



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

MIKROSKOP PRO VZÁJEMNÉ SESAZOVÁNÍ OPTICKÝCH VLÁKEN

MICROSCOPE FOR ALIGNMENT OF THE OPTICAL FIBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. KATEŘINA HEKRLOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZBYNĚK DOSTÁL, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Studentka: **Bc. Kateřina Hekrlová**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Přesná mechanika a optika
Vedoucí práce: **Ing. Zbyněk Dostál, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Mikroskop pro vzájemné sesazování optických vláken

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti vyvíjené přetlakové zařízení pro zavádění médií a světla do dutých optických vláken vyžaduje pro navazování světla specializovaný mikroskop. V rámci této diplomové práce bude navržen právě tento mikroskop, který umožní pohled na optické vlákno ze dvou na sebe kolmých směrů.

Cíle diplomové práce:

- 1) Navrhnout řešení mikroskopu.
- 2) Optimalizovat optickou soustavu modulu.
- 3) Vytvořit výrobní dokumentaci mechanických částí mikroskopu.
- 4) Navrhnout justážní metodu mikroskopu.
- 5) Sestavit software pro řízení mikroskopu.
- 6) Mikroskop otestovat.

Seznam doporučené literatury:

FUKA, J. a HAVELKA, B. Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.

TÖRÖK, P a KAO, F. Optical imaging and microscopy: techniques and advanced systems. Springer, 2007.

GLÉZL, Š., KAMARÁD, J., a SLIMÁK, I. Přesná mechanika. Alfa, 1992.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Rozebíratelné spojení optických vláken využívá různé typy konektorů, které zajišťují správnou polohu spojovaných vláken vůči sobě. Pokud jsou však optická vlákna sesazována ve volném prostoru, je nutný pohled ze dvou na sebe kolmých směrů, aby došlo k maximální přesnosti sesazení. Metoda přímého pozorování optických vláken tuto možnost poskytuje, avšak je nutné použít dvě zobrazovací soustavy. Tento problém řeší speciální mikroskop konstruovaný v rámci této práce, který pomocí pohybu objektivu a naklopného zrcátka dokáže zobrazit návaznost spojovaných optických vláken ze dvou na sebe kolmých směrů. V rámci návrhu tohoto mikroskopu byla vytvořena optická simulace zobrazování spojovaných vláken. Na jejím základě byl mikroskop zkonstruován, najustován a otestován s různými optickými vlákny.

Summary

The demountable splicing of optical fibres uses different types of connectors which ensures accurate position of connected fibres. If the optical fibres are aligned in free space, a view from two perpendicular viewing directions is necessary for a maximum aligning accuracy. The method of direct monitoring of optical fibres provides this possibility however, it is necessary to use two imaging systems. This problem can be solved by a special microscope, which is designed in this thesis. The microscope can visualize the alignment of optical fibres from two mutually perpendicular directions by moving the objective lens and inclined mirror. The diploma thesis also describes the procedure of designing an optical simulation of the connection of optical fibres. Based on it, the microscope is designed, adjusted and tested with various optical fibres.

Klíčová slova

Světelný mikroskop, sesazování optických vláken, mikroskopie světlého pole, metoda přímého pozorování.

Keywords

Light microscope, optical fibers splicing, bright field microscopy, direct monitoring system.

HEKRLOVÁ, K. *Mikroskop pro vzájemné sesazování optických vláken*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2021. 65 s. Vedoucí Ing. Zbyněk Dostál, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci zpracovala samostatně, pod odborným vedením Ing. Zbyňka Dostála, Ph.D., a všechny podklady jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Bc. Kateřina Hekřlová

Děkuji panu Ing. Zbyňkovi Dostálovi, Ph.D. za jeho trpělivý a velmi vstřícný přístup při vedení mé diplomové práce, za odborné rady a připomínky, které mi poskytl.

Bc. Kateřina Hekřlová

Obsah

Úvod	3
1 Navazování optických vláken	5
1.1 Nerozebíratelné spoje optických vláken	6
1.1.1 Tavné svařování	6
1.1.2 Slepované spoje	8
1.1.3 Mechanické spoje	9
1.2 Rozebíratelné spoje optických vláken	9
1.2.1 Konektorové spojení využívající centraci vlákna na střed objímky .	10
1.2.2 Konektorové spojení využívající centraci vlákna na střed kužele . .	11
1.2.3 Konektorové spojení využívající čočky	11
1.2.4 Konektory pro více optických vláken	12
1.3 Justážní mechanismy pro zarovnání optických vláken	14
1.3.1 Zarovnání pomocí systému dálkového zavádění a dálkové detekce .	16
1.3.2 Zarovnání pomocí systému dálkového zavádění a lokální detekce . .	16
1.3.3 Zarovnání pomocí systému lokálního zavádění a lokální detekce . .	17
1.3.4 Zarovnání pomocí metody přímého pozorování	18
1.3.5 Speciální techniky pro zarovnání optických vláken	20
1.4 Spojení optických vláken v tlakové komoře	22
2 Motivace a cíle práce	25
3 Techniky pozorování ve světelné mikroskopii	27
3.1 Metoda světlého pole	27
3.1.1 Optická soustava	28
3.1.2 Vzorky	30
3.2 Metoda temného pole	31
3.2.1 Optická soustava	31
3.2.2 Vzorky	33
3.2.3 Rheinbergovo osvětlení	33
3.3 Metoda fázového kontrastu	33
3.3.1 Optická soustava	34
3.3.2 Obraz	36
3.4 Hoffmanův modulační kontrast	37
3.5 Výběr vhodné techniky pro zarovnání optických vláken	38
4 Návrh optického systému	39
4.1 Výchozí parametry optického systému	39
4.1.1 Optická vlákna jako předmět	40
4.2 Optické schéma mikroskopu	41
4.3 Optická simulace	41
4.3.1 Objektiv	41
4.3.2 Tubusová čočka	42
4.3.3 Kamera	43
4.3.4 Optický model v programu Zemax	43

4.3.5	Výsledné parametry mikroskopu	45
5	Konstrukční řešení	47
5.1	Sestava tubusového výsuvu	49
5.2	Sestava pro pohyb objektivu	50
5.2.1	Pohyb objektivu v radiálním směru	50
5.2.2	Pohyb objektivu v axiálním směru	50
5.3	Pákový mechanismus	51
5.4	Kinematické uložení	53
5.5	Montáž	53
6	Software	55
7	Testování	57
	Závěr	61
	Seznam Literatury	63

Úvod

Mikroskopie, jako vědní obor zabývající se zobrazováním velice malých detailů pozorovaného objektu, se neustále rozvíjí [1]. Je snaha o zobrazování s maximálním možným rozlišením, což se do jisté míry daří v případě rastrovací sondové mikroskopie, u které lze vzorky pozorovat s rozlišením řádově až desítek nanometrů [2].

Rastrovací sondová mikroskopie (SPM - Scanning Probe Microscopy) využívá ke skenování vzorku sondu ve tvaru hrotu [2]. Aby bylo získávání informací o povrchu vzorku nanejvýš účinné, využívají se společně s ultravysokým vakuem různá pracovní média. Zde ale vznikají komplikace spojené s přívodem těchto médií až ke vzorku. Kvůli srážkovým procesům je velice komplikované dopravit toto pracovní médium v daném množství na konkrétní místo pozorovaného vzorku [2].

V rámci vývoje přetlakové komory je vyvíjeno zařízení, díky kterému bude ke vzorku přiváděno světlo a pracovní médium zároveň [2]. Toto vyvíjené zařízení je tvořeno dvěma optickými vlákny, z nichž prvním je plné zaváděcí optické vlákno a druhé je duté optické vlákno. Je ale nutné, aby byla optická vlákna korektně sesazena a docházelo tak k co nejmenšímu útlumu při přenosu signálu. Z tohoto důvodu je nutné se zabývat metodou pro sesazení optických vláken a pozorování takto vzniklého spoje.

1. Navazování optických vláken

Optická vlákna jsou důležitou součástí komunikačních sítí. Vyrábí se ale pouze v určitých délkových rozměrech, kdy se tato délka různí dle jeho typu i použití. Je tedy zřejmé, že v případě potřeby musí existovat technologie, díky které bude možné i mnohonásobné spojení těchto optických prvků [3, 4].

Samotné spojení musí vykazovat nízké ztráty. Příčiny ztrát lze rozdělit na vnitřní, které vznikají kvůli rozdílným vlastnostem spojovaných vláken, a vnější, které vznikají nedokonalostí geometrie spoje. Vnitřní vlivy jsou zapříčiněny:

- změnou průměru jádra a primární ochrany spojovaných vláken,
- nepřizpůsobením indexů lomu,
- nepřizpůsobením numerických apertur,
- eliptičností a nesoustředností jádra a primární ochrany.

