuje všechny dodatečné technické informace a je dostupný ke stažení na [14].

Druhá část nese název Orpheus-N a je to nekolineární optický parametrický zesilovač, zkráceně NOPA, jehož datasheet lze dohledat na [15]. Díky tomuto zařízení lze například převést pulzy vystupující z Pharos fs laseru na vlnovou délku v rozpětí 490-800 nm. V našem experimentu byly pulzy generovány pro vlnovou délku 632,7 nm, délku 20 fs s typickou energií 100 nJ pro jeden pulz.



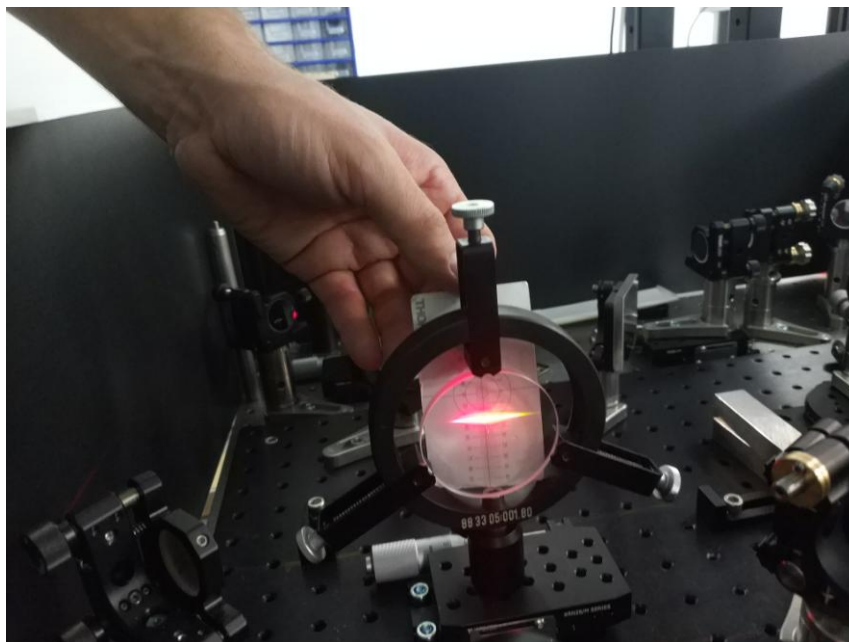
Obr. 13: Laser Pharos.



Obr. 14: Nopa Orpheus-N.

Difrakční mřížka

Byla použita difrakční mřížka s konstantou mřížky 600 vrypů/mm vyrobená firmou Richardson Gratings. Pro redukci počtu součástí byl svazek dvakrát naveden na stejnou mřížku na rozdílná místa. Jak mřížka rozděluje spektrum je ukázané na Obr. 15, kde je vidět už fokusovaný svazek do Fourierovy roviny a na testovací destičku.



Obr. 15: Ukázka rozložení pulzu na jednotlivé vlnové délky ve Fourierově rovině po rozdělení svazku na difrakční mřížce.

Zrcadla

Zrcadla byla vyrobena firmou Thorlabs. Dvě zrcadla, použitá pro měření FROG v sestavě za SHG krystalem, mají povrch z hliníku, kvůli lepší odrazivosti v modré části spektra. Všechna ostatní jsou vyrobena ze stříbra. Sférická zrcadla použitá ve 4f tvarovači pulzů mají pak ohniskovou vzdálenost 50 cm, což dává celkovou vzdálenost 2 metrů, které musí světlo při průchodu tvarovačem pulzů urazit.

SLM

V naší práci byl použit SLM-S640 od firmy Jenoptik, kde 640 udává celkový počet pixelů přístroje. SLM byl ze začátku experimentu postaven do Fourierovy roviny jako modulátor fáze. Použili jsme ho pro kalibraci laserového svazku a zjistili pozice jednotlivých vlnových délek na jeho pixelech. To nám umožnilo získat prostorové rozložení vlnových délek ve Fourierově rovině. Šířka svazku s použitím SLM byla vypočítána jako:

$$\text{šířka svazku} = \text{počet pixelů} \cdot \text{šířka pixelu} \quad (13)$$

Kde počet pixelů je počet, na kterém se objevilo alespoň 0,1 % maximální hodnoty intenzity procházejícího svazku a šířka pixelu SLM je rovná 0,1 mm. Datasheet pro SLM je dostupný z [16]. Po kalibraci byl přístroj nahrazen testovacím vzorkem.

Spektrometr

Pro získání dat byly použity dva spektrometry. První od firmy Ocean Optics typu HR4000 naměřil spektrum samotného použitého laseru. Rozsah pro měření vlnových délek je 200-1100 nm s rozlišením 0,02 nm (FWHM – „full width at half maximum“, může být přeloženo jako „plná šířka v polovině maxima“). S užitým nastavením byl použit v oblasti vlnových délek okolo červené barvy. Datasheet dostupný z [17].

Druhý spektrometr od firmy Avantes typu AvaSpec-ULS2048CL-EVO-RS měřil spektrum výsledného výstupu z FROGu. Rozsah pro měření vlnových délek je 200-1100 nm s rozlišením 0,06-20 nm. Pro naše měření měl spektrometr nastavený rozsah 230-500 nm s rozlišením 0,4 nm. Protože výstupní svazek z FROGu je podle kapitoly 2.3 poloviční vlnové délky vstupního laserového svazku, operuje spektrometr v okolí modrých barev. Datasheet dostupný z [18].



Obr. 16: Spektrometr HR4000.



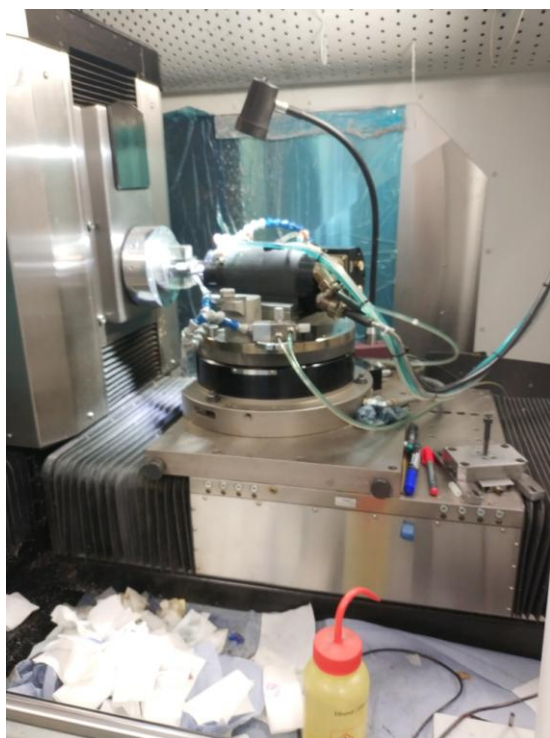
Obr. 17: Spektrometr AvaSpec.

3.2 Výroba a určování povrchu destičky

3.2.1 Výroba testovacích destiček

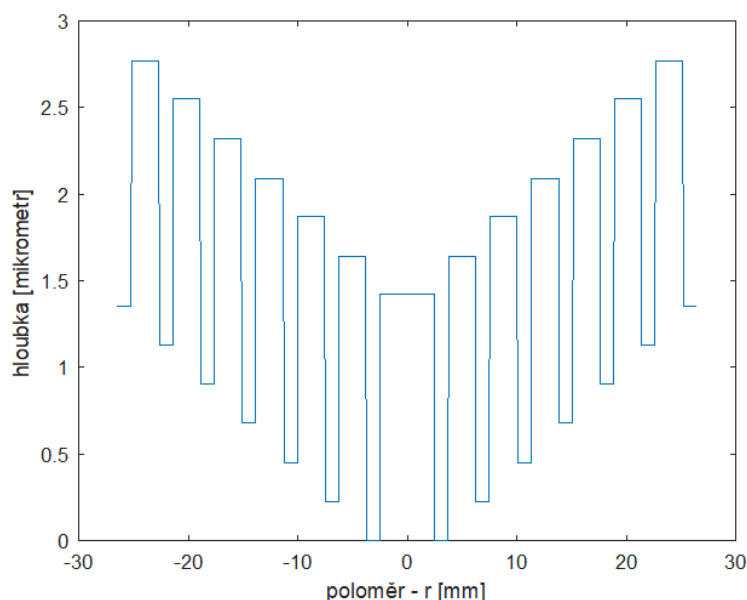
Po sestavení soustavy pro experiment potřebujeme objekt vložený do Fourierovy roviny, jak bylo psáno v kapitole 2.2, který nám bude tvarovat pulz. Pro nás to bude tedy testovací destička s průměrem 53 mm a hloubkou 5 mm. Materiál, který si zvolíme, bude hrát důležitou roli v simulaci a měření, jelikož každá látka má jiný index lomu n . My jsme si zvolili Polymethylmethakrylát (dále PMMA, chemická značka = $C_5H_8O_2$). PMMA má dobré optické vlastnosti, což jí předurčuje k tomu, aby byl jedním z nejpoužívanějších plastů v optice. Kromě jeho bezbarvosti a průhlednosti tento materiál propouští po započtení fresnelovských odrazů až 92 % [19]. Pro představu index lomu pro vlnovou délku λ okolo 580 nm je 1,491. V simulaci se index lomu mění spolu s měnící se λ , takže bylo nutné najít vhodný popisující vzorec, podle kterého se mění. Rovnice (14) nalezena v databázi [20] nám takovou závislost popisuje při vložení vlnových délek v mikrometrech:

$$n^2 - 1 = \frac{0.99654 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.00787} + \frac{0.18964 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.02191} + \frac{0.00411 \lambda^2}{\lambda^2 - 3.85727} \quad (14)$$



Jako poslední etapa výroby testovacího vzorku bylo nutné do destičky zanést specifický povrch ukázaný na Obr. 19. Kvůli zjednodušení výroby je navrhnutý profil sféricky symetrický. Povrch byl vyfrézován pomocí přístroje, zobrazeném na Obr. 18. Jedná se o výrobek firmy Nanotech a je to přesněji CNC generátor tvaru s přesností odměřování ve zlomcích mikrometrů, využívající metodu SPDT („Single Point Diamond Turning“, což lze přeložit jako „Jednobodové diamantové soustružení“) s ultrazvukovou asistencí.

