

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**LASEROVÉ MIKROOBRÁBĚNÍ TRANSPARENTNÍCH
MATERIÁLŮ PRO SENZORIKU**

**LASER MICROMACHINING OF TRANSPARENT
MATERIALS FOR SENZORS**

AUTOR:

Bc. Vojtěch Kudrna

STUDIJNÍ PROGRAM:

Výrobní Inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE:

Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

PRAHA 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kudrna** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **476056**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Laserové mikroobrábění transparentních materiálů pro senzorku

Název diplomové práce anglicky:

Laser micromachining of transparent materials for sensors

Pokyny pro vypracování:

1. Technologie laserového mikroobrábění
Základní principy
Možnosti a limity
Interakce paprsku laseru s transparentními materiály
2. Senzorika a vláknová optika
3. Možnosti laserového mikroobrábění pro výrobu senzorů
4. Návrh experimentu pro stanovení limitů a možností laserového mikroobrábění v transparentních materiálech s ohledem na kvalitu
5. Realizace a vyhodnocení experimentu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Zeman, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Pavel Kožmín, Ph.D. HOFMEISTER s. r. o.

Datum zadání diplomové práce: **16.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

V rámci diplomové práce je řešeno téma laserového mikroobrábění transparentních materiálů v oblasti optovláknové sensoriky. Jejím hlavním cílem je realizace experimentu optimalizace nastavení procesu laserového mikroobrábění. Návrhu a provedení experimentu předchází rešerše, ve které je popsána technologie laserového mikroobrábění, jsou definovány klíčové procesní parametry a je uveden přehled optovláknových senzorů. Experimentální část práce je tvořena řadou na sebe navazujících optimalizačních experimentů realizovaných na ultrakrátkopulsní laserové stanici a resultuje použitím optimalizovaných parametrů pro mikroobrábění optického vlákna.

Klíčová slova

Laserové mikroobrábění, ultrakrátkopulsní laser, optovláknové senzory, optické vlákno, parametry laserového mikroobrábění, optimalizace procesních parametrů

Annotation

The thesis deals with laser micromachining of transparent materials in the field of fibreoptic sensorics. Its main objective is to carry out an experiment to optimize the setup of the laser micromachining process. The design and execution of the experiment is preceded by a research review in which the laser micromachining technology is described, key process parameters are defined, and an overview of fibre optic sensors is given. The experimental part of the work consists of a series of successive optimization experiments performed on an ultra-short pulse laser station and results by using optimized parameters for optical fiber micromachining.

Keywords

Laser micromachining, ultrashort pulse laser, fiberoptic sensors, optical fiber, laser micromachining parameters, process parameters optimization

Poděkování

Rád bych zde poděkoval zejména svému vedoucímu panu Ing. Pavlovi Zemanovi, Ph.D. za cenné rady a věcné připomínky ke zpracování této diplomové práce. Neméně si cením a tímto děkuji také panu Ing. Tomášovi Primusovi za odborné konzultace a dohled nad průběhem řešení. A nakonec bych rád poděkoval také kolegovi Bc. Jakobovi Fouskovi za asistenci při praktickém provedení experimentů a měření.

Seznam zkratek a symbolů

UKP	ultrakrátkopulsní (laser)	
DLW	direct laser writing	přímý laserový zápis
UV	ultraviolet	ultrafialový
SEM	skenovací řádkovací mikroskop	
LIP	laser interference patterning	strukturování laserovou interferencí
LIL	laser interference lithography	litografie laserovou interferencí
CW	continuous wave (laser)	kontinuální laserový svazek
MZI	Mach-Zehnder interferometer	Machův-Zehnderův interferometr
FPI	Fabry-Perot interferometer	Fabryův-Perotův interferometr
FBG	fiber Bragg grating	Braggova mřížka na optickém vlákně
HBF	high birefrangence fiber	silně dvojlomné vlákno
HCF	hollow core fiber	duté vlákno
SMF	single mode fiber	jednovidové vlákno
OSI	optical sensor interrogator	optický interogátor
CCD	charged coupled device	zařízení s nábojovou vazbou
IH (IIH, IIIH)	1. (2., 3.) harmonická vlnová délka	
AT1 (AT2)	attenuátor výkonu laseru	
HF	kyselina fluorovodíková	
Ti	titan	
Pd-Ag	platina-stříbro	
KrF	kryptonfluorid	
SiO ₂	oxid křemičitý	
m [1]	počet koincidenčních fotonů	
h [J.s]	Planckova konstanta	

ν [Hz]	frekvence fotonu
E_g [J]	vazebná energie elektronu
γ [1]	Keldyshův parametr
ω [Hz]	frekvence laserového záření
e [C]	náboj elektronu
m_e [kg]	efektivní hmotnost elektronu
c [ms^{-1}]	rychlost světla
n [1]	index lomu světla
ϵ_0 [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]	permitivita vakua
I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$]	intenzita záření
NA	numerická apertura
Θ [°]	divergence
M^2	faktor kvality laserového svazku
λ [m]	vlnová délka
w_0	poloměr svazku v pase před fokusační čočkou
w	poloměr fokusovaného svazku
w_1	poloměr laserového svazku ve vzdálenosti Z_R od fokusu
D [m]	průměr fokusovaného svazku
D_0 [m]	průměr kolimovaného svazku před fokusační čočkou
f_{optiky} [m]	ohnisková vzdálenost
Z_R [m]	Rayleighova vzdálenost
P_{avg} [W]	průměrný výkon
τ_p [fs]	délka pulsu
E_p [J]	energie pulsu
f [Hz]	frekvence pulsů
F [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]	fluence – hustota energie v ploše laserového spotu
v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	rychlost skenování
Sp [%]	faktor překrytí pulsů
H [%]	faktor překrytí šrafování
λ_{Bragg} [m]	Braggova rezonanční vlnová délka
Λ [m]	perioda FBG
F_{th} [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]	prahová hodnota fluence pro ablaci
D [m]	průměr ablovaného spotu

r [m]	radiální vzdálenost od optické osy svazku
δX [μm]	směrodatná odchylka X
S [m]	šířka stopy laseru
H [m]	hloubka stopy laseru
R_a [m]	střední aritmetická úchylka profilu
R_z [m]	maximální výška profilu
S_a [m]	střední aritmetická výška plochy
S_z [m]	maximální výška plochy
θ [°]	fokusační úhel
h [m]	hloubka ablace
N [1]	počet přejezdů
α [°]	úhel sklonu stěny
β [°]	úhel šrafování

Seznam obrázků

Obr. 1 - Schéma systému maskové projekce (přeloženo) [5]	19
Obr. 2 – Simulace laserového mikroobrábění pomocí konturové masky s posunem (vlevo), SEM snímek vytvořeného pole mikročoček 1x1 mm na polykarbonátové fólii [3]	19
Obr. 3 – Interference dvou a tří paprsků: Interference a) resultující v interferenční obrazec b), interference c) resultující v interferenční obrazec d) [6].....	20
Obr. 4 - Rozmítání paprsku pomocí galvo-skenerů v kombinaci s polohovacím stolem (přeloženo) [11]	21
Obr. 5 - Schéma výsledků interakce mezi obráběným materiálem a laserovým svazkem v kontinuálním pulsním a ultrakrátkopulsním režimu (přeloženo) [12]	22
Obr. 6 - Srovnání děr ve folii korozivzdorné oceli o tloušťce 100 μm ablvaných pulsy délky 3,3 ns (vlevo) a 200 fs (vpravo). V obou případech byla použita intenzita laseru těsně nad prahovou hodnotu nutnou pro ablaci materiálu [15]	23
Obr. 7 – Schéma interakce fs laserového pulsu a transparentního materiálu. a) fokusace laserového pulsu, b) nelineární fotoionizace prostřednictvím multifotonové absorpce, tunelového jevu a lavinového efektu, c) předání energie elektronů mřížce resultující v jeden ze tří typů scénářů: d) isotropní změna indexu lomu transparentního materiálu, vznik periodických nanostruktur, ablace materiálu (přeloženo) [16]	26
Obr. 8 – SEM snímky periodické nanostruktury odhalené selektivním leptáním HF kyselinou. Lineární polarizace a) rovnoběžná a b) kolmá ke směru skenování S. [3]	27
Obr. 9 – Srovnání svazků chápaných podle geometrické optiky (vlevo) a Gaussovské optiky (vpravo) (přeloženo) [20]	28
Obr. 10 - Distribuce energie laserového svazku v rovině kolmé ke směru šíření dle Gausse (upraveno) [18]	29
Obr. 11 - Schéma fokusace ve spojitosti s numerickou aperturou čočky.....	29
Obr. 12 - Parametry strategie rozmítání Sp a H [18]	30
Obr. 13 - Schéma transmisního senzoru a) axiální posun b) radiální posun c) graf přenesné intenzity v závislosti na výchylce – srovnání citlivosti (přeloženo) [30]	32

Obr. 14 - Schéma FTIR transmisního senzoru (nahore) a průběhy odezvy v závislosti na úhlu θ (dole) (přeloženo) [30].....	33
Obr. 15 – a) Schéma reflexního senzoru, b) srovnání průběhů odezvy v závislosti na c) konfiguraci (přeloženo) [30].....	34
Obr. 16 – Schéma mikroohybového senzoru (přeloženo) [28].....	34
Obr. 17 – Schéma Machova-Zehnderova interferometru (přeloženo) [31]	35
Obr. 18 – Schéma Michelsnova interferometru (přeloženo) [30]	36
Obr. 19 – Schéma různých konfigurací intrinsických (IFFPI) a extrinsických (EFFPI) FP interferometrů (přeloženo) [28]	37
Obr. 20 – Schéma Sagnacova interferometru [30].....	37
Obr. 21 – Konceptuální schéma funkce FBG - Braggovy mřížky na jádře optického vlákna (přeloženo) [30]	38
Obr. 22 -a) Schéma fs laserového mikroobráběcího systému, b) postup procesu výroby, c) snímek senzoru (přeloženo) [38].....	40
Obr. 23 – Funkční schéma FPI [39]	41
Obr. 24 – Mikroskopický snímek FPI [39].....	42
Obr. 25 – Lom laserového paprsku při obrábění a), postup výroby senzoru b) až c) úběr obalu vlákna, d) vytváření sensorické struktury [40].....	42
Obr. 26 – Mikrosnímky interferometrické struktury (přeloženo) [40]	43
Obr. 27 – Funkční schéma kombinovaného FP a MZ interferometru (U-shaped defect – otvor v HCF vlákně, waveguide – vlnovod, core – jádro, cladding – obal vlákna, coating – primární ochrana vlákna) [41].....	44
Obr. 28 – Schéma a fotografie postupu výroby kombinovaného FP a MZ interferometru [41].....	44
Obr. 29 – Schéma spirálového drážkování optického vlákna pro zvýšení citlivosti FBG senzoru [43]	45
Obr. 30 – SEM snímek spirálového drážkování pro zvýšení citlivosti FBG senzoru [43].....	46
Obr. 31 - Fotografie zařízení použitých v rámci experimentů, laserová mikroobráběcí stanice (vlevo), konfokální mikroskop (vpravo)	48
Obr. 32 - Snímek experimentálního materiálu ve formě kvádrů.....	48
Obr. 33 - Schéma vlivu narůstající E_p na průměr ablovaného bodu	50
Obr. 34 - Matice bodů pro vyhodnocení ablačního prahu (II H)	51

Obr. 35 - Graf závislosti $\ln(2 E_p) = f(D^2)$ pro vyhodnocení ablačního prahu pro IIH 515 nm s 4F optikou	53
Obr. 36 - Detailní snímky bodů ablovaných různými $F [J.cm^{-2}]$ (nejnižší F vlevo)	55
Obr. 37 - Graf závislosti $P_{avg} = f(AT2)$ pro $AT1 = 10 \%$	56
Obr. 38 - Graf závislosti $P_{avg} = f(AT2)$ pro $AT1 = 20 \%$	56
Obr. 39 - Strategie měření geometrie drážky (drážka ablována $2,9 P/P_{Fth}$)	57
Obr. 40 - Graf naměřených hodnot $S_{avg} = f(P/P_{Fth})$	59
Obr. 41 - Graf naměřených hodnot $H_{avg} = f(P/P_{Fth})$	59
Obr. 42 - Snímek z konfokálního mikroskopu drážky ablované nízkým výkonem laseru ($1,2 P/P_{Fth}$)	60
Obr. 43 - Snímek z konfokálního mikroskopu drážky ablované vysokým výkonem laseru ($6,8 P/P_{Fth}$)	60
Obr. 44 - Graf pro vyhodnocení optimálních výkonových parametrů $\delta S/S_{avg} = f(P/P_{Fth})$	61
Obr. 45 - Graf pro vyhodnocení optimálních výkonových parametrů $\delta H/H_{avg} = f(P/P_{Fth})$	61
Obr. 46 - Snímek z konfokálního mikroskopu drážky vyrobené zjištěným optimálním výkonem ($P = 2,1 P_{Fth}$)	62
Obr. 47 - Měření drážky vyrobené zjištěným optimálním výkonem ($P = 2,1 P_{Fth}$)	62
Obr. 48 - Schéma experimentální matice pro optimalizaci faktoru překrytí pulsů a šrafování.....	63
Obr. 49 - Snímek optimalizační matice pro $P = 172 \text{ mW}$ (nevhodně zapsané hodnoty na ose H odpovídají rozsahu $1,1 - 1,9$).....	64
Obr. 50 - Snímek profilu polí matice pro $S_p = 80 \%$ (nahore), 85% ($P = 172 \text{ mW}$)	64
Obr. 51 - Snímek optimalizační matice pro $P = 143 \text{ mW}$ (nevhodně zapsané hodnoty na ose H odpovídají rozsahu $1,1 - 1,9$).....	65
Obr. 52 - Snímek profilu polí matice pro $S_p = 80 \%$ (nahore), 85% (dole) ($P = 143 \text{ mW}$).....	66
Obr. 53 - Snímek optimalizační matice pro $P = 115 \text{ mW}$ (nevhodně zapsané hodnoty na ose H odpovídají rozsahu $1,1 - 1,9$).....	67
Obr. 54 - Snímek profilu polí matice pro $S_p 80 \%$ (nahore), 85% , 90% (dole) ($P = 115 \text{ mW}$).....	67
Obr. 55 - Schéma kuželové díry s nastaveným úhlem sklonu stěny	69

Obr. 56 - Snímek z konfokálního mikroskopu kuželových pro úhly 5, 10, 15, 20, 25°	69
Obr. 57 - Snímek z konfokálního mikroskopu kuželových pro úhly 25, 30, 35, 40, 45°	70
Obr. 58 - Schéma 3/4 řezu vláknem s D drážkou.....	71
Obr. 59 - 3D model přípravku pro upnutí optického vlákna	71
Obr. 60 - Finální přípravek pro upnutí optického vlákna v prostoru stroje	72
Obr. 62 - Schéma D drážky.....	73
Obr. 63 – Schéma 1 iterace modelu pro výrobu D drážky	73
Obr. 64 - 3D sken 1. iterace D drážky	74
Obr. 65 – Zakřivení profilu dna D drážky kolmo k ose vlákna (vlevo), profil drážky souběžně s osou vlákna (vpravo)	75
Obr. 66 – Schéma 2 iterace modelu pro výrobu D drážky	75
Obr. 67 - 3D sken 2. iterace D drážky	76
Obr. 68 - Měřené profily 2. iterace D drážky (vlevo nahoře), profil D drážky souběžně s jádrem vlákna (vpravo nahoře), zakřivení profilu dna kolmo na osu vlákna (střed vlevo), výška profilu dna v různých směrech (střed vpravo, dole).	77
Obr. 69 – Schéma 3 iterace modelu pro výrobu D drážky, řez kolmo k jádru vlákna (vpravo).....	77
Obr. 70 - 3D sken 3. iterace D drážky	78
Obr. 71 - Měřené profily 3. iterace D drážky (vlevo nahoře), profil D drážky souběžně s jádrem vlákna (vpravo nahoře), zakřivení profilu dna kolmo na osu vlákna (vlevo dole), výška profilu dna kolmo na osu vlákna (vpravo dole).....	78
Obr. 72 – Schéma 4 iterace modelu pro výrobu D drážky, řez kolmo k jádru vlákna (vpravo).....	79
Obr. 73 - 3D sken 4. iterace D drážky	79
Obr. 74 - Měřené profily 4. iterace D drážky (vlevo nahoře), profil D drážky souběžně s jádrem vlákna (vpravo nahoře), výška profilu dna v různých směrech (dole).....	80
Obr. 75 - Měření profilové a plošné drsnosti finální iterace D drážky	81

Seznam tabulek

Tab. 1 – Procesní parametry experimentální výroby FPI [38]	41
Tab. 2 – Procesní parametry experimentální výroby FPI (hodnota E_p pro výrobu otvorů do HCF) [39].....	42
Tab. 3 – Procesní parametry experimentální výroby senzoru [40]	43
Tab. 4 – Procesní parametry experimentální výroby kombinovaného FP-MZI [41]	45
Tab. 5 – Procesní parametry výroby spirálového drážkování (varianty „S“ – jedna spirála, varianty „SS“ – dvě protichůdné spirály) (h [μm] výsledná hloubka drážky) (upraveno) [43]	46
Tab. 6 - Nastavené laserové parametry pro test ablačního prahu (II H - 4F)	52
Tab. 7 - Měřené průměry ablovaných bodů.....	52
Tab. 8 - Vypočtené hodnoty pro vyhodnocení ablačního prahu	53
Tab. 9 - Výsledky testu ablačního prahu	54
Tab. 10 - Laserové parametry pro experiment optimalizace výkonu pro mikroobrábění.....	56
Tab. 11 - Nastavení výkonu pro výrobu drážek.....	57
Tab. 12 - Naměřené hodnoty šířky drážek.....	58
Tab. 13 - Naměřené hodnoty hloubky drážek	58
Tab. 14 - Laserové parametry pro experiment optimalizace faktoru překrytí pulsů a šrafování.....	63
Tab. 15 - Finální vyhodnocení experimentu optimalizace faktoru překrytí pulsů a šrafování.....	66
Tab. 16 - Optimalizované parametry pro test hloubky ablace.....	68
Tab. 17 - Iterace hloubky ablace odpovídající 1 přejezdu.....	69
Tab. 18 - Komparace nastavených a měřených úhlů sklonu stěny.....	70
Tab. 19 - Parametry procesu laserového mikroobrábění pro výrobu D drážky ...	74
Tab. 20 - Naměřené hodnoty profilové drsnosti finální iterace D drážky	81
Tab. 21 - Souhrn aplikovaného optimalizovaného nastavení laserového mikroobrábění a dosažených výsledků obrábění	83

Obsah

1	Úvod	17
2	Technologie laserového mikroobrábění.....	18
2.1	Techniky laserového mikroobrábění.....	18
2.2	Ultrakrátkopulsní lasery	22
2.3	Interakce UKP s transparentními materiály	23
2.3.1	Nelineární fotoionizace.....	24
2.3.2	Lavinový efekt.....	25
2.3.3	Elektron – mřížkové interakce.....	26
2.4	Parametry procesu laserového mikroobrábění.....	27
3	Senzorika a vláknová optika	31
3.1	Klasifikace senzorů vláknové optiky	31
3.1.1	Senzory na bázi modulace intenzity	32
3.1.2	Senzory na bázi modulace fáze světelného signálu	35
3.1.3	Senzory modulace vlnové délky	37
3.1.4	Polarimetrické senzory	39
4	Mikroobrábění pomocí UKP laserů pro vláknovou sensoriku	40
5	Experiment.....	47
5.1	Použitá zařízení.....	47
5.2	Materiál použitý pro experiment.....	48
5.3	Testování ablačního prahu	49
5.3.1	Provedení testu ablačního prahu	51
5.3.2	Výsledky testu ablačního prahu.....	53
5.4	Optimalizace výkonu laseru pro mikroobrábění.....	55
5.4.1	Vyhodnocení experimentu optimalizace výkonu laseru	57
5.5	Optimalizace faktoru překryvu pulsů a šrafování	63
5.5.1	Výsledky optimalizace S_p a H	64

5.6	Testování ideálního sklonu stěn při hloubení	68
5.6.1	Test hloubky ablace	68
5.6.2	Limitní úhel sklonu stěny	69
5.7	Použití optimalizovaných parametrů na optické vlákno	71
5.7.1	Upnutí vlákna v pracovním prostoru stroj	71
5.7.2	Příprava optického vlákna	72
5.7.3	Výroba D drážky na optickém vlákně	72
6	Shrnutí práce	82
7	Závěr.....	84
8	Bibliografie	85

1 Úvod

V rámci této diplomové práce je řešena problematika laserového mikroobrábění transparentních materiálů s cílem jeho využití pro senzorické aplikace v oblasti optovláknových systémů. Diplomová práce je rozdělena do třech hlavních kapitol, z nichž první dvě prezentují zpracovanou rešerši a poslední popisuje realizaci experimentálního laserového mikroobrábění.

Kapitoly rešerše se v první řadě zabývají technologií laserového mikroobrábění s důrazem na mikroobrábění laserovým svazkem ve formě ultrakrátkých pulsů (UKP). V úvodu jsou popsány základní metody laserového mikroobrábění, tedy přímý zápis, masková projekce a strukturování interferujícími laserovými paprsky. Následuje rozbor hlavních rozdílů mezi laserovým mikroobráběním při použití kontinuálního, pulsního a UKP laseru, z nichž vyplývá důvod pro použití právě UKP laserů v oblasti mikrovýroby. Dále jsou popsány mechanismy interakce laserového paprsku ve formě UKP s transparentním materiálem, které dále podtrhují tuto skutečnost. Kapitulu uzavírá výčet parametrů procesu laserového mikroobrábění.

Vzhledem k zaměření práce je druhá část rešerše věnována optovláknové senzorce. Náplní kapitoly je především popis a klasifikace různých typů senzorů z hlediska funkčních principů, resp. dle modulované optické veličiny užitá pro měření. Kapitulu uzavírá přehled ve světě aktuálně řešených prací zabývajících se experimentální výrobou optovláknových senzorů s využitím UKP laserů.

Hlavním cílem práce je nalezení limitů laserového mikroobrábění transparentních materiálů s ohledem na dosažitelný detail a přesnost výroby. Tímto se zabývá poslední kapitola práce popisující průběh a vyhodnocení experimentů zaměřených na optimalizaci procesních parametrů laseru.

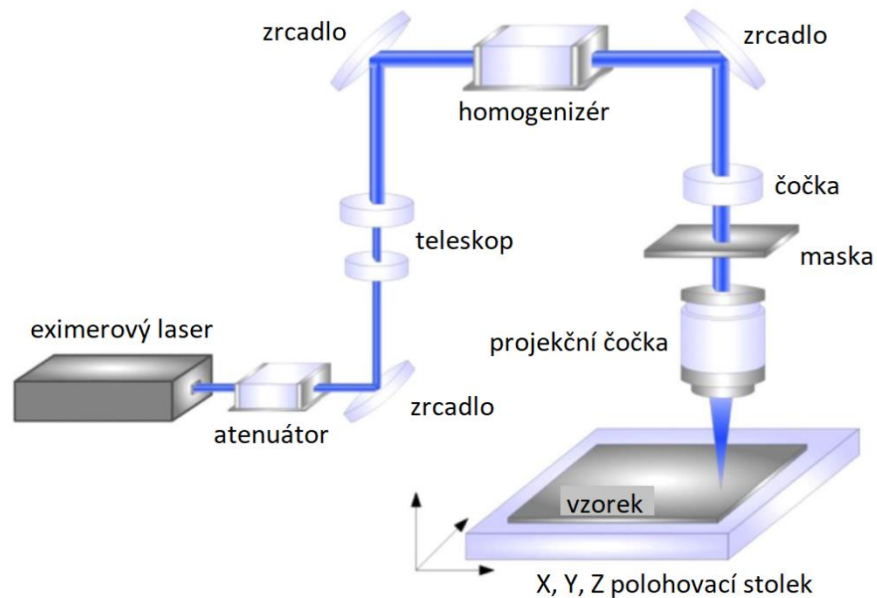
2 Technologie laserového mikroobrábění

Vzhledem k zaměření práce se následující podkapitoly zabývají technologií laserového mikroobrábění z pohledu zpracování transparentních materiálů. Transparentní materiály jsou pro světlo vlnových délek obvyklých pro pevnolátkové lasery prostupné, a nedochází tedy k jejich lineární absorpci či odrazu jako např. v případě kovových materiálů, což přináší určitá specifika pro použitelný laserový systém. V kapitole jsou principiálně popsány techniky laserového mikroobrábění, je vysvětlen důvod pro použití ultrakrátkopulsních laserů a popsána interakce mezi UKP a transparentním materiálem. V závěru kapitoly jsou jmenovány a vysvětleny pro proces mikroobrábění důležité parametry laserového svazku a strategie obrábění.

2.1 Techniky laserového mikroobrábění

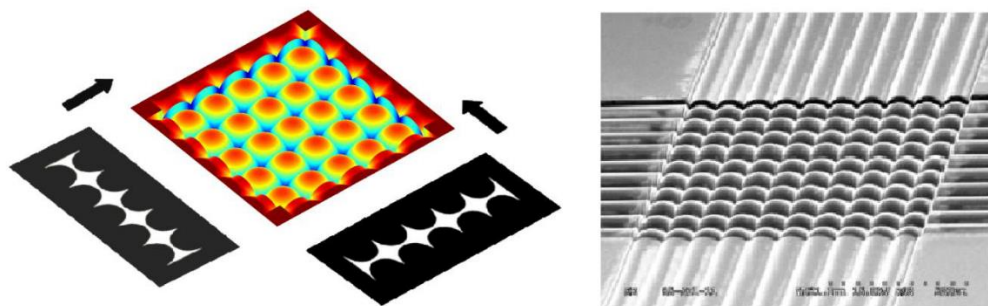
Pro laserové mikroobrábění se standardně používají tři základní techniky a jejich nadstavbové modifikace. Jedná se o mikroobrábění pomocí maskové projekce, mikroobrábění pomocí více interferujících laserových paprsků a mikroobrábění rozmítaným laserovým svazkem „bod po bodu“, které se v anglické literatuře označuje jako přímý laserový zápis (direct laser writing – DLW). [1] [2]

Masková projekce je technika mikroobrábění, která využívá zejména excimerových laserových zdrojů, tedy zdrojů záření vlnových délek v oblasti UV a vysokých výkonů v pulsním režimu. Na Obr. 1 je schematicky zobrazen systém maskové projekce s funkčními prvky. První komponentou je atenuátor regulující výkon svazku. Dále je svazek veden skrze soustavu teleskopických čoček, která upravuje rozbíhavost a zvětšuje plochu průřezu svazku. Dalším prvkem je homogenizér, který upravuje distribuci energie v rámci plochy průřezu svazku z gaussovského rozložení s energetickým maximem ve středu svazku na energeticky uniformní flat-top rozložení. Klíčovou fází je průchod svazku maskou upravující svazek do kýženého vzoru, který je následně zaměřen na povrch obráběného materiálu projekční čočkou. [2] [3] [4] [5]



Obr. 1 - Schéma systému maskové projekce (přeloženo) [5]

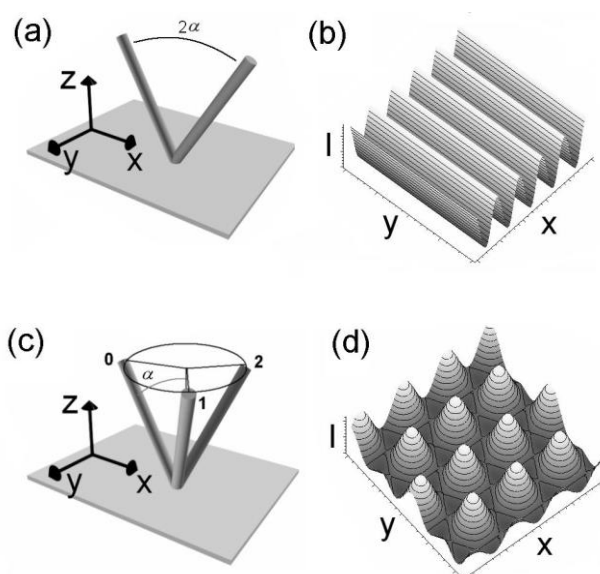
Bez potřeby posunu obráběného materiálu lze pomocí této metody realizovat efektivní plošné strukturování, např. plošné mikroděrování. Dalším příkladem techniky je mikroobrábění maskovou projekcí s posuvem, která je zobrazena na Obr. 2. Na schématu vlevo je naznačen relativní pohyb konturové masky po povrchu materiálu a simulovaný výsledek operace. V pravé části Obr. 2 je SEM snímek vytvořeného pole mikročoček na povrchu polykarbonátové fólie. Přednostmi maskové projekce je dosažitelné rozlišení, dobrá kontrola odebraného množství materiálu, resp. hloubky úběru, opakovatelnost procesu a schopnost zpracování velkých ploch. [2] [3] [4] [5]



Obr. 2 – Simulace laserového mikroobrábění pomocí konturové masky s posuvem (vlevo), SEM snímek vytvořeného pole mikročoček 1x1 mm na polykarbonátové fólii [3]

Technika mikroobrábění využívající interferenci laserových paprsků (často anglicky označovaná LIP – laser interference patterning, či LIL – laser interference lithography) je technikou umožňující vytváření periodických struktur na povrchu

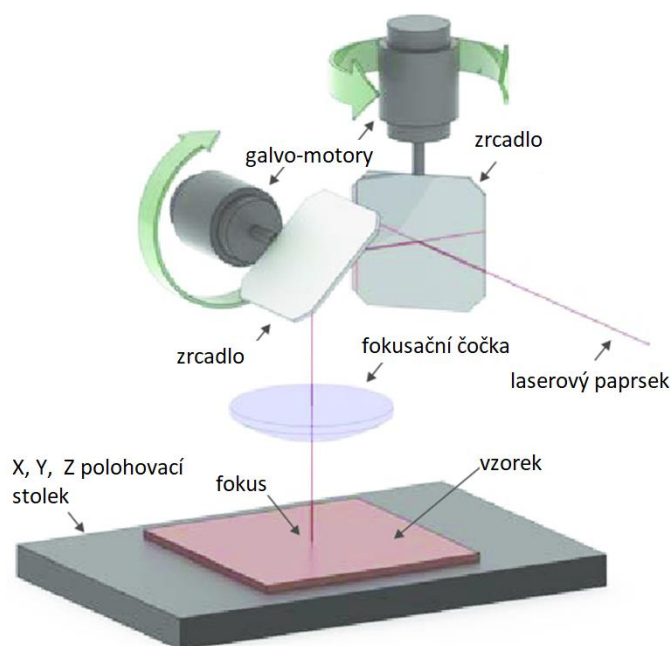
zpracovávaného materiálu. Funkčním principem této techniky je rozdělení laserového svazku na více paprsků, které jsou následně pomocí soustavy zrcadel zaměřeny pod úhlem na zpracovávaný povrch tak, aby zde spolu interferovaly. Výsledkem interference zaměřených paprsků je interferenční obrazec charakteristický proměnnou intenzitou záření, jehož základní uspořádání závisí na počtu interferujících paprsků (viz Obr. 3). Na Obr. 3 b) je schématické znázornění obrazce vzniklého interferencí dvou paprsků. Na Obr. 3 d) pak obrazec vzniklý interferencí tří paprsků. Perioda interferenčního obrazce je závislá na vlnové délce záření a na úhlu interferujících paprsků, přičemž limitní hodnotou je polovina vlnové délky záření. Jelikož intenzita laserového záření je proporcionální míře úběru dochází k přímému přenosu interferenčních obrazců na povrch materiálu. [6] [7] [8]



Obr. 3 – Interference dvou a tří paprsků: Interference a) resultující v interferenční obrazec b), interference c) resultující v interferenční obrazec d) [6]