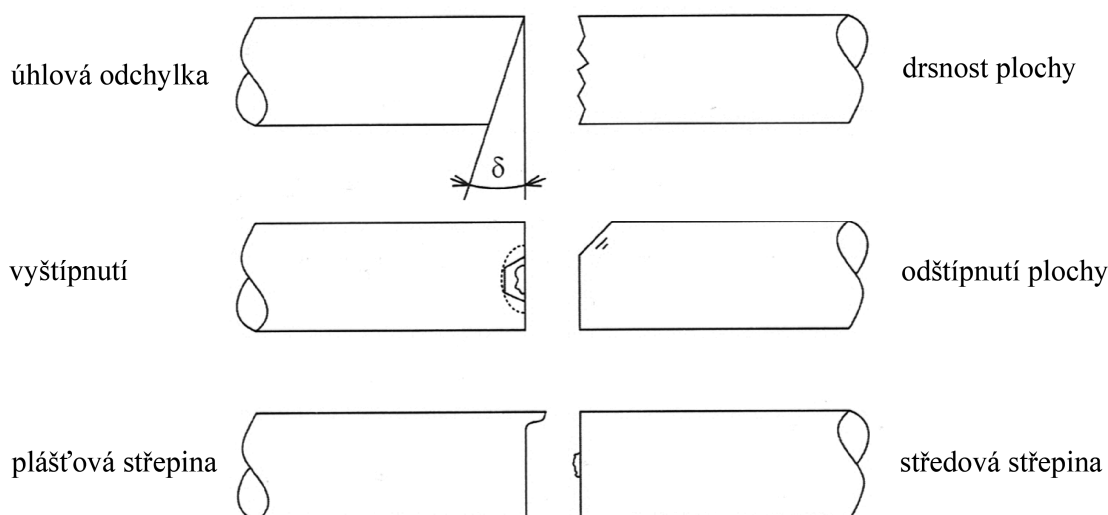
Vnější vlivy ztrát jsou:

- příčné přesazení,
- podélné přesazení,
- axiální sklon vláken,
- kvalita opracování konce vlákna,
- Fresnelovy odrazy [5].

Kvalitní technologií spojování lze ztráty způsobené vnějšími vlivy snížit. Pro vícevláková optická vlákna platí, že nejvýznamnějšími příčinami způsobujícími ztráty jsou příčné přesazení a nesprávné axiální zarovnání spojovaných vláken. Fresnelovy ztráty, které vznikají odrazem záření na rozhraní sklo-vzduch-sklo, lze významně snížit vhodným výběrem výplňového materiálu. Tento materiál musí mít podobný index lomu jako jádro optického vlákna.

Samotnému spojení optických vláken předchází úprava jejich koncové části. Aby bylo dosaženo co nejmenších ztrát, je nutné, aby konce obou spojovaných vláken byly ploché, hladké a kolmé k optické ose vlákna [5]. Příklady nežádoucích situací, které vedou ke zvýšení útlumu, lze vidět na obrázku 1.1. Mezi nejčastější techniky opracování koncových částí optického vlákna patří broušení, řezání či kontrolované zlomení vlákna [5]. Broušení a leštění, při kterých se využívá velice jemných a čistých brusiv či leštiv, se používají v případě konektorových spojení. Výsledný povrch má potom specifické vlastnosti. Technika kontrolovaného zlomení vlákna je nejpoužívanější pro účely spojování optických vláken sváření a provádí se pomocí tzv. zalamovačky. Aby bylo možné provést kvalitní lom, je nutné odstranit primární ochranu optického vlákna a očistit ho. Při samotném procesu lámání se břitem působí na optické vlákno, kde vzniká trhlinka. Následně díky axiálnímu tahu vznikne kolmý lom optického vlákna [3, 4, 5].

Spojení optických vláken může být buď dočasné (rozebíratelné) nebo permanentní (nerozebíratelné). K dočasnému spojení dvou optických vláken dochází prostřednictvím konektorů a používá se hlavně v případech, kdy je nutné časté demontování tohoto spojení. Naopak permanentní spojení se využívá v situacích, kdy je nutné pevné spojení optických vláken [3]. V následujícím textu budou tyto metody spojování optických vláken podrobně rozebrány.



Obrázek 1.1: Vady na koncích optických vláken zhoršující kvalitu jejich spojení. Převzato a upraveno z [5].

1.1. Nerozebíratelné spoje optických vláken

Do skupiny nerozebíratelných neboli permanentních spojení se řadí tavné svařování, slepované spoje a mechanická spojení [5].

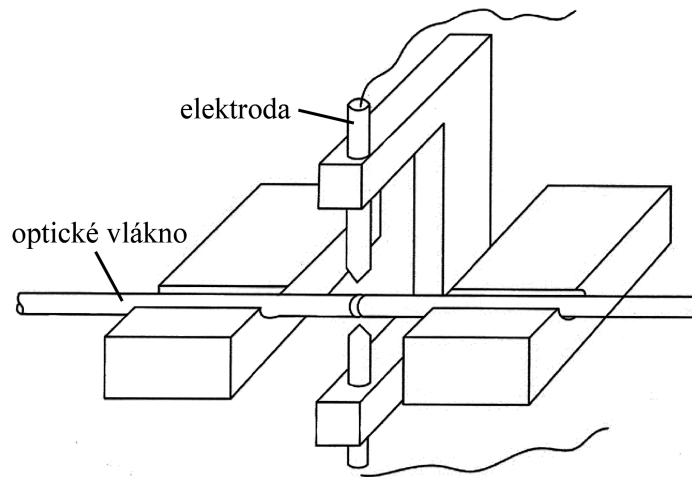
1.1.1. Tavné svařování

Tavné svařování neboli metoda fúze je používána v případech, kdy je požadováno spojení optických vláken s vysokou spolehlivostí a malými ztrátami. Jako zdroj lze využít například CO_2 laser nebo plynový hořák, avšak s ohledem na velkou pevnost spojení se využívá spíše elektrický oblouk [6, 7].

Ke kvalitnímu výsledku je nutné znát bod tavení skla, ze kterého je dané optické vlákno vyrobeno. Používá se totiž různá teplota, ale i doba vlastního sváření. Pro optická vlákna vyrobená ze skla, která mají teplotu tavení okolo 700°C , se používají pro spolehlivé spojení smyčky z nichromového drátu. Křemenná optická vlákna mají teplotu tavení vyšší (až 1600°C), a proto je k jejich spojení nutné použít generátory vyšších teplot, jako je například elektrický oblouk nebo speciální plynový hořák zvaný *micro torch* [3].

Na obrázku 1.2 je pro představu uvedeno schéma spojování optických vláken pomocí elektrického oblouku. Elektrody jsou tvořeny tyčemi, například z wolframu, jejichž konce jsou opracovány do špičky. Tyto elektrody jsou upevněny v izolantu, který chrání ostatní části mechanismu před vysokou teplotou a elektrických napětím. K upevnění spojovaných vláken se používají mechanismy s V-drážkami, které zajišťují požadovanou polohu vláken při svařování a navíc umožňují i pohyb vláken vůči sobě [5].

Vlastní svařování započne v okamžiku, kdy je vzdálenost spojovaných vláken asi $20\ \mu\text{m}$. Následně během velmi krátkého časového intervalu (asi $0,2\ \text{s}$) dojde k natavení konců optických vláken, přičemž jsou vlákna současně k sobě přitlačována s přesahem asi $15\ \mu\text{m}$. Pro spojování vícevidových vláken pomocí svařování se využívá střídavý proud $16,25\ \text{mA}$ o frekvenci $50\ \text{Hz}$ a celková doba sváření je $4\ \text{s}$ [5]. Po dokončení procesu sváření se obvykle provádí kontrola pevnosti a útlumu spojení [5].



Obrázek 1.2: Princip svařování optických vláken pomocí elektrického oblouku. Převzato a upraveno z [5].

Svařovací zařízení se neustále zdokonaluje. Moderní aparáty jsou téměř celé řízené počítačem, který automaticky volí typ svaru dle druhu spojovaných optických vláken. Také nastavování poloh vláken vůči sobě je plně automatizované. K justáži se využívají techniky popisované v části 1.3 [5].

Jestliže svařované vlákno vykazuje chyby, je nutné celý proces spojování opakovat. Tato situace může nastat vlivem mnoha příčin, například pokud dojde k vydutí nebo naopak zúžení profilu vlákna, při vzniku bublin či osových úchylek v místě spojení, nebo pokud nedojde k protavení materiálu v celém profilu [5].

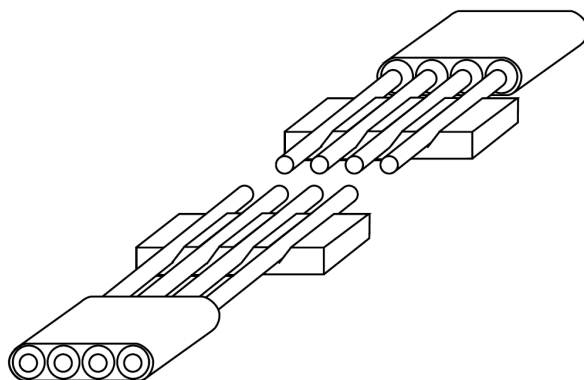
V případě, kdy je spojení optických vláken vyhodnoceno jako správné, je potřeba obnovit primární ochranu spojeného vlákna, tedy jeho opláštění a ochranný obal. To lze provést například nanesením vrstvy speciálního silikonu. Pro větší pevnost spoje lze použít plastovou trubičku, která se před započítím procesu svařování nasadí na vlákno a po spojení vláken se posune na místo sváru. Následně dojde za pomoci zvýšené teploty působící na tuto trubičku ke smrštění, a tak i k upevnění spoje [3, 5].