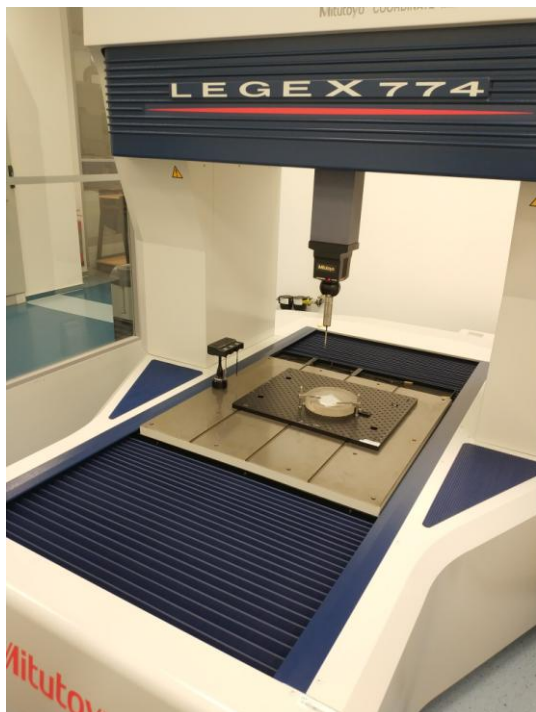
Obr. 18: Frézka Nanotech použita k vybroušení specifického tvaru povrchu na testovacím vzorku.



Obr. 19: Obrázek průřezu plánovaného povrchu testovací destičky, předložený frézce.

3.2.2 Určování povrchu testovacích destiček

Jelikož nahrazujeme SLM ve Fourierově rovině průhlednou destičkou, potřebujeme znát tvarové charakteristiky vyrobeného testovacího vzorku. To bude v kombinaci s typem materiálu ovlivňovat tvar pulzu.



Obr. 20: Přístroj Mitutoyo pro zjištění tloušťky testovací destičky.

Nejprve je důležité si zajistit hrubý obraz testovacího vzorku, neboli celkový tvar bez detailů. Toho jsme docílili pomocí CNC souřadnicového měřicího stroje LEGEX 774 vyrobeného firmou Mitutoyo, zobrazeném i s testovacím vzorkem na Obr. 20. Přístroj na stanovených souřadnicích používá sondu ve tvaru kuličky. Tato sonda se přibližuje k vzorku až do okamžiku, kdy je na ní vyvíjen tlak při dosažení měřeného objektu. Testovací destička se měřila z obou stran, upnutá svisle. Počítačem se po změření určí rozdíl mezi oběma měřeními, čímž se zjistily hloubky v určených souřadnicích testovací destičky. V porovnání s optickými metodami pro měření povrchu se jedná o nepřesná měření, ale pro měření mechanických

součástí je to zcela dostačující. Hlavním smyslem měření bylo určit případné prohnutí, které mohlo zapříčinit například zahřátí plastu při frézování povrchu apod.

Pro fs pulzy je však rozhodující i malá změna OPL, a proto vyžadujeme jemnější měření povrchu, než jen hrubý odhad tvaru. To jsme učinili metodou interferometrie bílým světlem (v angličtině „white-light interferometry“, dále v textu referováno jako WL interferometrie). Přístroj, jenž k tomu byl použit, je vyroben firmou ZYGO, značky NewView 7200, a je vidět na Obr. 21.



Obr. 21: WL interferometr použitý pro získání přesného tvaru povrchu.

WL interferometrie je způsob, jak zjistit 3D tvar povrchu bezkontaktně a velice přesně i pro rozměry mikrometrů až nanometrů. Zjednodušený princip WL interferometrie je takový, že místo monochromatického světelného zdroje, používaného v laserové interferometrii, použijeme k měření celé spektrum vlnových délek. To nám zajišťuje více referenčních datových bodů z jednoho místa a měření je mnohem přesnější. Měření a princip jako takový je velice podobný Michelsonovu interferometru. Dodatečné informace lze najít na stránce se článkem o WL interferometrii [21] se stažitelnou brožurou. WL je tedy dobrý pro přesná měření povrchu, avšak jen na malé ploše. Jednotlivé malé měřené obrazy se musí spojit dohromady, čímž může vzniknout chyba celkového tvaru. Souřadnicový měřicí stroj slouží pro získání hrubého obrazu na celé ploše materiálu. Z WL vezmeme pouze detaily povrchu a přičteme k nim celkový tvar destičky, naměřený profilometrem Mitutoyo. Dostaneme tak relativně přesný virtuální pohled na testovací vzorek, který můžeme použít pro simulaci.

3.3 Simulace pulzu

Po sestavení experimentu a naměření FROGu jsme si obstarali reálná data pro porovnání se simulací. Nyní nastává čas se je pokusit nasimulovat, což je vlastně hlavní náplní této práce. Učiníme tak v programu MATLAB. V podstatě se snažíme krok od kroku postupovat a simulovat, jako bychom sledovali virtuální paprsek procházející skrze 4f tvarovač pulzů. Celý program je dostupný na dodaném disku s prací.

Výpočet tvarování pulsu probíhal pomocí následujících kroků:

- 1) definování vstupního pulzu
- 2) určování dopadu spektra pulzu na destičku
- 3) změna fáze při průchodu deskou
- 4) výpočet výstupního pulzu v čase
- 5) výpočet očekávaného FROG spektrogramu

Jednotlivé kroky výpočtu popíšeme v následujících podkapitolách.

Výpočet jsme prováděli pro časovou škálu $\pm 6 \cdot 10^3$ fs, pro 4096 bodů, která odpovídá frekvenčnímu rozsahu $3,0353 - 6,4469 \cdot 10^{14}$ Hz. Středová frekvence rozsahu se rovná $4,7415 \cdot 10^{14}$ Hz k odpovídající středové vlnové délce 632,7 nm pro laser. Pro výpočet FROG se použil rozsah vlnových délek v rozmezí 268,1 – 385,7 nm.

3.3.1 Vstupní puls

Na začátku programu jsme nahráli všechna potřebná naměřená data. Jedná se konkrétně o data naměřená z kalibrace SLM (pozice vlnových délek v prostoru), profil hloubek tvarovací destičky a experimentálně změřené spektrum laserového pulzu. Následuje úprava dat, ořezání nepotřebných hodnot pro nepoužité vlnové délky (popsané blíže v kapitole 3.1.1 v odstavci zaměřeném na SLM a rovnicí (13)) a přepočítání os pro FT. Nejprve jsme si zjistili okrajové vlnové délky laserového svazku a podle nich si vygenerovali ekvidistantní frekvenční osu. Následuje výpočet intervalu nové osy vlnových délek λ ukázaný na Obr. 22 dle rovnice převzaté z [22]:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (15)$$

Kde f zastupuje frekvenční osu a c zastupuje rychlost světla. Simulace probíhala s použitím rychlosti světla ve vakuu, jelikož rozdíl s reálnou rychlostí je pro výpočet zanedbatelný.

```

T = 6.*10.^(3); % fs
t = linspace(-T,T,N).*10.^(-15);
dt = t(2) - t(1);

% priprava os pro FT
F0 = (c/min(lambda_int) + c/max(lambda_int))/2;
FaxizZero = (-N/2:N/2-1)/dt/N;
freq = F0 + FaxizZero;
vln_delka = c./freq;
lambdaC = c./F0;

```

Obr. 22: Přepočet os vhodných pro FT. Proměnná dt představuje časový krok, který v převráceném tvaru udává rozdíl vedlejších frekvencí pro frekvenční osu.

Poté nasimulujeme vstupní pulz pomocí zpětné FT, jenž je popsána rovnicí (5) v kapitole 2.2.1 algoritmem ukázaným na Obr. 23. Použitá amplituda je experimentálně změřené spektrum laseru, zatímco fáze je konstantní pro všechny vlnové délky. Tím předpokládáme, že pulz je ideálně komprimovaný. Program umožňuje použít jako vstupní pulz experimentálně změřený netvarovaný pulz. V naší simulaci je vstupní pulz gaussovský v čase i prostoru, ačkoliv takový být nutně nemusí.

```

function [pulseOut] = getPulseShape(freqAxis,t, AmpIn, phaseIn)
% dostani pulzu v case

pulseOut=double(zeros(size(t)));
N=length(freqAxis);

freqAxis=fftshift(freqAxis);
AmpIn = fftshift(AmpIn);
phaseIn = fftshift(phaseIn);

% integral
for ii=1:N
    tempPhase = (2*pi*freqAxis(ii)).*t + phaseIn(ii);
    AA = AmpIn(ii)*exp(1i*tempPhase);

    pulseOut=AA+pulseOut;
end
end

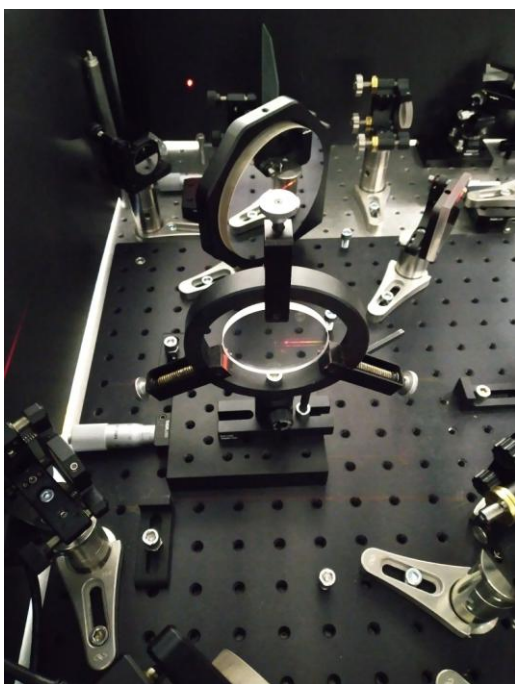
```

Obr. 23: Funkce vypočítávající pulz pomocí zpětné FT.

Aby byly výsledky simulace srovnatelné s experimentem, museli jsme zahrnout konečnou šířku pásma SHG [13]. V našem případě vynásobíme vstupní spektrum pulzu gaussovskou funkcí s FWHM 55 nm.