Přímý laserový zápis je nejuniverzálnější technikou laserového mikroobrábění, jelikož k úběru materiálu dochází postupnou cestou „bod po bodu“. Vytvářené struktury tak jsou geometricky omezené prakticky pouze velikostí fokusovaného laserového spotu. Vzhledem k absenci projekční masky či komponent realizujících vícepaprskovou interferenci se také jedná o metodu, která je ve své podstatě nejjednodušší. Základní systém je tvořen vybraným laserovým zdrojem, zařízením realizující relativní pohyb mezi laserovým svazkem a obráběným materiálem, fokusační čočkou a součástmi upravujícími výkonové a další parametry laserového paprsku. [9] [10]

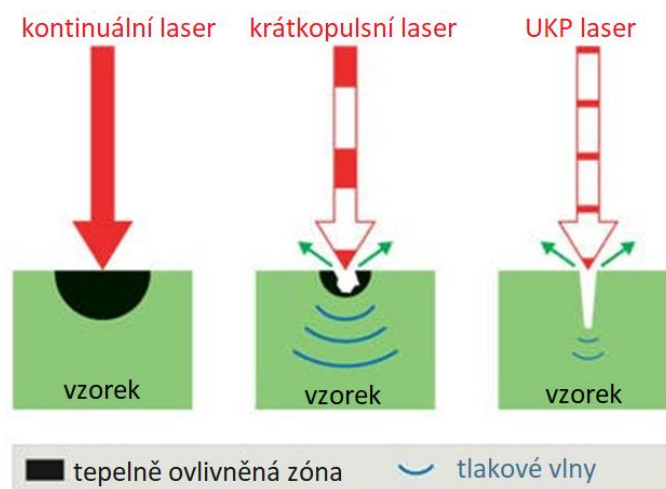
Jako zdroje se z důvodů objasněných v následující kapitole nejčastěji využívají pevnolátkové lasery pracující v pulsním režimu. Z pohledu srovnání technik laserového mikroobrábění je nejpodstatnější součástí DLW pohybový systém. Vzájemný pohyb svazku a materiálu lze realizovat pomocí polohovacího stolku obvykle operujícího s osami lineárního posunu X, Y, Z, případně osami rotací B, C atd. Lze použít také piezoelektrické polohovací stolky s nanometrickou přesností polohování. Ty však mají velmi malý rozsah a je proto vhodné je použít v kombinaci se standardními servomotorickými polohovacími stolky. Relativní pohyb mezi laserovým paprskem/obrobkem lze realizovat také pomocí galvo-skenerů, zrcadel na galvanometrických polohovačích, které rozmítají laserový paprsek po povrchu obráběného materiálu. Výhodou galvo-skenerů je dosažitelná rychlost rozmítání paprsku v řádu desítek $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Rozmítáním svazku nicméně může docházet k jeho zkreslení kvůli nedokonalostem fokusační čočky. Nejčastější řešení je proto použití galvo-skenerů v kombinaci s polohovacími stolky a použití optimální strategie pro konkrétní proces, které je zobrazeno na Obr. 4. Poslední komponentou optické cesty laserového systému je fokusační čočka, jejíž funkcí je jednak zaměření laserového paprsku na povrch obráběného materiálu a zmenšení průměru svazku, ale také korekce zkreslení způsobeného rozmítáním svazku. [9] [10]



Obr. 4 - Rozmítání paprsku pomocí galvo-skenerů v kombinaci s polohovacím stolem (přeloženo) [11]

2.2 Ultrakrátkopulsní lasery

Pro potřeby mikroobrábění se obecně využívá pulsních a zejména ultrakrátkopulsních (UKP) laserů. Důvodem je rozdílný mechanismus ablace materiálu, resp. povaha interakce mezi laserovým paprskem v pulsním a kontinuálním režimu a z ní vyplývající dopady na obráběný materiál. Obr. 5 ilustruje rozdíly v mechanismu úběru materiálu při použití kontinuálního (CW), krátkopulsního (ns) a UKP (ps/fs) laseru. Ve všech případech dochází primárně k přenosu energie nesené fotony laserového záření elektronům obráběného materiálu a až poté k předání této energie mřížce obráběného materiálu. Ablace kontinuálním laserem spočívá v postupném ohřevu, tavení a odpařování obráběného materiálu. Tento mechanismus úběru je sice nejproduktivnější z hlediska rychlosti ablace, ale z povahy věci je nevyhnutelný výskyt nepřesností vzniklých rozstříkem a opětovným zatuhnutím roztaveného materiálu. Tepelně ovlivněná oblast (na Obr. 5 značena černou barvou) je v případě ablace kontinuálním svazkem největší. [12]

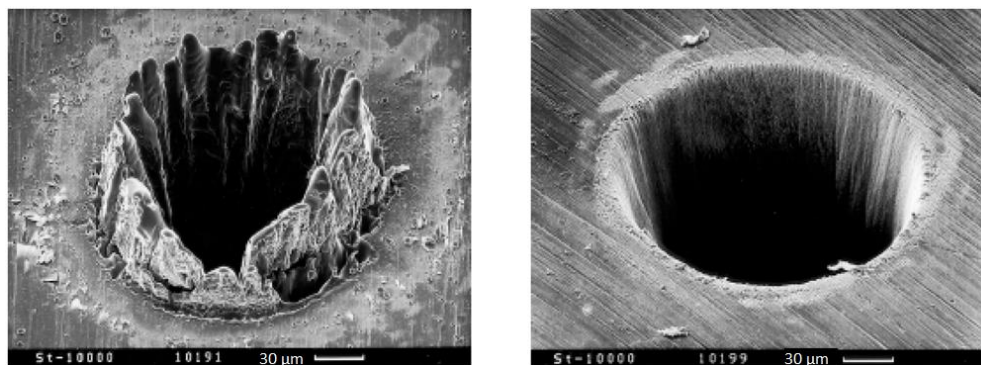


Obr. 5 - Schéma výsledků interakce mezi obráběným materiálem a laserovým svazkem v kontinuálním pulsním a ultrakrátkopulsním režimu (přeloženo) [12]

Pro mikroobrábění se proto používají téměř výhradně lasery krátkopulsní a ultrakrátkopulsní. Krátkopulsními lasery jsou míněny lasery vysílající pulsy o délce, jejíž hodnota je vyšší než hodnota doby termalizace, což je čas, po kterém začne probíhat předávání energie absorbované elektrony mřížce obráběného materiálu. Doba termalizace je různá pro konkrétní materiály, závisí zejména na tepelné vodivosti, ale obvykle dosahuje hodnot řádu jednotek až

desítek pikosekund. Při použití nanosekundových pulsů je proto mechanismus ablace podobný výše uvedené ablaci kontinuálním laserovým svazkem. Díky diskontinuitě procesu ale dochází k rázovému vypuzování materiálu v kapalně fázi tlakem zde vznikajících par. Vznik přetavených vrstev a tepelně ovlivněné oblasti je v porovnání s ablací kontinuálním svazkem redukován, nicméně tyto jevy jsou součástí ablace ns pulsy také. [13] [14] [15] [10]

K zásadní změně dochází při obrábění pomocí UKP laseru. Délka pulsů je v tomto případě obvykle v řádu stovek femtosekund až jednotek pikosekund. Klíčové je však, aby délka pulsu byla menší než doba termalizace konkrétního materiálu. V takovém případě dochází k jevu tzv. atermální ablaci. Díky tomu, že délka pulsu, resp. doba předání energie elektronům je kratší než doba termalizace, dochází v principu ke kumulaci energie na elektronech. Do mřížky materiálu je tato energie uvolněna naráz až po uplynutí doby termalizace, což má za následek extrémní, téměř skokový nárůst teploty a tlaku resultující v efektivně instantní přechod materiálu do plynného skupenství. Důsledkem tohoto jevu je, že úběr materiálu provází vznik tepelně ovlivněných oblastí jen minimálně. Porovnání ablaci ns a fs laserem, ze kterého je vhodnost použití UKP laserů pro mikroobrábění zjevná, je na Obr. 6. [13] [14] [15] [10]



Obr. 6 - Srovnání děr ve folii korozivzdorné oceli o tloušťce 100 µm ablaných pulsy délky 3,3 ns (vlevo) a 200 fs (vpravo). V obou případech byla použita intenzita laseru těsně nad prahovou hodnotu nutnou pro ablaci materiálu [15]

2.3 Interakce UKP s transparentními materiály

Jak bylo vysvětleno v předchozí kapitole, interakce femtosekundových laserových pulsů s materiálem obecně je zásadně rozdílná oproti působení kontinuálního svazku kvůli časovému horizontu celé události. Zpracování

transparentních materiálů světelným paprskem s sebou nese ale i další specifika. Pro pochopení nutnosti použití UKP laserů pro ablaci transparentních materiálů je teorie interakce paprsku UKP laseru s transparentním materiálem detailně popsána v následujících podkapitolách.

2.3.1 Nelineární fotoionizace

Při lineární absorpci světla je přestup elektronů v energetických hladinách realizován reakcí s jedním fotonem, který má energii odpovídající rozdílu příslušných dvou stavů elektronu a míra absorpce je tak nezávislá na intenzitě záření. Jelikož energie jediného fotonu laserového záření vlnové délky viditelného a IR spektra není pro lineární absorpci v transparentním materiálu dostatečná, musí pro předání energie dojít k tzv. nelineární fotoionizaci, která je realizována multifotonovou absorpcí a tunelovými jevy. Pravděpodobnost takové reakce je dostatečná pouze při vysoké intenzitě laserového záření, a lze ji proto dosáhnout právě využitím ultrakrátkých laserových pulsů, kde špičkový výkon ve spojení s dosažitelnou fokusací resultuje v intenzitu řádu až stovek TW/cm². [16] [17]

Multifotonová absorpce je děj, při kterém elektron vázaný ve valenční vrstvě atomu absorbuje energii více fotonů současně. Aby byl elektron z vázaného stavu uvolněn, musí jeho energie překročit prahovou hodnotu E_g (vazebná energie elektronu), a počet potřebných fotonů je proto dán vztahem [16]:

$$m * h * \nu > E_g, \quad (2-1)$$

kde m - počet koincidenčních fotonů, h - Planckova konstanta a ν - frekvence záření.

Druhou složkou nelineární fotoionizace jsou tunelové jevy, ke kterým může dojít, protože laserový puls vysoké intenzity je doprovázen silným elektrickým polem, které deformuje vazebnou strukturu a redukuje tak energetickou bariéru mezi vázaným a volným stavem elektronu, čímž zvyšuje pravděpodobnost kvantového tunelování elektronu z vázané do volné pozice. Poměr mezi multifotonovou absorpcí a tunelováním je popsán Keldyshovým parametrem γ [16]:

$$\gamma = \frac{\omega}{e} \sqrt{\frac{m_e * c * n * \epsilon_0 * E_g}{I}}, \quad (2-2)$$

kde ω – frekvence laserového záření, I – intenzita záření, m_e – efektivní hmotnost elektronu, e – náboj elektronu, c – rychlost světla, n – index lomu světla, ϵ_0 – permitivita vakua.

Ve stavu, kdy γ nabývá hodnot výrazně vyšších než 1,5, převládá vliv multifotonové absorpce. Naopak, je-li $\gamma \ll 1,5$, vyšší vliv bude mít tunelový efekt. Obvyklá hodnota v procesech laserového zpracování transparentních materiálů je $\gamma \sim 1$ a jedná se tak o kombinaci obou mechanismů. [16]

2.3.2 Lavinový efekt

Volné elektrony uvolněné z vázaného stavu mohou dále zvyšovat svou energii prostřednictvím postupné absorpce fotonů. Tímto způsobem se volné elektrony mohou dostat do takového energetického stavu, že mají dostatek disponibilní energie na to, aby prostřednictvím srážky uvolnily další vázaný elektron. Výsledkem jsou dva volné elektrony, které mohou dále absorbovat energii laserového pulsu a srážkami uvolňovat další vázané elektrony. Pokud je energie dodávaná laserovým zářením dostatečně velká, dochází k dalšímu opakování procesu – *lavinovému efektu*. [16] [17]

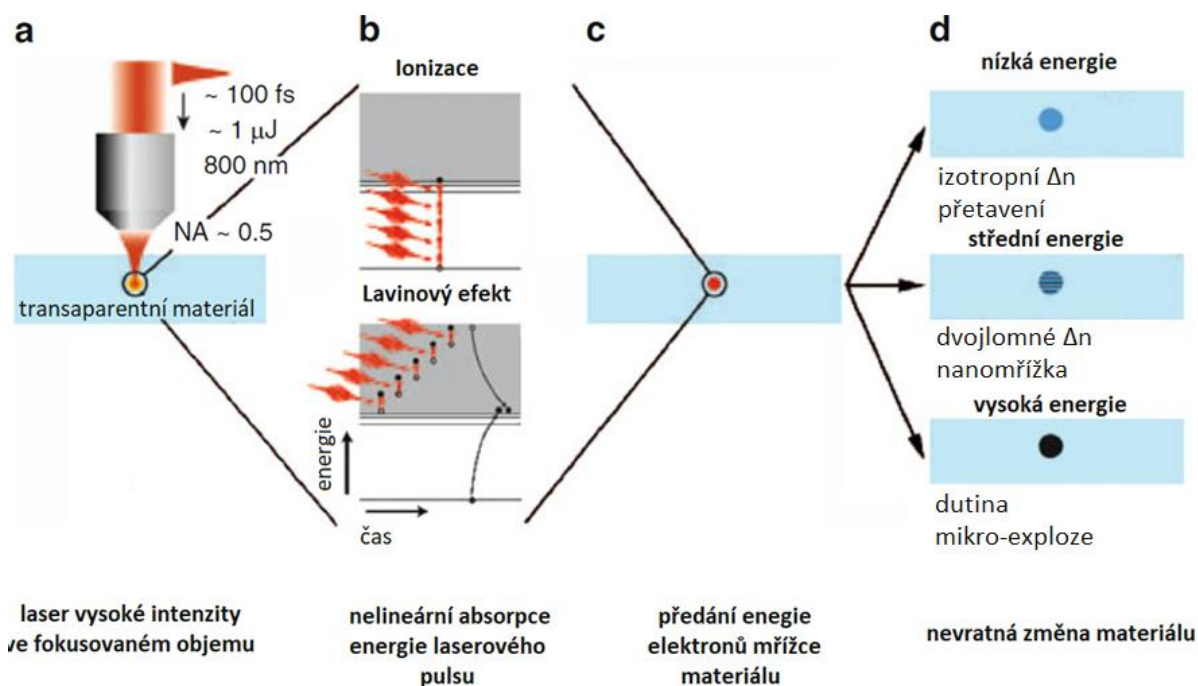
Prostřednictvím lavinového efektu roste hustota volných elektronů až ke kritické hodnotě, kdy elektrony vykazují kolektivní chování jako plazma a mají společnou frekvenci. Tato frekvence se s rostoucí hustotou elektronů přibližuje hodnotě laserového záření, dochází k rezonanci a plazma silně a efektivně absorbuje další energii laserového záření. Pro laserové vlnové délky $\lambda = 1 \mu\text{m}$ (obvyklé pro pevnolátkové lasery) je tato kritická hodnota hustoty elektronů 10^{29} m^{-3} a odpovídající intenzita laserového záření pro dosažení tohoto stavu je pro čisté křemenné sklo $10^{13} \text{ W.cm}^{-2}$. [16] [17]

Základním předpokladem pro fungování tohoto procesu je existence prvotních volných elektronů v materiálu, které se v dostatečné míře v optických materiálech nevyskytují (zdrojem volných elektronů mohou být nečistoty, defekty apod.). Je proto klíčové využívat fs pulsy, při kterých dochází k nelineární fotoionizaci – vzniku prvotních elektronů a dosažení kritické hodnoty hustoty

elektronů je zaručeno. V časovém horizontu fs pulsu také nedochází k „vybíjení“ elektrony akumulované energie prostřednictvím předávání energie atomům materiálu a celková potřebná energie je tak nižší. [16] [17]

2.3.3 Elektron – mřížkové interakce

Excitované plazma po určitém čase (~ 10 ps) předá svou energii atomovým jádrům a způsobí nevratné změny materiálu v závislosti na množství parametrů jak laserového záření, tak materiálu. V případě transparentních materiálů, např. křemenného skla, lze tyto strukturní změny indukované laserovým zářením rozdělit do třech hlavních kategorií v závislosti na množství předané energie, resp. v závislosti na energii laserového pulsu. Schéma celého děje interakce laserového pulsu s transparentním materiálem je pro rekapitulaci procesu zobrazeno na Obr. 7. [16] [17]

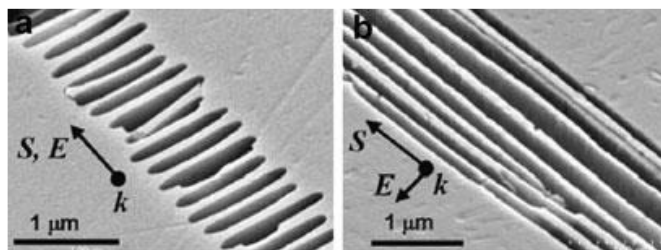


Obr. 7 – Schéma interakce fs laserového pulsu a transparentního materiálu. a) fokusace laserového pulsu, b) nelineární fotoionizace prostřednictvím multifotonové absorpce, tunelového jevu a lavinového efektu, c) předání energie elektronů mřížce resultující v jeden ze tří typů scénářů: d) isotropní změna indexu lomu transparentního materiálu, vznik periodických nanostruktur, ablace materiálu (přeloženo) [16]

V případě pulsu, jehož energie je relativně nízká, resp. jen o málo vyšší než konkrétní prahová hodnota, dochází k místní změně indexu lomu světla n , což je přičítáno lokálnímu zhuštění materiálu vlivem prudkého roztavení a opětovného

zchlazení fokusovaného objemu. Lokalizované změny n se využívá zejména pro vytváření fotonických vlnodů. [16] [17]

Při navýšení energie pulsu a zároveň nepřekročení ablačního prahu materiálu může dojít k nehomogenní změně indexu lomu světla za vzniku dvojlomného prostředí. Dvojlomnost laserem modifikovaného objemu je způsobena periodickou nanostrukturou vzniklou interferencí laserového záření a elektronové plazmy a lze ji pozorovat po selektivním odleptání kyselinou fluorovodíkovou. Orientace nanostruktury závisí na polarizaci laserového svazku a je vůči ní vždy kolmá, jak ukazuje Obr. 8. Tento efekt lze využít pro realizaci kanálků v rámci mikrofluidních systémů. [16] [17]



Obr. 8 – SEM snímky periodické nanostruktury odhalené selektivním leptáním HF kyselinou. Lineární polarizace a) rovnoběžná a b) kolmá ke směru skenování S . [3]

Při překročení ablačního prahu je v materiálu vybuzeno dostatečně velké mechanické napětí, aby jeho vlivem došlo k porušení materiálu a vznikne dutina. Napětí je způsobeno Coulombovými elektrostatickými silami mezi jednotlivými ionty ochuzenými o excitované elektrony. [16] [17]

2.4 Parametry procesu laserového mikroobrábění

Proces laserového mikroobrábění ovlivňuje celá řada parametrů. Zejména mezi tyto parametry patří fyzikální vlastnosti laserového svazku ovlivněné typem zdroje, kvalitou optické cesty stroje apod., nastavené výkonové parametry a nastavení rozmítání svazku, resp. nastavení obráběcí strategie. Následující kapitola sumarizuje a dává do spojitosti tyto parametry.

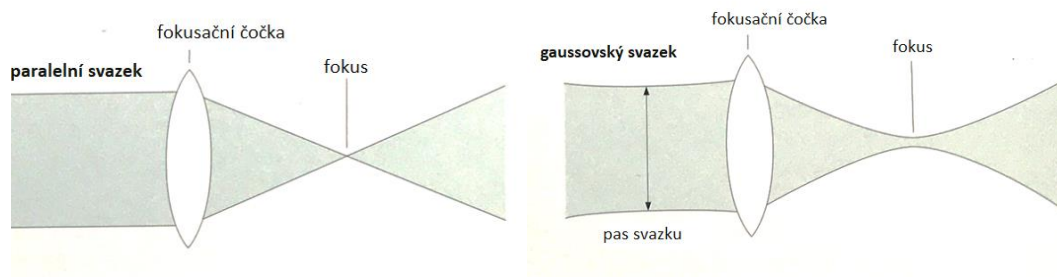
Základní vlastností laserového svazku je jeho monochromaticnost a tedy vlnová délka λ . Reálné laserové záření není a nemůže být dokonale monochromatické, dosahuje nicméně dostatečné kvality, aby se v praktických aplikacích chovalo stejným způsobem a vliv tzv. kvazi-monochromaticnosti se

standardně neuvažuje. Kvalita, resp. míra monochromatickosti je stanovena šířkou spektrální čáry zdrojem emitovaného záření. [18] [19]

V ideálním případě by se laserový svazek sestával z dokonale rovnoběžných paprsků, které by pomocí fokusační čočky bylo možné soustředit do jediného bezrozměrného fokusačního bodu. Vlastností laserového svazku je však určité odchylení od tohoto ideálu charakterizované úhlem divergence θ , tak jak je vidět na Obr. 9. Divergence způsobuje nemožnost dokonalé kolimovatelnosti a ve výsledku nemožnost fokusace laserového svazku v jediný bod. V ohnisku laserového svazku je proto vždy spot konečně velkého průměru. Fyzikální limit minimální divergence je daný tzv. difrakčním jevem, nicméně reálné svazky mají divergenci vždy vyšší. Toto hodnotí faktor kvality svazku M^2 , jenž je definován rovnicí:

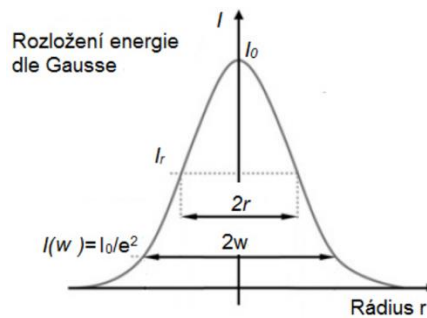
$$M^2 = \theta * \frac{\pi w_0}{\lambda}, \quad (2-3)$$

kde w_0 je poloměr kolimovaného svazku v pase (viz Obr. 9). [20] [21] [18]



Obr. 9 – Srovnání svazků chápaných podle geometrické optiky (vlevo) a Gaussovské optiky (vpravo) (přeloženo) [20]

Průměr zaostřeného svazku v pase za fokusační čočkou, tedy průměr tzv. laserového spotu, je dalším podstatným parametrem laserového mikroobrábění, jelikož svým způsobem určuje dosažitelný detail. Jeho definice je však závislá na konkrétním typu laserového svazku z hlediska distribuce energie v rovině kolmé ke směru jeho šíření. Obvykle se používá tzv. gaussovský svazek, tedy svazek, jehož intenzita v této rovině sleduje normální rozložení dle Gausse, jak je zobrazeno na Obr. 10. Z definice je pak jako poloměr svazku w (někdy také efektivní poloměr svazku) označen poloměr při kterém hodnota intenzity klesne na hodnotu $I = e^{-2} * I_0$, tj. přibližně na 13,5 % maximální hodnoty. [18] [22]



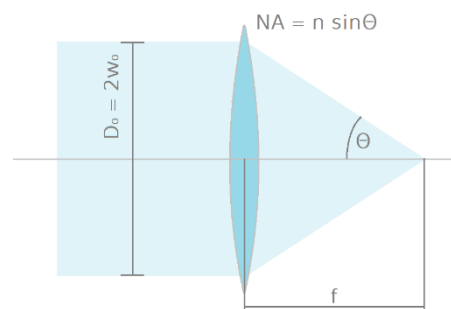
Obr. 10 - Distribuce energie laserového svazku v rovině kolmé ke směru šíření dle Gausse (upraveno) [18]

Průměr laserového spotu je pak $D = 2 * w$ a jeho minimální dosažitelná hodnota je určena vztahem:

$$D = \frac{4 * \lambda * f_{optiky} * M^2}{\pi * D_0} \quad (2-4)$$

kde f_{optiky} je ohnisková vzdálenost fokusační optiky a D_0 je průměr kolimovaného svazku před fokusační čočkou.

Ze vztahu je zřejmé, že změnu velikosti laserového spotu lze dosáhnout buď změnou vlnové délky laserového záření, anebo změnou fokusační optiky, přičemž klíčovým parametrem čočky není pouze její ohnisková vzdálenost, nýbrž poměr f/D_0 , resp f/w_0 , který je ve své podstatě numerickou aperturou čočky NA , což ilustruje Obr. 11. [23] [18]



Obr. 11 - Schéma fokusace ve spojitosti s numerickou aperturou čočky

S velikostí laserového spotu souvisí také parametr Rayleighovy vzdálenosti, resp. hloubky ostrosti definované vztahem:

$$Z_R = \frac{\pi * w^2}{\lambda * M^2} \quad (2-5)$$

Jedná se o vzdálenost od ohniska, kde $w_1 = \sqrt{2} * w$, což pro kruhový svazek resultuje ve dvojnásobné zvětšení plochy laserového spotu. [24] [18]

Důležité jsou pro laserové mikroobrábění také výkonové parametry. Průměrný výkon laserového zdroje P_{avg} však pro pulsní a UKP laserové svazky není vypovídající, jelikož přenos energie je koncentrován do časového intervalu charakterizovaného délkou pulsu τ_p . Z tohoto důvodu se pro bližší popis energetických poměrů procesu používá spíše parametr energie pulsu E_p vyjádřené z průměrného výkonu a opakovací frekvence pulsů f . [25] [26] [18]

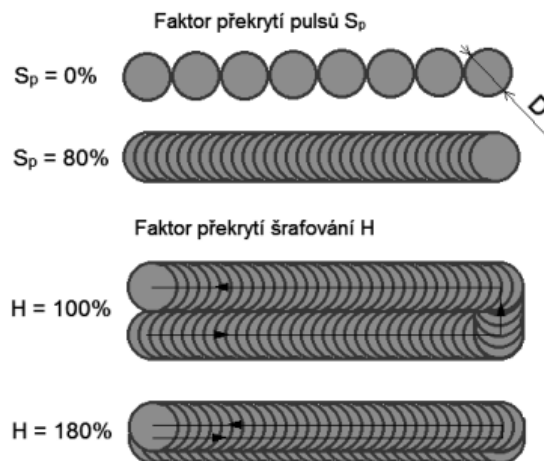
$$E_p = \frac{P_{avg}}{f} \quad (2-6)$$

Pro další upřesnění se energie pulsu E_p dává do kontextu s velikostí laserového spotu odvozením hustoty energie v ploše fokusovaného laserového spotu F v rámci pulsu, jenž je v anglicky psané literatuře označována jako fluence. [25] [26] [18]

$$F = \frac{E_p}{\pi * w^2} \quad (2-7)$$

Posledními ze základních parametrů procesu laserového mikroobrábění jsou parametry spjaté se strategií rozmítání paprsku. Po povrchu obráběného materiálu je laserový spot rozmítán skenovací rychlostí v , jež v kombinaci s průměrem spotu a frekvencí opakování pulsů resultuje v podílovou hodnotu faktoru překrytí pulsů S_p . Při šrafování ploch do procesu vstupuje ještě nastavení faktoru překrytí šrafování H . Schématický Obr. 12 ukazuje význam těchto parametrů. [27] [18]

$$S_p = 1 - \frac{v}{f * D} \quad (2-8)$$



Obr. 12 - Parametry strategie rozmítání S_p a H [18]

3 Senzorika a vláknová optika

Následující kapitola se přehledově věnuje optovláknové sensorice. Je rozdělena do dvou podkapitol, z nichž první se zabývá klasifikací dle funkčních principů. Druhá část je pak věnována přehledu vědeckých prací zabývajících se experimentální výrobou vláknové sensoriky s pomocí laserové technologie.