Spojování metodou fúze se používá i pro více optických vláken najednou. Jako příklad lze uvést tavné svařování plochého kabelu s normovaným počtem vláken. Každé z vláken leží v předem připravené V-drážce, která pevně stanovuje rozteč mezi jednotlivými vlákny. Nutno podotknout, že nedochází k nastavování každého vlákna individuálně. Justáž je totiž prováděna pro všechna optická vlákna na jedné straně spojení zároveň, což je zřejmé i z obrázku 1.3. Opět je nutné před započítím svařovacího procesu ze všech optických vláken odstranit opláštění a zarovnat konce pomocí metody kontrolovaného zlomení. Připravená vlákna se vloží mezi dva páry elektrod a pak může započít proces sváření. Hlavním důvodem, proč se nepoužívá pouze jedna elektroda, je skutečnost, že by docházelo k nerovnoměrnému zahřátí vláken. To je však pro metodu fúzního spojování nutné [3, 6, 8].

Existují i metody, při kterých se spojuje více optických vláken, avšak tyto vlákna spolu netvoří žádnou strukturu. Jde tedy o individuální svařování více optických vláken najednou. V takovém případě se liší proces přípravy vláken na svařování. Zlomení probíhá pro každé optické vlákno odděleně. Po vložení optických vláken do systému V-drážek musí dojít k vyrovnání, aby zakončení optických vláken tvořila přímku. Ve většině případů se využívá zarážka, o kterou se vyrovnávají vlákna opřou. Jakmile se všechna vlákna

dotknout zarážky, dojde k upevnění vláken svorkou a zarážka se odstraní. Následně již může dojít k fúzi [6, 8].

Systémy s V-drážkami mohou být vyrobeny z plastových materiálů, kovu, silikonu nebo z křemíkových destiček. Technologie výroby je u každého materiálu jiná. Například u plastových materiálů se využívá předem připravených forem, do kterých se roztavený plast vlévá. Naopak u kovu se V-drážky vyrábí ražením. V případě křemíkové destičky se používá leptání. Nejpresnějších rozměrů je však dosaženo u leptání silikonu, kde nepřesnosti v rozměrech nejsou větší než 1 μm . [3]

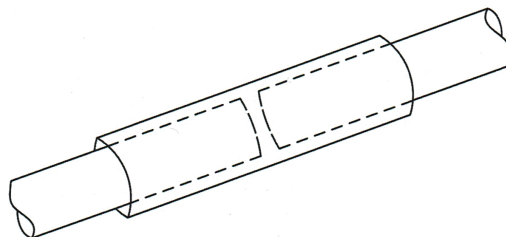


Obrázek 1.3: Svařování plochých kabelů. Převzato a upraveno z [8].

1.1.2. Slepované spoje

U těchto spojení se využívá lepidlo pro přilepení optických vláken k podkladu nebo ke slepení vláken dohromady. Lepidlo zajišťuje, aby nedocházelo k deformacím spoje, zvyšuje jeho pevnost v tahu a celkově chrání spojení vláken před okolním prostředím. Je důležité, aby lepidlo mělo co nejpodobnější index lomu jako jádro slepovaných optických vláken [5].

Na obrázku 1.4 je naznačeno nejpoužívanější spojení optických vláken metodou lepení. Jedná se o dutou trubičku, do které se zasunou spojované konce optických vláken. Spojení je dosaženo přidáním lepidla mezi optická vlákna a následným smrštěním výše zmiňované trubičky. Často se používá materiál, který působením ultrafialového záření tvrdne. Při této technice vytvrditelného spoje se zavede ultrafialové záření do vlákna a díky tomu lepidlo podléhá polymerizaci, čímž vznikne pevný spoj optických vláken. Nevýhodou tohoto spojení může být velká citlivost na změnu teploty [3, 5].

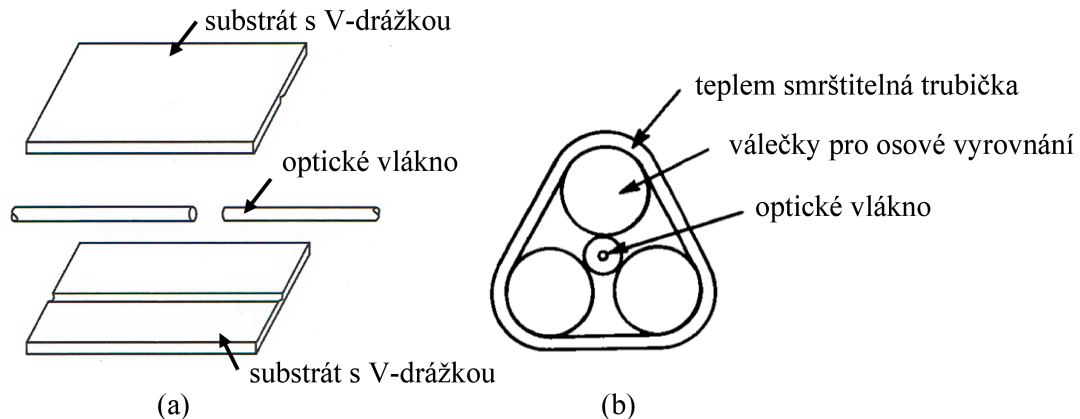


Obrázek 1.4: Spojování optických vláken technikou lepení s pomocí teplem smrštitelné trubičky. Převzato z [5].

1.1.3. Mechanické spoje

Optická vlákna mohou být spojena i pomocí různých mechanických struktur, kde dochází k čelnímu styku spojovaných vláken. Mezi nejpoužívanější mechanismy patří spojky s V-drážkou (viz obrázek 1.5(a)), popřípadě s více V-drážkami. Využívá se ale i mechanismů vyobrazených na obrázku 1.5(b), které připomínají tunel. Ve středu tohoto tunelu leží optická vlákna a okolo nich jsou umístěny tři válečky. Tyto válečky obepíná teplem smrštitelná trubička upevňující spojení zmiňovaných optických vláken [3, 5].

Platí, že spojení optických vláken pomocí těchto mechanických spojů je náchylnější na manipulaci, a proto musí být zajištěno pevné spojení použitého mechanismu a podložky. K minimalizaci ztrát spojení a zároveň k ochraně jádra vlákna se využívají optické sdrůžovací materiály, které se umísťují mezi konce spojovaných vláken. Používají se silikonové gely, epoxidové pryskyřice nebo ultrafialová lepidla [5]. Tyto spojovací materiály se volí dle optických vlastností materiálu, ze kterého je tvořeno optické vlákno. Nevýhodou může být závislost těchto spojovacích materiálů na teplotě. Obrovskou výhodou je ale možnost spojení dvou optických vláken vyrobených z tepelně nekompatibilních materiálů, jako jsou například křemičitá a fluoridová optická vlákna [3, 5, 8].



Obrázek 1.5: Mechanické spoje. (a) Mechanický spoj využívající mechanismu V-drážky. Převzato a upraveno z [5]. (b) Mechanický spoj využívající tři vodící válečky, které spojují optická vlákna pomocí teplem smrštitelné trubičky. Převzato a upraveno z [3].

1.2. Rozebíratelné spoje optických vláken

Rozebíratelné neboli konektorové spoje jsou druhou variantou, jak lze spojit optická vlákna, a přenést tak signál. Používají se v takových situacích, kdy je nutné časté demontování tohoto spojení. Konektory lze definovat jako zařízení napojené na konec optického vlákna, které lze snadno spojit nebo odpojit od jiných konektorů či zařízení [5, 8].

Princip rozebíratelného spoje spočívá opět v přesném nastavení optických vláken proti sobě. Na rozdíl od předchozích metod je však nutné zajistit, aby sesazovaná optická vlákna zůstala vůči sobě v určité vzdálenosti, protože se nesmí vzájemně dotýkat. Velikost mezery mezi optickými vlákny se pohybuje v řádu mikrometrů [5]. Při menší vzdálenosti by mohlo dojít k dotyku vláken, naopak při větší vzdálenosti by se již výrazně projevovaly ztráty způsobené rozšiřováním svazku. K vyšším ztrátám ale přispívá spíše špatné zarovnání optických os vláken než zvětšení vzdálenosti čelních ploch těchto vláken [3]. Justáž vláken

je prováděna vůči definovaným referenčním bodům konektoru. Konečná poloha se zajišťuje mechanickým dorazem a současně spojením částí konektoru [3, 5, 8].