3.3.2 Profil destičky v místě modulace

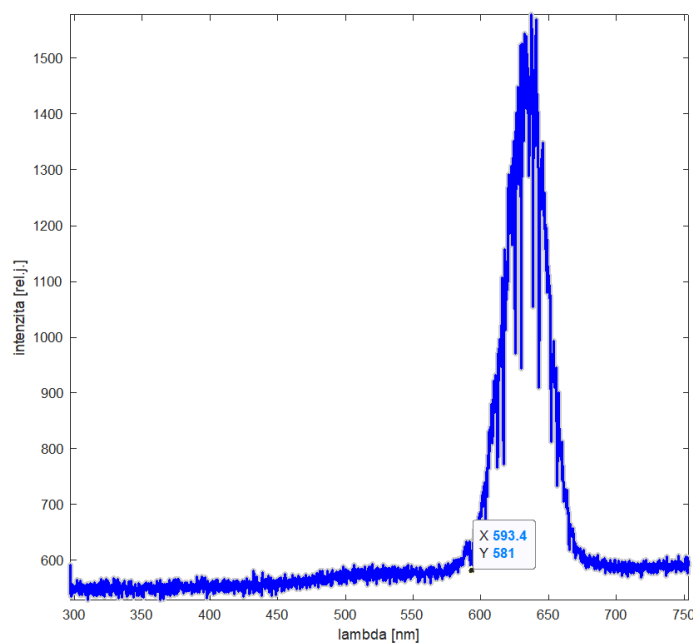
Taktéž musíme brát v potaz, že světelný svazek má jinou velikost, než testovací vzorek. Aby bylo možné porovnat simulaci s experimentem, je nutné zajistit, aby v obou případech dopadaly vlnové délky na stejné místo na testovacím vzorku. K tomu využijeme data z výše zmíněné kalibrace SLM. Data nám určí rozložení vlnových délek v prostoru, zároveň však potřebujeme zjistit přesnou polohu tvarovací destičky.



Obr. 24: Svazek dopadající na testovací vzorek s posunem 5 mm od okraje.

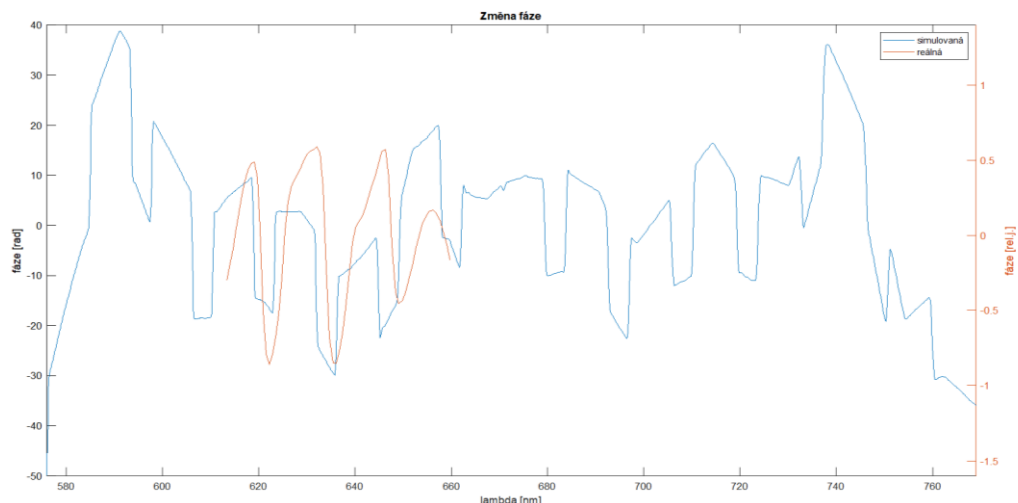
Destička byla v experimentu upevněna na mikrometrickém posuvu, od čehož se odvíjí proměnná „posun“, používaná v textu. Učiníme kalibraci pro pozici při posunu 0 mm, od čehož potom budeme moci odvíjet další posuny shodné s použitými v experimentálním měření.

Kalibrace v tomto programu probíhala tak, že byla destička vložena do svazku takovým způsobem, aby svazek přesahoval její okraj. Jak je vidět na Obr. 25, na místě okraje testovacího vzorku se ve spektru nachází zářez, kde se kvůli rozptylu intenzity propadly. Zdali se jedná o okraj, bylo potvrzeno pomocí změny posunu destičky, což vyvolalo i posun tohoto zářezu. V místě propadu pro 0 mm posun jsme odečetli vlnovou délku, která dopadala na okraj. Pomocí kalibrace SLM jsme jí převedli na pozici v prostoru 19,54 mm. Následně jsme jí zanesli do programu jako prvotní hrubou pozici proměnné „posun“ rovné 0 mm. Tato pozice není zcela přesná, protože profil destičky změřený WL interferometrií nebyl měřen přímo od okraje.



Obr. 25: Data, podle kterých byl prvotně kalibrován posun 0 mm svazku na destičce. Ve zvýrazněném bodě se nachází propad hodnot určující okraj testovacího vzorku.

Byla provedena simulace pro toto hrubé nastavení posunu, a porovnála se spektrální fáze výstupního pulzu s rekonstruovanými daty. Z důvodu, že profil nebyl měřen od kraje destičky, byla simulovaná fáze posunuta vůči experimentální. Správného výsledku bylo docíleno změnou posunu v simulaci o 0,2 mm, jak lze vidět v konečném výsledku na Obr. 26. Celá kalibrace probíhala přičítáním konstant v jádru programu k proměnné posun, které přiblížily posun k experimentálním hodnotám. Další experimentální měření probíhala od 5 mm posunu, aby bylo zajištěno, že bude na destičku dopadat celý svazek dle rovnice (13).



Obr. 26: Ukázka nedokonalé prvotní kalibrace posunu po použití zjištěné polohy okraje destičky ve svazku. Modrá křivka zobrazuje změnu fáze simulace, červená ukazuje změnu fáze experimentu.

Tím je kalibrace dokončena a okraj změřeného profilu povrchu je synchronizovaný s 0 mm posunem v simulaci. Při znalosti posunu v experimentu můžeme toto číslo zadat do programu a svazek nám virtuálně dopadne na místo na destičce s dostatečně velkou přesností na to, aby to výrazněji neovlivnilo výsledný spektrogram FROGu. Pokud by program popisoval realitu zcela přesně, mohl by se dopad svazku určit vykreslením výsledků pro posun přes celou destičku s dostatečně jemným krokem a porovnáním s výslednými spektrogramy FROGu z experimentu.

3.3.3 Změna fáze při průchodu testovacím vzorkem

Když známe rozložení spektra na testovacím vzorku, nasimulujeme průchod destičkou. K tomu využijeme vybraný interval naměřených dat testovacího vzorku, kde jednotlivé hodnoty pro hloubky destičky použijeme jako vzdálenost l v rovnici (9). Tím získáme OPL.

S těmito znalostmi můžeme změnit fázi a tím změnit proměnnou ve funkci počítající pulz, která je ukázána na Obr. 23. Fázi φ získáme použitím vzorce převzatého z [23]:

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{OPL}{\lambda} \quad (16)$$

```

function [phase] = getPhase(vln_delka,tloustka)
for i = 1:length(vln_delka)
    lambda_i = vln_delka(i).*10^6;
    index_lomu(i) = sqrt((0.99654*lambda_i^2)/(lambda_i^2 - 0.00787)+(0.18964*lambda_i^2)/(lambda_i^2 - 0.02191)+(0.00411*lam
end

    index_lomu = real(index_lomu);
for i = 1:length(tloustka)
    OP(i) = (tloustka(i).*index_lomu(i));
end
for i = 1:length(tloustka)
    phase(i) = 2*pi*(OP(i)./vln_delka(i));
end
end

```

Obr. 27: Funkce zajišťující simulaci změny fáze po průchodu testovacím vzorkem.

3.3.4 Výstupní pulz

Se znalostí změny fáze můžeme znovu použít funkci pro výpočet pulzu vyobrazenou na Obr. 23, tentokrát s rozdílnou změnou fáze, pojmenovanou jako proměnná *phaseIn*. Z matematického hlediska použijeme rovnici (5) a zaměníme proměnnou φ z konstantní vstupní na vypočítanou hodnotu po průchodu vzorkem. To způsobí změnu tvaru pulzu v čase a vypočítá výsledný tvarovaný výstupní pulz. Nyní jsme schopni zobrazit průběh pulzu po průchodu tvarovací destičkou v čase. Výsledek lze ještě zpřesnit a přiblížit realitě zahrnutím efektů rozlišení spektrometru a konečné velikosti fokusovaného bodu vlnové délky na Fourierovu rovinu. Možností je také použití reálně změřené vstupní fáze pulzu.

3.3.5 Výpočet FROG spektrogramu

Podle prvotních úvah jsme chtěli výsledky porovnat ve spektrogramech FROG. Pro výpočet mi byla vedoucím práce poskytnuta funkce, schopná vypočítat z pulzu SHG FROG spektrogram. SHG FROG, popsany kapitolou 2.3.2, používá frekvenční osu dvojnásobné frekvence vůči laserovému pulzu. Funkcí dostaneme spektrogram, který můžeme začít porovnávat s reálně naměřeným spektrogramem FROGu. Pokud bychom si přáli vidět pouze tvar pulzu, stačila by předešlá část programu. Rekonstruovaná data byla doprovodně získána pomocí algoritmu, založeném na metodě známé v angličtině jako Generalized Projections, implementované Ranou Jafari [24].

4 Výsledky

Tato kapitola má za úkol popsat čtenáři výsledky celé práce a zhodnotit je. Stěžejní pak bude hlavně porovnání výsledných simulovaných dat tvarování pulzu s experimentálními. Začneme zkoumáním vlivů různých parametrů na výsledek simulace, jak je popsáno dále.

4.1 Výsledky

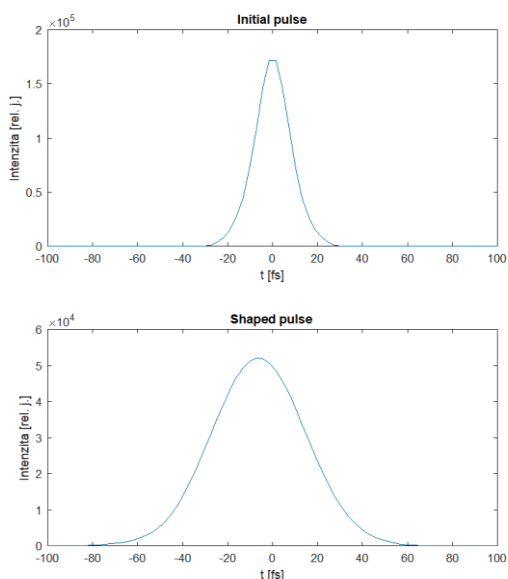
Podkapitola je rozdělena na:

- 1) test simulace pro rovný testovací povrch
- 2) výsledky z charakterizace testovacího vzorku
- 3) identifikování nejmenší změny posunu s viditelnou změnou výsledků
- 4) vliv korekčních proměnných (rozlišení spektrometru, konečná velikost stopy laseru)
- 5) vliv zpřesnění vstupní fáze
- 6) vliv změny počtu výpočetních bodů N
- 7) výsledky simulací z programu MATLAB
- 8) porovnání simulovaných a experimentálních spektrogramů FROG
- 9) porovnání simulovaných a experimentálních změn fází

Výsledky pak blíže diskutujeme v kapitole 4.2.