Hlavní výhodou optických vláknových sensorů je množství veličin a jevů, které lze při použití správného typu senzoru monitorovat. Optické vláknové senzory se používají například pro měření mechanického napětí a deformace, rychlosti a zrychlení, rotace a náklonu, vibrací, teploty a teplotních gradientů, vlhkosti, pH, viskozity, chemických a biologických reakcí a dalších. Akcentovanými výhodami této sensoriky jsou: Nízká hmotnost, možnost miniaturizace, vysoká citlivost, resistantnost vůči elektromagnetickému rušení, mechanická odolnost vůči vnějším vlivům prostředí, možnost multiplexování a další. [28] [29]

Je pravdou, že oproti standardním elektronickým sensorům disponují optické senzory často řadou funkčních výhod. Nicméně zejména kvůli vyšší ceně optických sensorů se tyto senzory aktuálně uplatňují převážně ve specifických, pokročilých aplikacích, kde nasazení konvenčního způsobu měření není možné. [28] [29]

3.1 Klasifikace sensorů vláknové optiky

Podle využití samotného optického vlákna se senzory rozdělují do dvou hlavních skupin na takzvaně *intrinstické* (vnitřní) a *extrinsické* (vnější) senzory. Vláknové senzory označované jako vnější využívají optického vlákna pro vedení paprsku světla do a z externího snímacího systému, kde mimo samotné vlákno dojde k modulaci optického signálu. Oproti tomu v případě vnitřních sensorů optický signál vlákno neopouští a ke snímání dochází přímo ve vlákně. Trendem doby je vývoj převážně vnitřních sensorů díky výhodám, jako je jejich kompaktnost. [28] [29]

Podrobněji je možné senzory v rámci vláknové optiky kategorizovat podle parametru (vlastnosti) optického signálu, jež je modulován a vyhodnocován v rámci měření. Funkčním principem může být modulace intenzity světla

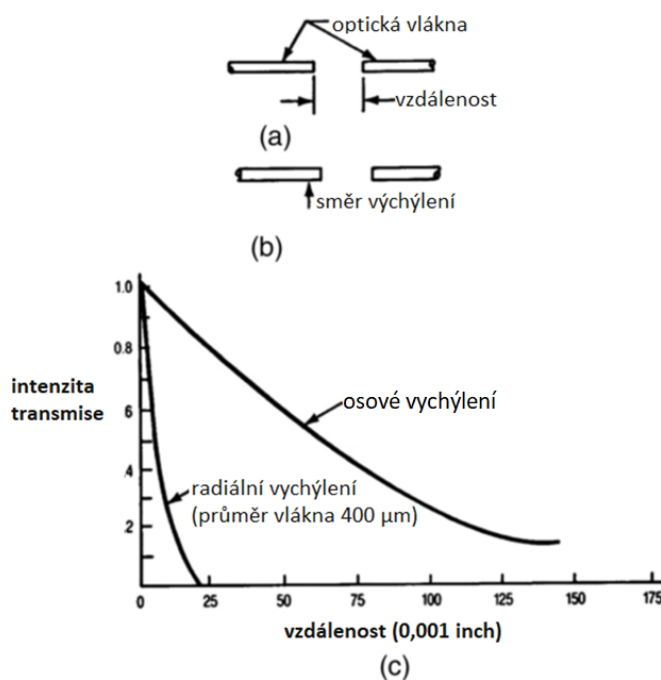
(amplitudové či intenzitní senzory), modulace fáze světla (interferometrické senzory), modulace polarizace světla (polarizační senzory) a modulace vlnové délky světla (spektrometrické senzory). [28] [29]

Dále se vláknová sensorika obvykle rozděluje do skupin podle jejich cílové aplikace (teplotní senzory, pH senzory, bio-senzory apod.) nebo podle jejich prostorového uspořádání (bodové, semi-distribuované a distribuované senzory). [28] [29]

3.1.1 Senzory na bázi modulace intenzity

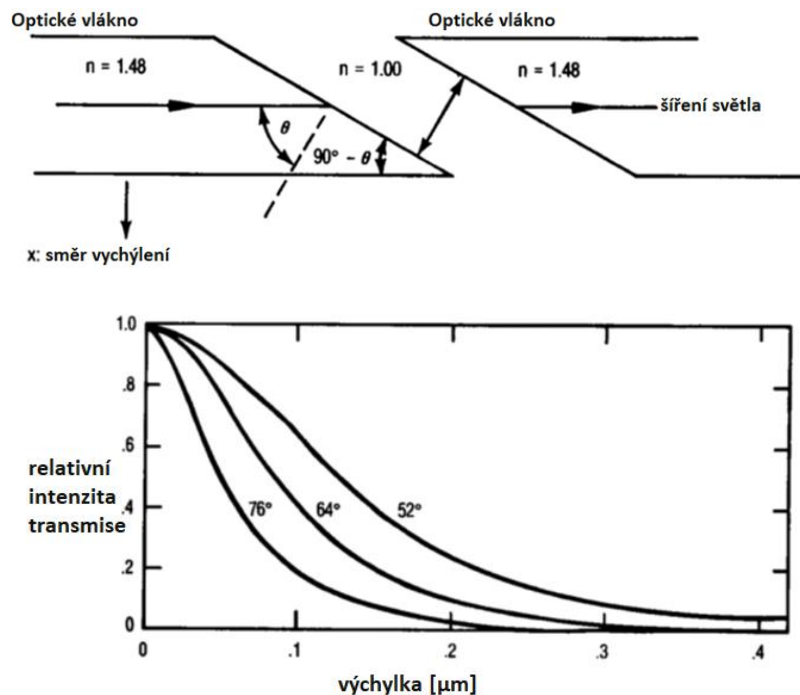
Modulace intenzity optického signálu lze využít např. pro měření vzdálenosti, významné zastoupení ale mají senzory tohoto typu v rámci aplikací, kde fungují jako spínače. Rozlišují se tři základní koncepty senzorů a to: Transmisní, reflexní a mikroohybové. [30] [29] [28]

Elementární uspořádání transmisního senzoru pro měření axiálního posunu je na Obr. 13 a). Úbytek intenzity optického signálu je úměrný vzdálenosti mezi čely vláken senzoru a závislost lze lineárně aproximovat přibližně pro prvních 20 % rozsahu. Vyšší citlivosti transmisního senzoru můžeme dosáhnout při konfiguraci na Obr. 13 b), kde je měřena výchylka v radiálním směru. Maximální rozsah měření pak odpovídá průměru optického vlákna. [30] [29] [28]



Obr. 13 - Schéma transmisního senzoru a) axiální posun b) radiální posun c) graf přenesné intenzity v závislosti na výchylce – srovnání citlivosti (přeloženo) [30]

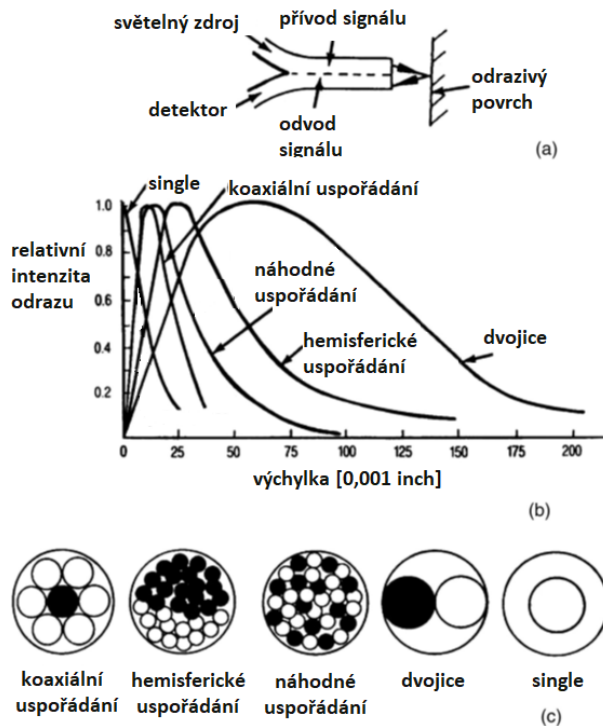
Nejvyšší citlivostí, avšak malým rozsahem, disponují transmisní senzory využívající FTIR jevu (frustrated total internal reflection – frustrovaný totální vnitřní odraz). Čela vláken jsou zkosená pod specifickým úhlem vůči ose, což má za následek totální vnitřní odraz světla a nedochází k propagaci signálu z vlákna. Situace se však mění, pokud se k sobě vlákna přiblíží na velmi malou, sub-mikronovou, vzdálenost. V tu chvíli dochází k přenosu energie nesené optickým signálem prostřednictvím evanescentní vlny na rozhraní a optický signál je navázán v následném vlákne. Schematické uspořádání a závislost mezi axiální výchylkou a intenzitou optického signálu je na Obr. 14. [30] [29] [28]



Obr. 14 - Schéma FTIR transmisního senzoru (nahore) a průběhy odezvy v závislosti na úhlu θ (dole) (přeloženo) [30]

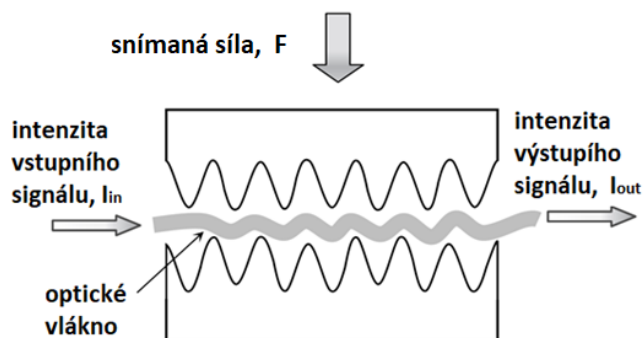
Druhým standardním konceptem amplitudových senzorů je odrazová konfigurace senzoru. Skládá se z dvojice či dvou svazků vláken paralelně uspořádaných kolmo vůči odrazivé rovině, přičemž jedna větev přivádí optický signál ze zdroje a druhá zachycuje a odvádí odražené světlo k detektoru. Intenzita odraženého světla je závislá na vzdálenosti mezi konci optických vláken a rovinou odrazu. Schéma senzoru a příklady průběhu závislosti intenzity na vzdálenosti od odrazivé roviny pro různé uspořádání optických vláken je na Obr. 15. Rozsah měření, resp. průběh intenzity (Obr. 15 (b)) lze upravovat pomocí přidavných čoček, nahrazením roviny odrazu konvexním zrcadlem apod. Nejvyšší

citlivosti, resp. přesnosti měření, se dosahuje v oblasti lineárního nárůstu intenzity, a to až v řádu $10^{-2} \mu\text{m}$. [30] [29] [28]



Obr. 15 – a) Schéma reflexního senzoru, b) srovnání průběhů odezvy v závislosti na c) konfiguraci (přeloženo) [30]

Posledním ze základních konceptů intenzitních senzorů je koncept ohýbání optického vlákna. Využívá se ztráty optického signálu způsobené vícenásobným ohybem vlákna, který je zapříčiněn posunem ozubeného přípravku, jak je ilustrováno na Obr. 16. Perioda jednotlivých ohybů je závislá na průměru a dalších parametrech optického vlákna, ale obvykle se pohybuje v řádu desetin až jednotek milimetrů. Možná maximální výchylka, resp. amplituda ohybu vlákna, je obvykle v řádu jednotek mikrometrů. [30] [29] [28]

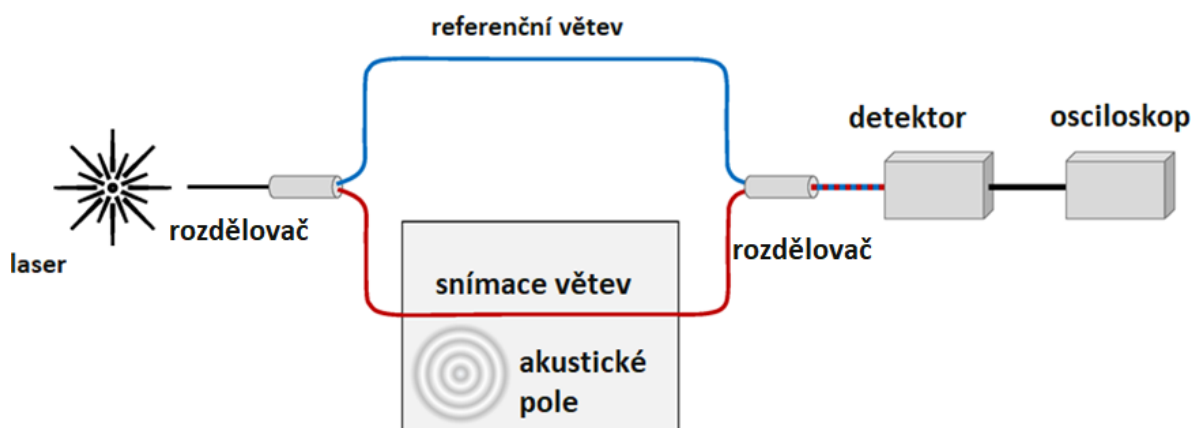


Obr. 16 – Schéma mikroohybového senzoru (přeloženo) [28]

3.1.2 Senzory na bázi modulace fáze světelného signálu

Senzory, v rámci kterých je optický signál fázově modulován a následně skládán s referenčním optickým signálem, se označují jako interferometry. Tyto senzory se vyznačují vysokou citlivostí a přesností měření a jsou proto velmi aktivně vyvíjeny a často publikovány. Z hlediska konkrétní konfigurace se rozlišují čtyři základní interferometry: Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Pérot a Sagnac. [28] [30] [29]

Machův-Zehnderův interferometr, jehož schéma je na Obr. 17, je nejjednodušší a jeho základním principem je rozdělení koherentního optického signálu do dvou oddělených větví, fázová modulace jednoho z nich vlivem měřené veličiny a opětovné spojení těchto dvou signálů resultující v měřenou změnu amplitudy pomocí detektoru. Změna fáze signálu může být způsobena například deformací (prodloužením či zkrácením) snímací větve. Pokud jsou délky drah signálu ve snímací a referenční větvi stejné, nebo se liší o celočíselný násobek vlnové délky signálu, pak budou interferující paprsky přesně ve fázi a výsledná intenzita bude maximální. V případě, že dojde k deformaci snímací větve o velikosti poloviny vlnové délky signálu, bude výsledný signál minimální, resp. nulový. [31] [30]

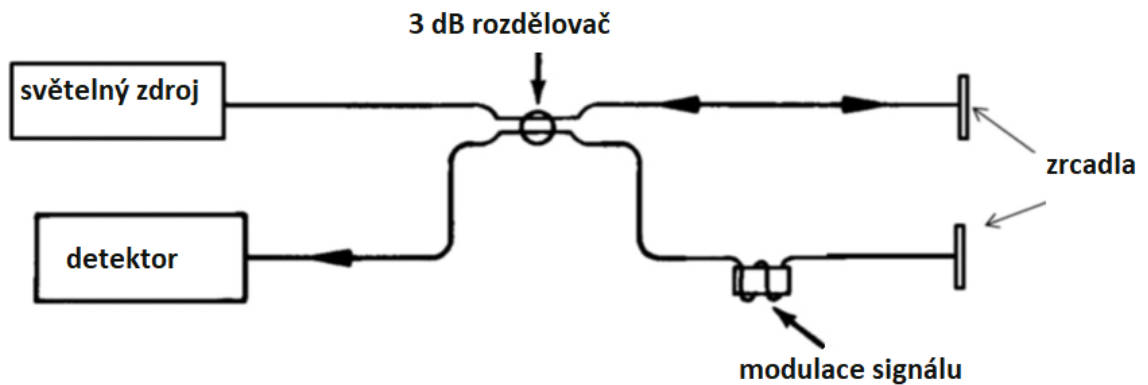


Obr. 17 – Schéma Machova-Zehnderova interferometru (přeloženo) [31]

Konfigurace Michelsonova interferometru, která je zobrazena na Obr. 18, je velmi podobná, využívá ale vláken se zrcadlovým zakončením. Jelikož signál prochází snímací a referenční větví dvakrát, změna délky snímací větve interferometru se projeví dvojnásobně na výsledném fázovém posunu. Výhodou Michelsonova interferometru je eliminace druhého rozdělovače signálu.

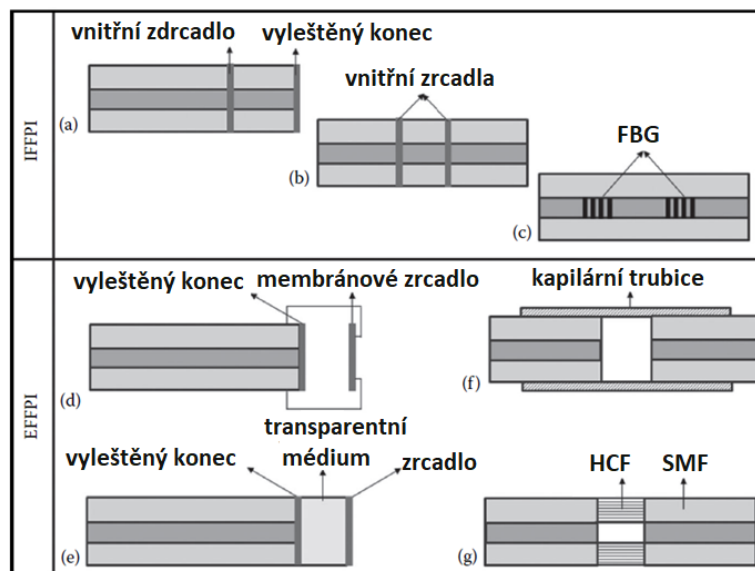
Nevýhodou pak vedení signálu zpátky do světelného zdroje, což je zdrojem světelného šumu nevhodného pro velmi přesné aplikace. [30]

Jak bude ukázáno v dalších kapitolách této práce, větve interferometrů obecně nemusí být samostatná vlákna (tak jako na Obr. 17, Obr. 18), ale lze je vytvářet i v rámci jediného optického vlákna, například pomocí fs laseru.



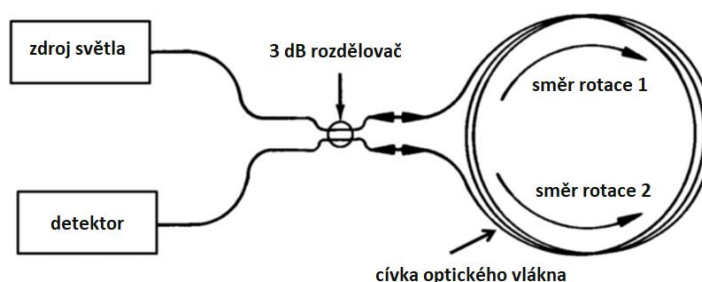
Obr. 18 – Schéma Michelsnova interferometru (přeloženo) [30]

Fabryův-Perotův interferometr (FPI) nevyužívá na rozdíl od předchozích dvou interference optických signálů ze snímací a referenční větve, ale interference složek jediného signálu, jenž je odražen v rezonátoru FPI, tzv. etalonu. Schéma FPI je na Obr. 19. Rozdělení signálu ze zdroje je dosaženo na částečně odrazivých rozhraních vymezujících etalon FPI, která mohou být tvořena pouze samotným rozhraním vlákno/vzduch (extrinický FPI), povlakem vytvořeným na čele vlákna a následným napojením pokračujícího vlákna, Braggovou mřížkou (intrinický FPI) i jinak. Optický signál ze světelného zdroje je po příchodu na první rozhraní částečně odražen zpět a část ho pokračuje dál. Na druhém rozhraní je situace stejná a odražená část signálu se vrací na první rozhraní, kde je opět rozdělena atd. K interferenci dochází mezi tímto způsobem odraženými paprsky v prostoru etalonu FPI, které mezi sebou mají fázový posun. Velikost fázového posunu je úměrná fyzické délce etalonu, indexu lomu prostředí etalonu a vlnové délce signálu. Analýze je podrobena odražené nebo transmisní spektrum signálu charakteristické rezonančním vrcholem, který se v závislosti na změně optické délky etalonu posouvá. [32] [33] [34] [28]



Obr. 19 – Schéma různých konfigurací intrinsických (IFFPI) a extrinsických (EFFPI) FP interferometrů (přeloženo) [28]

Sagnacův interferometr je speciálně konstruován primárně za účelem detekce rotace. Schéma interferometru je na Obr. 20. Rozdělovač navazuje optický signál do stejného vlákna, které je smotáno v cívce, v obou směrech (směr 1 a 2). Za klidového stavu interferometru nedochází k žádnému fázovému posunu, jelikož dráha obou signálů je stejná. Změnu dráhy signálů vyvolává rotace cívky optického vlákna. Rotace ve směru 1 má za následek prodloužení dráhy signálu 1 a současné zkrácení dráhy signálu 2. Naopak rotace ve směru 2 má opačný výsledek. Měřený fázový posun je úměrný rychlosti rotace cívky a Sagnacův interferometr lze použít např. pro gyroskopy. [34] [30]



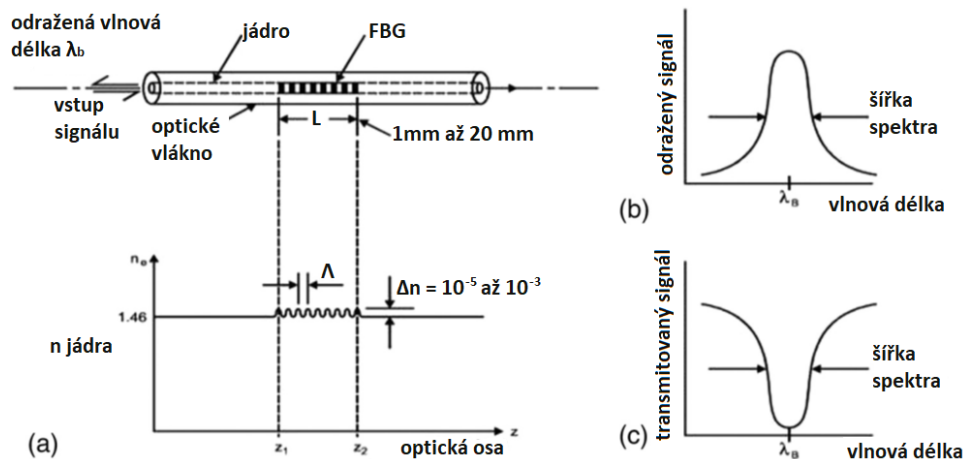
Obr. 20 – Schéma Sagnacova interferometru (přeloženo) [30]

3.1.3 Senzory modulace vlnové délky

Mezi senzory, které pro měření využívají spektrální analýzy optického signálu, se řadí fluorescenční a fosforescenční senzory, které se převážně používají v chemicko-biologických aplikacích a pracují s charakteristickými spektry různých chemických látek. Dále do skupiny spektrálních senzorů patří senzory

využívající Braggových mřížek. Právě FBG (Fiber Bragg Grating) senzory jsou v této skupině dominantní. [28] [30]

Samotná FBG je tvořena pouze periodickou změnou indexu lomu světla Δn jádra optického vlákna. Takováto struktura (Obr. 21 a)) se nazývá FBG a funguje jako pásmový filtr, tj. odráží se od ní konkrétní část spektra optického signálu definovaná parametry mřížky a zbytek signálu jí prochází nezměněn tak, jak schematicky naznačují grafy na Obr. 21 b) c). [35] [36] [30]



Obr. 21 – Konceptuální schéma funkce FBG - Braggovy mřížky na jádře optického vlákna (přeloženo) [30]

Braggova mřížka z principu silně odráží pouze konkrétní vlnovou délku díky tomu, že na každém optickém rozhraní změny indexu lomu světla dochází k částečnému odrazu a z těchto mnohonásobných odrazů konstruktivně interferuje pouze vlnová délka příslušná geometrii dané FBG, která se nazývá Braggovou rezonanční vlnovou délkou λ_{Bragg} . Vztah mezi λ_{Bragg} a geometrií mřížky definovanou její periodou Λ je dán vztahem:

$$\lambda_{Bragg} = 2 * n_{eff} * \Lambda, \quad (3-1)$$

kde n_{eff} je efektivní index lomu světla jádra optického vlákna. [35] [36] [30]

Charakter odraženého spektra dále v rámci jednoduchých homogenních FBG (konstantní Δn a Λ) ovlivňuje zejména celková délka FBG a velikost změny indexu lomu světla Δn , která FBG tvoří. [36] [30]

Senzorická funkce FBG je založená na analýze odraženého spektra, resp. analýze posunu Braggovy rezonanční vlnové délky. Posun λ_{Bragg} je způsoben změnou parametrů vztahu (3-1), která je obvykle způsobena deformací

vlákna, ať už vlivem teploty nebo mechanického namáhání. Velká výhoda FBG senzorů oproti ostatním senzorům vláknové optiky tkví právě v analýze vlnové délky, nikoliv intenzity optického signálu. To je výhodné, protože vlnová délka optického signálu není výrazně ovlivňována např. drobnými poruchami a tlumením optické cesty nebo kolísáním zdroje optického signálu. Další výhodou je možnost řazení více FBG rozdílných parametrů do série na jednom vlákně, což dává za vznik distribuovanému FBG senzoru. Snímáním odraženého spektra pak lze sledovat posuny více λ_{Bragg} příslušných konkrétním mřížkám a monitorovat tak sledovanou veličinu lokálně. [28]

3.1.4 Polarimetrické senzory

Pro polarimetrické senzorické aplikace se používají speciální HB (high-birefringence, silný dvojlom) vlákna. Ve své podstatě je každé vlákno do jisté míry dvojlomné, a to kvůli nevyhnutelným malým zbytkovým pnutím a nedokonalostmi tvaru průřezu jádra optického vlákna způsobených výrobou. Zvýšení dvojlomnosti, vytvoření HB vlákna, se dosahuje začleněním prvků indukujících napětí do obalu vlákna (Panda HB, Bow-tie HB), nebo cíleným vytvořením vlákna s eliptickým průřezem jádra či obalu vlákna. [37]

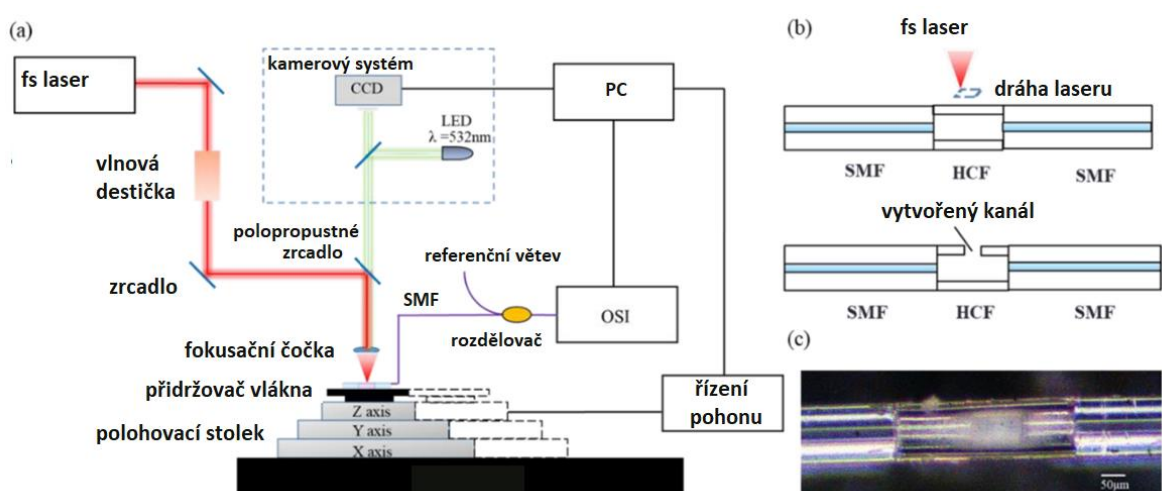
HB vlákno umožňuje stabilní průchod optického signálu ve dvou na sebe kolmých rovinách, a vede tedy optický signál tvořený dvěma na sebe kolmými složkami. Při průchodu se tyto dvě složky nemění z hlediska polarizace, ale mají rozdílnou rychlost způsobenou rozdílnými efektivními indexy lomu světla v daných preferovaných rovinách. Výsledkem nestejně rychlosti složek optického signálu je periodicky se měnící celková intenzita optického signálu a periodická změna celkové polarizace signálu, která se mění z lineární přes eliptickou na kruhovou a obráceně. Vyhodnocovaným parametrem při měření je buďto právě celková intenzita světelného signálu, nebo fázový posun dvou složek pulsu optického signálu, který je závislý také na celkové délce vlákna. [37] [29] [30] [28]

Jako senzory lze HB vlákna použít díky tomu, že vnější vlivy jako je teplota, mechanické napětí, deformace, tlak apod. způsobují změny efektivních indexů lomu vlákna a způsobují tak změnu periody, se kterou se mění intenzita optického signálu, anebo mění fázový posun složek pulsu. Konkrétní vazby mezi vnějšími vlivy a parametry vlákna lze najít v literatuře. [29]

4 Mikroobrábění pomocí UKP laserů pro vláknovou sensoriku

Technologie ultrakrátkopulsních laserů se ukazuje jako perspektivní možnost pro mikroobrábění a strukturování optických vláken, o čemž svědčí řada vědeckých článků zabývajících se návrhem a experimentální výrobou pokročilých převážně intrinsických senzorů. Důvodem pro použití právě UKP laserů je dosažitelnost vysokého detailu při mikroobrábění, a to jednak povrchu, ale i strukturování v objemu optického vlákna. Pro přiblížení konkrétních sensorických struktur, k jejichž výrobě bylo použito femtosekundových laserů, následuje přehled aktuálních prací na toto téma.

Interferometry, a zejména FP interferometry, jsou často prezentovanými senzory indexu lomu světla okolního prostředí, které se využívají pro měření koncentrace látek rozpuštěných v referenčním médiu. Příkladem může být senzor, jehož schéma, fotografie a postup výroby je na Obr. 22. FPI je realizován integrací sekvence HCF (Hollow-core fiber, duté vlákno) do klasického jednovidového vlákna (Single-mode fiber, SMF), přičemž do HCF je pomocí fs laseru vytvořen otvor. Měřený okolní plyn či kapalina tak vyplní duté vlákno, kde dochází ke kýžené interakci s optickým signálem. [38]



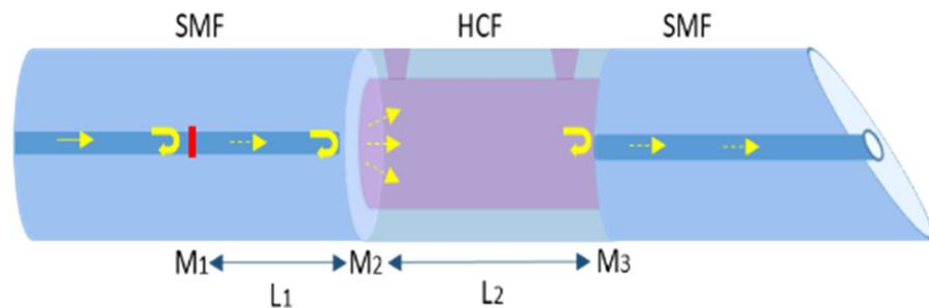
Obr. 22 -a) Schéma fs laserového mikroobráběcího systému, b) postup procesu výroby, c) snímek senzoru (přeloženo) [38]

Pro vytvoření otvoru do HCF byl použit laserový systém s parametry shrnutými v Tab. 1 s objektivovou čočkou 10násobného zvětšení s numerickou aperturou $NA = 10$. Vláknem bylo upnuto na tříosém polohovacím stolku s přesností polohování $0,3 \mu\text{m}$. V průběhu mikroobrábění obdélníkového otvoru byla sledována odezva senzoru pomocí optického integrátoru (OSI) a proces byl monitorován CCD kamerou (Obr. 22 a)). Snímek vzniklé kavity ze světelného mikroskopu je na Obr. 22 c). [38]

Tab. 1 – Procesní parametry experimentální výroby FPI [38]

λ [nm]	t_p [fs]	f [kHz]	P [W]	E_p [mJ]
800	30	1	~ 3	$\langle 0,1 \rangle$

Senzor podobné konstrukce uvádí článek [39]. Senzor je také realizován implementací úseku HCF do SMF vlákna. Pomocí fs laseru je zde však vytvořeno v přívodní části SMF částečně odrazivé rozhraní (M1 na Obr. 23) o osové délce $20 \mu\text{m}$, které vytváří referenční signál namísto referenční větve senzoru z článku [38]. Díky tomu je senzor výrazně kompaktnější. Druhou operací je vytvoření dvou děr o průměru $40 \mu\text{m}$ do hloubky $24 \mu\text{m}$ spojujících okolí s jádrem HCF.