I přes mnoho předností mají konektorová spojení řadu nevýhod. Obecně vykazují větší ztráty než fúzní spojení. Velikost těchto ztrát se pohybuje v rozmezí 0,05 dB až 0,5 dB pro spojení stejných optických vláken [8]. Při spojení rozdílných typů optických vláken jsou tyto ztráty samozřejmě vyšší, závisí však na konkrétním konstrukčním řešení konektoru a použitých materiálech. Je popisována i závislost ztrát na teplotě, což je taktéž nežádoucí. Navíc jsou konektory náchylnější na poškození okolním prostředím. V neposlední řadě je nutné zmínit, že konektorové spojení je oproti fúzním spojům náchylnější na poškození při přenosu vysokého výkonu [3, 5, 8].

Konstrukční řešení konektoru se liší podle použití. Využívá se tuhého i poddajného uložení v samotném těle konektoru. Vždy je však zaručeno zarovnání optických os spojovaných vláken. Optické vlákno je zpravidla umístěné v ochranném prvku. Celý tento ochranný prvek je pak obklopen justážním mechanismem, prostřednictvím kterého dochází k pohybu optického vlákna [5].

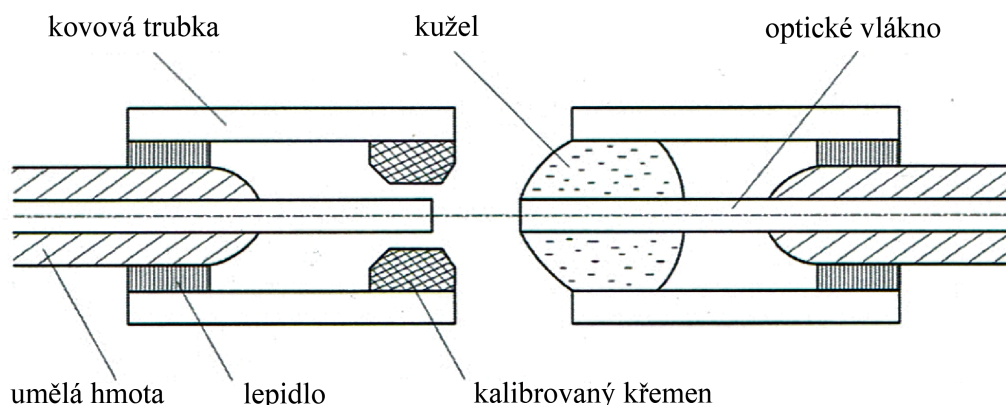
Existuje nepřehledné množství konektorových spojů, které se liší svou konstrukcí nebo účelem použití. Několik základních typů konektorů bude představeno v následujících odstavcích.

1.2.1. Konektorové spojení využívající centraci vlákna na střed objímky

Prvním zástupcem z řady rozebíratelných spojení je konektor pro jednovláknová optická vlákna, který využívá pro zarovnání vláken centraci na střed vnější objímky. Je to jeden z nejjednodušších a nejstarších konektorů jednovláknových vláken [3, 5].

Nosným prvkem tohoto konektoru je dutá součástka, která může být tvořena například obyčejnou ocelovou objímkou. Jsou ale kladeny vysoké nároky na přesnost výroby tohoto dílu. Důvodem je skutečnost, že optické osy spojovaných vláken se centrují vzhledem k této objímce [3].

Druhým konstrukčním problémem je vytvoření mezery mezi spojovanými vlákny, aby nedocházelo k oděru čelních ploch. Řešení tohoto problému lze vidět na obrázku 1.6. Spojovaná optická vlákna jsou vložena do ochranného obalu z umělé hmoty a následně přilepena ke kovové trubce, jež má více funkcí. Za prvé tato trubka tvoří ochranný obal pro spojované optické vlákno a za druhé se podílí na centraci optických vláken vůči sobě, protože svým vnějším průměrem naléhá na výše zmiňovanou objímku konektoru a tvoří tak část lineárního vedení. Aby nedošlo ke styku čelních ploch optických vláken, jsou zde využity kalibrované komponenty, které na sebe přímo nasedají, a vymezují tak prostor mezi vlákny. První komponentou je kroužek z křemene, který je zasazen do levé části konektoru. Druhou komponentou, která přímo nasedá na stykovou plochu kroužku, je kužel ze silikonové gumy. Vzdálenost samotných optických vláken je zajištěna dorazem kovových trubek [3, 5].

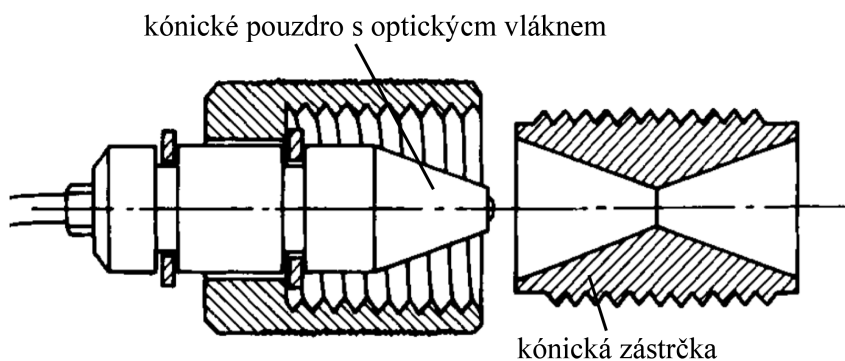


Obrázek 1.6: Princip jednojádrového konektoru využívající centraci optického vlákna na střed objímky. Převzato a upraveno z [5].

1.2.2. Konektorové spojení využívající centraci vlákna na střed kužele

Konektor využívající centraci optického vlákna na střed kužele je složen z několika částí (viz obrázek 1.7). Středovým dílem celého konektoru je symetrická zástrčka. Z obou stran se do této zástrčky zasouvá optické vlákno upevněné v kónickém pouzdře. Dotykem šikmých ploch je vymezeno úhlové, příčné i axiální zarovnání optických vláken. Mechanické spojení mezi vnitřní zástrčkou a vnější objímkou optického vlákna může být řešeno různě, na obrázku 1.7 je použitý závit [3].

Výhodou tohoto konektoru je ve srovnání s předchozím typem jeho nižší pořizovací cena. Ta je dána hlavně sériovou výrobou pomocí metody lisování, která je vůči klasickému obrábění levnější. Jako materiál je nejvíce využívána epoxidová pryskyřice. S touto skutečností se ale pojí určité nepřesnosti ve výrobě dílů [3].



Obrázek 1.7: Princip konektoru využívající centraci optického vlákna na střed kužele. Převzato a upraveno z [3].

1.2.3. Konektorové spojení využívající čočky

Dalším typem je konektor využívající optické elementy, kterými mohou být různé druhy čoček (kulové, válcové, plankonvexní a další) [9].

Již v úvodu části 1.2 je zmíněno, že vzdálenost čelních ploch nesmí přesahovat hodnotu několika mikrometrů. V některých aplikacích je ale žádoucí, aby se mezi čelní plochy optických vláken vložil nějaký optický prvek, například filtr nebo mřížka. V takovém

případě by se ale vzdálenost optických vláken zvětšila, zvýšila by se divergence záření, a tedy by docházelo k vysokým ztrátám. Aby se vyřešil tento problém, používají se čočky umístěné mezi konci spojovaných vláken, což demonstruje obrázek 1.8. Čočka L_1 zalamuje divergentní paprsky tak, že po průchodu touto čočkou se šíří rovnoběžně s optickou osou. Je tedy zřejmé, že ohnisková rovina této čočky splývá s koncem optického vlákna OV_1 . Naopak čočka L_2 fokusuje kolimovaný svazek do svého ohniska, které se opět nachází v rovině zakončení výstupního optického vlákna OV_2 . Zpravidla se v konektorových spojích využívá dvou identických čoček [5, 9]. Z těchto skutečností vyplývá, že celkové ztráty konektorového spojení budou záviset i na optických vadách použitých čoček. Nejvíce se projevuje působení sférické vady, ostatní optické vady mají v tomto případě zanedbatelný vliv [9]. Vlivem sférické vady vzniká v ohnisku druhé čočky *spot* neboli rozptylová funkce bodu. Poloměr r jejího prvního minima závisí u různých typů čoček vždy na stejných parametrech, konkrétně dle [9]:

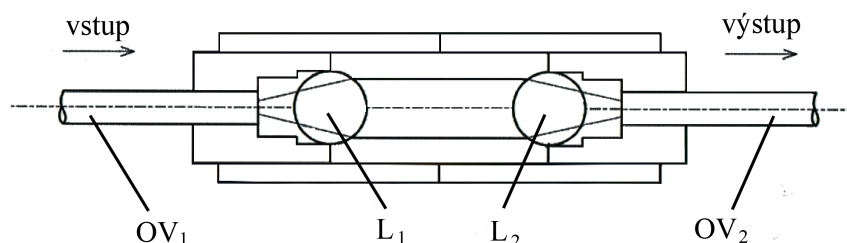
$$r = \frac{1}{4} \left[\frac{n}{(n-1)^2} \right] f NA^3, \quad (1.1)$$

kde n je index lomu použité čočky, f je její ohnisková vzdálenost a NA značí numerickou aperturu optického vlákna.