4.1.1 Test simulace pro rovný testovací povrch

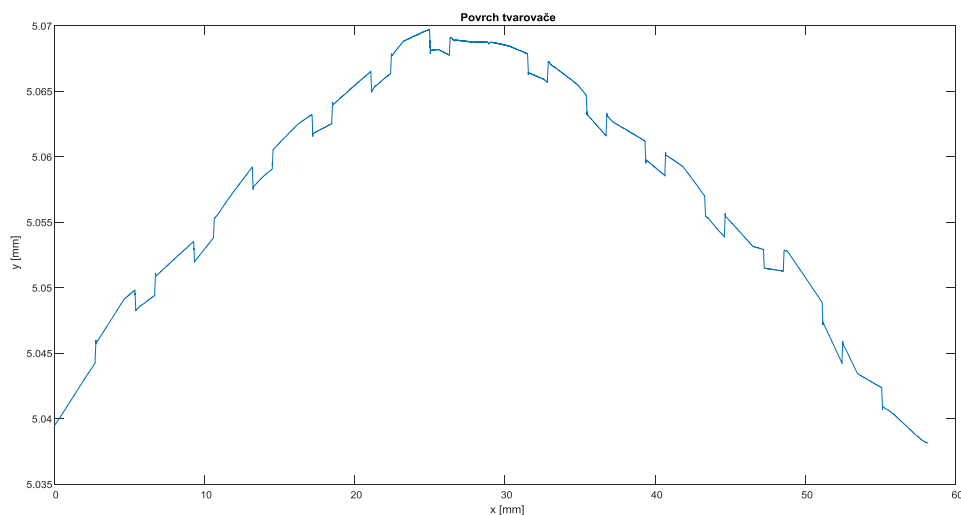
Abychom se ujistili, že program funguje správně, lze v programu nastavit povrch testovacího vzorku na zcela rovný. Výsledek testu je zobrazen na Obr. 28. Šířka pulzu v polovině maxima byla pro vstupní 18,2 fs, a pro výstupní 49,1 fs. Pulz se prodloužil v důsledku disperze indexu lomu v destičce.



Obr. 28: Výstup simulace pro rovnou destičku. Výstupní pulz se průchodem skrze destičku konstantní tloušťky v závislosti na změně indexu lomu způsobené disperzí materiálu rozšířil v čase. Gaussovský tvar zůstal stejný.

4.1.2 Výsledky z charakterizace testovacího vzorku

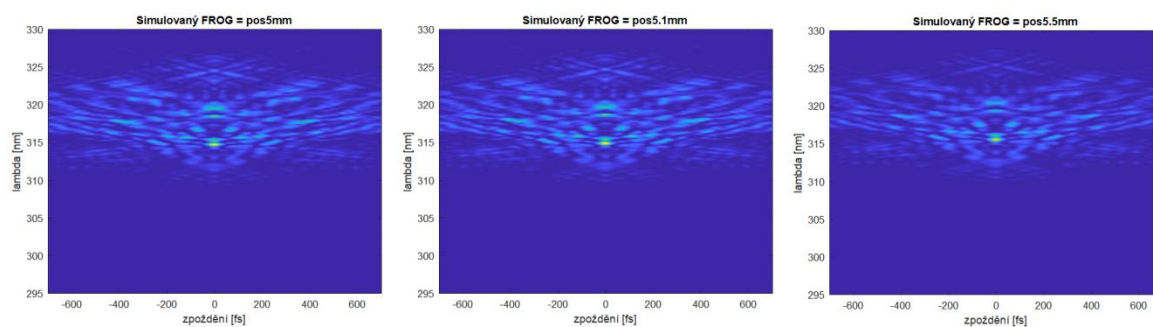
Měření destičky pomocí přístrojů a metod v kapitole 3.2 nám poskytlo soubor dat, jenž je vidět na Obr. 29. Ten jsme použili pro všechny následující simulace. Přesnost povrchu byla pořízena s rozlišením WL interferometru 0,1 nm vertikálně a horizontálně v jednotkách μm .



Obr. 29: Výsledný celkový tvar povrchu testovacího vzorku, použitý ve výpočtech.

4.1.3 Identifikování nejmenšího posunu s viditelnou změnou výsledků

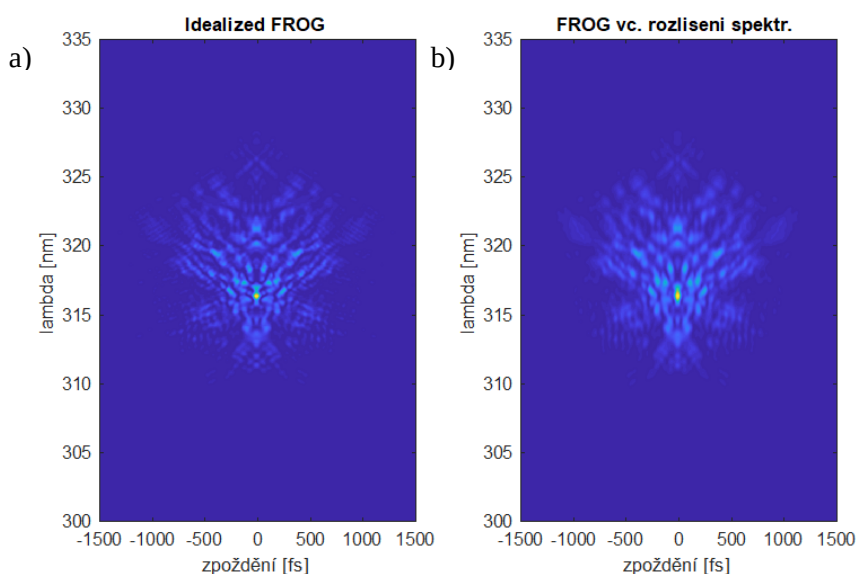
Jednou ze zajímavých částí práce bylo zjistit, jak moc malá změna posunu má viditelný vliv na změnu spektrogramu FROG. Bylo provedeno několik simulací pro dvojice posunů s různým rozdílem, což ukázalo, že nemá smysl používat menší posun, než je 0,1 mm. Pro menší posuny nebyla znatelná výraznější změna ve spektrogramech FROG. Pokud není cílem hledat i ty nejmenší změny, tak je 0,5 mm zcela dostačující alespoň pro náš testovací vzorek. Na Obr. 30 jsou viditelná porovnání spektrogramů.



Obr. 30: Ukázka rozdílů mezi spektrogramy s jemnou změnou posunu. Zleva doprava jsou posuny rovny 5 mm, 5,1 mm, 5,5 mm. Barevná škála dle Obr. 9.

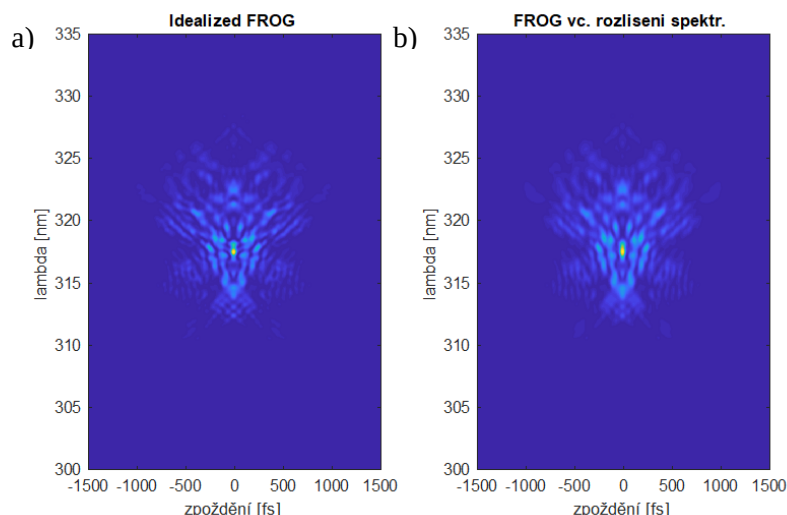
4.1.4 Vliv korekčních proměnných

Pro přiblížení simulace co nejvíce ke skutečnosti můžeme do programu zavést i rozlišení použitého spektrometru, které je 0,4 nm. Bez tohoto rozlišení je výsledkem simulace ideální spektrogram. S použitím rozlišení je výsledek podobný idealizovanému, ale podle očekávání rozmazanější ve spektrální ose. Porovnání ideálního a reálnějšího FROGu je zobrazené na Obr. 31 pro posun 6 mm.



Obr. 31: Porovnání spektrogramů a) bez a b) se započítáním rozlišení spektrometru. Spektrogram je simulován pro posun destičky o 6 mm. Barevná škála dle Obr. 9.

Kromě rozlišení spektrometru program nabízí možnost změny proměnné `focalSpotWidthmMM`, zastupující šířky bodů na Fourierově rovině, na které jsou fokusovány vlnové délky po průchodu čočkou. Rozdíl je pro experimentálně zjištěnou hodnotu proměnné 0,12 mm vyobrazen na Obr. 32. Pro ostatní simulace byla použita malá hodnota 0,00005 mm, blíží se ideálně fokusovaným bodům.

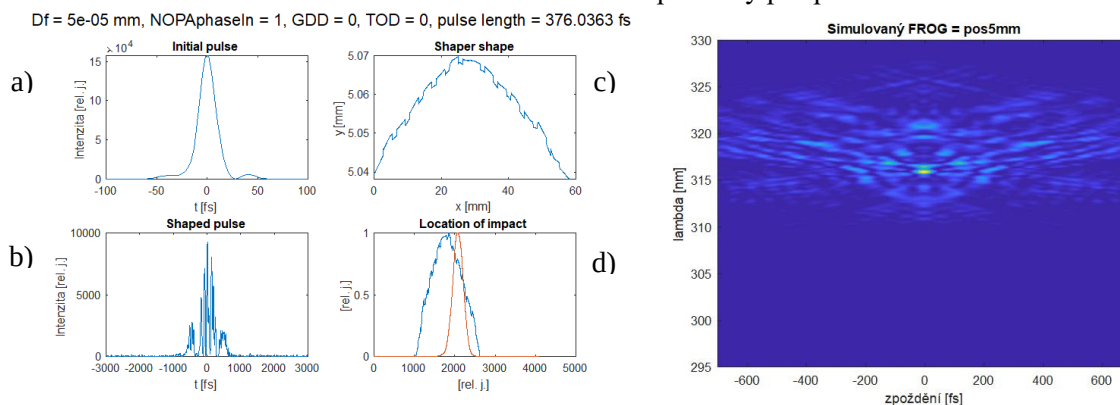


Obr. 32: Obrázek zobrazující spektrogram pro šířku bodu jedné vlnové délky rovné 0,12 mm. Obrázek a) je bez rozlišení spektrometru, b) s rozlišením. Posun = 6 mm Barevná škála dle Obr. 9..