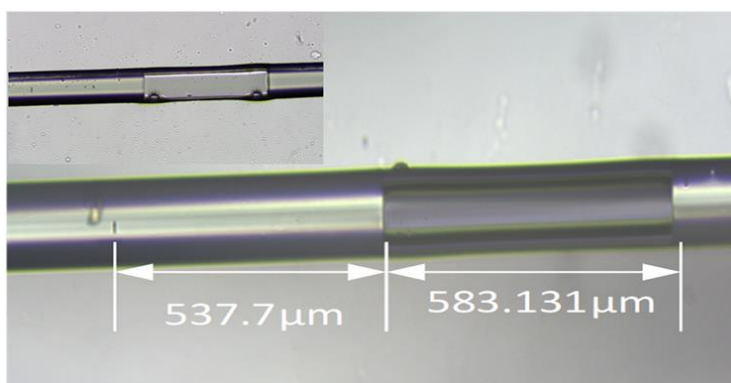


Obr. 23 – Funkční schéma FPI [39]

Použit byl Ti:Safírový laserový zdroj s parametry uvedenými v Tab. 2. Pro modifikaci jádra SMF byla použita imersní objektivová čočka 63násobného zvětšení s $NA = 1,4$. Rychlost posuvu při mikroobrábění děr byla $2 \mu\text{m/s}$ a použita byla suchá objektivová čočka 20násobného zvětšení s $NA = 0,4$. Na Obr. 24 je snímek celého senzoru z optického mikroskopu (v horní části detail vyrobených děr). [39]

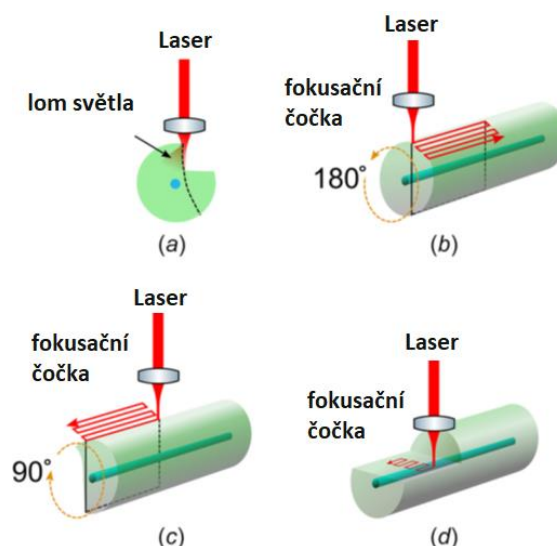
Tab. 2 – Procesní parametry experimentální výroby FPI (hodnota E_p pro výrobu otvorů do HCF) [39]

λ [nm]	t_p [fs]	f [kHz]	P_{max} [W]	E_p [μ J]
800	35	5	3	12



Obr. 24 – Mikroskopický snímek FPI [39]

Článek [40] uvádí další interferometrický senzor pro měření indexu lomu okolního prostředí. Vytvářená struktura je však geometricky výrazně složitější. Použito bylo klasické SM vlákno o průměru 125 μ m (jádru 8 μ m). Proces laserového mikroobrábění se skládá z dvou kroků. Prvním je odhalení jádra vlákna úběrem téměř poloviny průřezu v délce senzoru a druhým je vytvoření samotné struktury. Schéma procesu je na Obr. 25. [40]



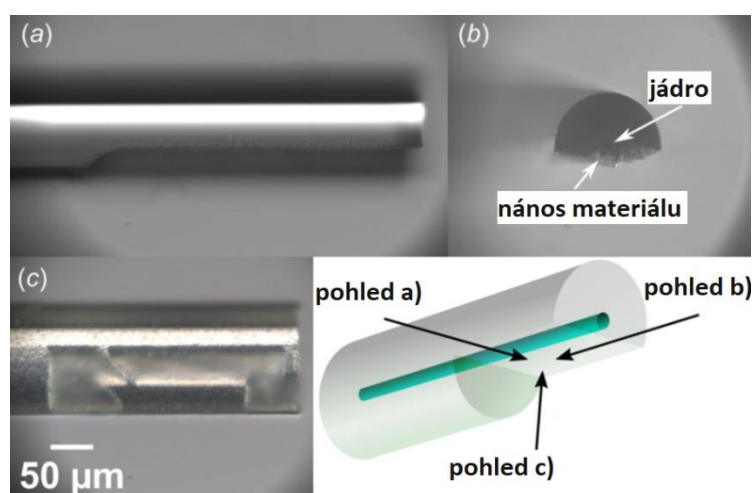
Obr. 25 – Lom laserového paprsku při obrábění a), postup výroby senzoru b) až c) úběr obalu vlákna, d) vytváření senzorické struktury [40]

Pro obrábění byl použit laserový zdroj s parametry uvedenými v Tab. 3 a pro fokusování svazku byla použita objektivová čočka 20násobného zvětšení

s $NA = 0,42$. Při vyšších výkonech laseru vlivem lomených paprsků (viz Obr. 25 a)) docházelo k vytváření tepelně ovlivněných oblastí, ve kterých se změnili optické vlastnosti materiálu. Při vysokých opakovacích frekvencích pulsu navíc docházelo k hromadění částic na obrobeném povrchu, což vedlo k dalšímu zhoršení průběhu procesu. Autoři proto volili výkonové hodnoty laseru blízké ablačnímu prahu materiálu a využili funkce „pulse-picker“, která vybírá jednotlivé pulsy a snižuje tak výslednou opakovací frekvenci. Snímky z optického mikroskopu výsledné sensorické struktury jsou na Obr. 26. [40]

Tab. 3 – Procesní parametry experimentální výroby senzoru [40]

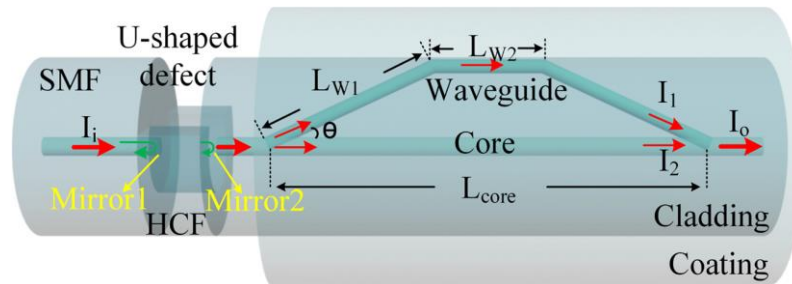
	λ [nm]	t_p [fs]	pulse picker	F [J.cm ⁻²]	posuv [μ m/s]
Operace b) - c)	1030	229	100	21,1	80
Operace d)	1030	229	100	4,2	80



Obr. 26 – Mikrosnímky interferometrické struktury (přeloženo) [40]

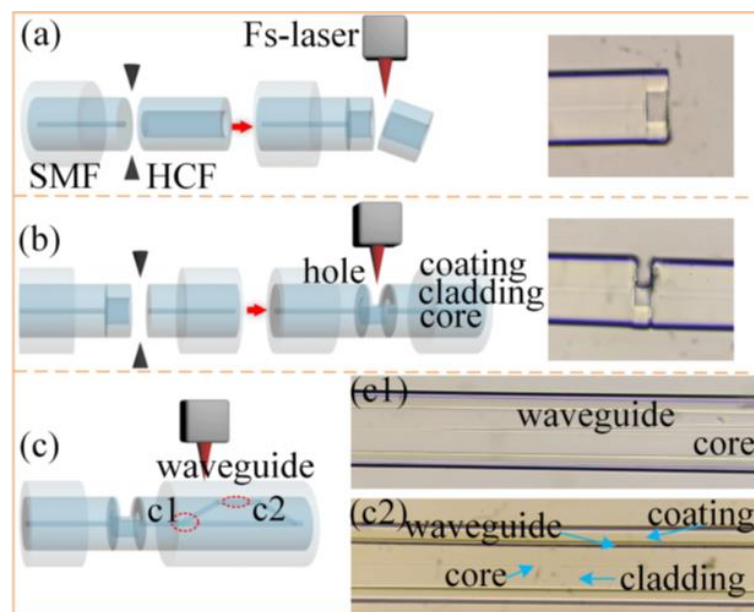
Pokročilý interferometrický senzor předvádí článek [41]. Jedná se o kaskádový senzor FP a MZ interferometru, který je postaven na SMF-HCF-SMF základu. FP interferometr tvoří dutina v HCF (stejně jako uvádí [38]) a v navazujícím SMF je vytvořena struktura MZ interferometru, tak jak uvádí schéma je na Obr. 27. Senzor je určen pro měření teploty a slanosti mořské vody. Měření slanosti vody je založeno (stejně jako v předchozích článcích) na měření indexu lomu světla rezonátoru FP interferometru vyhodnocením zpětně odraženého optického signálu. Teplotu okolí lze stanovit pomocí MZ interferometru analýzou procházejícího signálu. Měření je založeno na teplotou indukované změně optické délky vlnovodu, jímž prochází paprsek I_1 . Změna

optické délky vlnovodu I_1 a I_2 je různá kvůli řádově rozdílnému termo-optickému koeficientu materiálu primární akrylové ochrany ($2,9 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ [41]) a obalu ($11,3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ [42]) vlákna, který udává změnu indexu lomu světla při zvýšení teploty o 1 K. [41]



Obr. 27 – Funkční schéma kombinovaného FP a MZ interferometru (U-shaped defect – otvor v HCF vlákně, waveguide – vlnovod, core – jádro, cladding – obal vlákna, coating – primární ochrana vlákna) [41]

Postup výroby senzoru je na Obr. 28 rozložen do tří postupných kroků. V prvním kroku (Obr. 28 a) je na obnažené SMF připojen úsek HCF, jehož délka je upravena řezem provedeným fs laserem na hodnotu $35 \mu\text{m}$. V druhém kroku (Obr. 28 b) je připojeno pokračující SMF a na HCF je vytvořena drážka (šířka v axiálním směru $30 \mu\text{m}$, hloubka v radiálním směru $60 \mu\text{m}$). Proces řezání byl proveden při imersi vlákna ve vodě pro eliminaci aberace způsobené cylindrickou morfologií vlákna. Posledním krokem (Obr. 28 c) je vytvoření vlnovodu I_1 v SMF. Část vlnovodu L_{W1} svírá s jádrem vlákna úhel $1,65^\circ$ a je $1934 \mu\text{m}$ dlouhá, část L_{W2} paralelní s jádrem vlákna měří $3000 \mu\text{m}$. [41]



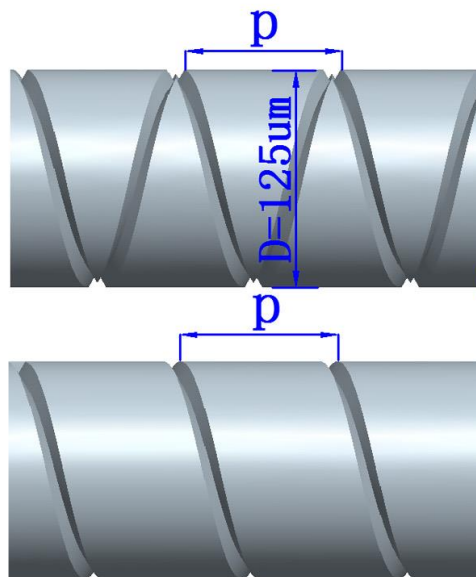
Obr. 28 – Schéma a fotografie postupu výroby kombinovaného FP a MZ interferometru [41]

Laserové parametry procesu jsou uvedené v Tab. 4.

Tab. 4 – Procesní parametry experimentální výroby kombinovaného FP-MZI [41]

	λ [nm]	t_p [fs]	f [kHz]	laser intensity [μ W]	posuv [μ m/s]
Operace a) - b)	520	<400	10	51	70
Operace c)	520	<400	50	27	30

Článek [43] uvádí FBG senzor, modifikovaný pro měření koncentrace vodíku v okolní atmosféře. Klíčové je pro jeho funkci napaření Pd-Ag povlaku na povrch vlákna, který na sebe vodík váže a vlivem toho se deformuje. Takto způsobená deformace natahuje FBG v axiálním směru, což se projeví měřeným posunem Braggovy rezonanční vlnové délky. UKP laserové mikroobrábění bylo použito k vytvoření spirálových drážek na povrchu optického vlákna, a tím k zvětšení plochy pro nanesení Pd-Ag povlaku, což vede k umocnění celého efektu (schéma na Obr. 29). [43]



Obr. 29 – Schéma spirálového drážkování optického vlákna pro zvýšení citlivosti FBG senzoru [43]

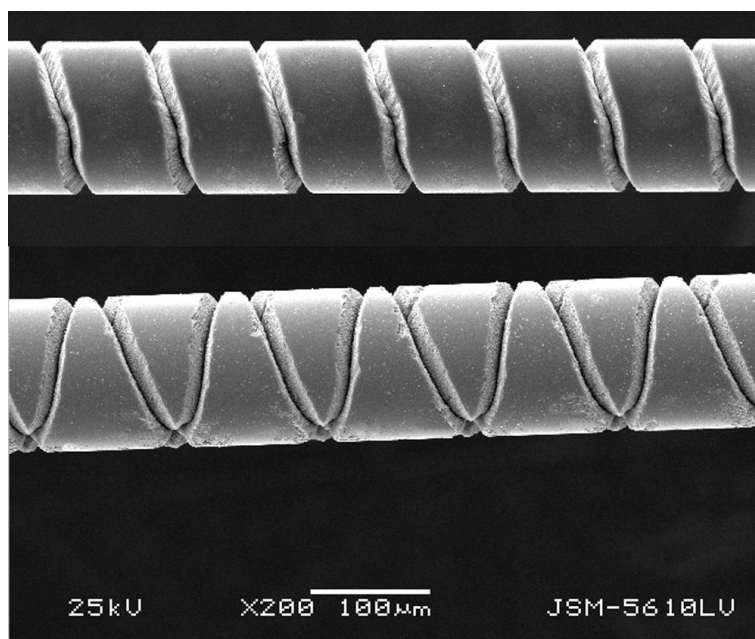
V rámci experimentálního návrhu tohoto senzoru bylo vytvořeno několik variant lišících se provedením (jedna spirála či dvě protichůdné spirály) a velikostí stoupání drážkování od 60 do 120 μ m. Všechny varianty byly vytvořeny na standardním SMF o průměru 125 μ m. Výroba FBG na 10 mm úseku jádra SMF byla realizována ozářením excimerovým KrF laserem ($\lambda = 248$ nm) přes fázovou masku. Mikroobrábění spirálového drážkování bylo následně provedeno

Ti:Safírovým laserem. Nastavení laseru a výsledná geometrie drážkování je shrnuto v Tab. 5. [43]

Tab. 5 – Procesní parametry výroby spirálového drážkování (varianty „S“ – jedna spirála, varianty „SS“ – dvě protichůdné spirály) (h [μm] výsledná hloubka drážky) (upraveno) [43]

Varianta	λ [nm]	τ_p [fs]	f [kHz]	P [mW]	ω [min^{-1}]	v [$\mu\text{m/s}$]	h [μm]
S-1	780	180	1	30	12	12	19
S-2				30		18	19
S-3				30		24	19
SS-1				35		18	21
SS-2				30		18	19
SS-3				25		18	16,5
SS-4				25		12	16,5
SS-5				25		24	16,5

Spirálové geometrie drážky bylo dosaženo současnou rotací a posuvem optického vlákna pomocí specializovaného upínacího přípravku. SEM snímek jedné varianty je na Obr. 30. [43]



Obr. 30 – SEM snímek spirálového drážkování pro zvýšení citlivosti FBG senzoru [43]

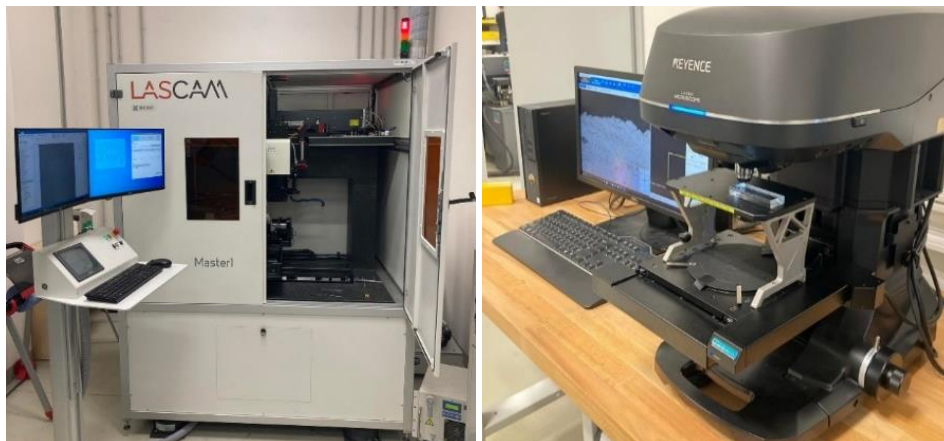
5 Experiment

Experimentální část práce se zabývá optimalizací procesních parametrů laserového mikroobrábění pro dosažení co nevyššího detailu a přesnosti mikroobrábění vybraného typu optického vlákna. Pro zjištění vhodného nastavení procesu byla navržena série experimentů. Prvním experimentem je měření ablačního prahu testovaného materiálu. Následuje optimalizace výkonových parametrů, faktorů překrytí pulsů a šrafování s ohledem na kvalitu obrobeného povrchu. Dále byl navržen test hloubky ablace a určení dosažitelného sklonu stěn při objemovém úběru materiálu. Optimalizace parametrů je tak realizována postupně od stacionárního bodového obrábění (test ablačního prahu), pokračuje jednodimenzionálním liniovým obráběním čar a kontur (optimalizace výkonu), následuje povrchové obrábění v ploše (optimalizace strategie rozmítání svazku) a objemové obrábění (test hloubky ablace a limitního sklonu stěn). V závěru experimentální části jsou optimalizované parametry použity pro mikroobrábění optického vlákna.

5.1 Použitá zařízení

Pro experimenty byla použita mikroobráběcí laserová stanice Master 1 (Obr. 31 vlevo). Jedná se o systém pro DLW mikroobrábění vybavený femtosekundovým pulsním laserovým zdrojem Carbide od výrobce Light Conversion. Zdroj může generovat tři harmonické vlnové délky, a to: IH – 1030 nm, IIH – 515 nm a IIIH – 343 nm. Pohyb svazku po obrobku je realizován pomocí dvojice galvoskenérů a pro pozicování obrobku lze použít polohovacího stolku s pěti řízenými osami. V systému lze využít dvou variant fokusačních optik: F-theta optiky anebo 4F optiky, jež je specializovaná na dosažení malého laserového spotu pro mikroobrábění.

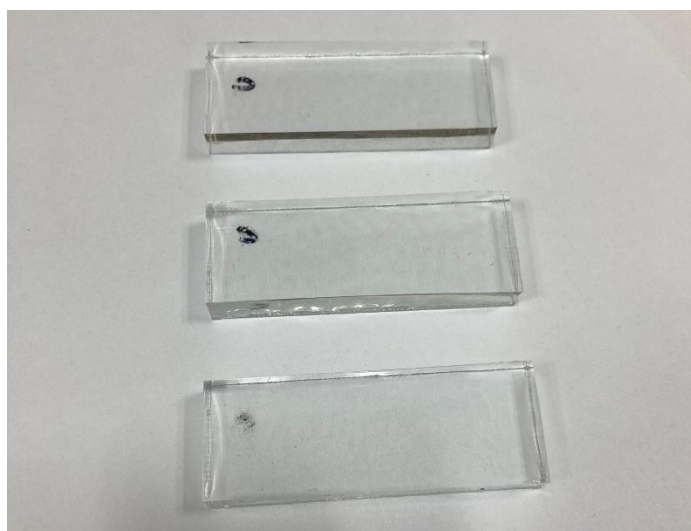
Pro veškerá měření v rámci experimentů byl použit konfokální mikroskop Keyence VHX-H3M3 (Obr. 31 vpravo) vybavený objektivy pro 5 až 150násobné zvětšení. Dále je mikroskop vybaven stolkem s poháněnými osami a vzorky tak lze polohovat v prostředí programu mikroskopu (velké posuny v ose z je třeba provádět ručně).



Obr. 31 - Fotografie zařízení použitých v rámci experimentů, laserová mikroobráběcí stanice (vlevo), konfokální mikroskop (vpravo)

5.2 Materiál použitý pro experiment

Pro experiment byl zajištěn optický materiál křemenné sklo – amorfní SiO_2 vysoké čistoty. Pro optimalizaci parametrů byl materiál připraven ve formě kvádrů 69x26x10 mm (Obr. 32) a pro navazující experiment ve formě jednovidového optického vlákna typu G652D. Optické vlákno je tvořeno jádrem o průměru 9 μm a obalem o průměru 125 μm , na kterém je nanesena ještě polymerní ochrana, takže celkový průměr vlákna je 250 μm .



Obr. 32 - Snímek experimentálního materiálu ve formě kvádrů

5.3 Testování ablačního prahu

[44] [45] [46] [47] [18]

Ablační práh je prahová hodnota fluence $F [J \cdot cm^{-2}]$, hustoty energie v ploše laserového spotu v rámci pulsu, při níž začne docházet k ablaci materiálu. Definičním vztahem její průměrné hodnoty je:

$$F = \frac{E_p}{\pi \cdot w^2} = \frac{P_{avg}}{\pi \cdot w^2 \cdot f} \quad (5-1)$$

kde $E_p [J]$ je energie laserového pulsu, $P_{avg} [W]$ je průměrný výkon laserového zdroje, $w [cm]$ je efektivní poloměr svazku v ohnisku a $f [Hz]$ je opakovací frekvence pulsů.

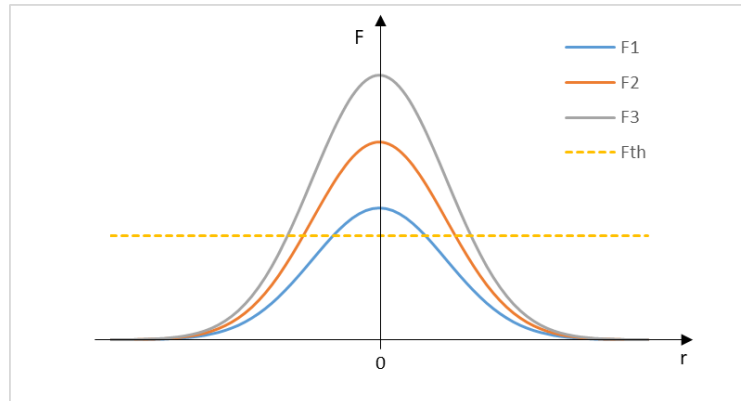
Teoreticky se jedná se o materiálovou konstantu, nicméně její hodnota je ovlivněna konstelací celého systému laserového mikroobrábění. Roli hraje zejména použitá vlnová délka laserového záření $\lambda [nm]$, délka pulsu $\tau_p [fs]$, kvalita přenosu laserového svazku optickou cestou a další vlivy. Právě proto je zjištění hraniční hodnoty výkonových parametrů pro ablaci materiálu důležité. Např. v případě potřeby replikace výkonových parametrů navazujících experimentů na jiném laserovém zařízení je vhodnější stanovit ablační práh znovu a využít poměru F/F_{th} , spíše než absolutní hodnoty E_p .

Metodika pro testování ablačního prahu spočívá ve sledování závislosti mezi průměrem pulsem ablovaného bodu D a nastavenou energií laserového pulsu E_p . Průměr ablovaného bodu se s rostoucí energií pulsu zvyšuje kvůli rozložení energie v ploše pulsu. Použité laserové centrum využívá Gaussovského normálního rozložení, kde se hodnota fluence mění s radiální vzdáleností od optické osy svazku r dle rovnice:

$$F(r) = \frac{2 \cdot E_p}{\pi \cdot w^2} \cdot e^{-\frac{2 \cdot r^2}{w^2}} \quad (5-2)$$

Obr. 33 ukazuje izolovaný teoretický vliv narůstající energie pulsu E_p na průměr ablovaného bodu dle rovnice (5-2). Pokud je v obrázku naznačená hranice F_{th} prahovou hodnotou fluence pro ablaci materiálu, je zřejmé, že se nárůst E_p , resultující v jednotlivé teoretické průběhy fluence $F1$ až $F3$, projeví změnou

průměru ablovaného bodu. Velikost průměru ablovaného bodu D je teoreticky vymezena průsečíky hranice F_{th} reprezentující prahovou hodnotu fluence pro ablaci materiálu s průběhy $F1$ až $F3$.



Obr. 33 - Schéma vlivu narůstající E_p na průměr ablovaného bodu

Hledáním těchto průsečíků, dosazením do rovnice (5-2) hodnotu F_{th} a vhodnou substitucí $r = D/2$, lze stanovit závislost mezi průměrem ablovaného bodu D a energií pulsu E_p .

$$F_{th} = \frac{2 * E_p}{\pi * w} * e^{\frac{-2 * D^2}{4 * w^2}} \quad (5-3)$$

$$\ln\left(\frac{\pi * w * F_{th}}{2 * E_p}\right) = \frac{-2 * D^2}{4 * w^2} \quad (5-4)$$

$$D^2 = 2 * w^2 * \ln\left(\frac{2 * E_p}{\pi * w * F_{th}}\right) \quad (5-5)$$

Z praktických důvodů vyhodnocení je vhodné rovnici upravit do přímkového tvaru (5-6). Takto lze lineární regresí naměřených hodnot E_p a D vypočítat konstanty rovnice přímky (5-7) a stanovit prahovou hodnotu fluence F_{th} .

$$\ln(2 * E_p) = \frac{1}{2 * w^2} * D^2 + \ln(F_{th}) + \ln(\pi * w^2) \quad (5-6)$$

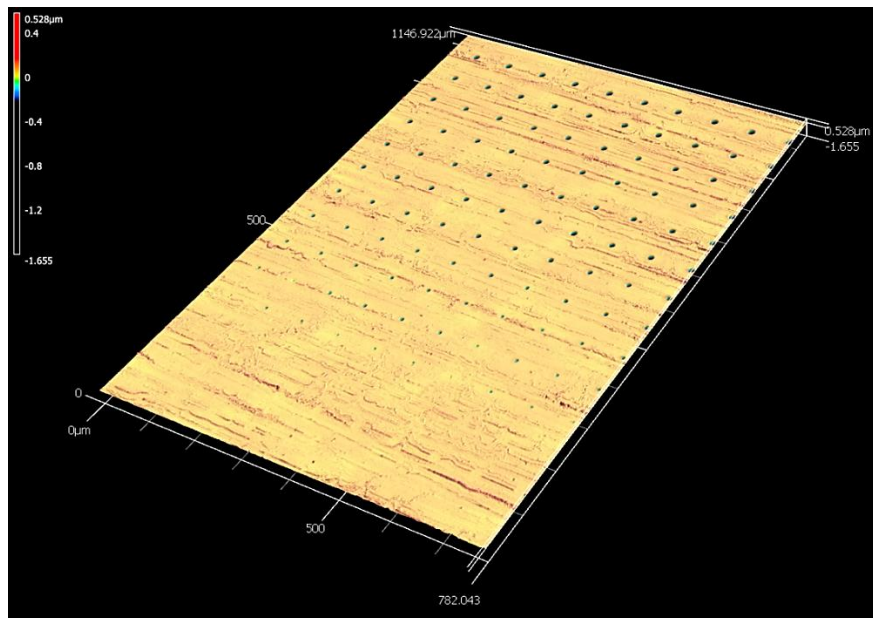
$$y = kx + q \quad (5-7)$$

$$y = \ln(2 * E_p), \quad k = \frac{1}{2 * w^2}, \quad x = D^2, \quad q = \ln(F_{th}) + \ln(\pi * w^2)$$

5.3.1 Provedení testu ablačního prahu

Použitý laserový systém disponuje možnostmi využití I, II a III harmonické vlnové délky zdroje, tedy 1030 nm, 515 nm a 343 nm. Při použití II H, lze také využít fokusační optiky 4F, jež dle výrobce dosahuje velikosti laserového spotu $\sim 5 \mu\text{m}$. Test ablačního prahu byl proveden pro tyto čtyři možné varianty s cílem zjištění nejvhodnějšího nastavení harmonické vlnové délky v kombinaci s fokusační optikou následovně.

Pro zjištění ablačního prahu křemenného skla byla navržena matice bodů (viz Obr. 34), ve které po řádcích narůstá výkon. Jednotlivé body jsou ablovány 10 laserovými pulsy délky $\tau_p = 270 \text{ fs}$, což je nejmenší nastavitelná hodnota na použitém laserovém zdroji. Nastavení deseti pulsů přibližně simuluje následující obráběcí proces při nastavení obvyklé hodnoty překryvu pulsů $S_p = 90 \%$.



Obr. 34 - Matice bodů pro vyhodnocení ablačního prahu (II H)

Z každé řady bodů bylo změřeno vždy 6 bodů, které nejlépe sledovaly kruhovou geometrii, jež může být zejména v oblasti výkonů v těsné blízkosti ablačního prahu narušena např. prachovými a jinými částicemi na povrchu vzorku. Následující postup vyhodnocení je demonstrován na datech pro II H (515 nm) při použití 4F optiky. Pro ablaci bodů matice byly použity parametry laseru shrnuté v Tab. 6.

Tab. 6 - Nastavené laserové parametry pro test ablačního prahu (II H - 4F)

Řada	τ_p [fs]	λ [nm]	f [kHz]	P_{avg} [mW]	E_p [nJ]
1				74	369
2				79	395
3				84	418
4				91	453
5				94	470
6				100	501
7				105	522
8	270	515	200	110	550
9				116	579
10				120	601
11				126	630
12				131	655
13				137	684
14				140	697

Průměry bodů odpovídající nastaveným výkonům uvádí Tab. 7. Měřené průměry ablovaných bodů D_{avg} [μm] dosahovaly hodnot mezi 3 až 7 μm a jejich směrodatná odchylka δ [μm] se pohybovala v okolí hodnoty 0,2 μm .

Tab. 7 - Měřené průměry ablovaných bodů

Řada	D_1 [μm]	D_2 [μm]	D_3 [μm]	D_4 [μm]	D_5 [μm]	D_6 [μm]	D_{avg} [μm]	δ [μm]
1	3,38	3,03	3,03	3,45	2,89	3,12	3,15	0,20
2	3,94	3,86	3,88	3,47	4,10	3,82	3,85	0,19
3	4,23	4,74	4,77	4,35	4,53	3,98	4,43	0,28
4	4,17	4,63	4,27	4,43	4,85	5,31	4,61	0,38
5	4,98	5,23	5,28	5,09	4,95	5,04	5,09	0,12
6	4,76	5,19	5,20	5,33	5,27	5,21	5,16	0,19
7	5,35	5,41	5,05	5,41	5,07	5,02	5,22	0,17
8	5,02	4,91	5,05	5,47	5,65	5,75	5,31	0,33
9	6,23	6,37	5,39	5,38	5,71	5,61	5,78	0,39
10	5,84	5,85	5,92	5,91	5,73	5,64	5,81	0,10
11	5,58	6,13	6,36	6,49	5,85	6,06	6,08	0,30
12	6,16	6,79	6,20	6,58	6,37	6,16	6,38	0,24
13	5,74	6,39	6,29	6,02	5,85	6,01	6,05	0,23
14	6,51	7,04	6,76	6,90	6,64	6,49	6,72	0,20

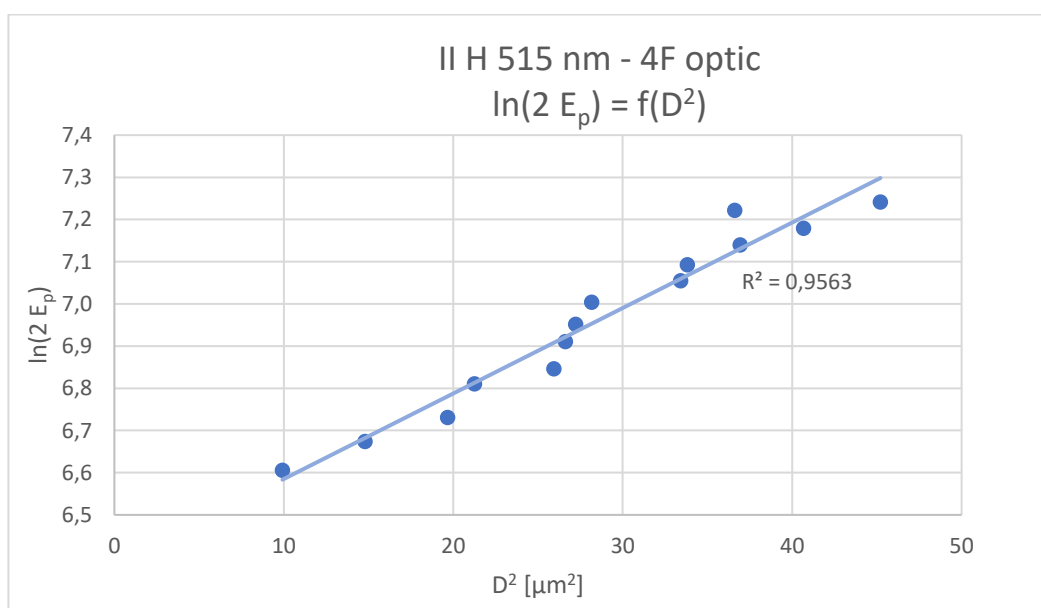
5.3.2 Výsledky testu ablačního prahu

Tab. 8 uvádí vypočtené hodnoty D_{avg}^2 a $\ln(2E_p)$, jakožto souřadnice bodů přímky (5-7).

Tab. 8 - Vypočtené hodnoty pro vyhodnocení ablačního prahu

D_{avg}^2 [μm^2]	$\ln(2E_p)$
9,92	6,61
14,79	6,67
19,66	6,73
21,25	6,81
25,94	6,85
26,60	6,91
27,22	6,95
28,15	7,00
33,40	7,05
33,80	7,09
36,93	7,14
40,66	7,18
36,60	7,22
45,21	7,24

Do grafu na Obr. 35 byly vyneseny vypočítané hodnoty $x = D^2$ a $y = \ln(2 * E_p)$ přímky (5-7) z Tab. 8.



Obr. 35 - Graf závislosti $\ln(2 E_p) = f(D^2)$ pro vyhodnocení ablačního prahu pro IIH 515 nm s 4F optikou

Z lineární regrese těchto dat byly získány konstanty přímky (5-7), ze kterých byly stanoveny hodnoty w a F_{th} .

$$k = \frac{1}{2 * w^2} = 0,0203 \quad q = \ln(F_{th}) + \ln(\pi * w^2) = 6,3826 \quad (5-8)$$

$$w = \sqrt{\frac{1}{2 * 0,0203}} = 4,96 \mu m \quad (5-9)$$

$$F_{th} = e^{6,3826 - \ln(\pi * 4,96^2)} = 7,627 \text{ nJ} \cdot \mu m^{-2} = 0,763 \text{ J} \cdot cm^{-2} \quad (5-10)$$

Ekvivalentní experiment byl proveden celkem pro čtyři dostupné varianty základního laserového nastavení. Výsledky těchto experimentů jsou shrnuty v Tab. 9.