Běžně používaná vícevidová optická vlákna, která mají numerickou aperturu $NA = 0,2$, využívají v konektorech čočky s ohniskovou vzdáleností $f = 3$ mm. Pro index lomu kulové čočky $n = 1,9$ vznikne *spot* o průměru asi $16 \mu\text{m}$, což není zanedbatelná plocha ve srovnání v rozměry jádra vícevidového vlákna. Posunutím konců optických vláken OV_1 a OV_2 mírně před toto ohnisko, tedy blíže k čočkám, dojde ke snížení sférické vady optického systému [9].

Samotné konstrukční řešení taktéž demonstruje obrázek 1.8. Spojovaná optická vlákna jsou opět upevněna v dílech, jenž se zasouvají z obou stran do objímky. Kulové čočky jsou pak umístěny v tomtéž díle ve vybrání, které je orientováno směrem do středu konektoru [5].

Tento typ konektoru je v dnešní době velice oblíbený, a to hlavně díky jeho výborným přenosovým vlastnostem. Ztráty tohoto spojení totiž v případě vícevidových vláken dosahují hodnot do 0,2 dB [9].



Obrázek 1.8: Princip konektoru s kulovými čočkami. OV_1 - vstupní optické vlákno, OV_2 - výstupní optické vlákno, L_1 a L_2 - kulové čočky. Převzato a upraveno z [5].

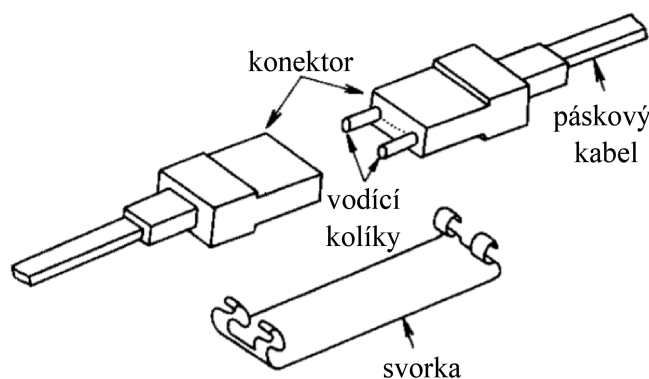
1.2.4. Konektory pro více optických vláken

Páskové neboli *ribbon* konektory jsou vícevláknové konektory. Jedním ze základních typů páskových konektorů je konektor typu MT, což je z anglického *mechanical transferable*.

Tento typ konektoru se používá pro vícevláknová vlákna a v dnešní době má mnoho modifikací [3, 10, 11].

Původní konstrukční řešení ukazuje obrázek 1.9. Konektor tvoří opět dvě části, kdy ale oproti jednovláknovým konektorům zde přibývají vodící kolíky, které zapadají do vodících děr na druhé části konektoru. Mezi těmito vodícími elementy jsou v řadě umístěná zakončení spojovaných optických vláken. Obě části konektoru k sobě přitlačuje svorka [10].

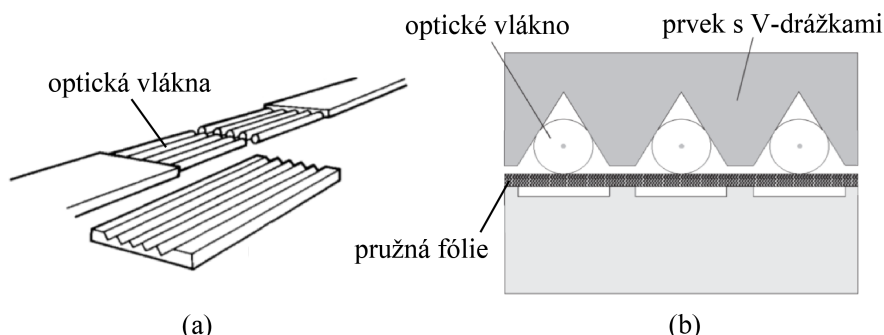
Těla konektorů se vyrábí metodou lití do forem, což do jisté míry snižuje přesnost výroby. Druhá nevýhoda MT konektorů je složité mechanické opracování konců spojovaných vláken. Navíc tento proces komplikuje skutečnost, že vlákna jsou fixně umístěna ve svých polohách. Použitím tohoto konektoru lze dle [10] získat ztráty menší než 0,35 dB [3, 10, 11].



Obrázek 1.9: Páskový konektor typu MT pro vícevláknová optická vlákna. Převzato a upraveno z [10].

Alternativou MT konektoru je konektor s V-drážkami. Lze využít dvě uspořádání, kdy v prvním případě se využívá působení V-drážky na optické vlákno ze dvou stran, avšak u druhého uspořádání je vlákno umístěno pouze v jedné V-drážce [11].

Obrázek 1.10(a) ukazuje situaci, kdy V-drážky obklopují spojovaná optická vlákna z obou stran. Přitlačením konců optických vláken k sobě vzniká spojení. Ke kompenzaci délkových tolerancí spojovaných vláken se zde využívá jejich ohebnosti [11]. Pokud je vyžadováno trvalé spojení těchto vláken, lze použít epoxidovou pryskyřici. [3, 11].



Obrázek 1.10: (a) Konektorové spojení, při kterém V-drážky obklopují optická vlákna ze všech stran. Převzato a upraveno z [3]. (b) Uspořádání optických vláken uvnitř přesného konektoru využívající V-drážky, kde se k větší přesnosti využívá pružné membrány, která přitlačuje vlákna ke stěnám V-drážky. Převzato a upraveno z [11].

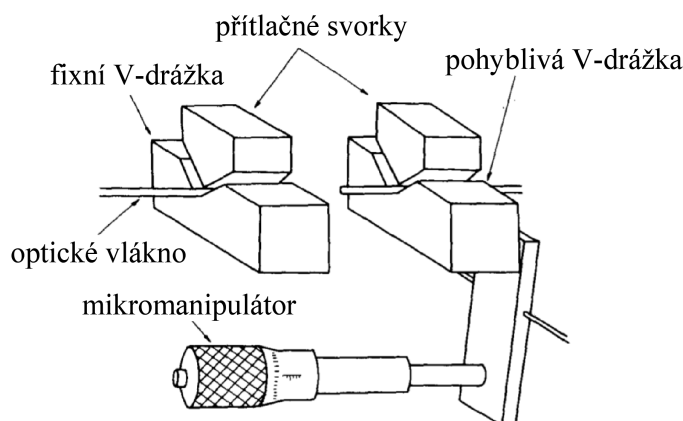
Naopak u druhého uspořádání je V-drážka přítomná pouze na jedné straně. Aby došlo ke kompenzacím vertikálních odchylek polohy vláken, využívá se tenké pružné fólie, která přitlačuje jádra optických vláken k povrchu V-drážek. Excentricita jader pak obvykle nepřesahuje $0,5\ \mu\text{m}$ [11]. Tento typ konektoru se právě díky jeho přesnější technice zarovnání používá pro jednovidová optická vlákna [11].

1.3. Justážní mechanismy pro zarovnání optických vláken

Zarovnání optických vláken nastává ve chvíli, kdy jsou konce spojovaných optických vláken náležitě upraveny. Většina technik pro justáž optických vláken používá různé modifikace mechanismu s V-drážkou. Hlavní výhodou použití V-drážky je skutečnost, že se při umístění odizolované části optického vlákna do tohoto mechanismu dosáhne přesnějšího nastavení, protože sklo obecně vykazuje menší stupeň zvlnění než je tomu například u ochranných obalů optických vláken. Je ale nutné mít na paměti, že působení V-drážky na jádro vlákna může vyvolat i různé povrchové vady [5, 6, 8].

Justáž optických vláken může být provedena pomocí několika mechanismů, které budou v následujících odstavcích podrobně rozebrány.

Jeden z nezákladnějších systému, který se používá při spojování vícevidových optických vláken, je vidět na obrázku 1.11. Optická vlákna jsou umístěna v upevňovacích mechanismech, z nichž jeden je fixní a u druhého je umožněn pohyb pomocí mikromanipulátoru. Každý mechanismus je tvořen V-drážkou, ve které je pomocí přitlačných svorek upevněno spojované optické vlákno. Vlákna je možné vůči sobě justovat pouze ve směru jejich optické osy. Proto lze tuto justážní metodu zařadit do kategorie pasivního zarovnávání [8]. Předpokládá se totiž, že vyrovnání optických os vláken je zajištěno již při výrobě V-drážky. Proto není nutné používat další mechanismus, který by zprostředkoval náklon optických vláken vůči sobě. Navíc na sesazení vícevidových vláken nejsou kladeny takové nároky na přesnost, jako je tomu u jednovidových vláken. Mezi nesporné výhody tohoto jednoduchého zarovnávacího mechanismu patří rychlost, jednoduchost a velice malé pořizovací náklady [6, 8, 12].



Obrázek 1.11: Mechanismus pro zarovnávání vícevidových optických vláken. Převzato a upraveno z [6].