4.1.5 Vliv zpřesnění vstupní fáze

Ve skutečnosti nemusí být fáze pro vstupní pulz konstantní. Pro zpřesnění simulace můžeme nahrát fázi pulzu, získanou přímo při jeho generaci v přístroji NOPA. Výsledky pro použití fáze z NOPA jsou zobrazeny na Obr. 33 spolu se spektrogramem FROG na Obr. 34. Pro porovnání jsou na Obr. 35 a Obr. 36 zobrazeny výsledky pro konstantní vstupní fázi pulzu. Výsledky

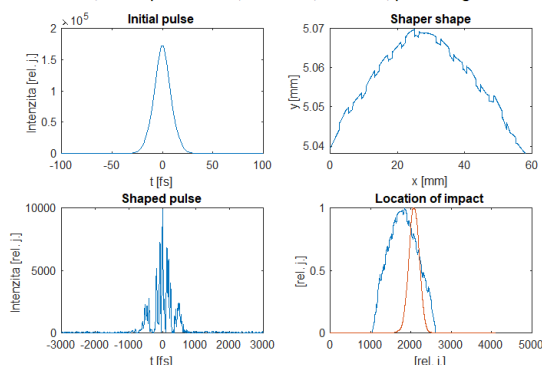
pořízeny pro posun 5 mm.



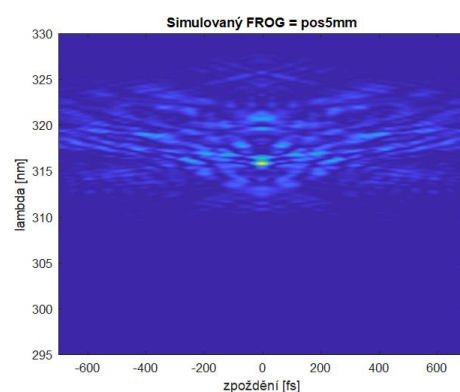
Obr. 33: Grafický výstup simulace pro vstupní fázi z NOPA. Pole a) tvar simulovaného vstupního pulzu v čase. Pole b) tvar simulovaného výstupního pulzu v čase. Pole c) celkový povrch tvarovací destičky. Pole d) místo, kam dopadne svazek na tvarovací destičku. Tato legenda popisuje všechny následující grafické výstupy simulace.

Obr. 34: Spektrogram pro vstupní fázi z NOPA. Barevná škála dle Obr. 9.

$Df = 5e-05$ mm, NOPAphaseIn = 0, GDD = 0, TOD = 0, pulse length = 373.1089 fs



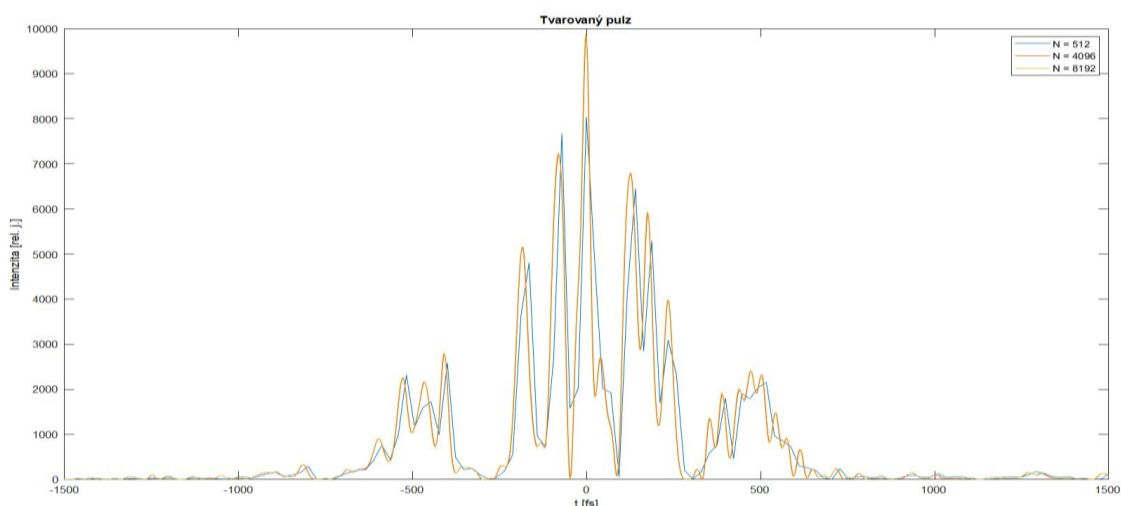
Obr. 35: Výsledky pro konstantní vstupní fázi. Popis jednotlivých polí dle Obr. 33.



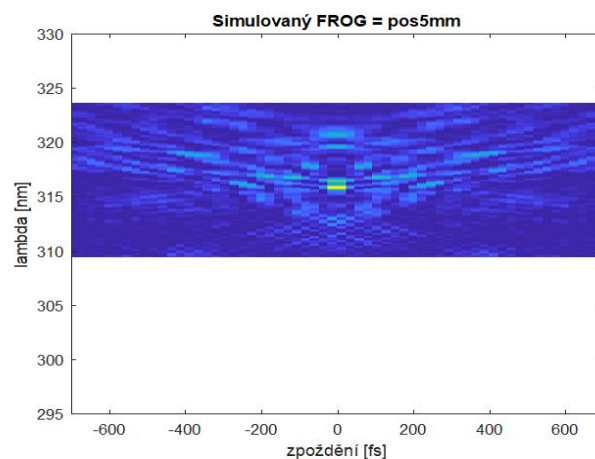
Obr. 36: Spektrogram s konstantní vstupní fází. Barevná škála dle Obr. 9.

4.1.6 Vliv změny počtu výpočetních bodů N

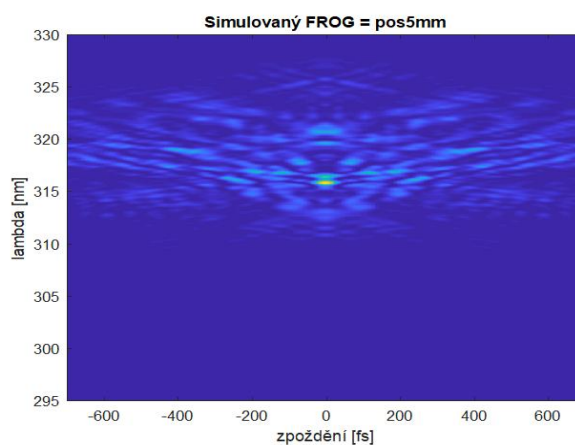
Další proměnnou, na kterou je potřeba v programu dávat důraz, je počet výpočetních bodů N. Dle hodnoty této proměnné se určují velikosti polí a dat, které následně značně ovlivňují výpočty, jako je např. integrace. Ukázky změn této proměnné pro simulaci jsou vyobrazeny na Obr. 37, 38, 39 a 40. První Obr. 37 zobrazuje tvar výstupního pulzu s posunem 5 mm při různých nastaveních výpočetních bodů. Simulace probíhaly při $N = 512$, 4096 a 8192. Pro jednotlivá nastavení N jsou na Obr. 38, 39 a 40 zobrazeny příslušné spektrogramy FROG.



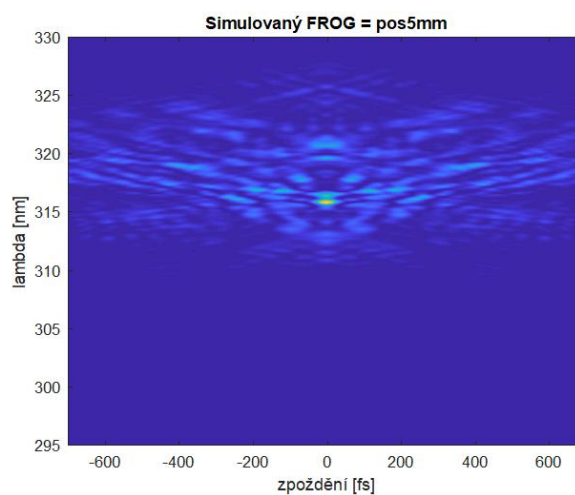
Obr. 37: Porovnání tvarů pulzů pro různé počty výpočetních bodů N.



Obr. 38: FROG pro $N = 512$, posun = 5 mm.
Barevná škála dle Obr. 9.



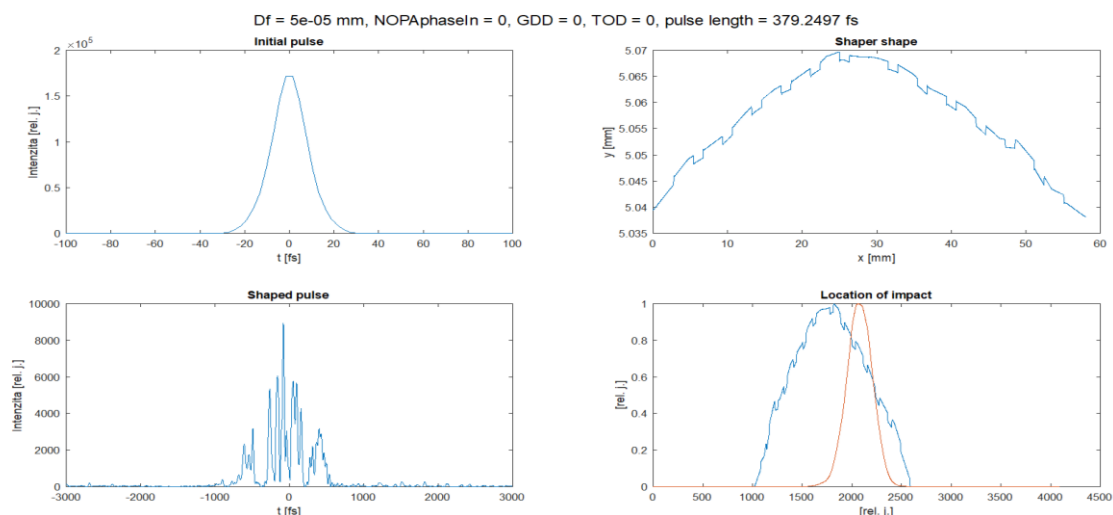
Obr. 39: FROG pro $N = 4096$, posun = 5 mm.
Barevná škála dle Obr. 9.