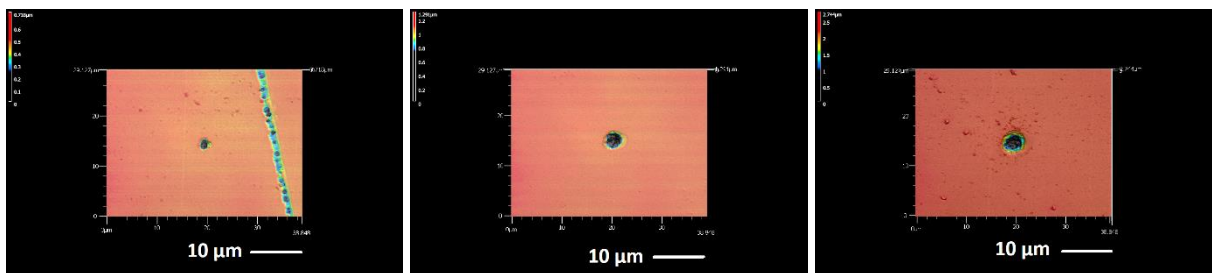
Tab. 9 - Výsledky testu ablačního prahu

	λ [nm]	F_{th} [J.cm ⁻²]	w [μm]
IH	1030	1,470	18,43
IIH	515	0,856	22,69
IIIH	343	0,693	12,98
IIH – 4F	515	0,763	4,97

Výsledky testu ablačního prahu křemenného skla dobře vystihují očekávané trendy. S klesající vlnovou délkou laserového záření klesá hodnota ablačního prahu v rozmezí $F_{th} \in (1,5 ; 0,7)$. Taktéž bylo potvrzeno, že na velikost F_{th} má vliv celý systém laserového mikroobrábění, čemuž lze přisoudit změnu F_{th} při změně fokusační optiky, kdy její hodnota mírně klesla z 0,86 J.cm⁻² na 0,76 J.cm⁻².

Přestože nejnižší hodnotu ablačního prahu, resp. nevyšší míru absorpce, vykazuje III H (343 nm) vlnová délka, byla pro další experimenty vzhledem k cílům práce jako nejvhodnější varianta vybrána varianta II H (515 nm) – 4F, a to kvůli velikosti ablovaných bodů při použití 4F optiky. Efektivní poloměr laserového spotu byl určen na hodnotu $w = 4,97 \mu m$ a reálná velikost ablovaných bodů se pohybovala v rozmezí 3 až 7 μm, což koresponduje se specifikací výrobce, udávající velikost laserového spotu 5 μm.

Na snímcích na Obr. 36 je vidět, že pro velmi malé F v blízkosti ablačního prahu je bod nerovnoměrně hluboký a nemá dobrou kruhovitost. Bod ablovaný příliš vysokou energií je sice dobře kruhový a rovnoměrně hluboký, ale na jeho hraně je vidět zvrásnění materiálu – největší tepelně ovlivněná oblast. Je zřejmé, že změna výkonových parametrů intenzivně ovlivňuje kvalitu obrobeneho povrchu. Se zvyšujícím se výkonem roste rovnoměrnost úběru materiálu, zároveň se ale zvyšuje také tepelné zatížení materiálu. Za účelem zjištění optimálních podmínek z hlediska výkonových parametrů byl realizován následující experiment.

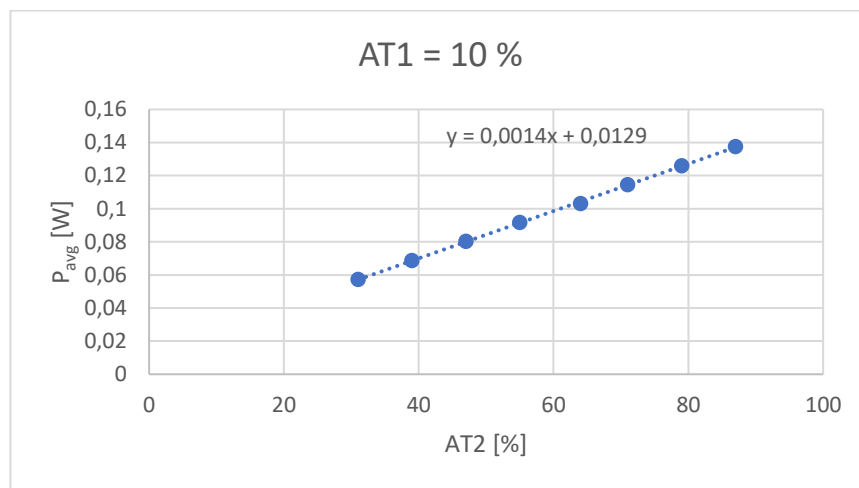


Obr. 36 - Detailní snímky bodů ablovaných různými F [$J.cm^{-2}$] (nejnižší F vlevo, nejvyšší F vpravo)

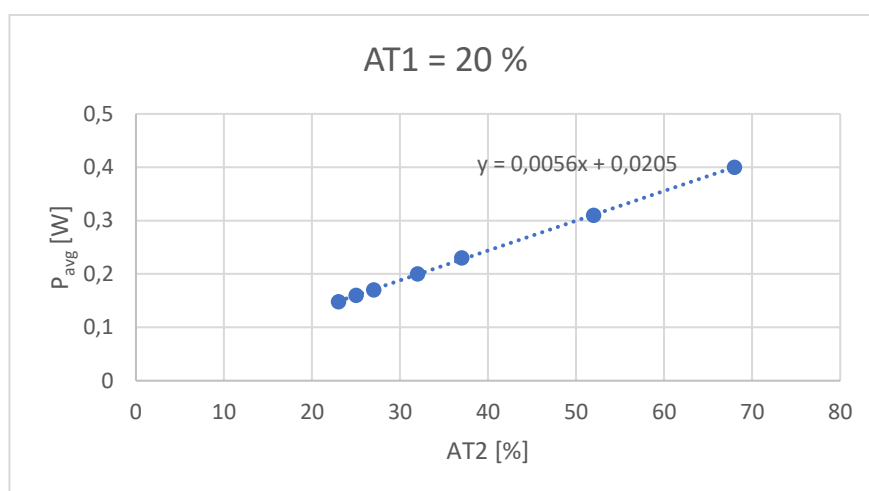
5.4 Optimalizace výkonu laseru pro mikroobrábění

Pro optimalizaci výkonu laseru pro mikroobrábění byl navržen experiment výroby drážek. Variovaným parametrem pro jednotlivé drážky je výkon laseru. Faktor překrytí pulsů S_p je držen na konstantní hodnotě a odpovídá testování ablačního prahu. Frekvence pulsů a rychlost rozmítání paprsku jsou taktéž neměnné, jelikož ovlivňují S_p . Výkon je regulován pomocí dvojice atenuátorů. První z nich, AT1, reguluje výkon laseru bezprostředně za laserovým zdrojem a určuje maximum regulovatelného výkonu pomocí AT2, který slouží pro jemné výkonové nastavení. Pro precizní nastavení výkonu je vhodné využívat středního pásma AT2 (cca. 20 až 80 %), kde se výkon laseru chová nejstabilněji.

Pro snazší nastavování výkonu laseru bylo provedeno měření výkonu na konci optické cesty, z něhož byla určena závislost mezi procentuálním nastavením atenuátorů (jakožto parametrem zadávaným do řídicího softwaru) a reálným výkonem laserového svazku. Pro experiment potřebný rozsah výkonů nebylo dostatečné jedno fixní nastavení primárního atenuátoru a byly proto zjištěny závislosti pro 10 a 20 % AT1. Výsledek měření a zjištěné závislosti jsou uvedeny na Obr. 37 a Obr. 38.



Obr. 37 - Graf závislosti $P_{avg} = f(AT2)$ pro $AT1 = 10 \%$



Obr. 38 - Graf závislosti $P_{avg} = f(AT2)$ pro $AT1 = 20 \%$

Pro samotné stanovení optimálních výkonových parametrů byly vytvořeny drážky pro jejichž výrobu bylo použito výkonů v rozsahu 1 až 7násobku výkonu odpovídajícího ablačnímu prahu, tedy $P \in (1 ; 7)P_{F_{th}}$. Takto omezený interval byl zvolen, jelikož při vyšších výkonech by velmi pravděpodobně docházelo k tepelné akumulaci a poškození materiálu. Parametry, jež jsou platné pro všechny drážky a byly drženy na konstantních hodnotách jsou shrnuty v Tab. 10.

Tab. 10 - Laserové parametry pro experiment optimalizace výkonu pro mikroobrábění

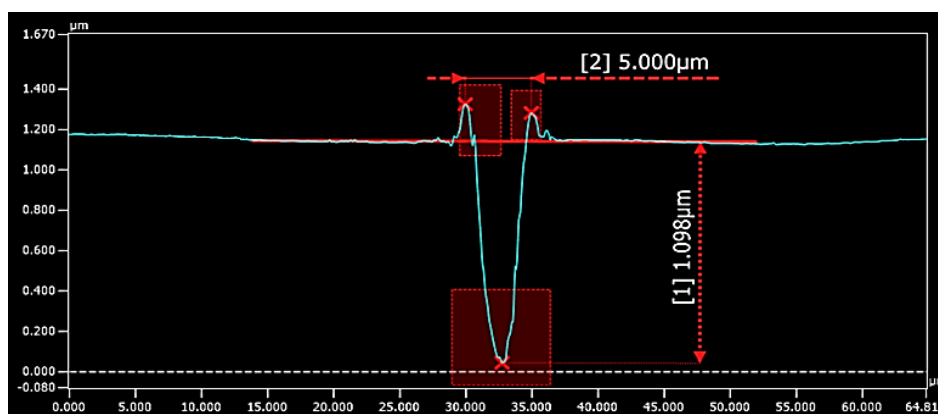
F_{th} [$J \cdot cm^{-2}$]	f [kHz]	$P_{F_{th}}$ [W]	S_p [%]	τ_p [fs]
0,7963	200	0,059	90	270

Nastavení výkonu pro jednotlivé drážky je uvedeno v Tab. 11.

Tab. 11 - Nastavení výkonu pro výrobu drážek

Č. drážky	AT1 [%]	AT2 [%]	P [W]	P/P _{Fth} [1]
1		39	0,069	1,2
2		47	0,080	1,4
3	10	55	0,092	1,5
4		63	0,103	1,7
5		79	0,126	2,1
6		23	0,148	2,5
7		25	0,160	2,7
8		27	0,172	2,9
9	20	32	0,200	3,4
10		37	0,229	3,9
11		52	0,309	5,2
12		68	0,401	6,8

Sledovanými parametry drážek jsou jejich geometrie, resp. šířka S [μm] a hloubka H [μm], ale také rovnoměrnost drážky, která je charakterizovaná poměrem mezi odchylkou δ [μm] příslušného rozměru a průměrnou hodnotou daného rozměru. Šířka drážky byla měřena jako horizontální vzdálenost mezi vrcholy nasnímaného profilu, hloubka jako vertikální vzdálenost mezi rovinou povrchu vzorku a minimem profilu (viz Obr. 39).



Obr. 39 - Strategie měření geometrie drážky (drážka ablována 2,9 P/P_{Fth})

5.4.1 Vyhodnocení experimentu optimalizace výkonu laseru

Tab. 12 a Tab. 13 v číslech shrnují výsledky experimentu optimalizace výkonu laseru pro mikroobrábění. Optimálním výkonem pro mikroobrábění je myšlen takový výkon, při kterém je dosaženo teoreticky nejvyššího detailu mikroobrábění. Tzn. absolutní hodnoty šířky a hloubky drážky jsou minimální

a okolí drážky není významně tepelně ovlivněno (minimum materiálu nad úrovní původní roviny povrchu vzorku zformovaného přetavením). Zároveň ale drážka musí mít rovnoměrný tvar v rámci své délky. Jelikož se jedná o protichůdné požadavky (velikost drážky se s rostoucím výkonem zvětšuje, zlepšuje se ale rovnoměrnost úběru), je nutné nalézt vhodné kompromisní řešení.

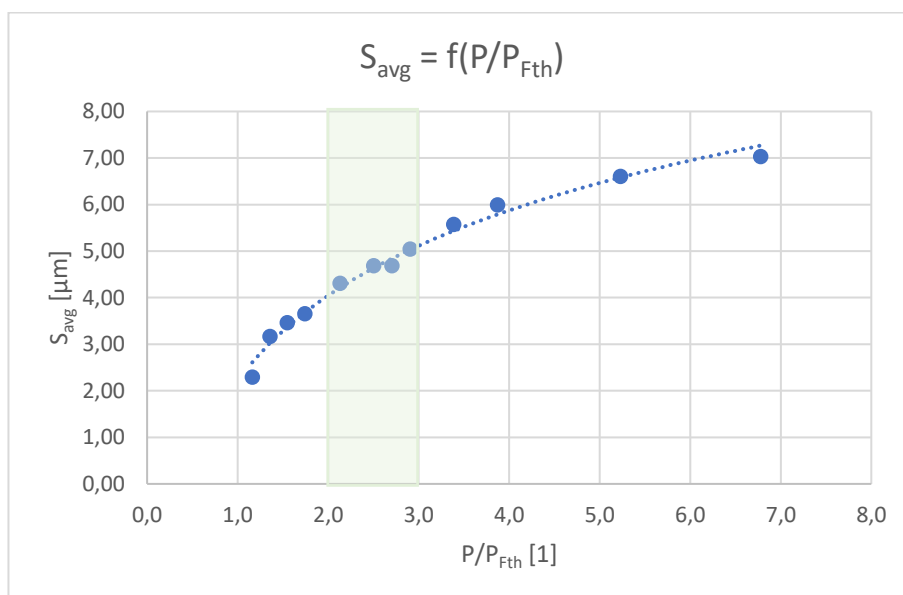
Tab. 12 - Naměřené hodnoty šířky drážek

Č. drážky	P/P _{Fth} [1]	S [μm]			S _{avg} [μm]	δS [μm]	δS/S _{avg} [1]
1	1,2	2,45	1,90	2,53	2,29	0,34	0,15
2	1,4	2,98	2,98	3,54	3,17	0,33	0,10
3	1,5	3,35	3,42	3,61	3,46	0,13	0,04
4	1,7	3,80	3,61	3,54	3,65	0,13	0,04
5	2,1	4,43	4,30	4,18	4,30	0,13	0,03
6	2,5	4,75	4,81	4,49	4,68	0,17	0,04
7	2,7	4,94	4,56	4,56	4,68	0,22	0,05
8	2,9	5,00	5,13	5,00	5,04	0,07	0,01
9	3,4	5,44	5,57	5,70	5,57	0,13	0,02
10	3,9	6,08	5,95	5,95	5,99	0,07	0,01
11	5,2	6,39	6,58	6,84	6,60	0,22	0,03
12	6,8	7,15	7,09	6,84	7,03	0,17	0,02

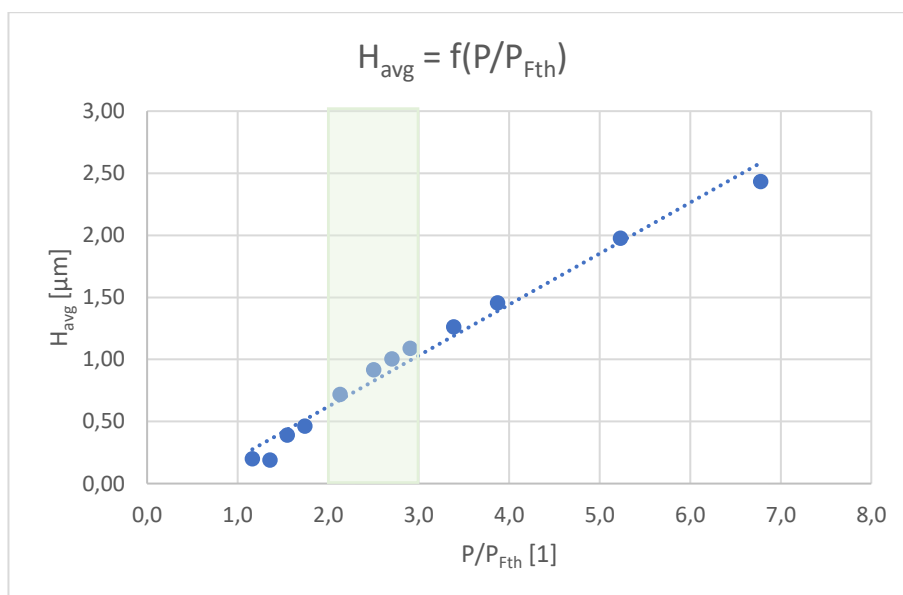
Tab. 13 - Naměřené hodnoty hloubky drážek

Č. drážky	P/P _{Fth} [1]	H [μm]			H _{avg} [μm]	δH [μm]	δH/H _{avg} [1]
1	1,2	0,15	0,26	0,19	0,20	0,05	0,28
2	1,4	0,20	0,19	0,17	0,19	0,01	0,07
3	1,5	0,43	0,37	0,37	0,39	0,03	0,08
4	1,7	0,49	0,46	0,44	0,46	0,02	0,05
5	2,1	0,71	0,74	0,71	0,72	0,02	0,02
6	2,5	0,90	0,90	0,94	0,92	0,02	0,03
7	2,7	1,04	1,02	0,96	1,00	0,04	0,04
8	2,9	1,10	1,11	1,07	1,09	0,02	0,02
9	3,4	1,28	1,25	1,26	1,26	0,01	0,01
10	3,9	1,45	1,45	1,47	1,46	0,01	0,01
11	5,2	1,98	1,99	1,97	1,98	0,01	0,01
12	6,8	2,49	2,38	2,42	2,43	0,06	0,02

Grafy na Obr. 40 a Obr. 41 prezentují naměřené hodnoty šířky a hloubky ablovaných drážek v závislosti na poměru P/P_{Fth} .



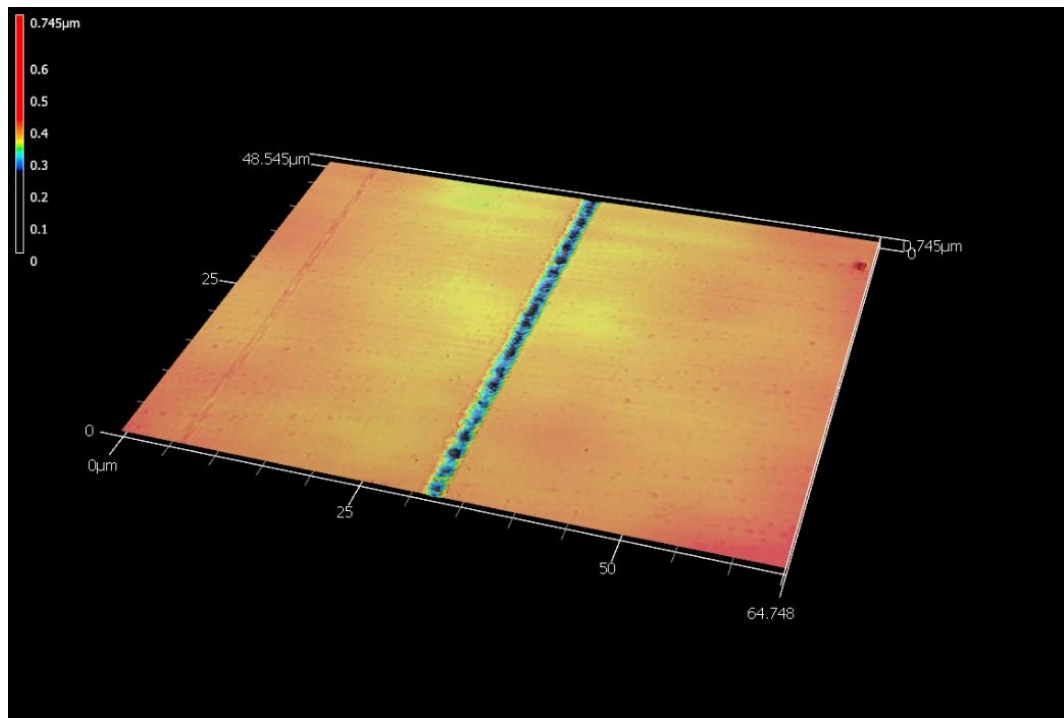
Obr. 40 - Graf naměřených hodnot $S_{avg} = f(P/P_{Fth})$



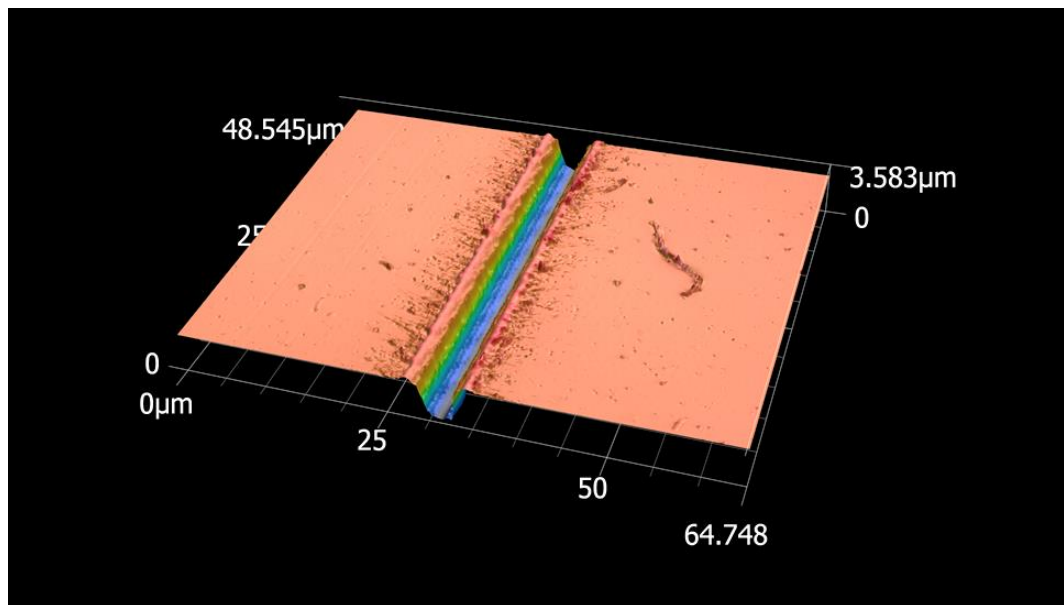
Obr. 41 - Graf naměřených hodnot $H_{avg} = f(P/P_{Fth})$

I s přihlédnutím k odchylkám daných rozměrů (které se dramaticky neměnily, jak je vidět v Tab. 12 a Tab. 13) by se podle těchto výsledků jako optimální řešení jevílo použití co nejnižšího výkonu. Nicméně jak ukazuje snímek z konfokálního mikroskopu na Obr. 42, drážka pro jejíž výrobu byl použit výkon velmi blízký P_{Fth} je nejméně tvarově rovnoměrná. Z Obr. 43 je zřejmé, že použití vysokého výkonu také není optimální. V okolí drážky je viditelná značná tepelně

ovlivněná oblast, přičemž přetavený materiál dosahoval až do výšky 400 nm nad rovinu povrchu vzorku.

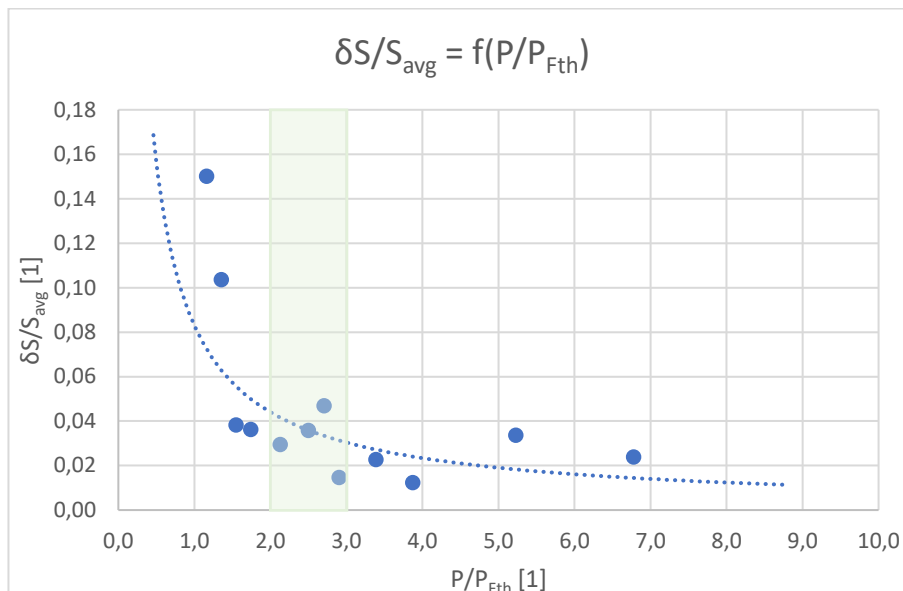


Obr. 42 - Snímek z konfokálního mikroskopu drážky ablované nízkým výkonem laseru ($1,2 P/P_{Fth}$)

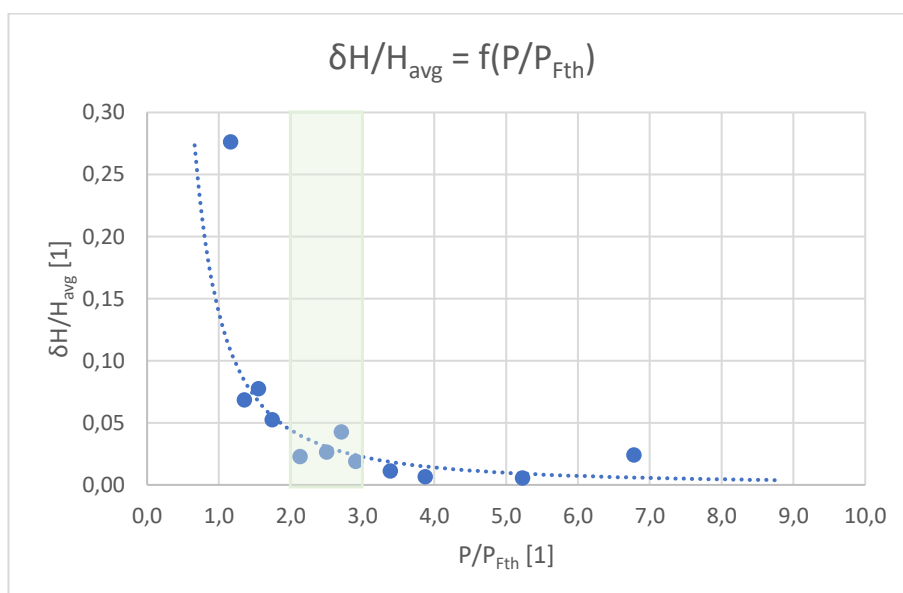


Obr. 43 – Snímek z konfokálního mikroskopu drážky ablované vysokým výkonem laseru ($6,8 P/P_{Fth}$)

Pro stanovení optimálního výkonu proto byla sledována závislost mezi poměrem odchylky šířky a její průměrné hodnoty $\delta S/S_{avg}$, resp. $\delta H/H_{avg}$ a výkonového nastavení P/P_{Fth} . Grafy na Obr. 44 a Obr. 45 sledující tuto závislost dobře ukazují popsany trend zhoršující se rovnoměrnosti drážky v blízkosti ablačního prahu materiálu

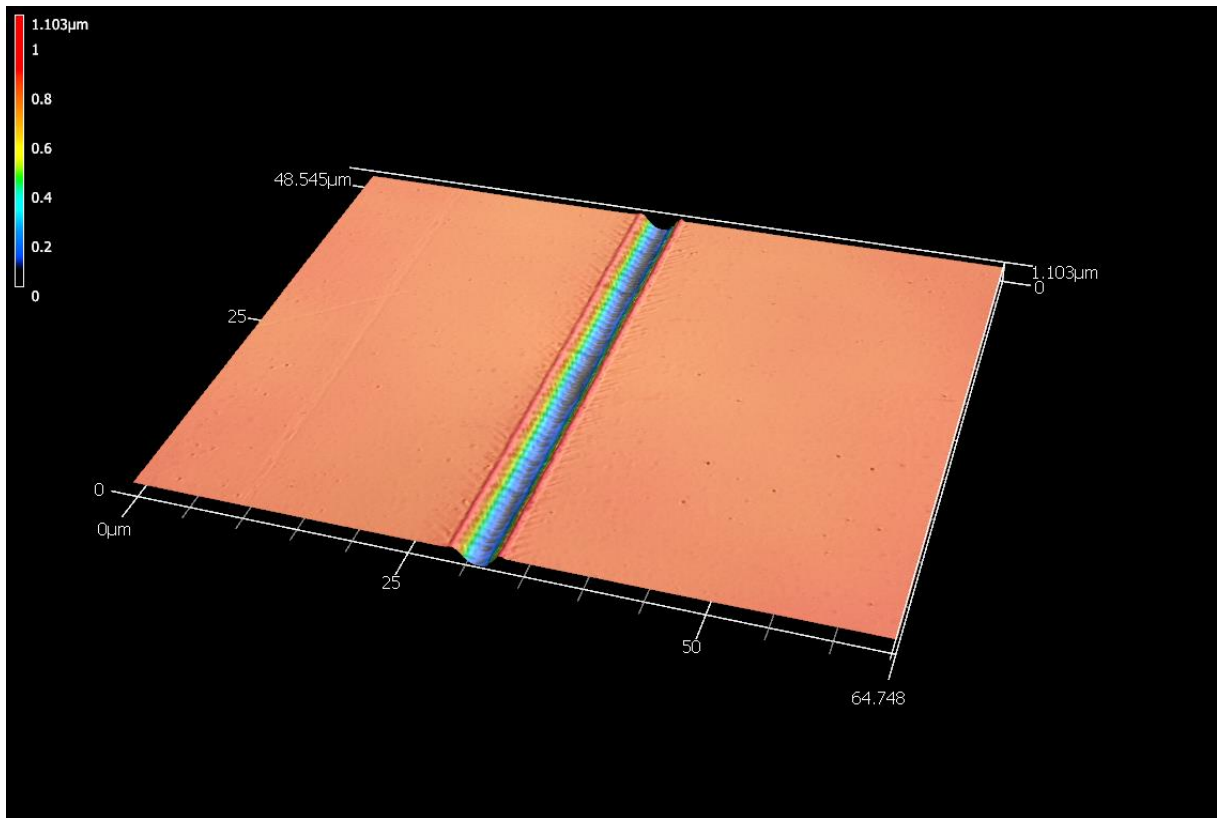


Obr. 44 - Graf pro vyhodnocení optimálních výkonových parametrů $\delta S/S_{avg} = f(P/P_{Fth})$

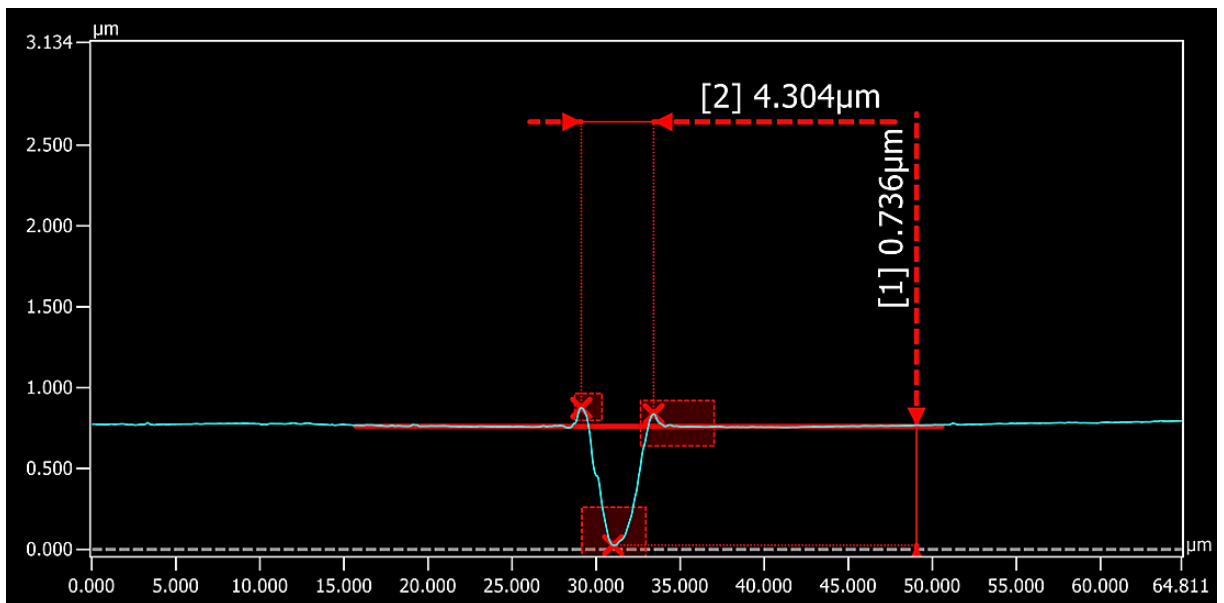


Obr. 45 - Graf pro vyhodnocení optimálních výkonových parametrů $\delta H/H_{avg} = f(P/P_{Fth})$

Po proložení dat mocninnou spojnicí trendu, jenž hodnoty nejlépe vystihuje, byla jako optimální oblast výkonu vybrána oblast 2 až 3 násobku ablačního prahu. Interval výkonů $P \in (2; 3) P_{Fth}$ byl stanoven jako optimální, neboť při těchto výkonech dochází k nejmenšímu úběru a zároveň se nachází před prudkým nárůstem poměru $\delta H/H_{avg}$, resp. $\delta S/S_{avg}$ charakterizující rovnoměrnost. Snímek drážky pro jejíž ablaci byl použit výkon z této oblasti je na Obr. 46. Jak ukazuje Obr. 47, očekávatelná hloubka drážky pro takové výkony je přibližně 0,7 μm a šířka stopy asi 4,5 μm . Přetavený materiál dosahuje do výšky asi 100 nm nad rovinu původního povrchu vzorku.