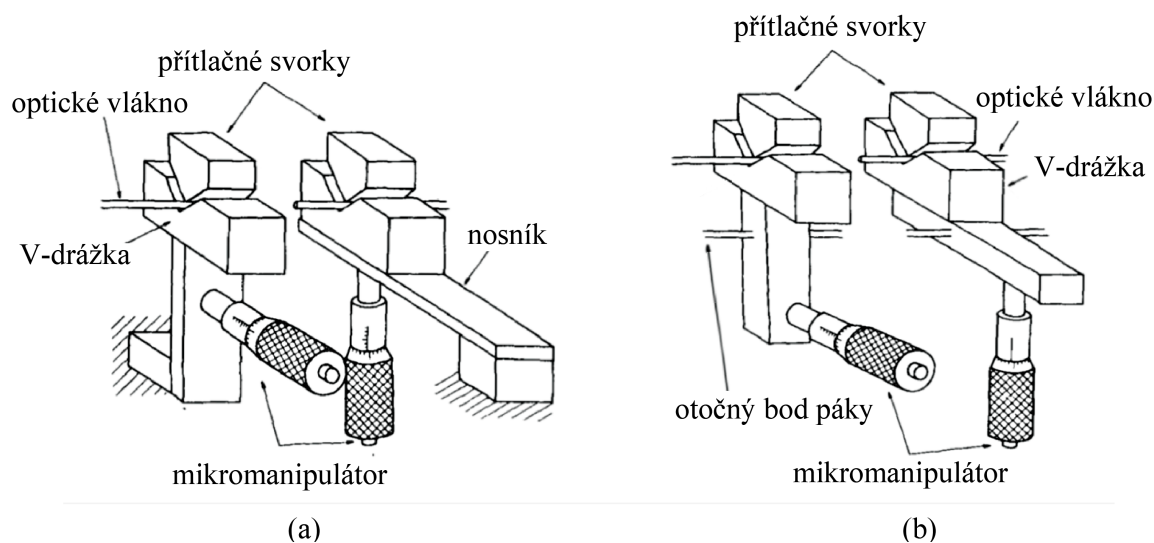
Při sesazování jednovlákových optických vláken jsou nároky na přesnost zarovnání jader těchto vláken podstatně vyšší než u výše zmiňovaných vláken vícevlákových [6].

Na začátek je třeba si uvědomit, že průměr jádra jednovlákového vlákna je asi $8\ \mu\text{m}$ a průměr opláštění činí $125\ \mu\text{m}$ [13]. V porovnání s rozměry vícevlákových vláken je zřejmé, že justáž vláken s menšími rozměry s sebou nese několik problémů. Aby nedocházelo ke ztrátám, musí být vlákna vyrobena bez nepřesností na vnějším průměru jádra. Těmito požadavky se ale snižuje reprodukovatelnost, což společně s časovým hlediskem vede ke zvyšování nákladů výroby jednovlákových optických vláken. Odchyšky od přesného nastavení os optických vláken může způsobit i smítko prachu ve V-drážce nebo nesprávné usazení vlákna v tomto upeňovacím mechanismu [6, 13].

V následujících odstavcích budou popsány jednotlivé techniky pro zarovnání jednovlákových optických vláken. V zásadě lze mechanismy využívající V-drážky rozdělit na dva základní typy a to na nosníkový typ a pákový typ [6].

U nosníkového typu (viz obrázek 1.12(a)) je mechanismus s V-drážkou, ve kterém jsou umístěna optická vlákna, upevněna na koncích nosníků. Druhý konec nosníku je pevně spojen s podložkou. Vlivem mikromanipulátorů dochází k distorzi nosníků, a tedy i k pohybu optických vláken v osách x a y [6].

Mechanismus pákového typu pracuje na jiném principu. Na obrázku 1.12(b) lze vidět, že optická vlákna upevněná v mechanismech s V-drážkou leží na kratší straně páky. Naopak mikromanipulátory působí na opačném konci, tedy na její delší straně. Otočný bod pro oba pákové mechanismy je v jedné ose. Pohybem mikromanipulátorů opět dochází k justáži vláken v osách x a y [6].



Obrázek 1.12: Mechanismy pro zarovnání jednovlákových optických vláken. (a) Nosníkový typ. (b) Pákový typ. Převzato a upraveno z [6].

Je zvykem, že namísto mikromanipulátorů se využívají spíše motory, nejčastěji piezomotory. Použití piezomotorů má řadu výhod, mezi něž bezpochyby patří přesné polohování. Avšak mezi nevýhody se společně s nutností vysokých budících napětí řadí i omezený rozsah pohybu [6, 14].

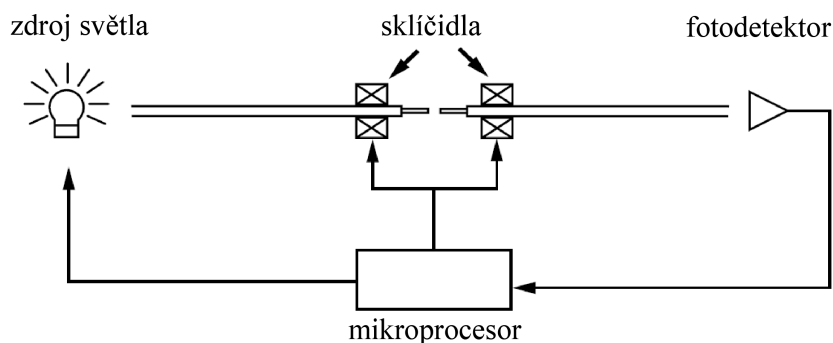
Kromě výše zmiňovaných základních justážních metod jednovlákových vláken existují dle [6] i další metody:

- systémy dálkového zavádění a dálkové detekce (RIRDS - remote injection and remote detection systems),
- systémy dálkového zavádění a lokální detekce (LDS - remote injection and local detection systems),
- systémy lokálního zavádění a lokální detekce (LIDS - local injection and detection system),
- systémy přímého pozorování.

1.3.1. Zarovnání pomocí systému dálkového zavádění a dálkové detekce

Systém dálkového zavádění a dálkové detekce (RIRDS) vyžaduje přítomnost tří pracovních míst, které jsou od sebe nějak vzdálena. Schéma této metody je znázorněné na obrázku 1.13. Signál je veden jedním ze spojovaných optických vláken ze zdroje až ke svářecímu zařízení, kde dochází k přepojení signálu na druhé optické vlákno. V bodě přepojení dochází k nastavení optimální polohy těchto optických vláken. Využívá se při tom měření výstupního výkonu na detektoru, který se nachází až za tímto přepojením. Jakmile je na detektoru zaznamenána maximální hodnota výstupního výkonu, jsou vůči sobě optická vlákna nastavena dokonale a může započít proces spojování [6, 8].

Zarovnání optických vláken pouze na základě měření výstupního signálu má ale také své nevýhody. Může totiž docházet k chybám zarovnání vlivem nesprávného chodu parbrsků mezi spojovanými vlákny, což je většinou způsobené nepřesným opracováním konců těchto optických vláken. Současně vlivem rozdílného indexu lomu skla a okolního prostředí dochází na optickém rozhraní k odrazům, a tak i ke ztrátám původního signálu. Hodnota těchto ztrát činí asi 0,3 dB [6]. Takto vzniklé ztráty se dají redukovat zmenšením velikosti vzduchové mezery [6, 8].



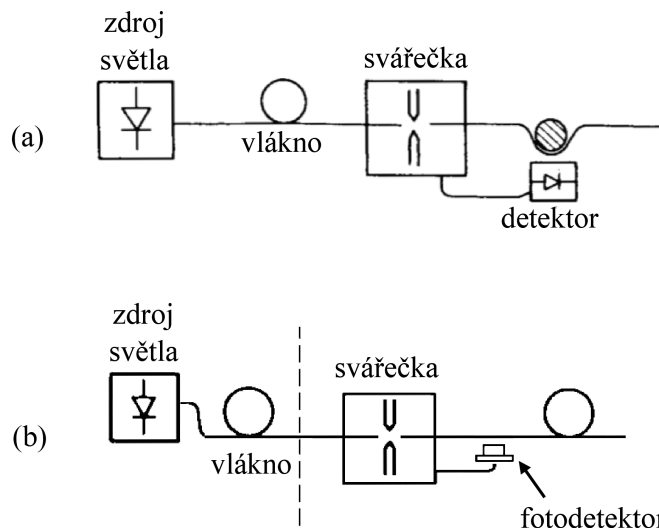
Obrázek 1.13: Justážní metoda optických vláken využívající systém dálkového zavádění a dálkové detekce. Převzato a upraveno z [8].

1.3.2. Zarovnání pomocí systému dálkového zavádění a lokální detekce

Systémy dálkového zavádění a lokální detekce (LDS) pracují na stejném principu jako předchozí metoda. Liší se ale umístěním detektoru intenzity signálu, který je v tomto případě situovaný přímo za spojením optických vláken. Signál lze detekovat dvěma různými způsoby [6].

Prvým způsobem lze vidět na obrázku 1.14(a). Využívá se zde silného ohybu jednovláknového vlákna, čímž vzniká tzv. ohebný vazební člen. Vlivem ohybu dojde k vyzáření světelného signálu skrz opláštění. Poloměr tohoto ohnutí by měl být v řádu několika milimetrů [6]. Jádra těchto vláken jsou tedy zarovnána ve chvíli, kdy dochází k maximálnímu vyzáření.