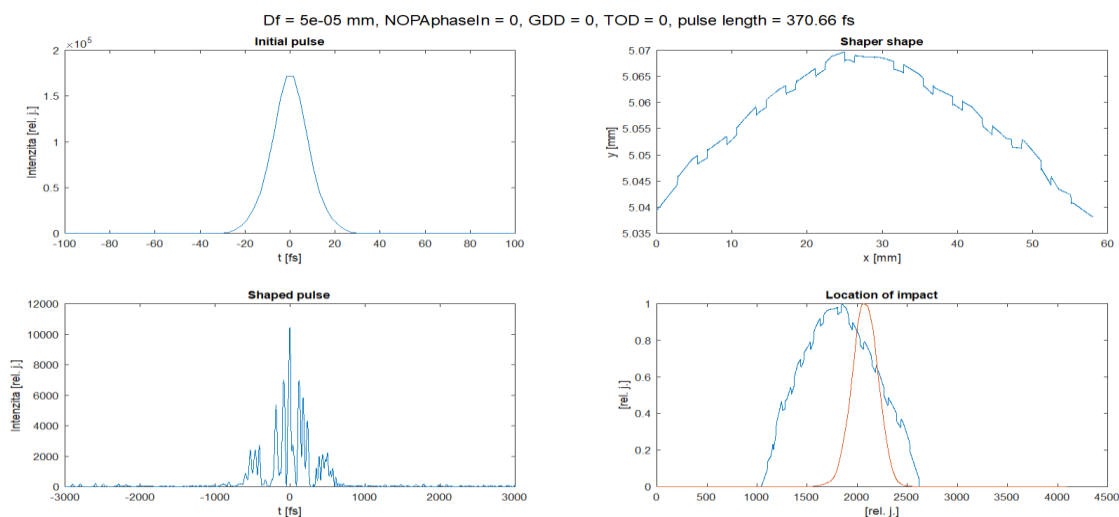
Obr. 40: FROG pro $N = 8192$, posun = 5 mm.
Barevná škála dle Obr. 9.

4.1.7 Výsledky simulací z programu MATLAB

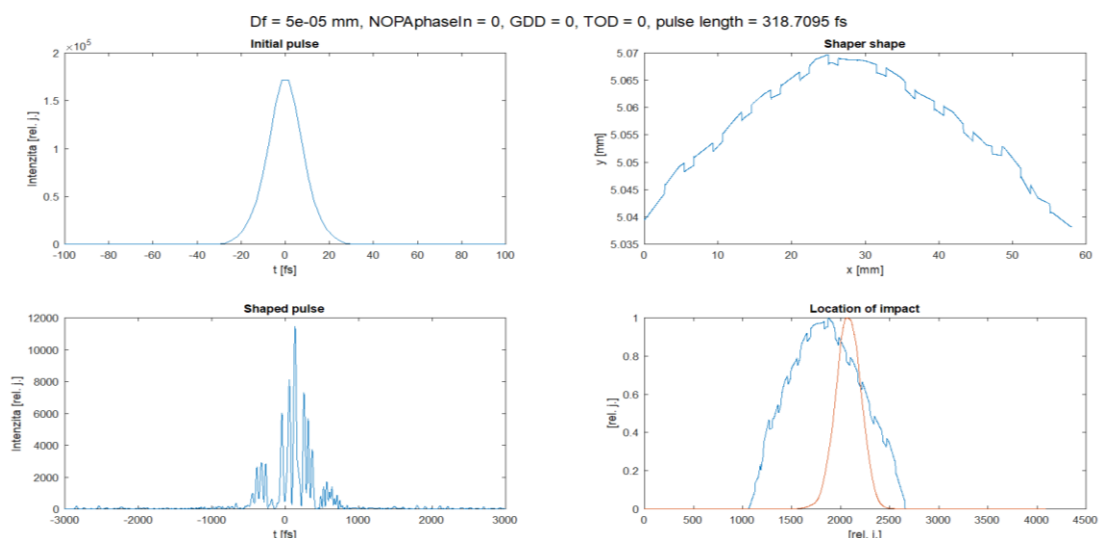
Výsledky, které program nasimuloval, jsou graficky zobrazeny pro velikosti posunu svazku na desce o 5, 6 a 7 mm, jelikož s takovými posuny jsme udělali výběr z dat experimentálně naměřených. Výstupy z programu jsou zobrazeny na Obr. 41, 42 a 43. Pro simulace jsme použili rozlišení spektrometru 0,4 nm, počet výpočetních bodů 4096 a přesnost fokusace vlnových délek 0,12 mm.



Obr. 41: Výsledek při posunu 5 mm. Popis jednotlivých polí dle Obr. 33.



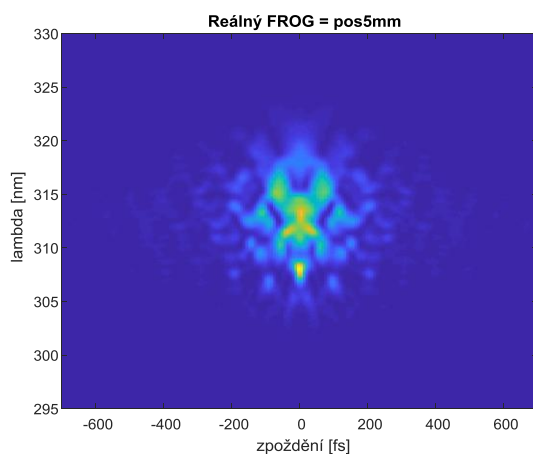
Obr. 42: Výsledek při posunu 6 mm. Popis jednotlivých polí dle Obr. 33.



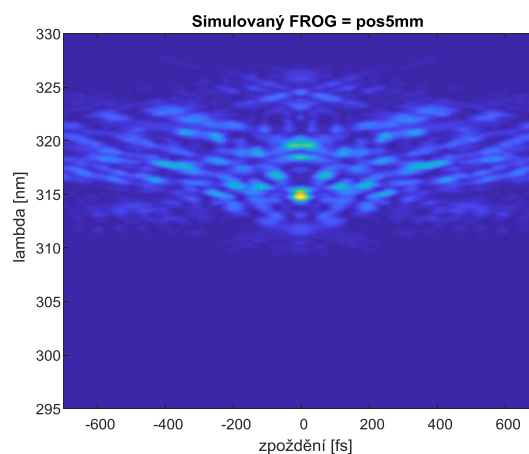
Obr. 43: Výsledek při posunu 7 mm. Popis jednotlivých polí dle Obr. 33.

4.1.8 Porovnání simulovaných a experimentálních spektrogramů FROG

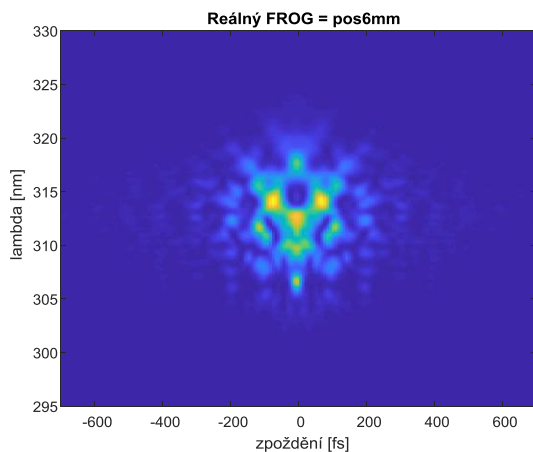
Rozdíly při porovnávání tvaru pulzu v časové doméně mohou být špatně patrné. FROG by v tomto případě poskytoval jasné určení, zdali program simuluje realitu zcela správně, či ne. Proto bylo rozhodnuto už od počátku cílit na FROG a porovnávat spektrogramy, jelikož se to zdálo nejvíce názorné. Na Obr. 44, 46 a 48 jsou ukázány simulované spektrogramy FROG, zatímco na Obr. 45, 47 a 49 jsou ukázány související reálně naměřené experimentální. Stejně jako pro výstup simulace v předchozí kapitole, jsou spektrogramy vypočítány pro posuny 5, 6 a 7 mm.



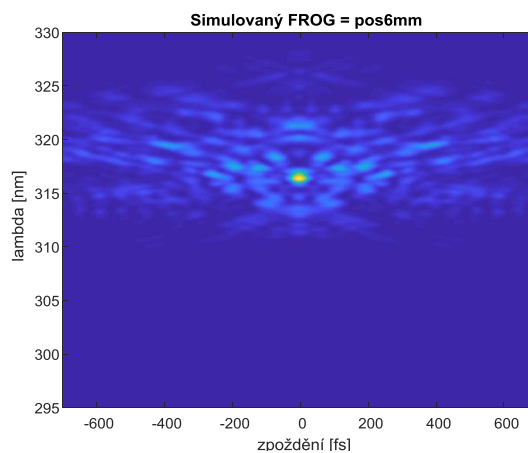
Obr. 44: Spektrogram reálného FROGu při posunu testovacího vzorku o 5 mm. Barevná škála dle Obr. 9.



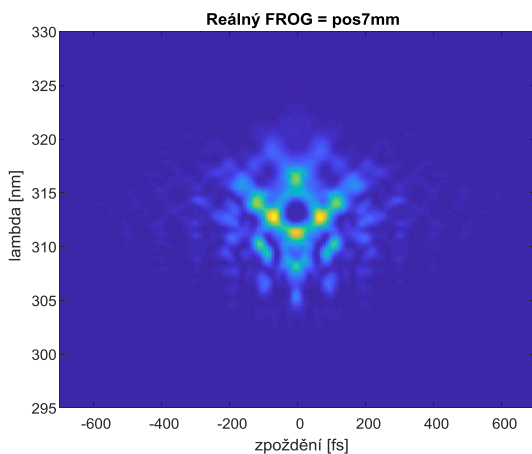
Obr. 45: Spektrogram simulovaného FROGu při posunu testovacího vzorku o 5 mm. Barevná škála dle Obr. 9.



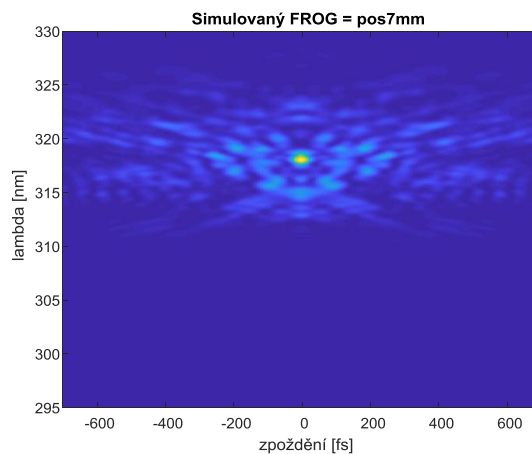
Obr. 46: Spektrogram reálného FROGu při posunu testovacího vzorku o 6 mm.
Barevná škála dle Obr. 9.