Obr. 46 - Snímek z konfokálního mikroskopu drážky vyrobené zjištěným optimálním výkonem ($P = 2,1 P_{Fth}$)

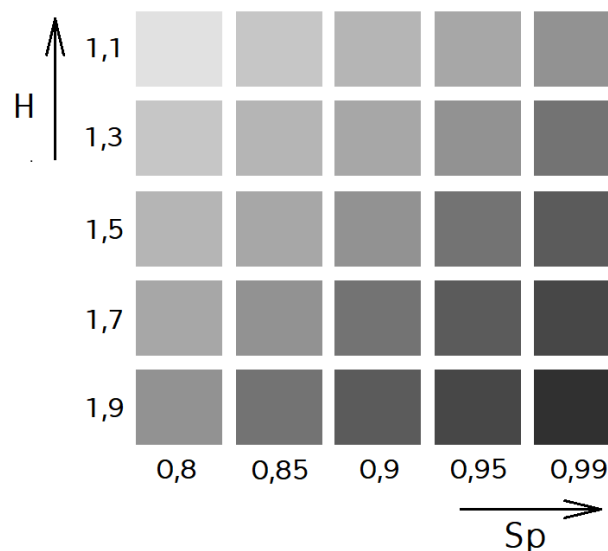


Obr. 47 - Měření drážky vyrobené zjištěným optimálním výkonem ($P = 2,1 P_{Fth}$)

5.5 Optimalizace faktoru překryvu pulsů a šrafování

Po zjištění ablačního prahu, diskusi chování ablace při vícepulsní bodové ablaci a optimalizaci výkonu laseru při jednodimenzionálním – čarovém skenování je navazujícím logickým krokem optimalizace strategie rozmítání laserového paprsku pro dosažení rovnoměrného úběru materiálu v ploše. Klíčovými parametry jsou v tomto ohledu faktory překrytí pulsů S_p a šrafování H . Význam těchto faktorů byl blíže popsán v kapitole 2.4.

Pro zjištění optimálního nastavení překrytí pulsů a šrafování byla navržena experimentální matice, v rámci které bylo vyzkoušeno 25 různých kombinací těchto faktorů viz Obr. 48. Interval faktoru překrytí pulsů (S_p) byl zvolen s ohledem na dobré výsledky předchozího experimentu v okolí hodnoty 90 %. Faktor překrytí šrafování (H) byl testován v celém rozsahu.



Obr. 48 - Schéma experimentální matice pro optimalizaci faktoru překrytí pulsů a šrafování

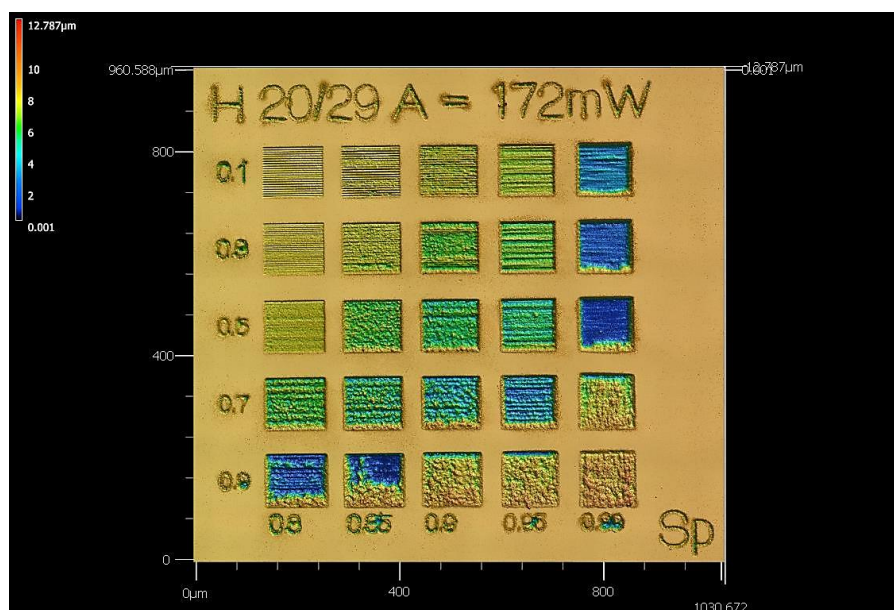
Z intervalu výkonů $P \in (2 ; 3)P_{F_{th}}$, jenž byl předchozím experimentem určen jako optimální, byly vybrány tři výkony, pro které byly matice vytvořeny. Použité výkony a další pro experiment konstantní parametry uvádí Tab. 14.

Tab. 14 - Laserové parametry pro experiment optimalizace faktoru překrytí pulsů a šrafování

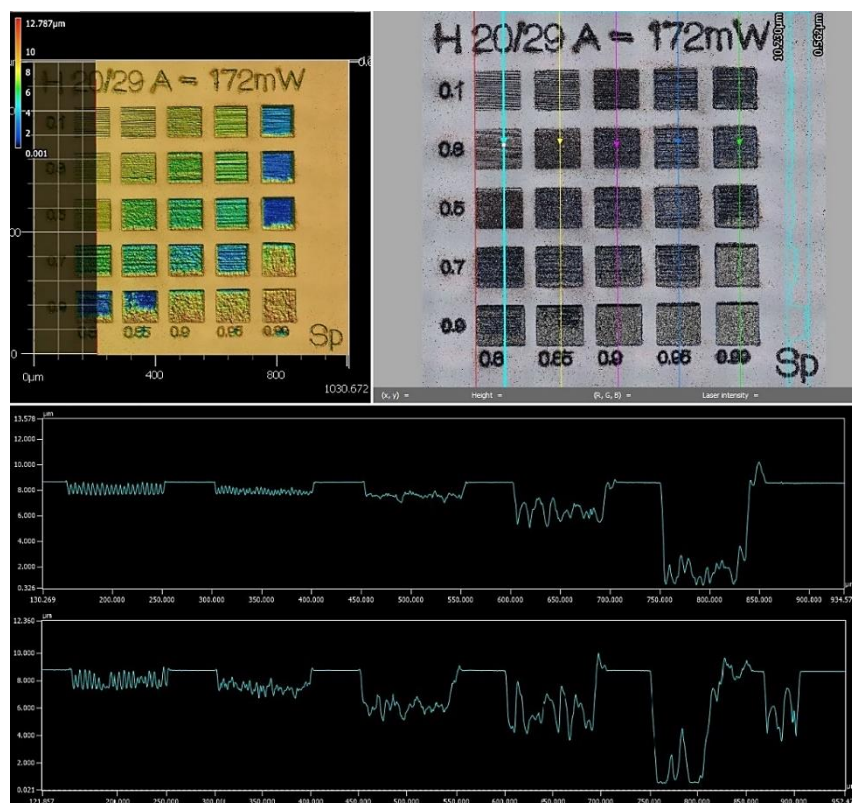
Matice č.	τ_p [fs]	D [μm]	f [kHz]	$P_{F_{th}}$ [mW]	P [mW]	$P/P_{F_{th}}$ [1]
1	270	5	200	59	115	1,9
2					143	2,4
3					172	2,9

5.5.1 Výsledky optimalizace S_p a H

Vyhodnocení experimentu spočívá v kontrole profilu jednotlivých polí matice ve směru kolmém na směr rozmítání laserového paprsku. Snímky z konfokálního mikroskopu ukazující postup měření jsou na Obr. 49 až Obr. 54.



Obr. 49 - Snímek optimalizační matice pro $P = 172 \text{ mW}$ (popis osy H odpovídá navrženému rozsahu 0,1→1,1 až 0,9→1,9)

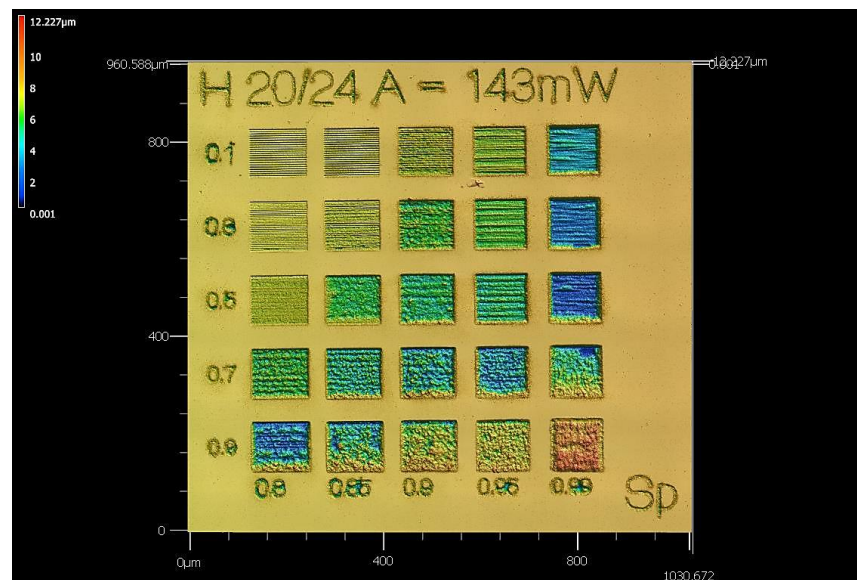


Obr. 50 - Snímek profilu polí matice pro $S_p = 80\%$ (nahore), 85% ($P = 172 \text{ mW}$)

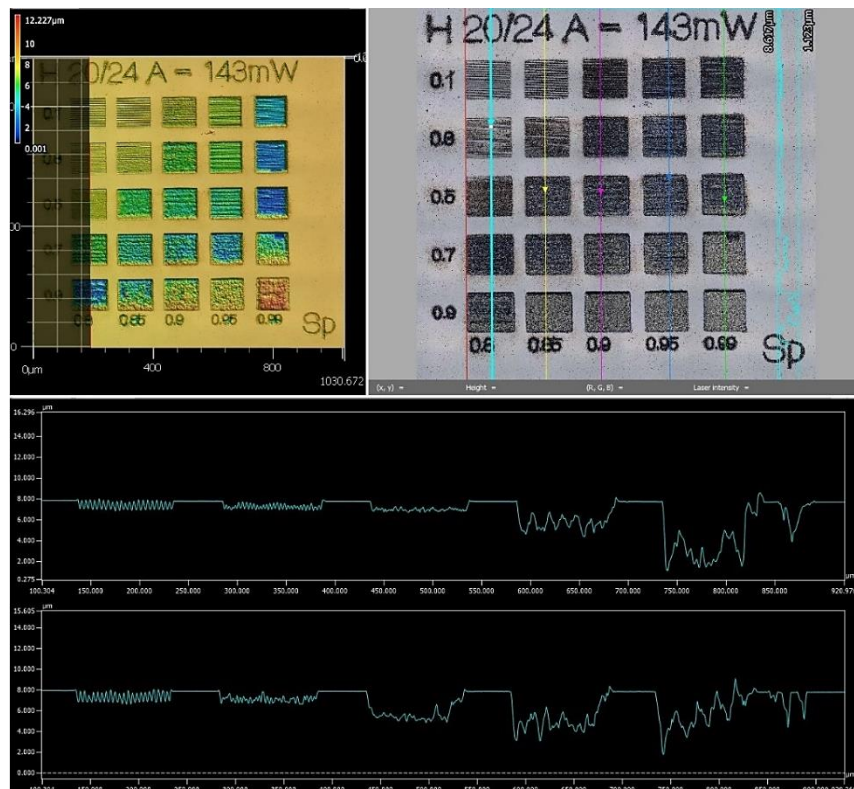
Pouze vizuální kontrolou je ze snímků profilů jednotlivých polí dobře vidět, že pro hodnoty faktoru překryvu šrafování 170 % a vyšší dochází k velmi nerovnoměrnému úběru materiálu, v extrémních případech k totálnímu znehodnocení povrchu. Stejný trend je znatelný pro hodnoty faktoru překrytí pulsů $S_p \geq 90\%$ a snímky těchto profilů zde proto nejsou prezentovány.

Na snímcích na Obr. 49, Obr. 51 a Obr. 53 je dokonce vidět, že při použití nejvyšších hodnot S_p a H (99 % a 190 %) dochází k tak velké tepelné akumulaci v materiálu, že k ablaci vůbec nedochází, a namísto toho se materiál přetavuje a vystupuje nad rovinu původního povrchu vzorku. Naopak při hodnotách faktoru překryvu šrafování $H \leq 30\%$, dochází k nedostatečnému propojení jednotlivých stop po přejezdu laserového paprsku. To má za následek viditelnou nežádoucí řádkovitost profilu.

Tyto trendy platí pro všechna tři výkonová nastavení a optimální se zdají být hodnoty faktorů překryvů $H = 150\%$ a $S_p = 80\%$, nebo 85% pro $P = 115\text{ mW}$. Při nastavení výkonu $P = 172\text{ mW}$ ($3 P/P_{Fth}$) je však rovnoměrnost povrchu znatelně horší než v případě nižších výkonů. Dalšímu měření proto byla podrobena nastavení $H = 150\%$ v kombinaci s $S_p = 80\%$ pro $P = 143\text{ mW}$ a $S_p = 80$ a 85% pro $P = 115\text{ mW}$.



Obr. 51 - Snímek optimalizační matice pro $P = 143\text{ mW}$ (popis osy H odpovídá navrženému rozsahu $0,1 \rightarrow 1,1$ až $0,9 \rightarrow 1,9$)



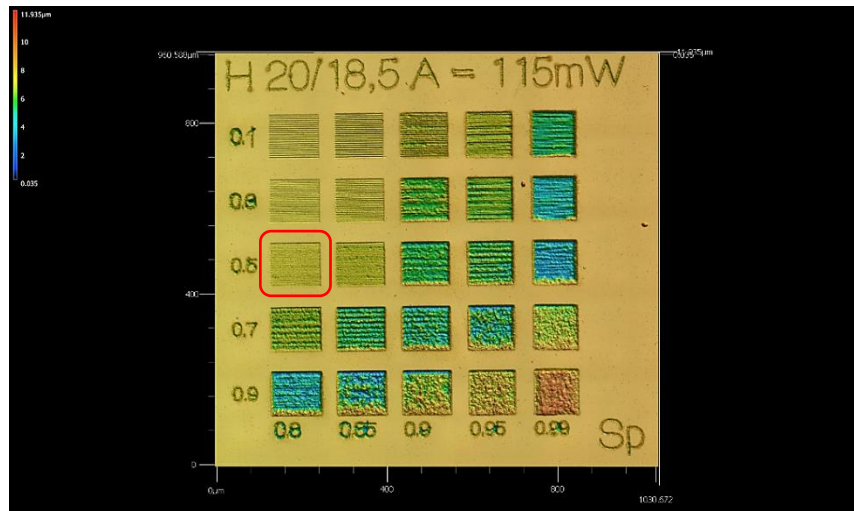
Obr. 52 - Snímek profilu polí matice pro $S_p = 80\%$ (nahore), 85% (dole) ($P = 143\text{ mW}$)

Rozhodujícím parametrem pro vyhodnocení byl zvolen parametr drsnosti R_z [μm] obrobeného povrchu na profilu kolmém ke stopám obrábění, který dobře charakterizuje rovnoměrnost úběru materiálu. Rovnoměrnost úběru je zde rozhodující a důležitější než hloubka ablace jedním přejezdem, jelikož při obrábění více přejezdy má nerovnoměrnost povrchu tendenci se postupně zhoršovat. Hloubka ablace byla změřena jako vstup do navazujícího experimentu.

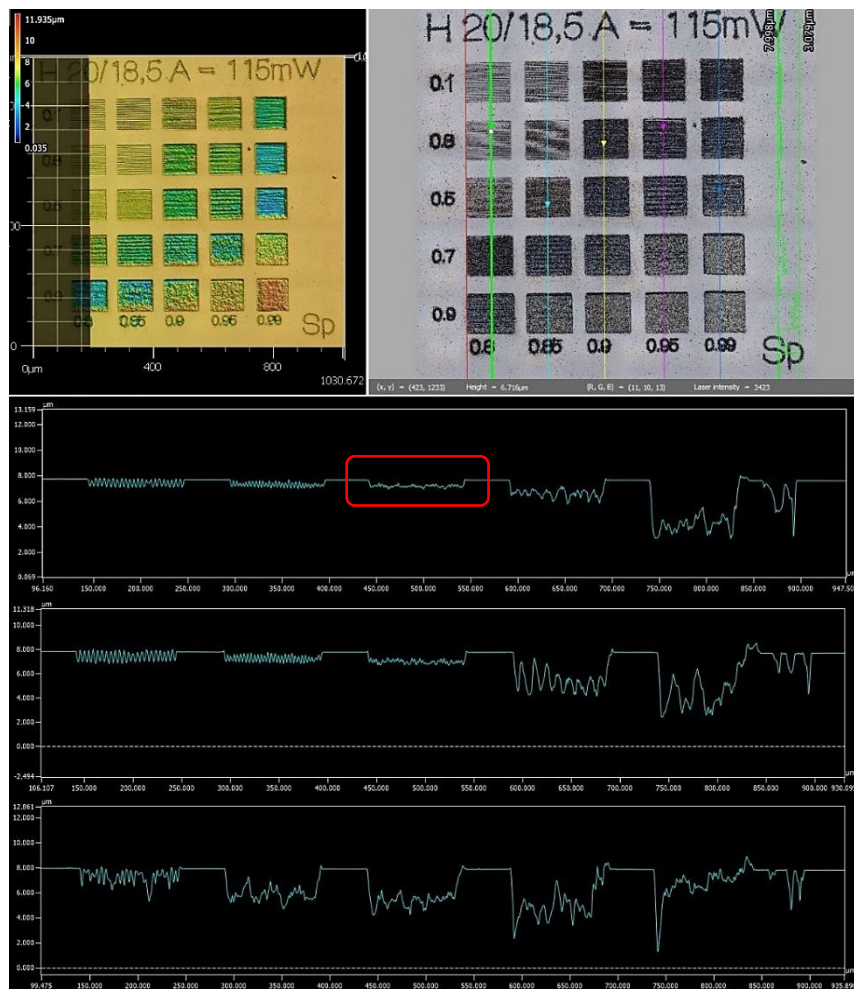
Jak uvádí Tab. 15 nejlepšího výsledku bylo dosaženo při nastavení faktoru překryvu pulsů $S_p = 80\%$, šrafování $H = 150\%$ a výkonu $P = 115\text{ mW}$. Dosažená hloubka ablace při tomto nastavení je $0,5\text{ }\mu\text{m}$ a výsledná drsnost povrchu charakterizovaná parametrem $R_z = 0,5\text{ }\mu\text{m}$. Dané pole a příslušný profil je vyznačen na Obr. 53 a Obr. 54.

Tab. 15 - Finální vyhodnocení experimentu optimalizace faktoru překrytí pulsů a šrafování

P [mW]	S_p [%]	H [%]	Hloubka [μm]	R_a [μm]	R_z [μm]
115	80	150	0,5	0,06	0,5
	85		0,7	0,1	0,7
143	80	150	0,8	0,1	0,6



Obr. 53 - Snímek optimalizační matice pro $P = 115 \text{ mW}$ (popis osy H odpovídá navrženému rozsahu 0,1→1,1 až 0,9→1,9)



Obr. 54 - Snímek profilu polí matice pro S_p 80 % (nahore), 85 %, 90 % (dole) ($P = 115 \text{ mW}$)

5.6 Testování ideálního sklonu stěn při hloubení

Při výrobě děr či zahloubení, pro něž je třeba velkého počtu přejezdů laserem, je poměrně kritickým omezením (zejména v případě 3D/2,5D obrábění) sklon stěny vytvářené díry. Předpokladem je, že hlavní omezení tohoto sklonu určuje numerická apertura fokusační čočky, jejíž hodnota je pro používanou fokusační optiku 4F rovna 0,26. Odpovídající úhel je z definice numerické apertury (5-11) roven 15° . Dalším omezením je rozostření laserového spotu z důvodu fokusace na plochu, která není kolmá k optické ose svazku.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{NA}{n}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{0,26}{1}\right) \cong 15^\circ \quad (5-11)$$

Vzhledem k tomu, že hloubka ablace jednoho přejezdu je nestejná při plošném (jeden přejezd) a objemovém (velký počet přejezdů) obrábění, je pro další postup potřeba otestovat hloubku ablace při objemovém obrábění.

5.6.1 Test hloubky ablace

Hloubka ablace odpovídající jednomu přejezdu při objemovém obrábění pro zvolené parametry (viz Tab. 16) byla stanovena jednoduchým iteračním experimentem měření hloubky ablace h [μm] v závislosti na počtu přejezdů N [1]. Vstupní hodnotou pro test hloubky ablace je hodnota $0,5 \mu\text{m}/\text{přejezd}$.

Tab. 16 - Optimalizované parametry pro test hloubky ablace

P_{avg} [mW]	$P_{\text{avg}}/P_{\text{Fth}}$ [1]	f [kHz]	τ_p [fs]	D [μm]	Sp [%]	H [%]
125	2	200	270	5	80	150

Pro zjištění hloubky ablace na přejezd Δh [μm] byla ablována díra deseti přejezdy s nastaveným krokem v ose Z mezi jednotlivými přejezdy. Velikost kroku pro první iteraci byla nastavena na $0,5 \mu\text{m}$. Výsledná hloubka ablace však byla změřena s hodnotou $18 \mu\text{m}$ odpovídající $\Delta h = 1,8 \mu\text{m}$.

$$\Delta h = \frac{h}{N} = \frac{18}{10} = 1,8 \mu\text{m} \quad (5-12)$$

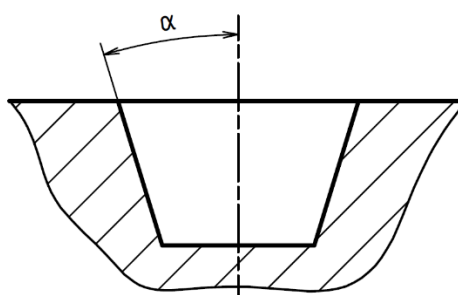
Postupnou iterací shrnutou v Tab. 17 byla určena hloubka ablace na přejezd na hodnotu $2 \mu\text{m}$.

Tab. 17 - Iterace hloubky ablace odpovídající 1 přejezdu

Iterace	krok Z [μm]	N [1]	h [μm]	Δh [μm]
1	0,5	10	18,01	1,8
2	1,9	10	19,21	1,92
3	2	60	120,59	2

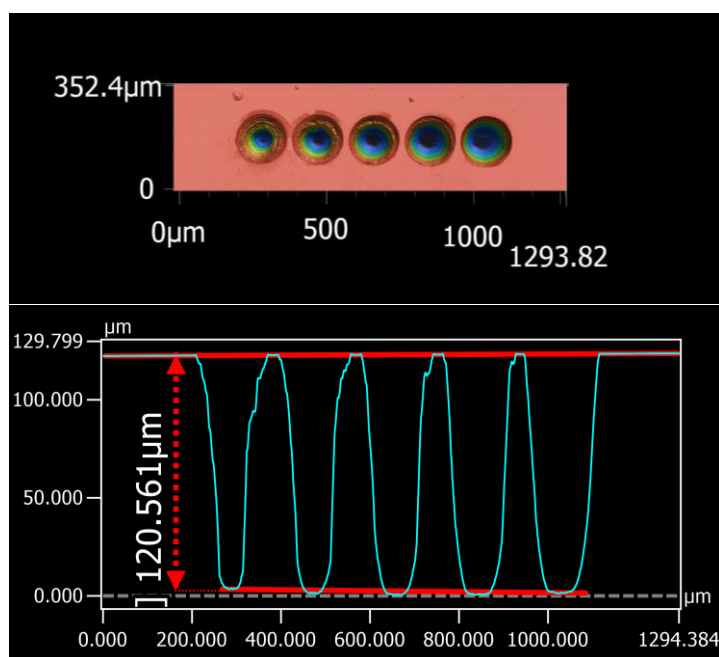
5.6.2 Limitní úhel sklonu stěny

Limitním úhlem sklonu stěny je myšlen takový úhel, při kterém reálný změřený úhel odpovídá úhlu nastavenému (Obr. 55). Pro jeho zjištění byly ablovány kuželové díry s úhlem stěny α z řady od 5° do 45° .



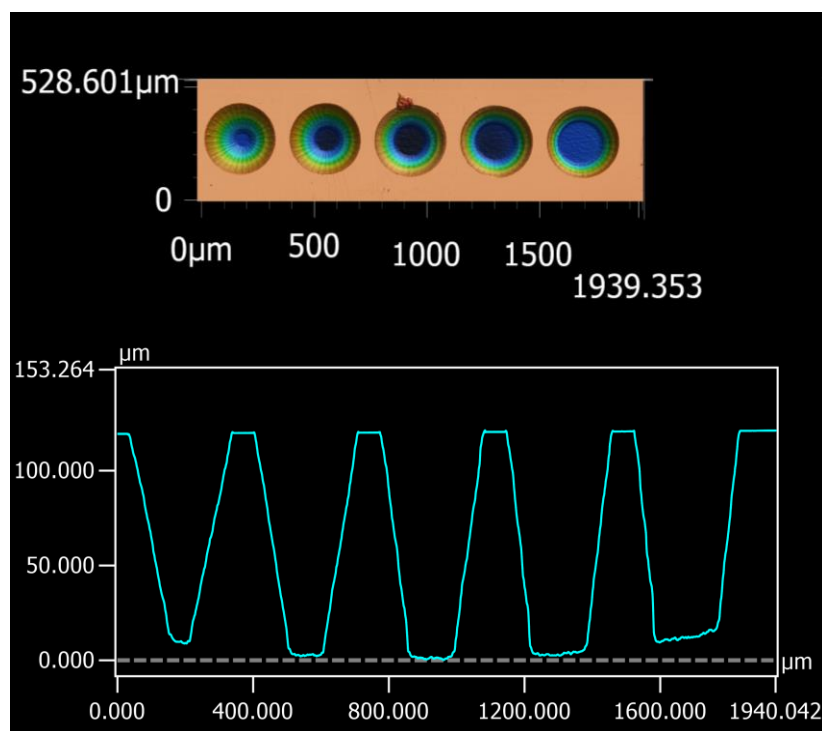
Obr. 55 - Schéma kuželové díry s nastaveným úhlem sklonu stěny

Jak ukazuje Obr. 56, při nastavení úhlu stěny menší než 25° dochází k velké tvarové deformaci. Stěny se nesvažují pod konstantním úhlem, nýbrž mají spíše parabolický tvar znemožňující vyhodnocení úhlu.



Obr. 56 - Snímek z konfokálního mikroskopu kuželových pro úhly 5° , 10° , 15° , 20° , 25°

Pro větší úhly na Obr. 57 již dochází k vytváření děr kuželového tvaru dovolující měření úhlu.



Obr. 57 - Snímek z konfokálního mikroskopu kuželových pro úhly 25, 30, 35, 40, 45°

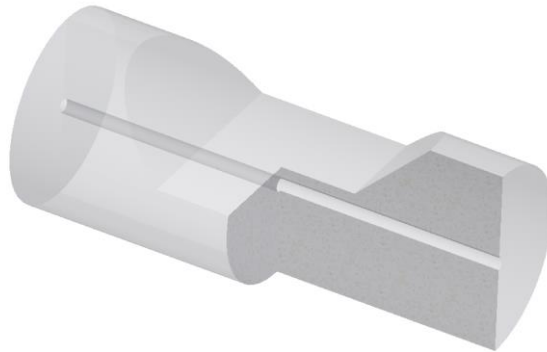
Jak ukazuje Tab. 18, při výběru 30 a vyšších úhlů dochází k dobré shodě mezi nastaveným a reálně měřeným úhlem sklonu stěny. Odchylka od nastavené hodnoty se pohybuje v rámci jednoho stupně.

Tab. 18 - Komparace nastavených a měřených úhlů sklonu stěny

nastavený úhel [°]	změřený úhel [°]
5	-
10	-
15	-
20	-
25	29,77
30	30,26
35	35,21
40	40,75
45	45,49

5.7 Použití optimalizovaných parametrů na optické vlákno

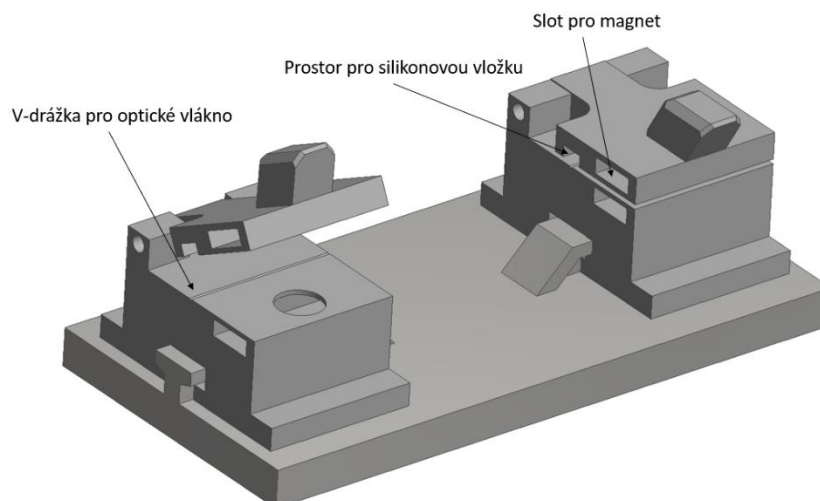
Cílem posledního experimentu je použití optimalizovaných parametrů pro výrobu D drážky na optickém vlákně, jež je schematicky vyobrazena ve tříčtvrtečním řezu na Obr. 58. Drážka na vlákně realizuje rovinu pro potencionální vytvoření senzoru jako je např. interferometrická struktura [40].