Naopak u druhého způsobu, který je vyznačen na obrázku 1.14(b), se již neparcuje s ohýbáním optických vláken. Výkon přenášeného záření se totiž detekuje v místě zeslabení optického vlákna. Jádra spojovaných optických vláken jsou přesně zarovnána v situaci, kdy dochází k minimu vyzáření výkonu.



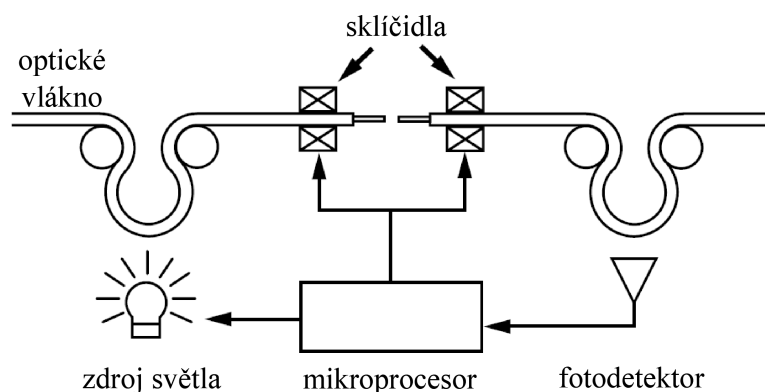
Obrázek 1.14: Justážní metoda optických vláken využívající systém dálkového zavádění a lokální detekce. Převzato a upraveno z [6].

1.3.3. Zarovnání pomocí systému lokálního zavádění a lokální detekce

U systému lokálního zavádění a lokální detekce (LIDS) se světlo nezavádí do optického vlákna volným zakončením, nýbrž použitím ohebného vazebního členu, což ukazuje obrázek 1.15. Současně i detekce záření probíhá přes tento ohebný vazební člen. Jak již název metody napovídá, světlo je do optického vlákna zaváděno těsně před připojením na další optické vlákno a detekováno je taktéž v blízkosti tohoto připojení [5, 6, 8].

V kombinaci s mikroprocesorovým zařízením slouží tento systém k přesnému nastavení jader spojovaných optických vláken ve směrech x , y a z . Navíc je pomocí této metody možné současné spojování v různých místech, což činí tuto metodu velice flexibilní. Další výhodou je i skutečnost, že vznikají velice malé ztráty. Průměrná ztráta spojení pomocí systému LID je 0,13 dB [6]. Z popisu této metody vyplývá, že umožňuje měřit ztrátu daného spoje lokálně. [5, 6].

Nevýhodou je opět nutnost ohýbání vlákna. Navíc je třeba, aby obal optického vlákna tvořil dostatečně průhledný materiál, skrz který bude zajištěn vstup nebo naopak výstup záření. Obě tyto nevýhody řeší níže uvedená metoda přímého pozorování [5, 6, 8].

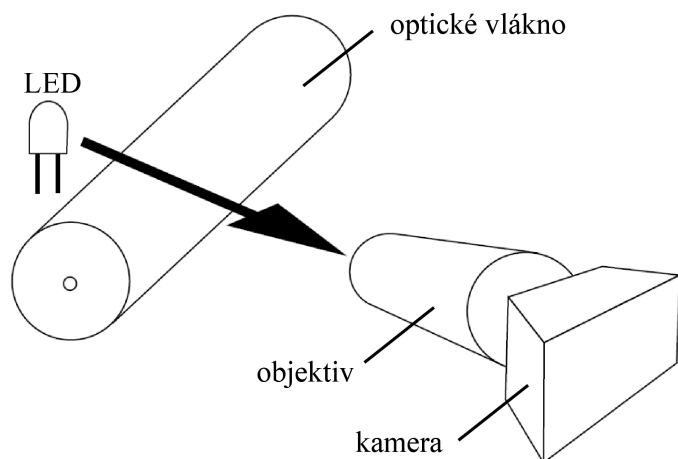


Obrázek 1.15: Justážní metoda optických vláken využívající systém lokálního zavádění a lokální detekce. Převzato a upraveno z [8].

1.3.4. Zarovnání pomocí metody přímého pozorování

Metoda přímého pozorování optického vlákna je jednou z nejpoužívanějších metod pro zarovnávání optických vláken. Zarovnávat optická vlákna lze vzhledem k jejich opláštění, což je méně přesné, avšak využívané u vícevidových optických vláken, nebo vzhledem k jádrům, což se používá převážně u jednovidových optických vláken kvůli vyšší přesnosti [6, 8].

Cílem techniky zarovnání pomocí přímého pozorování, která je někdy označována zkratkou PAS (Profil Alignment System) [8], je zobrazit zvětšený obraz spojovaných optických vláken. K tvorbě obrazu se využívá optická soustava složená ze zdroje světla, objektivu a kamery (viz obrázek 1.16). Ve většině případů se jako zdroj světla používá systém LED pro jeho téměř monochromatické osvětlení. Objektiv se může zkombinovat s přídatnými zrcadly, které společně s ním tvoří zobrazovací soustavu této metody. Díky správnému umístění zrcadel je možné zarovnání jader optických vláken pozorovat ze dvou na sebe kolmých směrů. Kamera potom slouží k převodu získaného obrazu do digitální podoby [8].

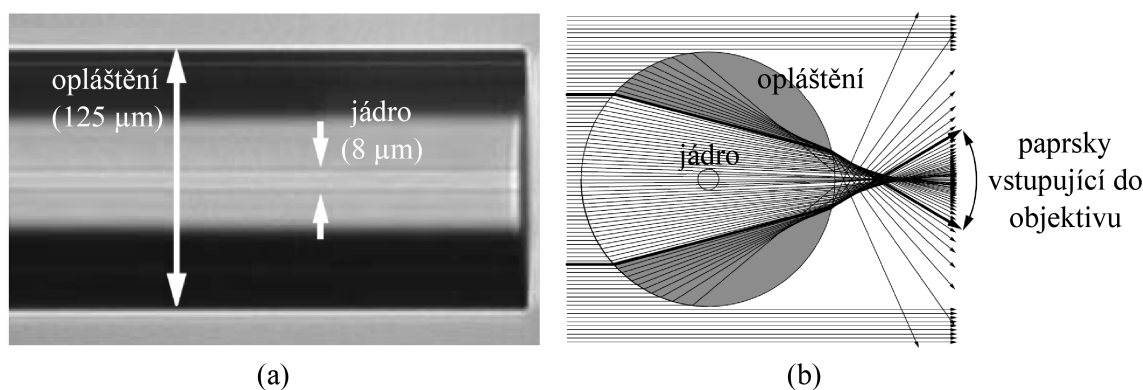


Obrázek 1.16: Schéma optických členů potřebných k zarovnání optických vláken pomocí metody přímého pozorování. Převzato a upraveno z [8].

Obrázek 1.17(a) znázorňuje příčné zobrazení jednovidového vlákna pomocí metody přímého pozorování. Lze vidět plášť vlákna, který je naznačen tmavou barvou, a dále pak

světlejší část vlákna, uvnitř které je při dostatečném zvětšení a rozlišení viditelné jádro. Je nutné podotknout, že pokud bude optické vlákno přesně zaostřeno, bude se zdát, jako by jádro tohoto vlákna zmizelo. Proto se vlákna záměrně zobrazují mírně rozostřeně, aby se zvýšila viditelnost jader sesazovaných vláken. Je nutné si povšimnout, že jádro je na tomtéž obrázku zobrazeno větší, než ve skutečnosti je. Tento efekt je dán zvětšovací účinkem pláště, kdy zvětšení jádra je přímo rovné indexu lomu opláštění [8].

Toto opláštění lze vnímat jako silnou spojnu čočku, protože zde figuruje velký rozdíl indexu lomu mezi opláštěním a okolním prostředím, nejčastěji vzduchem. Trajektorie paprsků procházejících přes jednovlákové optické vlákno lze vidět na obrázku 1.17(b). Z tohoto obrázku je zřejmé, že periferní paprsky procházející přes opláštění nevstupují do objektivu a tudíž tvoří tmavé okraje u příčného obrazu optického vlákna. Při použití objektivu s vyšší numerickou aperturou by se tyto tmavé okraje samozřejmě zmenšily. Při zarovnávání jednovlákových optických vláken je ale důležité sledovat jádra těchto vláken. Proto lze konstatovat, že tvorba tmavých okrajů na zarovnání nemá vliv. Získaný obraz rozložení intenzity je dále počítačově zpracováván. Po vyhodnocení tohoto obrazu dochází k automatickému zarovnání spojovaných optických vláken, nebo se zarovnání vyhodnotí jako konečné [6, 8].



Obrázek 1.17: Metoda přímého pozorování. (a) Příčný obraz jednovlákového optického vlákna. (b) Trajektorie paprsků při tvorbě příčného obrazu optického vlákna. Tlustou čarou vyznačené paprsky reprezentují okrajové paprsky, které jsou ještě objektivem zachyceny. Paprsky procházející zastíněnou částí opláštění se nepodílí na tvorbě obrazu, což vede k vytvoření tmavých okrajových částí. Převzato a upraveno z [8].