Obr. 47: Spektrogram simulovaného FROGu při posunu testovacího vzorku o 6 mm.
Barevná škála dle Obr. 9.



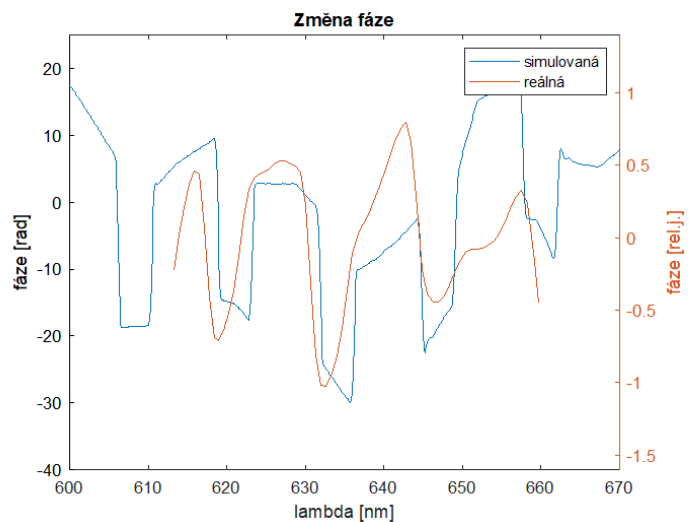
Obr. 48: Spektrogram reálného FROGu při posunu testovacího vzorku o 7 mm.
Barevná škála dle Obr. 9.



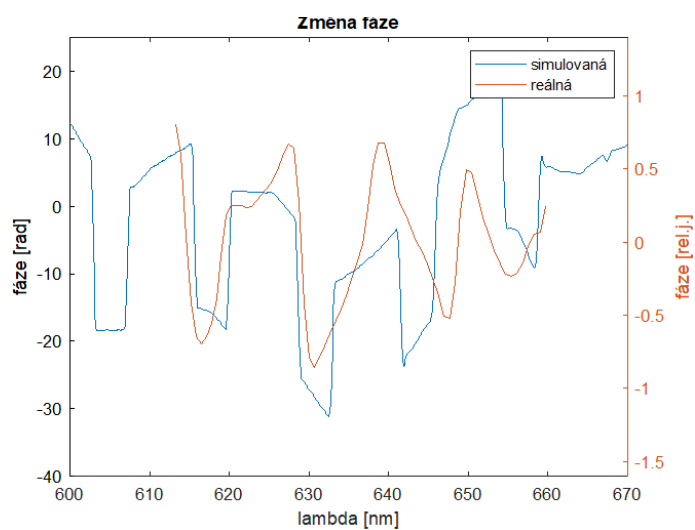
Obr. 49: Spektrogram simulovaného FROGu při posunu testovacího vzorku o 7 mm.
Barevná škála dle Obr. 9.

4.1.9 Porovnání simulovaných a experimentálních změn fází

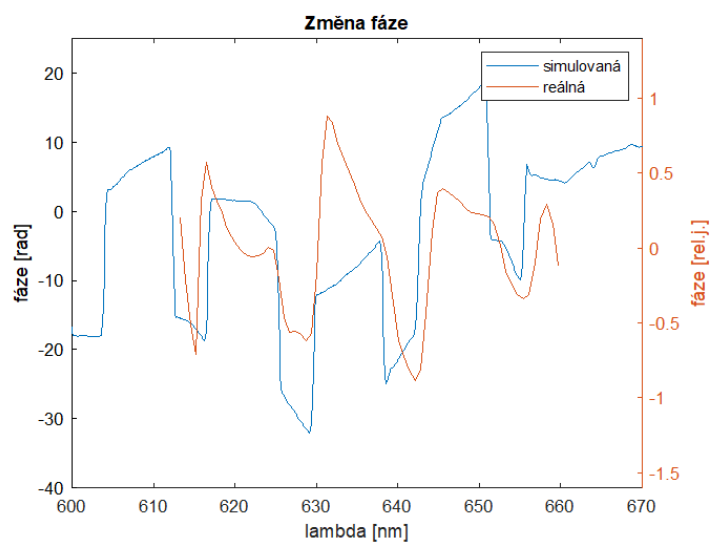
Kromě tvaru pulzu a jeho FROG spektrogramu, lze pulzy porovnat ještě pomocí změn jejich fází. Po porovnání spektrogramů FROG se jeví jako vhodnější a robustnější metoda porovnat fáze. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 50, 51 a 52 pro posuny 5, 6 a 7 mm.



Obr. 50: Porovnání změn fáze pro posun 5 mm.



Obr. 51: Porovnání změn fáze pro posun 6 mm.



Obr. 52: Porovnání změn fáze pro posun 7 mm.

4.2 Diskuze

Už z prvního pohledu je jasné, že simulace zcela neodpovídá realitě. Avšak podle výsledků testování z kapitoly 4.1.1, kde jsme testovali změnu tvaru pulzu po průchodu rovnou tvarovací destičkou, simulace probíhá z hlediska výpočtu fázově modulovaného pulzu dle očekávání správně. Dále jsme testovali průchod velmi tenkou destičkou a změnu fáze na destičce pro jediný fázový skok. Ve všech těchto ohledech simulace vedla na očekávané výsledky.

V kapitole 4.1.2 na Obr. 29 jsou ukázána data, kde vidíme naměřený tvar reálné testovací destičky. Tato data byla použita jako tvarovací vzorek místo zcela rovné destičky v simulaci. Chyba, která se mohla naskytnout při sečtení detailů povrchu a celkového tvaru testovacího vzorku, by konstantně ovlivňovala všechna data. Neměla by výraznější vliv na výsledný tvar spektrogramu, kromě změny šířky pulzu v čase, jako tomu je u zcela rovné destičky. V případě, že by data byla špatně naměřena profilometrem a chyba byla přibližně konstantně rozložena po celém profilu destičky, ovlivnilo by celkový tvar fáze, který nemá na spektrogram výrazný vliv, jak diskutujeme dále. V případě, že by byl špatně odečten povrch při měření WL interferometrem, pulz by dostal zcela jiný tvar v časové i spektrální doméně.

Vůči navrženému tvaru destičky na Obr. 19 vypadá naměřený tvar destičky rozdílně. Zatímco u navržené destičky je centrum tvaru minimem, v reálně naměřené destičce je centrum posazeno v maximum. Může to být zapříčiněno např. ohřevem a prohnutím testovací destičky při výrobě.

Kapitola 4.1.3 zkoumá minimální posun, pro který jsou viditelné změny ve spektrogramech FROG. Tato informace nebyla nutná pro porovnání simulace s reálně naměřenými daty. Zároveň je to ale zajímavá informace, pokud bychom se rozhodli zkoumat spektrogramy pro celý povrch testovacího vzorku. Podle simulovaných výsledků, je vhodným minimálním posunem 0,5 mm. Menší posun by prodloužil simulaci a přitom nepřidal výsledkům výraznější novou hodnotu, protože se spektrogramy výrazněji nelišily. V tomto případě pak patrně záleží na složitosti povrchu testovacího vzorku, hustotě vrypů a schodů.

Následující kapitola 4.1.4 se zabývala přiblížením simulace k realitě pomocí zavedení nepřesnosti spektrometru a nedokonalostí fokusace jednotlivých vlnových délek na Fourierovu rovinu. Jak se ukázalo, tyto nepřesnosti mají minimální vliv, co se týče tvaru pulzu. Hlavním rozdílem pak bylo rozmazání spektrogramu, který neutrpěl žádné jiné výraznější změny. Další simulace probíhaly v tomto ohledu blíže ideálu, jelikož bylo snazší porovnávat menší rozdíly při zaostřeném spektrogramu a tvar pulzu zůstal velice podobný.

Simulace také nabízí možnost použití reálně naměřené fáze vstupního netvarovaného pulzu pro přesnější výpočty tvaru pulzů. Kapitola 4.1.5 se zabývá porovnáním obou možností, kde použijeme vstupní fázi v podobě konstanty, tj. dokonale stlačený pulz, a fázi reálně naměřenou při generaci fs pulzů pomocí NOPA. Pulzy se mírně liší ve svých tvarech v čase, ale spektrogramy nevykazují znatelné změny. Pro simulaci je dostačující použití konstantní vstupní fáze, jelikož stlačený pulz, použitý v simulaci, je dostatečně podobný vstupnímu naměřenému pulzu.

Následující kapitola 4.1.6 zkoumá vliv výpočetních bodů N . Z těchto výsledků lze usoudit, že potřebujeme dostatečně velké N pro přesný výsledek, jinak je pulz zkreslený. Při nízké hodnotě N se pulz zjednodušuje a v důsledku zkreslení má trochu odlišný spektrogram v porovnání s ostatními. Na druhou stranu příliš velké číslo už nemá výraznější hodnotu pro výpočet, jelikož se výsledné spektrogramy neliší. Zároveň se značně prodlužuje výpočetní čas, proto byla shledána pro tento algoritmus vhodná hodnota $N = 4096$ bodů. Vše potvrzuje Obr. 37, kde se tvary pulzů pro $N = 8192$ a 4096 shodují a pro 512 je pulz zjednodušen.

Grafické výstupy ze simulace, zobrazené v kapitole 4.1.7, ukazují, jak se mění tvar pulzu v čase v závislosti na místě průchodu svazku testovacím vzorkem. Pro simulaci byl použit stejný vstupní pulz, aby je bylo možné porovnat mezi sebou. Grafy ukazují, že na rozdílné šířce materiálu a povrchu, kterým svazek prochází, výsledek silně záleží, což se pak projevuje i na spektrogramech v následující kapitole.

Kapitola 4.1.8 je první, která porovnává výsledky simulace s realitou. Jedná se porovnání simulovaných spektrogramů FROG s experimentálně naměřenými spektrogramy FROG. Při tomto porovnání je jasné, že simulace ne úplně odpovídá realitě. Lze najít podobnosti, jako maxima, nalézající se uprostřed spektrogramu a tvar v okolí maxima. Simulovaný pulz je však mnohem širší, než experimentální. Je důležité zdůraznit, že spektrogram FROG je náchylný na každou změnu tvaru pulzu.