Obr. 58 - Schéma 3/4 řezu vláknem s D drážkou

5.7.1 Upnutí vlákna v pracovním prostoru stroje

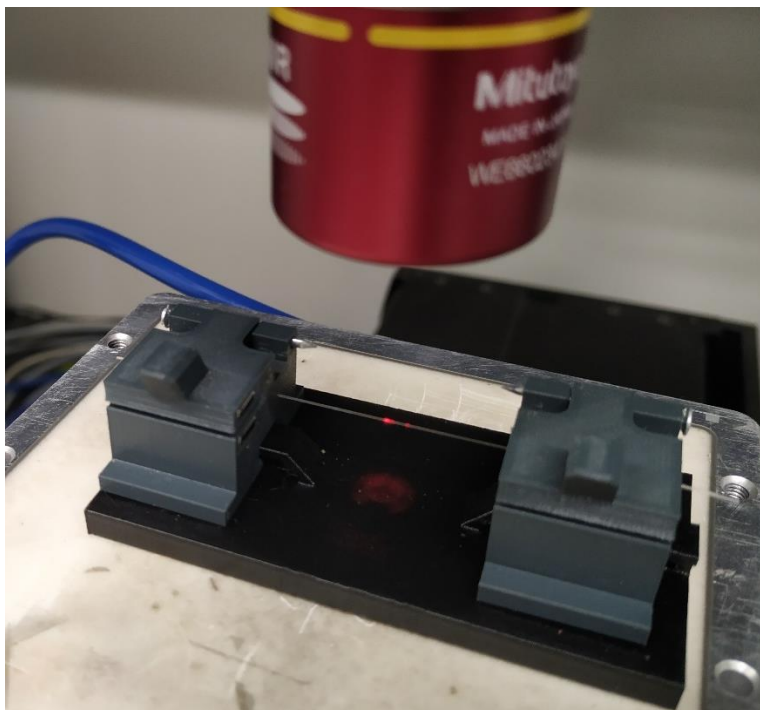
Pro upínání vlákna v prostoru stroje byl navržen upínací přípravek, jehož model je na Obr. 59, inspirovaný komerčně dostupnými variantami. Navržený přípravek se skládá ze tří samostatných částí, a to základny a dvou pantových přidržovačů, jenž jsou spojeny T-drážkou.



Obr. 59 - 3D model přípravku pro upnutí optického vlákna

Optické vlákno je drženo v prizmatické upínce pomocí silikonového těsnění vlepěného do vyznačeného prostoru na Obr. 59. Přidržovací sílu vytvářejí

neodymové kvádrové magnety vložené do připravených slotů. Výroba jednotlivých komponent přípravku proběhla na 3D tiskárně Prusa MK3S, přičemž použitým materiálem byl Prusament PETG. Již vytištěný přípravek s upnutým vláknem v prostoru stroje je vidět na Obr. 60.



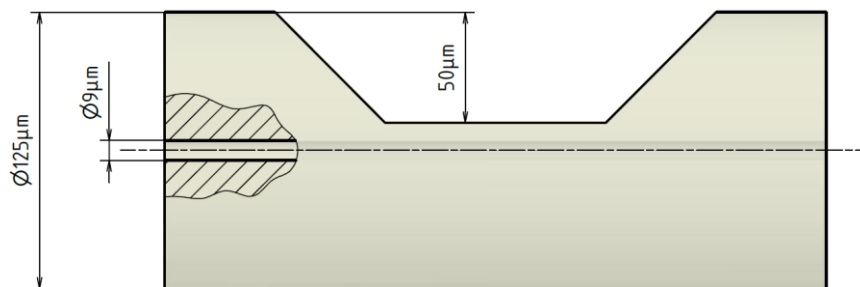
Obr. 60 - Finální přípravek pro upnutí optického vlákna v prostoru stroje

5.7.2 Příprava optického vlákna

Před samotným procesem laserového mikroobrábění je potřeba vlákno na požadovaném segmentu zbavit primární polymerní ochrany. Skladba vrstev vlákna v dodaném stavu je 9 μm jádro, 125 μm obal, 250 μm primární polymerní ochrana. Pro odstranění ochranné vrstvy byly použity specializované kalibrované kleště od firmy Miller model CFS-3 vybavené třemi kalibroványými průměry pro postupné stripování vlákna na průměry 900, 250 a 125 μm .

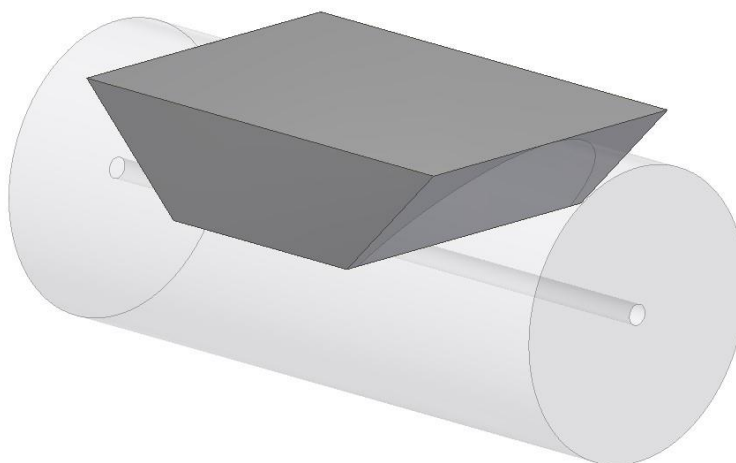
5.7.3 Výroba D drážky na optickém vlákně

Vytvářená drážka formuje rovinu v blízkosti jádra optického vlákna. Obnažené optické vlákno má průměr 125 μm a jádro 9 μm . Pozice roviny drážky je nastavena ve vzdálenosti 8 μm od jádra, tak aby z ní bylo možné dalšími operacemi zasahovat do úrovně jádra, a zároveň tak aby byl ponechán prostor pro chybu v hloubce úběru. Schéma D drážky na optickém vlákně s popsányými rozměry uvádí Obr. 61.



Obr. 61 - Schéma D drážky

Pro laserové obrábění kontur, ploch a objemů jednoduchých tvarů (např. kružnice, kruh, válec) je nejsnazší připravit dráhy laseru přímo v řídicím systému stroje. Pro vytvoření drah pro výrobu D drážky však byl použitý 3D model z externího softwaru, který byl v řídicím systému následně rozdělen do vrstev po kroku v ose Z odpovídající zjištěné hloubce ablace na přejezd. V první iteraci byl použit model na Obr. 62.



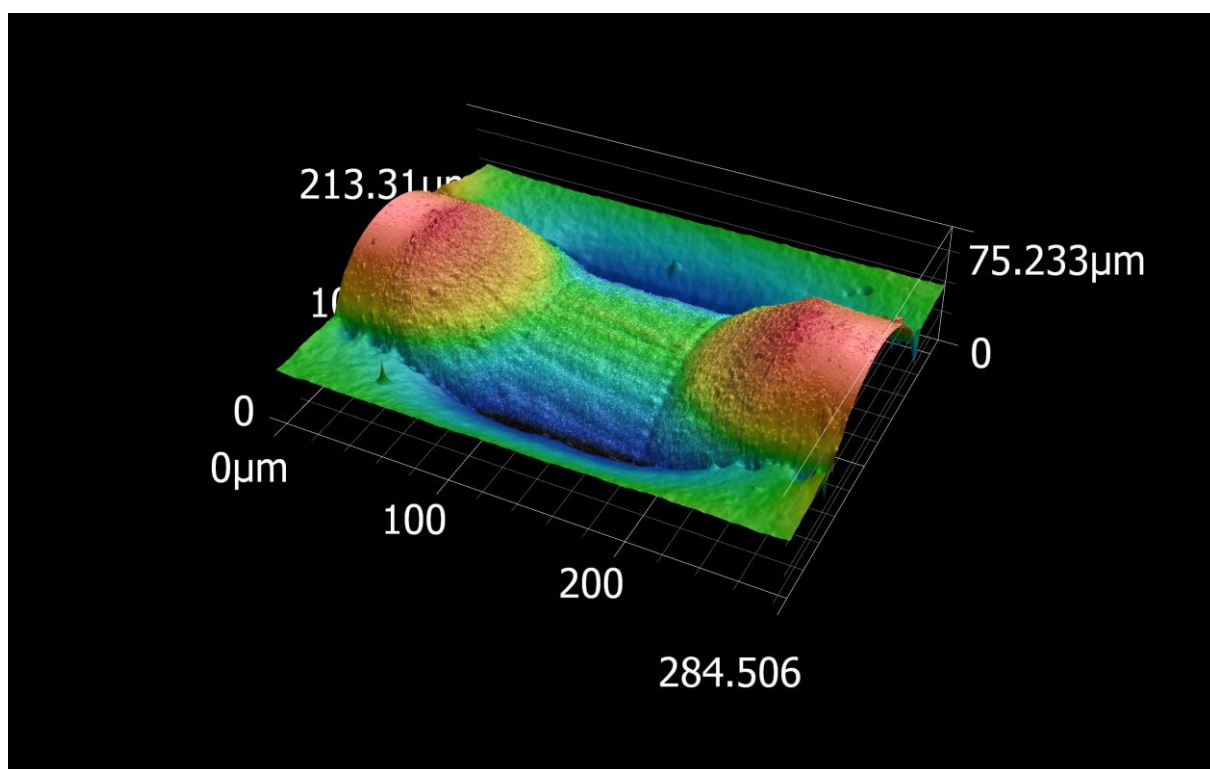
Obr. 62 – Schéma1 iterace modelu pro výrobu D drážky

Model 1. iterace je hranol s lichoběžníkovou podstavou o výšce 135 µm. Výška je zvolena cíleně na tuto hodnotu, aby byl na obou stranách přesah 5 µm od hrany vlákna, a to z důvodu obtížného zaměření osy vlákna na stroji. Model byl rozdělen na 26 vrstev/přejezdů odpovídající změřené hodnotě hloubky ablace v kapitole 5.6.1. Předchozími experimenty optimalizované parametry použité pro laserové mikroobrábění shrnuje Tab. 19. Zaveden byl také parametr úhlu β , který odpovídá natočení šrafování v jednotlivých vrstvách. Ve snaze zajištění postupného vyhlazování stop po přejezdech laserovým svazkem byla zvolena prvočíselná hodnota $\beta = 17^\circ$.

Tab. 19 - Parametry procesu laserového mikroobrábění pro výrobu D drážky

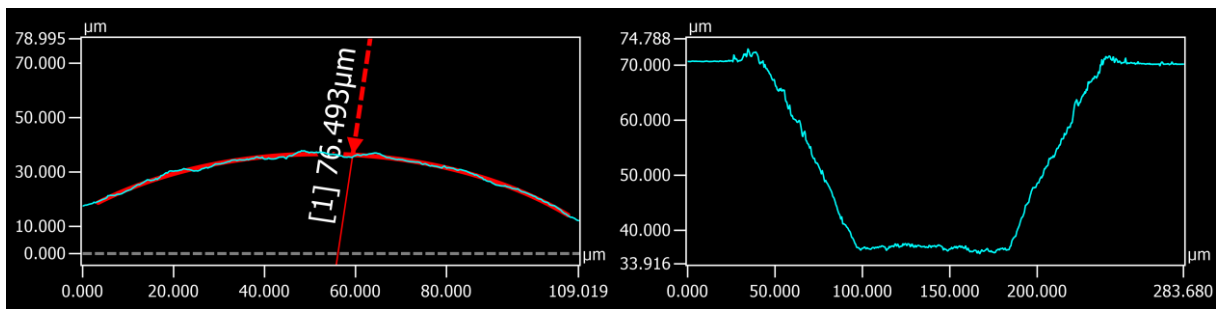
P_{avg} [mW]	P_{avg}/P_{Fth} [mW]	τ_p [fs]	f [kHz]	S_p [%]	H [%]	Δh [μm]	β [°]
124	2,1	270	200	80	150	2	17

Jak je vidět na Obr. 63, vytvořená drážka velmi špatně kopíruje modelem definovaný tvar. Žádaná rovina se na stranách svažuje, resp. se jedná spíše o válcovou plochu s poloměrem křivosti 76,5 μm (viz Obr. 64 vlevo). Toto je přikládáno jednak nevhodně zvolenému hranolovému modelu a dále také přesahům zjednodušující pozicování (zaměření modelu na vlákno). Taktéž nebylo dosaženo požadované hloubky 50 μm . Vzhledem k tomu, že se jedná o chemicky i strukturně stejný materiál je chyba v hloubce ablace přičítána geometrii vlákna.



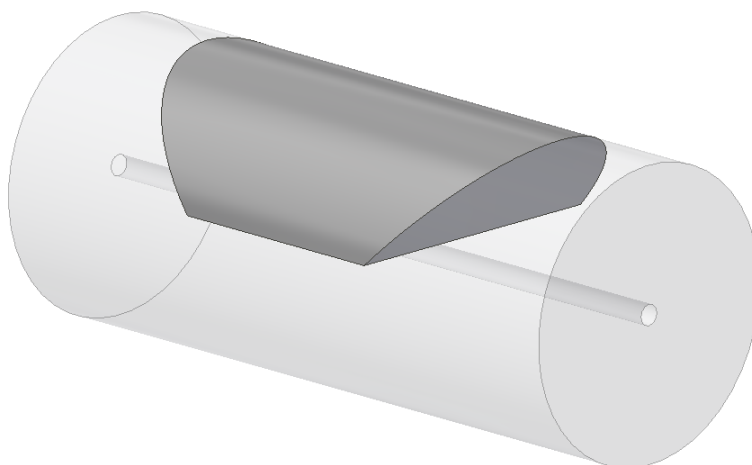
Obr. 63 - 3D sken 1. iterace D drážky

Na Obr. 64 (vpravo) je vidět profil drážky souběžně s osou vlákna, který by neměl být v ohledu hloubky ablace ovlivněn tvarem modelu. Dosažená hloubka ablace v tomto řezu byla asi 30 μm . Parametr Δh (určující počet vrstev/přejezdů, resp. krok v ose Z) byl proto následně upraven metodikou popsanou v 5.6.1 s použitím modelu 1. iterace na hodnotu 1,1 μm .



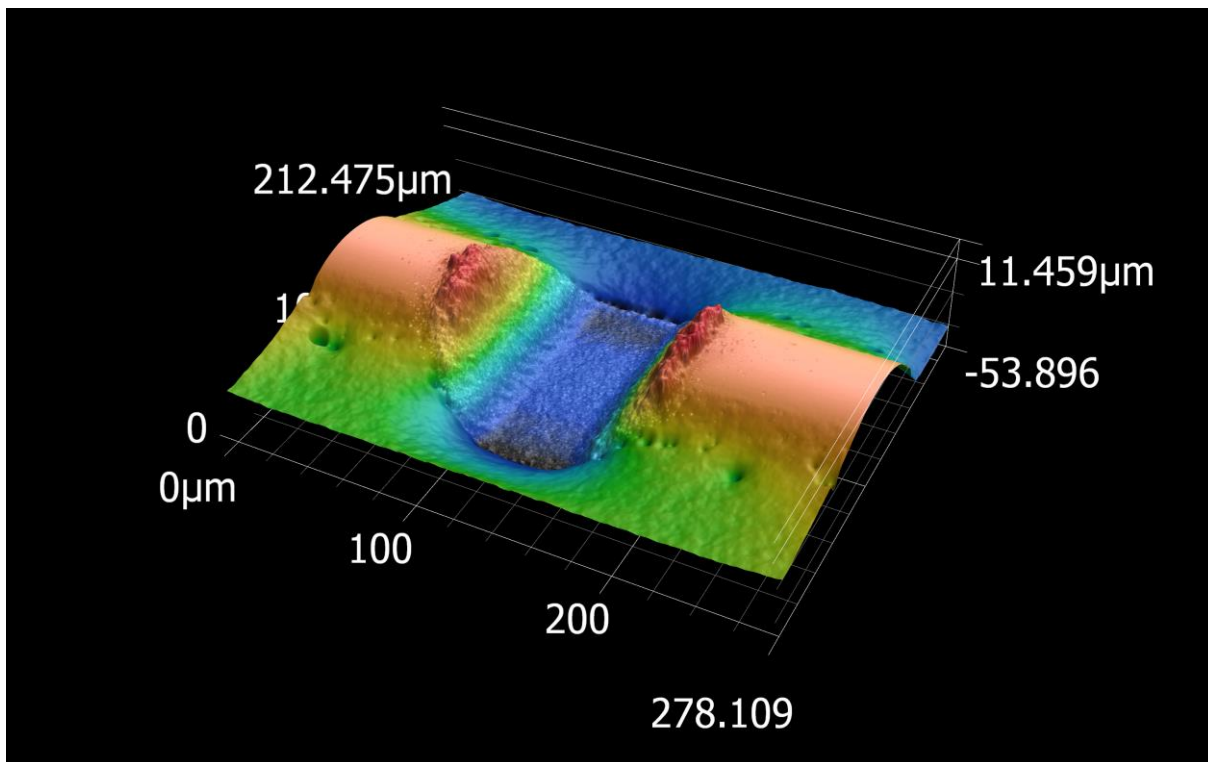
Obr. 64 – Zakřivení profilu dna D drážky kolmo k ose vlákna (vlevo), profil drážky souběžně s osou vlákna (vpravo)

Upravený model, který je zobrazen na Obr. 65, byl zbaven přesahů na stranách vlákna a jeho tvar byl přizpůsoben průměru vlákna 125 μm s očekáváním vytvoření žádané roviny. Zaměření modelu bylo bez přesahů nutné provést v úrovni jádra vlákna, kde jsou okraje lépe viditelné. S výjimkou hloubky ablace na přejezd byly procesní parametry ponechány na hodnotách uvedených v Tab. 19.



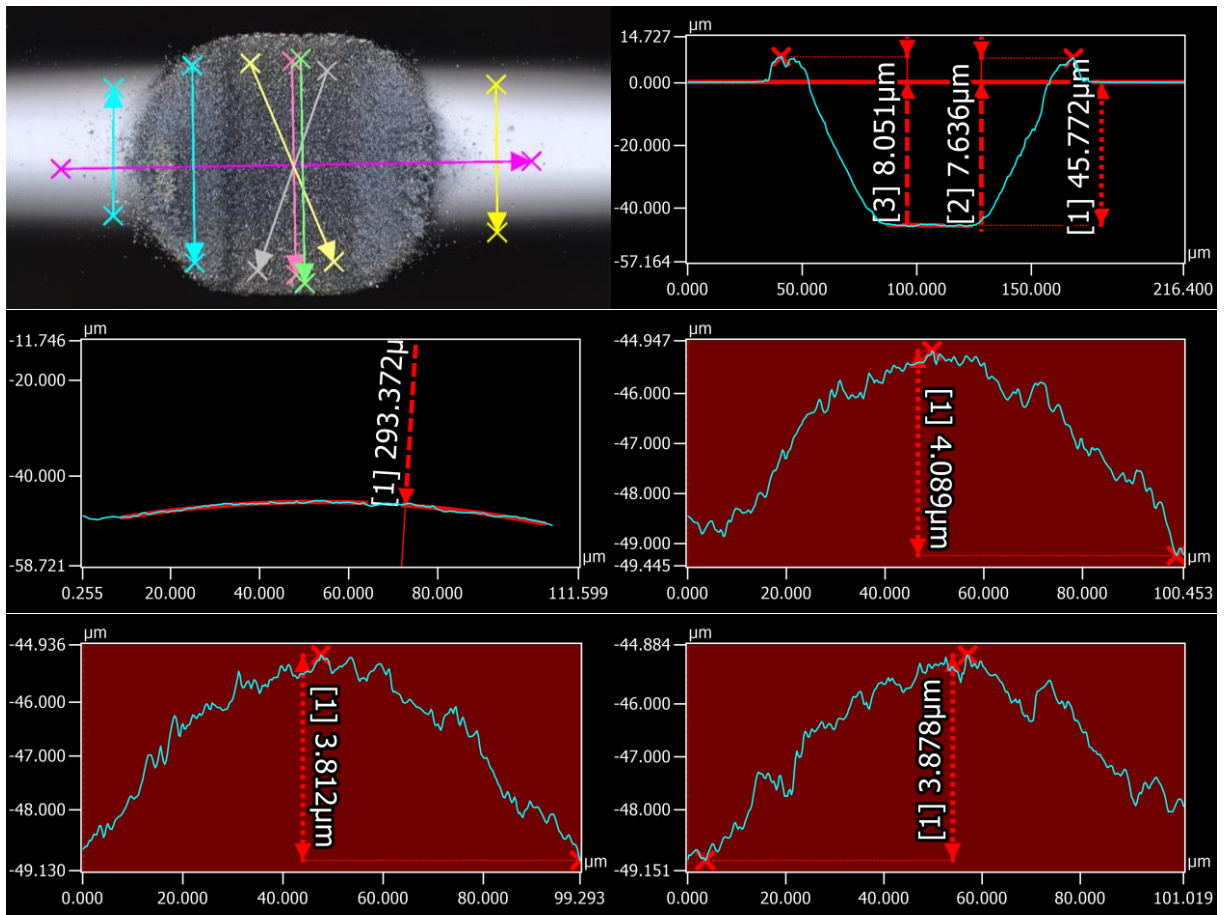
Obr. 65 – Schéma 2 iterace modelu pro výrobu D drážky

Jak je vidět na obrázku Obr. 66, došlo změnou modelu v ohledu tvaru D drážky k výraznému zlepšení, nicméně při měření dokumentovaném na Obr. 67 byla zjištěna přetrvávající válcovitost dna D drážky.



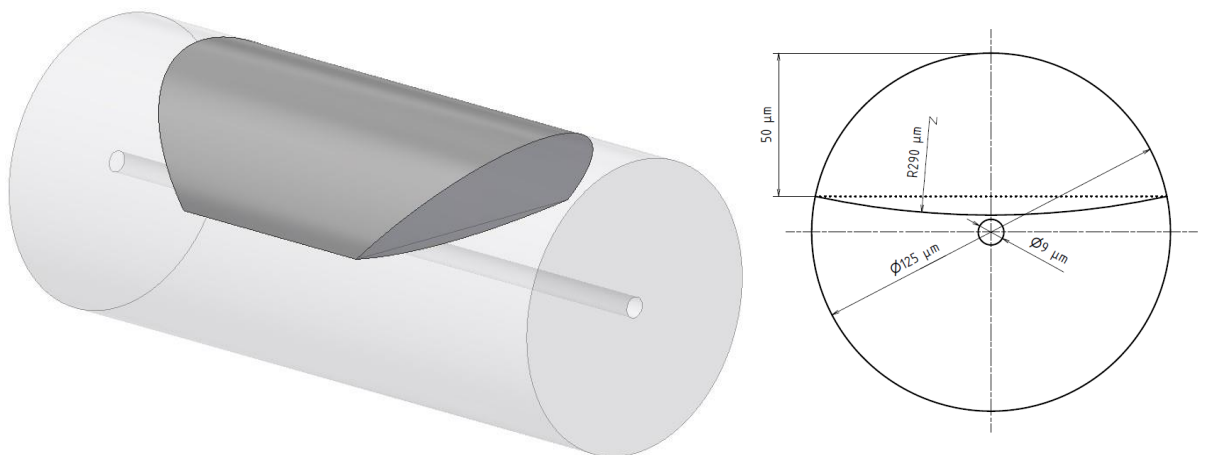
Obr. 66 - 3D sken 2. iterace D drážky

Poloměr profilu dna drážky kolmo k ose vlákna byl změřen na hodnotu 293 μm a výška profilu v různých směrech dna na průměrnou hodnotu 3,9 μm . Opět došlo také k nedodržení definované hloubky ablace 50 μm , reálná hloubka drážky byla změřena na profilu souběžném s jádrem vlákna s hodnotou 45,8 μm . Nad úroveň průměru vlákna vystupuje nahromaděný materiál do výšky asi 8 μm . Není jasné, zda by se v ultrazvukové čističce dal tento nános materiálu alespoň z části odstranit či nikoliv, jelikož pro pořízení skenu na konfokálním mikroskopu je potřeba nechat vlákno upnuté v přípravku, který pro ponor do čisticí lázně není určen.



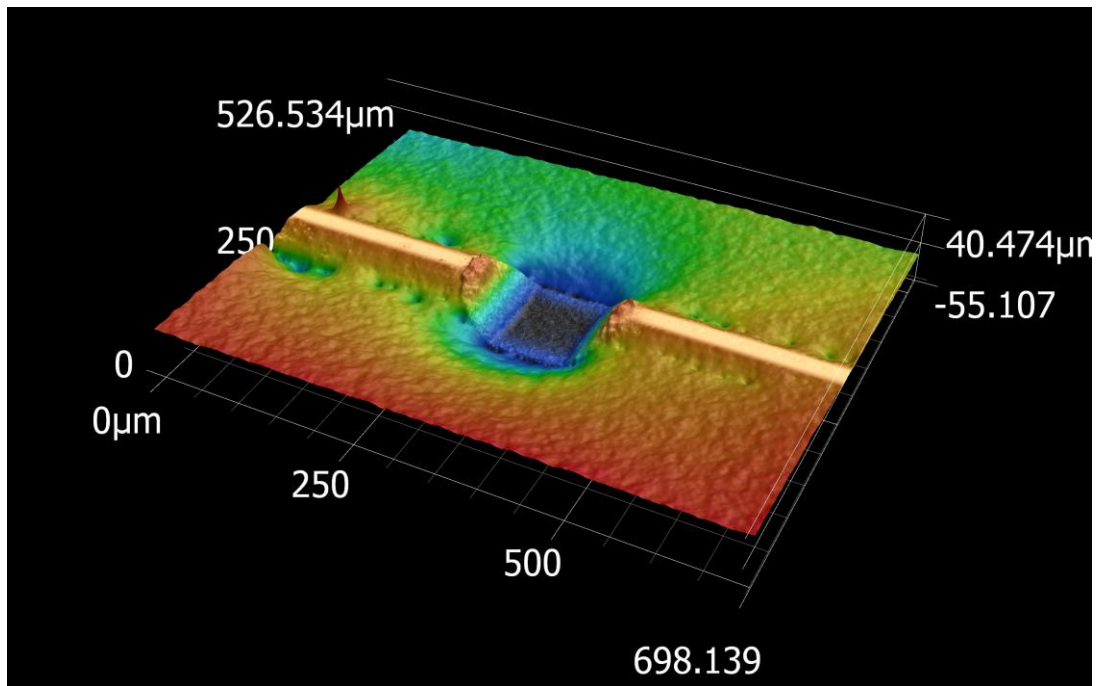
Obr. 67 - Měření profilů 2. iterace D drážky (vlevo nahoře), profil D drážky souběžně s jádrem vlákna (vpravo nahoře), zakřivení profilu dna kolmo na osu vlákna (střed vlevo), výška profilu dna v různých směrech (střed vpravo, dole)

S cílem tvarové kompenzace byl model upraven vydutím dna. Poloměr zakřivení válcové plochy je $290 \mu\text{m}$ (viz Obr. 68 vpravo), což odpovídá zakřivení měřené plochy na Obr. 67. Parametr Δh byl ponechán na hodnotě $1,1 \mu\text{m}$, neboť v případě, že vydutím dna dojde ke kýžené tvarové kompenzaci, dojde také ke snížení úrovně dna o výšku profilu na Obr. 67.

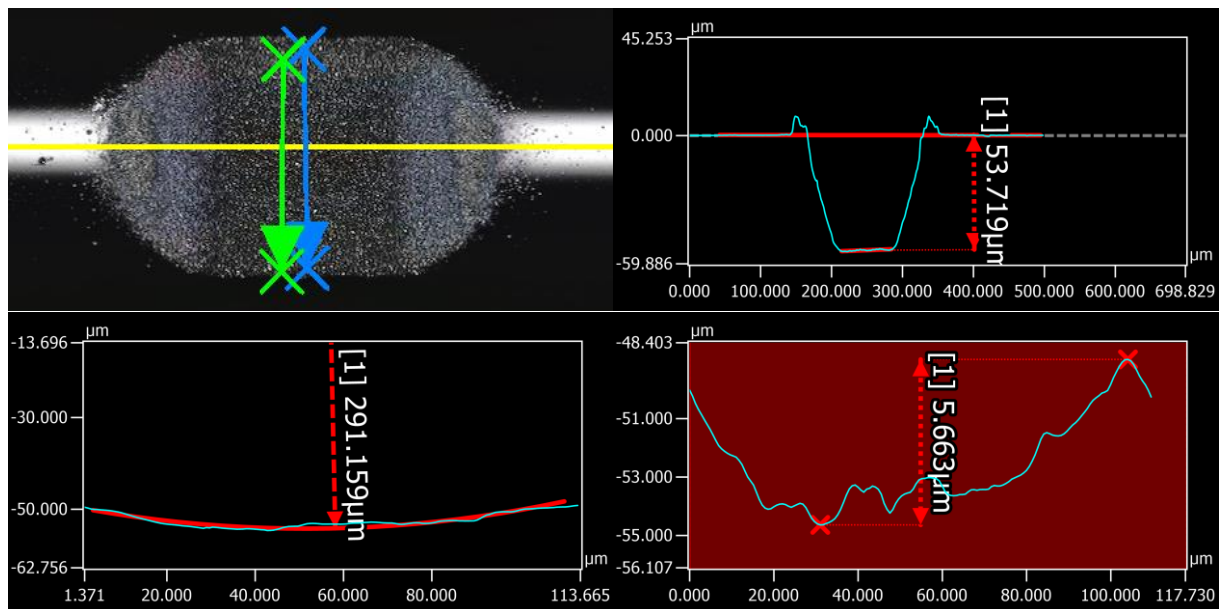


Obr. 68 – Schéma 3 iterace modelu pro výrobu D drážky, řez kolmo k jádru vlákna (vpravo)

Výsledkem třetí iterace modelu byla drážka na Obr. 69 se zakřivením dna v opačném směru překvapivě s poloměrem zakřivení, který odpovídá zakřivení modelu 290 μm (viz Obr. 70). Hloubka ablace byla změřena s hodnotou 53,7 μm , v absolutní hodnotě s téměř stejnou chybou jako v předchozí iteraci.