V poslední kapitole 4.1.9, věnující se porovnání změn fáze pro realitu a experiment, data vycházejí lepší. Změna fáze se mění s posunem a lze tyto rozdíly názorně porovnat. Podle těchto výsledků lze usoudit, že simulace přece jen pracuje, i přes rozdílnosti spektrogramů, dobře. Minima i maxima a některé z detailů se nacházejí na blízkých pozicích na spektru. Tvary funkcí změn fází pak v určitých oblastech sdílí podobné tvarování, kde experimentální fáze má pozvolnější změny. Je ale zřejmé, že reálně naměřené fáze jsou v okolí fázových skoků rozmazané, což se projevuje zúžením obálky výsledného pulsu.

Když známe spektrogramy a fázové změny pulzů, můžeme spekulovat o tom, proč použítá simulace neodpovídá realitě. Existuje mnoho důvodů, které mohou ovlivňovat reálné výsledky vůči idealizovaným simulovaným. Vyřešili jsme rozlišení spektrogramu, nedokonalosti fokusace vlnových délek, vliv počtu výpočetních bodů a zavedení reálně naměřené vstupní fáze. Přesné simulování reality však bývá často obtížné ne-li nemožné.

V této simulaci můžeme spekulovat o následujících možných důvodech nepřesností. Ač testy skončily úspěšně, nelze vyloučit možnost chyby v dalších krocích při výpočtu samotné simulace. Také se můžeme ještě navrátit k fokusování vlnových délek do Fourierovy roviny. V ideálním případě by každá vlnová délka měla nekonečně malý fokusovaný bod. V realitě tomu tak není, což řešíme průměrováním fáze v oblasti dané velikosti ohniskového bodu ve Fourierově rovině v kapitole 4.1.4. To se však může ukázat jako stále přílišně zjednodušené.

Kromě ideality simulace pak mohou nastat problémy i se samotnými experimentálními daty. Musíme brát v potaz rozlišení měřicích přístrojů, např. nepřesnosti měření povrchu destičky. Tvarovač pulzů 4f je zároveň sestava, která je náchylná na přesnost nastavení prvků. Může se například podílet na rozmazání výsledné spektrální fáze tvarovaných pulsů. V našem případě bylo však měření provedeno vícekrát pro na sobě nezávislá ladění, kde výsledné spektrogramy vyšly stejně. Není důvod se domnívat, že toto mohl být hlavní důvod nesouhlasu simulace s experimentálními daty.

5 Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se s problematikou tvarování femtosekundových laserových pulzů, provedení experimentálního tvarování femtosekundových pulzů pomocí 4f tvarovače a následně se pokusit tato měření simulovat v programu MATLAB. Po provedení experimentu a simulace mezi sebou získaná data porovnat a optimalizovat program simulující pulz, aby se přiblížil experimentu.

Abychom měli možnost ověřit budoucí simulovaná data, byla vyrobena testovací destička z PMMA se specifickým povrchem. Její parametry byly naměřeny na profilometru a WL interferometru pro použití v simulaci. S testovací destičkou jsme se přesunuli do laboratoře k sestavenému 4f tvarovači pulzů, sestaveném dle teoretické části této práce. Nejprve byla provedena kalibrace SLM, abychom zajistili rozložení vlnových délek v prostoru. Dále jsme naměřili spektrum laserových femtosekundových pulzů a následně vyměnili SLM za testovací destičku posazenou na mikrometrickém posuvu. Se změnou posunu destičky vůči procházejícímu laserovému svazku jsme naměřili spektrogramy metodou FROG. Tím jsme dostali všechna potřebná experimentální data k porovnání se simulací. Experiment a všechny jeho části byly uskutečněny za podpory výzkumného centra TOPTEC.

Vytvořil jsem program v prostředí MATLAB, schopný simulovat průchod laserového femtosekundového pulzu skrze 4f tvarovač pulzů. Tvarování pulzu bylo v simulaci provedeno změnou fáze při průchodu testovací destičkou se specifickým povrchem. Zprvu se jednalo o kostru programu, schopnou simulovat ideální tvarování pulzu v čase. Postupně se do simulace přidaly vlastnosti, které přibližují výstup simulace k realitě, jako např. schopnost zadávat rozlišení spektrometru, nahrávat vstupní fázi pro výpočty a vypočítání délky simulovaných pulzů v čase. Nakonec se přidala schopnost vypočítávat z tvaru pulzu v čase spektrogram FROG, který jsme mohli porovnat s experimentálně naměřeným spektrogramem z laboratoře.

Program simuluje tvarování fs pulzů podle testů úspěšně, ale zatím se zcela neshoduje s reálně naměřenými daty. Simulaci jsme kalibrovali, abychom sjednotili zadané hodnoty posunu testovací destičky vůči světelnému svazku s experimentálně naměřenými daty. Byli jsme schopni toho docílit pro přesnost přibližně 0,1 mm. Po kalibraci jsme proměnnou zastupující posun testovací destičky dále zkoumali a došli k závěru, že pro posun nemá smysl zadávat menší hodnoty, než 0,5 mm, aby to znatelně ovlivnilo výsledné spektrogramy. Určili jsme, že zavedení rozlišení spektrometru 0,4 nm a nedokonalosti fokusace vlnových délek 0,12 mm nemá na výsledný spektrogram kromě rozmazání výraznější vliv. Potvrdili jsme, že jsme schopni nasimulovat dostatečně přesný vstupní pulz za použití konstantní fáze. Pro výpočet simulace jsme určili vhodný počet výpočetních bodů 4096. Po předchozích krocích jsme nasimulovali tvar vstupního a výstupního tvarovaného pulzu v čase a byli schopni jej vykreslit. Porovnávali jsme spektrogramy FROG, které měly určitou podobnost. Následně jsme porovnali změny fází pro simulaci a realitu, jenž nám poskytnuly lepší výsledky. Potvrdilo se, že program pracuje správně a charakter výsledků je podobný. Změna fáze experimentu sleduje při grafickém překrytí změnu fáze simulace.

Program je momentálně pravděpodobně moc idealizovaný, ale je zde prostor pro přidání více prvků, které učiní simulaci blíže podobnou realitě. Program je však už nyní dobrým základem pro simulace a budoucí úpravy. Na základě simulací z programu by bylo možné v budoucnosti optimalizovat povrchy tvarovacích destiček pro generaci specifického pulzu. Opačně také pak zjistit tvar pulzu pro specifický tvar tvarovací destičky.

Použitá literatura

- [1] Weiner, A. M. (1995). Femtosecond optical pulse shaping and processing. Progress in Quantum Electronics, 19(3), 161–237. doi:10.1016/0079-6727(94)00013-o
- [2] Bhattacharya, Atanu. (2018). Ultrafast Optics and Spectroscopy in Physical Chemistry. 10.1142/10537.
- [3] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. Základy fotoniky: Fundamentals of photonics. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN isbn80-85863-00-6
- [4] O. Haderka, J. Valenta, Zkrocené femtosekundy, (n.d.). Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1997/cislo-3/zkrocene-femtosekundy.html> (accessed March 9, 2022).
- [5] RULLIÈRE, Claude. Femtosecond laser pulses: principles and experiments. 2nd ed. New York: Springer, c2005. ISBN isbn0-387-01769-0.
- [6] R. Paschotta, Regenerative Amplifiers, Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/regenerative_amplifiers.html (accessed March 9, 2022)
- [7] R. Paschotta, Optical Parametric Amplifiers, Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/optical_parametric_amplifiers.html (accessed March 9, 2022)
- [8] MONMAYRANT, Antoine, Sébastien WEBER a Béatrice CHATEL. A newcomer's guide to ultrashort pulse shaping and characterization. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics [online]. 2010, 43(10) [cit. 2021-8-25]. ISSN 0953-4075. Dostupné z: doi:10.1088/0953-4075/43/10/103001
- [9] ThorLabs, Diffraction Gratings Tutorial, Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9026 (accessed March 17, 2022)
- [10] LIŠKA, Vojtěch. Prostorový modulátor světla [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-03-17]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/wp6pv/Bakalarka_IS.pdf. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Prof. Mgr. Tomáš Tyc, Ph.D.
- [11] Swamp Optics, FROG, Dostupné z: https://www.swampoptics.com/assets/tutorials_frog.pdf (accessed March 24, 2022)
- [12] Swamp Optics, Intensity Autocorrelation, Dostupné z: https://www.swampoptics.com/assets/tutorials_autocorrelation.pdf (accessed March 29, 2022)
- [13] TREBINO, Rick. Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser. 1. Boston: Springer, 2000. ISBN 1-4020-7066-7.

- [14] O. Cep, D. Yb, Modular-Design Industrial-Grade Femtosecond Lasers, 2022. Dostupné z: <https://lightcon.com/product/pharos-femtosecond-lasers/>
- [15] O. Cep, D. Yb, Non-Collinear Optical Parametric Amplifier, 2022. Dostupné z: <https://lightcon.com/product/orpheus-noncollinear-opa/>
- [16] Jenoptik, Liquid crystal spatial light modulators, Dostupné z: <https://www.jenoptik.de/-/media/websitedocuments/optics/modulators/liquid-crystal-spatial-light-modulator.pdf>
- [17] Ocean Optics inc., HR4000 Data Sheet, Dostupné z: <http://www.xipugd.com/Private/ProductFiles/5713fa85843fbb18f8c1.pdf>
- [18] Avantes, StarLine AvaSpec-ULS2048CL-EVO Spectrometer, Dostupné z: <https://www.avantes.com/content/uploads/2020/11/DS-Spec-AvaSpec-ULS2048CL-EVO-200702.pdf>
- [19] KOPLAST, Plexisklo - popis plexiskla, Dostupné z: <https://www.koplast.cz/plexisklo-popis-plexiskla/> (accessed April 3, 2022)
- [20] M. N. Polyanskiy, "Refractive index database", Dostupné z: [https://refractiveindex.info/?shelf=organic&book=poly\(methyl_methacrylate\)&page=Szczurowski](https://refractiveindex.info/?shelf=organic&book=poly(methyl_methacrylate)&page=Szczurowski) (accessed April 4, 2022).
- [21] Polytec, White-light interferometry, Dostupné z: <https://www.polytec.com/int/surface-metrology/technology/white-light-interferometry> (accessed April 2, 2022)
- [22] MALÝ, Petr. Optika. Praha: Karolinum, 2008. ISBN isbn978-80-246-1342-0.
- [23] Nikon Instruments Inc., Specimen Optical Path Length Variations, Dostupné z: <https://www.microscopyu.com/tutorials/specimen-optical-path-length-variations> (accessed April 30, 2022)
- [24] Georgia Institute of Technology, Dostupné z: <https://frog.gatech.edu/> (accessed May 6, 2022)