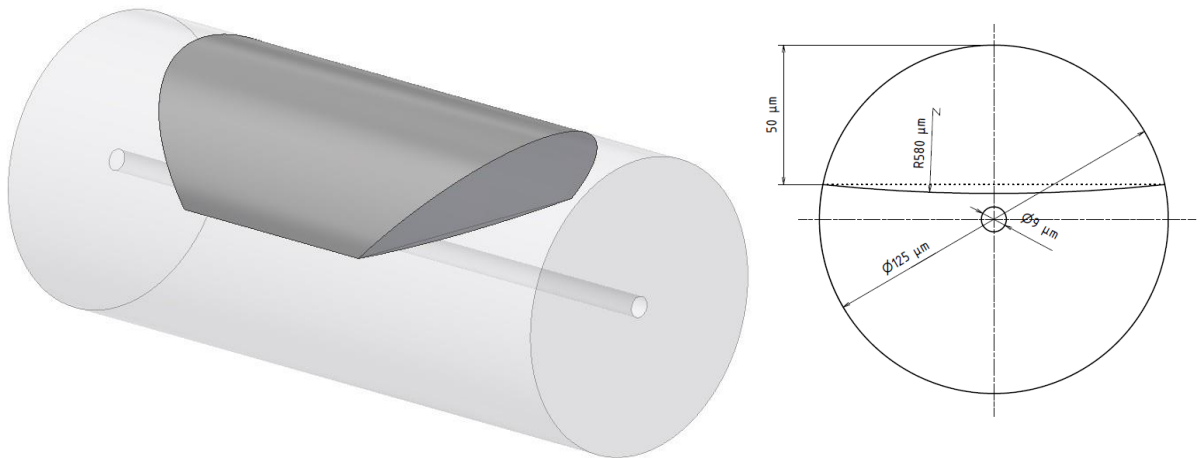


Obr. 69 - 3D sken 3. iterace D drážky



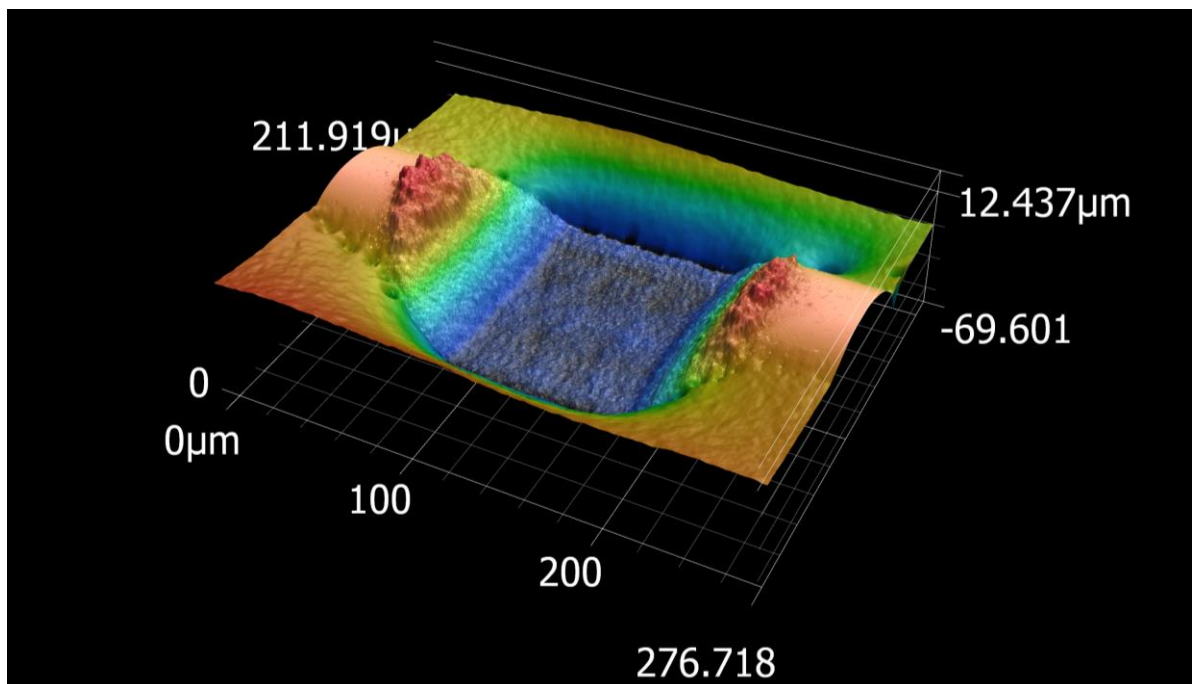
Obr. 70 - Měřené profily 3. iterace D drážky (vlevo nahoře), profil D drážky souběžně s jádrem vlákna (vpravo nahoře), zakřivení profilu dna kolmo na osu vlákna (vlevo dole), výška profilu dna kolmo na osu vlákna (vpravo dole)

Ve 4. iteraci byl model finálně upraven. Poloměr zakřivení dna byl upraven na dvojnásobek předchozí hodnoty, tedy 580 μm viz schéma na Obr. 71 vpravo. K úpravám parametrů laserového procesu nedošlo.



Obr. 71 – Schéma 4 iterace modelu pro výrobu D drážky, řez kolmo k jádru vlákna (vpravo)

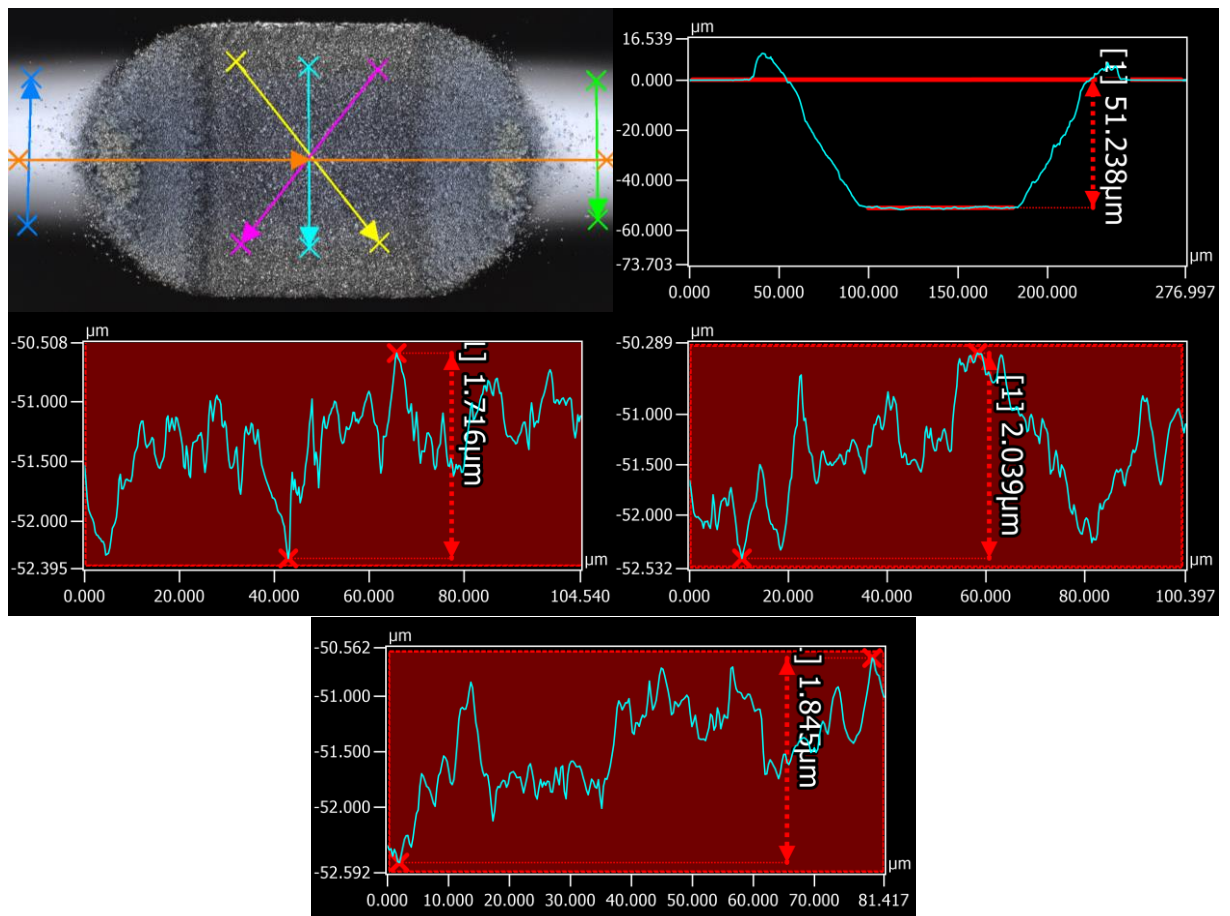
Výsledkem poslední úpravy modelu je D drážka na Obr. 72.



Obr. 72 - 3D sken 4. iterace D drážky

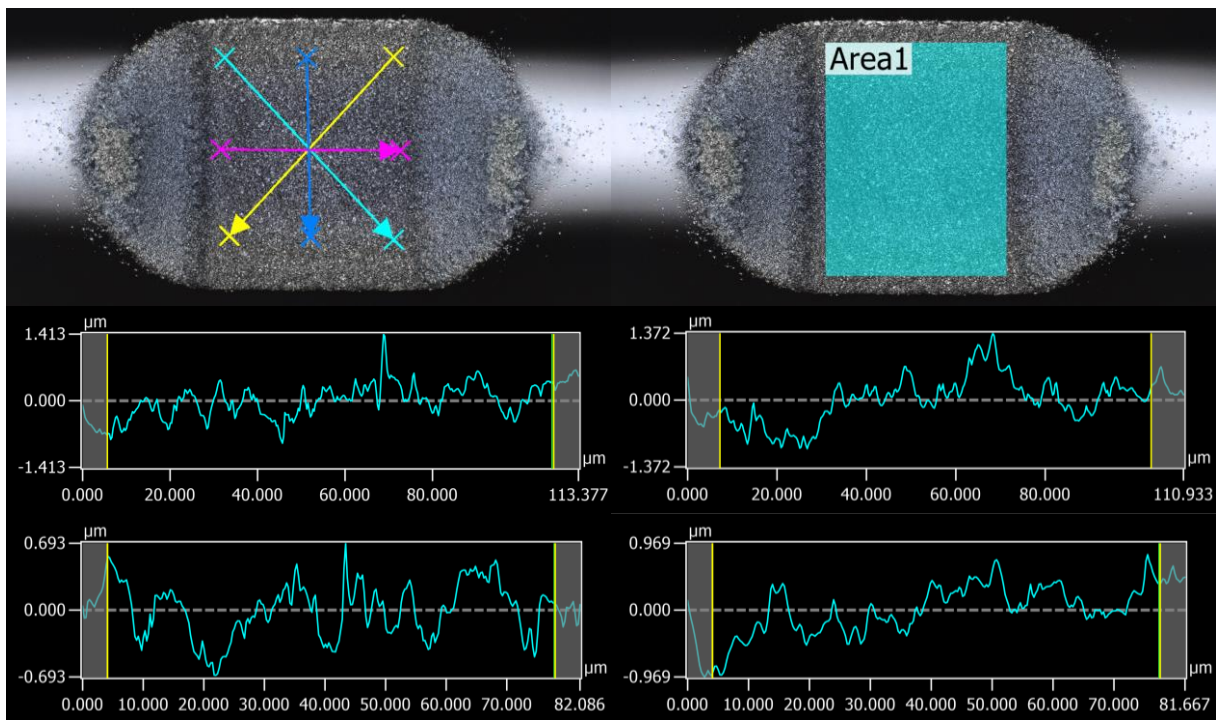
Profilovým měřením čtvrté iterace D drážky bylo zjištěno, že aplikovaná tvarová korekce dna, vydutí s poloměrem zakřivení 580 μm resultuje v dobrou rovinnost dna drážky. Měřením dokumentovaným na Obr. 73 byla zjištěna výška profilu v různých směrech, která dosahuje průměrné hodnoty 1,9 μm . Z tohoto

zobrazení je také patrné, že válcovitost plochy byla dobře eliminována. Hloubka ablace byla změřena s hodnotou 51,2 μm .



Obr. 73 - Měřené profily 4. iterace D drážky (vlevo nahoře), profil D drážky souběžně s jádrem vlákna (vpravo nahoře), výška profilu dna v různých směrech (dole)

Vzhledem kuspokojivému výsledku z hlediska tvaru funkční plochy D drážky bylo provedeno také měření drsnosti, jehož průběh je naznačen na Obr. 74. Výsledná průměrná profilová drsnost je popsána parametry $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ a $R_z = 1,9 \mu\text{m}$ (ve shodě s ručním měřením výšky profilu). Díky nastavení úhlu β mezi šrafováním jednotlivých vrstev není pozorovatelná žádná periodická struktura a byla proto změřena i plošná drsnost popsána parametry $S_a = 0,4 \mu\text{m}$ a $S_z = 3,9 \mu\text{m}$.



Obr. 74 - Měření profilové a plošné drsnosti finální iterace D drážky

Hodnoty parametrů drsnosti jednotlivých profilů a vypočtené průměrné hodnoty uvádí Tab. 20.

Tab. 20 - Naměřené hodnoty profilové drsnosti finální iterace D drážky

	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4	Průměr
Ra [μm]	0,27	0,37	0,24	0,28	0,3
Rz [μm]	2,31	2,27	1,37	1,75	1,9

6 Shrnutí práce

Cílem diplomové práce bylo především navrzení, realizace a vyhodnocení experimentů zaměřených na optimalizaci procesních parametrů laserového mikroobrábění transparentního materiálu s důrazem na dosažitelný detail výroby. Před návrhem experimentu byla vypracována rešerše rozdělená do kapitol „Technologie laserového mikroobrábění“ a „Senzorika a vláknová optika“. V teoretické rovině zde byl v první řadě komplexně popsán proces laserového mikroobrábění s použitím ultrakrátkopulsních laserů a následně byly v rámci přehledné klasifikace popsány základní typy optovláknových senzorů a principy využívané při měření s nimi. V rámci této rešeršní části byly definovány procesní parametry klíčové pro splnění cíle práce. Spojujícím prvkem rešerše laserového mikroobrábění a optovláknové sensoriky je kapitola „Mikroobrábění pomocí UKP laserů pro vláknovou sensoriku“, která přehledově ukazuje aktuální projekty zabývající se návrhem a výrobou senzorů pomocí UKP laserů na optických vláknech.

Esenciální částí práce je návrh a provedení experimentu. Zvoleným materiálem pro optimalizaci procesních parametrů byl materiál standardních optických vláken – křemenné sklo v podobě kvádrů 69x26x10 mm. V první řadě byla určena prahová hodnota fluence laseru $F [J \cdot cm^{-2}]$ pro ablaci materiálu pro 3 disponibilní harmonické vlnové délky laserového zdroje a dvě fokusační optiky. Zjištěné prahové hodnoty fluence pro ablaci materiálu se pohybovaly v intervalu $F \in (0,7 ; 1,5) J \cdot cm^{-2}$, přičemž růst je úměrný vlnové délce. Zjištěné hodnoty jsou porovnatelné s hodnotami v odborné literatuře, např. článek [48] uvádí jako prahovou hodnotu pro ablaci $F_{th} = 0,97 J \cdot cm^{-2}$, pro 20 pulsů o vlnové délce $\lambda = 785 nm$ a délce pulsu $\tau_p = 130 fs$. Z vyhodnocení testu ablačního prahu byla pro další optimalizaci vybrána pouze IIH vlnová délka zdroje (515 nm), a to z důvodu možnosti použití fokusační čočky 4F specializované na minimalizaci velikosti laserového spotu pro účely mikroobrábění. Příslušná hodnota ablačního prahu byla následně využívána v průběhu optimalizace jako komparační hodnota.

Optimalizací prošli jednak výkonové parametry laseru a následně také nastavení strategie rozmítání laserového svazku. Jako optimální se z výsledků

experimentů jeví být pro mikroobrábění daného materiálu výkon o velikosti 2násobku ablačního prahu materiálu a strategie rozmítání svazku charakterizovaná faktory překryvu pulsů a šrafování nastavená na hodnoty $S_p = 80\%$ a $H = 150\%$. Dále byla stanovena hodnota hloubky ablace pro toto nastavení při obrábění velkým počtem přejezdů $\Delta h = 2\ \mu\text{m}$ a limitní úhel sklonu stěny při hloubení $\alpha = 30^\circ$.

Optimalizované nastavení laserového procesu bylo v závěru experimentu použito pro výrobu D drážky na optickém vlákně typu G652D, realizující rovinu pro vytvoření sensorické struktury. V ohledu přesnosti průměrné hloubky ablace bylo po několika iteracích tvarových korekcí modelu dosaženo odchylky od definovaného rozměru $< 1,5\ \mu\text{m}$. Vytvořená rovina byla dále hodnocena parametry drsnosti, kde bylo dosaženo střední aritmetické úchyly profilu $Ra = 0,3\ \mu\text{m}$, resp. střední aritmetická výška plochy $Sa = 0,4$ a maximální výšky profilu $Rz = 1,9\ \mu\text{m}$, resp. maximální výška plochy $Sz = 3,9\ \mu\text{m}$. Z hlediska kvality obrobeneho povrchu bylo dosaženo výsledků porovnatelných s dostupnou literaturou. Např. článek [49] uvádí dosaženou drsnost povrchu po optimalizaci procesních parametrů $Ra \in (0,1 ; 0,4)\ \mu\text{m}$ dle konkrétního nastavení, dále článek [50] uvádí pro popis dosažitelné drsnosti parametr střední kvadratické výšky plochy $Sq \in (0,06 ; 0,5)\ \mu\text{m}$. Přehled optimalizovaných procesních parametrů a dosažených kvalitativních parametrů uvádí Tab. 21.

Tab. 21 - Souhrn aplikovaného optimalizovaného nastavení laserového mikroobrábění a dosažených výsledků obrábění

Aplikované optimalizované nastavení procesních parametrů							
F_{th} [J.cm ⁻²]	τ_p [fs]	f [kHz]	P_{Fth} [mW]	P_{avg} [mW]	P_{avg}/P_{Fth} [1]	S_p [%]	H [%]
0,763	270	200	59	125	2	80	150
Obrábění kontur				Plošné mikroobrábění			
Hloubka stopy [μm]		Šířka stopy [μm]		h [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	
0,7		4,3		0,5	0,06	0,5	
Objemové mikroobrábění							
Δh [μm]	α [°]	Ra [μm]	Rz [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]		
2	30	0,3	1,9	0,4	3,9		

7 Závěr

V rámci celé diplomové práce je řešena problematika mikroobrábění transparentních materiálu s využitím ultrakrátkopulsních laserů a jejím hlavním cílem je optimalizace procesních parametrů pro dosažení co nejvyšší přesnosti a detailu při zpracování křemenného skla, jakožto materiálu používaného pro výrobu standardních jednovidových optických vláken.

Pro splnění cíle byla vypracována rešerše zabývající se technologií laserového mikroobrábění s důrazem na ultrakrátkopulsní lasery a optovláknovou sensoriku. Poté byl navržen experiment, který zkoumal proces ablace materiálu postupně při bodovém, konturovém, plošném a objemovém mikroobrábění a na základě výsledků jednotlivých testů stanovil optimální podmínky laserového mikroobrábění. Experiment začal testováním ablačního prahu, jehož výsledkem byl výběr vlnové délky a fokusační optiky. Dále byla provedena optimalizace výkonu laseru a parametrů strategie rozmítání laserového svazku. Pro stanovené optimální parametry byly provedeny testy ablace při objemovém mikroobrábění, z nichž byl určen limitní sklon stěny při hloubení a hloubka ablace na přejezd.

Zjištěné optimalizované parametry byly v poslední části experimentu použity pro mikroobrábění optického vlákna, kde bylo cílem vytvořit D drážku realizující rovinu, prostor pro vytvoření komplexní sensorické struktury. V závěru experimentu byla finální verze D drážky hodnocena z hlediska dosažené přesnosti hloubky ablace, tvaru a drsnosti vytvořeného povrchu. Dosažené kvalitativní parametry dosahují hodnot ve shodě s návrhem experimentu a dostupnou literaturou.

S ohledem na produktivitu mikroobrábění by bylo možné pokračovat v experimentech zaměřených na vliv zavedení hrubovacích operací provedených vyšším výkonem na výslednou kvalitu obrobeného povrchu, přičemž hrubovací operace by musely být taktéž vhodně optimalizovány. Práci by bylo možné dále rozvinout výrobou sensorické struktury na připravené rovině a ověřením její reálné funkčnosti.

8 Bibliografie

- [1] BHATTACHARYYA, Bijoy a Biswanath DOLOI. Micromachining processes. *Modern Machining Technology* [online]. Elsevier, 2020, 593-673 [cit. 2022-06-06]. ISBN 9780128128947. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-812894-7.00007-4
- [2] MISHRA, Sanjay a Vinod YADAVA. Laser Beam MicroMachining (LBMM) – A review. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2015, 73, 89-122 [cit. 2022-06-06]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2015.03.017
- [3] CHIU, Chi-Cheng a Yung-Chun LEE. Excimer laser micromachining of aspheric microlens arrays based on optimal contour mask design and laser dragging method. *Optics Express* [online]. 2012, 20(6) [cit. 2022-06-06]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.20.005922
- [4] DAYAL, Govind, Syed NADEEM AKHTAR, S. RAMAKRISHNA a J. RAMKUMAR. Excimer Laser Micromachining Using Binary Mask Projection for Large Area Patterning With Single Micrometer Features. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing* [online]. 2013, 1(3) [cit. 2022-06-06]. ISSN 2166-0468. Dostupné z: doi:10.1115/1.4024880
- [5] DELMDAHL, Ralph a Rainer PAETZEL. Laser Drilling of High-Density Through Glass Vias (TGVs) for 2.5D and 3D Packaging. *Journal of the Microelectronics and Packaging Society* [online]. 2014, 21(2), 53-57 [cit. 2022-06-06]. ISSN 1226-9360. Dostupné z: doi:10.6117/kmeps.2014.21.2.053
- [6] LASAGNI, Andrés, Ángel RODRÍGUEZ-VÁZQUEZ, Diego ACEVEDO, Marina CORNEJO, Fernando LASAGNI, Meline POLITANO, Cesar BARBERO a Frank MÜCKLICH. *Direct fabrication of surface architectures on polymers and copolymers using laser interference patterning* [online]. 73650- [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: doi:10.1117/12.821090

- [7] RODRIGUEZ, Ainara, Mikel ECHEVERRÍA, Miguel ELLMAN et al. Laser interference lithography for nanoscale structuring of materials: From laboratory to industry. *Microelectronic Engineering* [online]. 2009, 86(4-6), 937-940 [cit. 2022-06-06]. ISSN 01679317. Dostupné z: doi:10.1016/j.mee.2008.12.043
- [8] BREMUS-KOEBBERLING, Elke, Stefan BECKEMPER, Beate KOCH a Arnold GILLNER. Nano structures via laser interference patterning for guided cell growth of neuronal cells. *Journal of Laser Applications* [online]. 2012, 24(4) [cit. 2022-06-06]. ISSN 1042-346X. Dostupné z: doi:10.2351/1.4730804
- [9] SELIMIS, Alexandros, Vladimir MIRONOV a Maria FARSARI. Direct laser writing: Principles and materials for scaffold 3D printing. *Microelectronic Engineering* [online]. 2015, 132, 83-89 [cit. 2022-06-06]. ISSN 01679317. Dostupné z: doi:10.1016/j.mee.2014.10.001
- [10] AHMMED, K., Colin GRAMBOW a Anne-Marie KIETZIG. Fabrication of Micro/Nano Structures on Metals by Femtosecond Laser Micromachining. *Micromachines* [online]. 2014, 5(4), 1219-1253 [cit. 2022-06-06]. ISSN 2072-666X. Dostupné z: doi:10.3390/mi5041219
- [11] RÖMER, G.R.B.E. a P. BECHTOLD. Electro-optic and Acousto-optic Laser Beam Scanners. *Physics Procedia* [online]. 2014, 56, 29-39 [cit. 2022-06-06]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2014.08.092
- [12] LUCAS, Lonnie a Jim ZHANG. Femtosecond laser micromachining: A back-to-basics primer. In: *Industrial Laser Solutions for Manufacturing* [online]. 2012 [cit. 2022-06-07]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/micromachining/article/16485321/femtosecond-laser-micromachining-a-backtobasics-primer>

- [13] HAMAD, Abubaker. Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution. *High Energy and Short Pulse Lasers* [online]. InTech, 2016 [cit. 2022-06-07]. ISBN 978-953-51-2606-5. Dostupné z: doi:10.5772/63892
- [14] JAEGGI, B., B. NEUENSCHWANDER, M. SCHMID, M. MURALT, J. ZUERCHER a U. HUNZIKER. Influence of the Pulse Duration in the ps-Regime on the Ablation Efficiency of Metals. *Physics Procedia* [online]. 2011, 12, 164-171 [cit. 2022-06-07]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.118
- [15] TUENNERMANN, Andreas, Stefan NOLTE a Jens LIMPET. Femtosecond vs. Picosecond Laser Material Processing. *Laser Technik Journal* [online]. 2010, 7(1), 34-38 [cit. 2022-06-07]. ISSN 16137728. Dostupné z: doi:10.1002/latj.201090006
- [16] EATON, Shane, Giulio CERULLO a Roberto OSELLAME. Fundamentals of Femtosecond Laser Modification of Bulk Dielectrics. *Femtosecond Laser Micromachining: Photonic and Microfluidic Devices in Transparent Materials: Topics in Applied Physics – Svazek 123* [online]. Springer Science & Business Media, 2012, s. 3-17 [cit. 2022-02-07]. ISBN 9783642233661.
- [17] RAFAEL R., Gattass a Mazur ERIC. Femtosecond laser micromachining in transparent materials: A round-up of recent papers in the field of photonics published by the physical sciences division of the Nature Publishing Group. *Nature Photonics*. 2008, 2(4), 219-225. ISSN 1749-4885. Dostupné z: doi:10.1038/nphoton.2008.48
- [18] ČERMÁK, Adam. *LASER v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů*. Plzeň, 2017. Disertace. Západočeská univerzita, Fakulta strojní.
- [19] RÜDIGER, Paschotta. Monochromatic Light. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/monochromatic_light.html

- [20] BUCHFINK, Gabriela, Nikola LEIBINGER-KAMMÜLLER, ed. *The Laser as a Tool*. 1. Vogel Communications Group, 2007. ISBN 978-3-8343-3072-7.
- [21] RÜDIGER, Paschotta. Beam Divergence. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/beam_divergence.html
- [22] RÜDIGER, Paschotta. Beam radius. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/beam_radius.html
- [23] RÜDIGER, Paschotta. Focal Length: Achievable Beam Waist Radius. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/focal_length.html
- [24] RÜDIGER, Paschotta. Rayleigh Length. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/rayleigh_length.html
- [25] RÜDIGER, Paschotta. Pulse energy. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/pulse_energy.html
- [26] RÜDIGER, Paschotta. Fluence. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/fluence.html>
- [27] MARCZAK, J. Micromachining And Patterning In Micro/Nano Scale On Macroscopic Areas. *Archives of Metallurgy and Materials* [online]. 2015, 60(3), 2221-2234 [cit. 2022-06-09]. ISSN 2300-1909. Dostupné z: doi:10.1515/amm-2015-0368
- [28] RAJAN, Ginu. *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications* [online]. Boca Raton: CRC Press, 2015 [cit. 2022-04-02]. ISBN 9781315215358.
- [29] YIN, Shizhuo, Paul RUFFIN a Francis YU. *Fiber Optic Sensors* [online]. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2008 [cit. 2022-04-02]. ISBN 9781315219431.

- [30] KROHN, David, Trevor W. MACDOUGALL a Alexis MENDEZ. *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications* [online]. 4th Edition. Bellingham: SPIE, 2015 [cit. 2022-04-08]. ISBN 9781628411812. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1117/3.1002910>
- [31] LAN, Chengming, Wensong ZHOU a Yawen XIE. Detection of Ultrasonic Stress Waves in Structures Using 3D Shaped Optic Fiber Based on a Mach–Zehnder Interferometer. *Sensors* [online]. 2018, 18(4) [cit. 2022-04-09]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:[10.3390/s18041218](https://doi.org/10.3390/s18041218)
- [32] LEE, Byeong, Young KIM, Kwan PARK, Joo EOM, Myoung KIM, Byung RHO a Hae CHOI. Interferometric Fiber Optic Sensors. *Sensors* [online]. 2012, 12(3), 2467-2486 [cit. 2022-04-10]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:[10.3390/s120302467](https://doi.org/10.3390/s120302467)
- [33] FLORES, Raquel, Ricardo JANEIRO a Jaime VIEGAS. Optical fibre Fabry-Pérot interferometer based on inline microcavities for salinity and temperature sensing. *Scientific Reports* [online]. 2019, 9(1) [cit. 2022-04-10]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:[10.1038/s41598-019-45909-2](https://doi.org/10.1038/s41598-019-45909-2)
- [34] REZA, Ali, Sara TOFIGHI, Marzieh BATHAEE a Farnaz FARM. Optical Fiber Interferometers and Their Applications. *Interferometry - Research and Applications in Science and Technology* [online]. InTech, 2012 [cit. 2022-04-09]. ISBN 978-953-51-0403-2. Dostupné z: doi:[10.5772/34346](https://doi.org/10.5772/34346)
- [35] PASCHOTA, Rudiger. Bragg Mirrors. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html
- [36] HELÁN, Radek. *Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur* [online]. Brno, 2009 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/892>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce František Urban.

- [37] DOMANSKI, Andrzej, Tomasz WOLINSKI, Wojtek BOCK, Eric UDD a Ralph TATAM. *Polarimetric fiber optic sensors* [online]. 21-28 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: doi:10.1117/12.195548
- [38] LIU, Yueying, Zhenguo JING, Ang LI, Qiang LIU, Peng SONG, Rui LI, Wei PENG a Hannan WANG. An open-cavity fiber Fabry-Perot interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining for refractive index sensing. *Eleventh International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2019)*. SPIE, 2019, 3-. ISBN 9781510631731. Dostupné z: doi:10.1117/12.2541465
- [39] LIU, Xin, Qiaohan WANG a D.N. WANG. Ultra compact and sensitive optical fiber interferometric refractive index sensor. *Optik*. 2022, 254. ISSN 00304026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2022.168642
- [40] ZHOU, Fengfeng, Seunghwan JO, Xingyu FU, Jung-Ting TSAI a Martin JUN. Fabrication of Optical Fiber Sensors Based on Femtosecond Laser Micro Machining. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*. 2020, 8(4). ISSN 2166-0468. Dostupné z: doi:10.1115/1.4049580
- [41] ZHAO, Yong, Jian ZHAO, Xi-xin WANG, Yun PENG a Xu-guang HU. Femtosecond laser-inscribed fiber-optic sensor for seawater salinity and temperature measurements. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2022, 353. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2021.131134
- [42] ROCHA, A., J. SILVA, S. NUNES a L. ANDRADE. Measurements of refractive indices and thermo-optical coefficients using a white-light Michelson interferometer. *Applied Optics* [online]. Optical Society of America, 2016, 55(24), 6639-6643 [cit. 2022-04-24]. ISSN 2155-3165. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1364/AO.55.006639
- [43] ZHOU, Xian, Yutang DAI, Meng ZOU, Joseph KARANJA a Minghong YANG. FBG hydrogen sensor based on spiral microstructure ablated by femtosecond laser. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016, 236, 392-398. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2016.06.027

- [44] NATHALA, Chandra, Ali AJAMI, Wolfgang HUSINSKY, Bilal FAROOQ, Sergey KUDRYASHOV, Alben DASKALOVA, Irina BLIZNAKOVA a Andreas ASSION. Ultrashort laser pulse ablation of copper, silicon and gelatin: effect of the pulse duration on the ablation thresholds and the incubation coefficients. *Applied Physics A* [online]. 2016, 122(2) [cit. 2022-06-18]. ISSN 0947-8396. Dostupné z: doi:10.1007/s00339-016-9625-6
- [45] SANNER, N., O. UTÉZA, B. BUSSIERE, G. COUSTILLIER, A. LERAY, T. ITINA a M. SENTIS. Measurement of femtosecond laser-induced damage and ablation thresholds in dielectrics. *Applied Physics A* [online]. 2009, 94(4), 889-897 [cit. 2022-06-18]. ISSN 0947-8396. Dostupné z: doi:10.1007/s00339-009-5077-6
- [46] RÜDIGER, Paschotta. Gaussian Beams. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/gaussian_beams.html
- [47] RÜDIGER, Paschotta. Fluence. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/fluence.html>
- [48] SHAHEEN, M. E., J. E. GAGNON a B. J. FRYER. Femtosecond laser ablation behavior of gold, crystalline silicon, and fused silica: a comparative study. *Laser Physics* [online]. 2014, 24(10) [cit. 2022-06-26]. ISSN 1054-660X. Dostupné z: doi:10.1088/1054-660X/24/10/106102
- [49] PFEIFFER, Manuel, Andy ENGEL, Guenter REISSE a Steffen WEISSMANTEL. Microstructuring of fused silica using femtosecond laser pulses of various wavelengths. *Applied Physics A* [online]. 2015, 121(2), 689-693 [cit. 2022-06-26]. ISSN 0947-8396. Dostupné z: doi:10.1007/s00339-015-9457-9
- [50] DOGAN, Yusuf a Christi K. MADSEN. *Optimization of ultrafast laser parameters for 3D micromachining of fused silica* [online]. 2020, 123 [cit. 2022-06-26]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2019.105933