Tento systém zarovnání je vlivem velkého množství komponent dražší než dříve zmiňované metody, avšak je mnohem flexibilnější. Díky zobrazovací optické soustavě je totiž možné detekovat nečistoty na jádrech spojovaných vláken či na V-drážkách. Zároveň lze detekovat jistý stupeň zvlnění jader vláken nebo jejich ochranných obalů. Výhodou ale může být i možnost odhadu ztrát na vytvořeném spojení [6, 8].

Tato technika je vhodná i pro hromadné zarovnání, při kterém je využíváno zpravidla více objektivů a kamer pro detekci ve více pohledech [8].

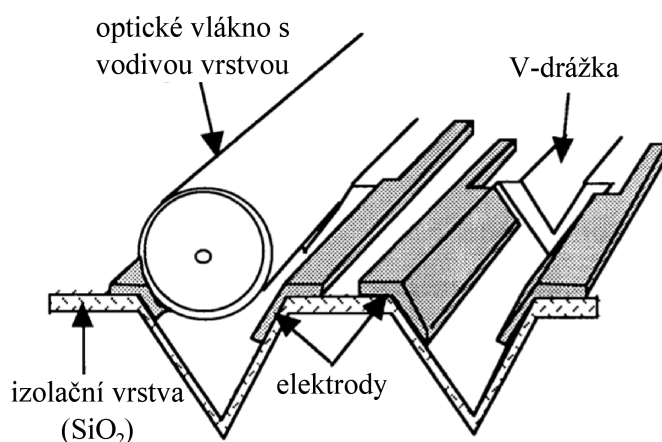
1.3.5. Speciální techniky pro zarovnání optických vláken

Mikrozarovňovací mechanismus pro spojení optických vláken

U některých aplikací, jako jsou například telekomunikační systémy, je naprosto nepřijatelné, aby spojená optická vlákna vykazovala velké ztráty. V této oblasti se využívá i vícenásobných spojení optických vláken, což koeficient ztrát samo o sobě opět zvyšuje [4].

Přesné zarovnání před samotným spojením je prvním krokem k úspěšnému výsledku. Je ale nutné pohlížet i na nemalé problémy, které s požadavkem přesného zarovnání vznikají. První komplikací je velmi obtížná výroba držáku optického vlákna, zvláště pokud je při justáži zapotřebí mikrometrická přesnost. Obrábění a následná montáž jsou také velmi nákladné. Druhým problémem je skutečnost, že samotné optické vlákno není dokonale rovné, ale vykazuje jistý stupeň prohnutí. Řešením těchto dvou problémů může být technika mikrozarovňování [4].

U mechanismu mikrozarovňování se nejdříve vyrovnají osy vláken vůči osám držáku a následně dochází k individuálnímu zarovnání os vláken pomocí mikrozarovňovacího stroje, čímž docílíme zvýšení přesnosti nastavení. Na obrázku 1.18 je vidět realizace elektrostaticky poháněného mikrozarovňovacího mechanismu. Skládá se ze samotného optického vlákna, na které je iontovým napařováním nanесena vrstva vodivého materiálu, a ze substrátu s V-drážkami, které mají širší a užší část. Zároveň lze vidět elektrody připevněné na okrajích V-drážek. Dalo by se tedy říci, že užší část V-drážky slouží jako nosník optického vlákna. Také lze pozorovat, že mezi vláknem a elektrodami je volný prostor. Ten se vyplňuje pomocí lepidla, jenž má index lomu přizpůsobený indexu lomu optického vlákna.



Obrázek 1.18: Schéma mikrozarovňovacího mechanismu optických vláken. Převzato a upraveno z [4].

Samotné mikrozarovňování nastane ve chvíli, kdy mezi vláknem a elektrodou vznikne elektrický proud. V ten okamžik se vlákno ohne směrem k této elektrodě. Celková potenciální energie systému je potom dána součtem energie ohýbající vlákno a celkové energie mezi elektrodami. Velikost vychýlení tedy závisí na hodnotě elektrického proudu mezi elektrodou a vodivou vrstvou nanесenou na optickém vlákně, ale zároveň i na délce širší části V-drážky, tedy nosníku. V momentě, kdy je nalezena správná poloha vlákna, lepidlo obklopující optické vlákno se vytvrdí a tím se spojení zafixuje [4].

Zarovnávací mechanismus optických vláken využívající grayscale technologii

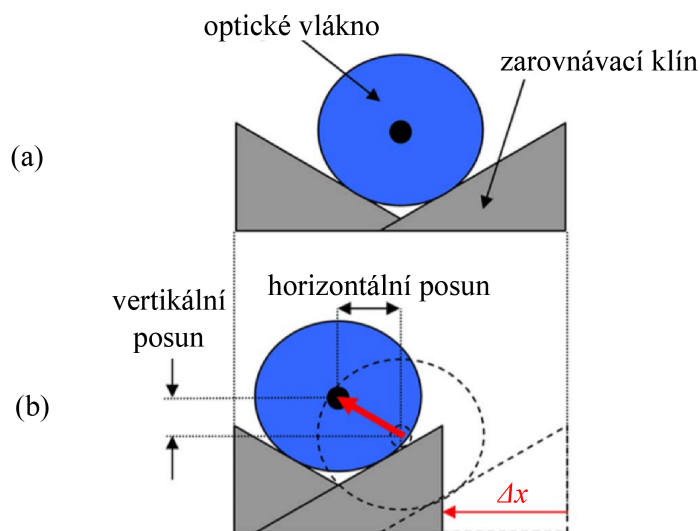
Metoda zarovnávání optických vláken využívající grayscale technologii je metodou pro automatické zarovnání optických vláken ve dvou osách. K dosažení výsledků se využívá zarovnávacích klínů. Výhodou je rychlost a přesnost tohoto zarovnání. Navíc není třeba využívat drahých a pomalých aktuátorů, pomocí kterých je v obdobných případech dosaženo zarovnání optických vláken s přesností na mikrometry, což tento systém oproti ostatním značně zvýhodňuje [15].

Tato technologie využívá pohybu několika klínů odvrácených základnami od sebe, které lze vidět na obrázku 1.19. Povrch těchto klínů musí být ve srovnání s povrchem optického vlákna hladký, aby docházelo k souvislému pohybu. Při opracování stykových ploch těchto klínů se využívá tzv. grayscale technologie, při které dochází k naprašování vrstvy křemíku a následnému leptání za sucha. Tím vzniká vhodná struktura, se kterou může být jádro justovaného optického vlákna v kontaktu.

Samotná sestava zarovnávacích klínů v principu vytváří dynamickou V-drážku. Díky posunu klínů vůči sobě je možné horizontální i vertikální nastavení polohy konce optického vlákna. Samotný pohyb je generován MEMS aktuátory. Z obrázku 1.19(b) je zřetelné, jaké pohyby mohou být vykonávány. Pokud poloha konce optického vlákna, která je naznačena na obrázku 1.19(a), bude brána jako výchozí poloha, může dojít k následujícím pohybům:

1. pohyb levého klínu způsobí pohyb vlákna směrem nahoru a doprava,
2. pohyb pravého klínu způsobí pohyb směrem nahoru a doleva,
3. pohyb obou klínů současně způsobí vertikální pohyb.

Kombinací těchto pohybů, tedy nastavením vhodného napětí na MEMS aktuátorech, dojde k nastavení konce optického vlákna do jakékoliv polohy. Celkový rozsah pohybu je vymezen krajními polohami mechanismu.



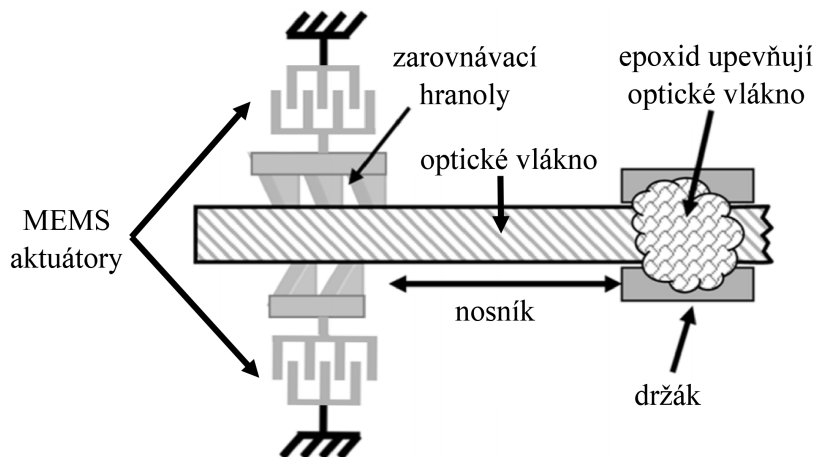
Obrázek 1.19: Princip zarovnávacího mechanismu optických vláken využívající grayscale technologii. (a) Výchozí poloha optického vlákna. (b) Při působení na jeden z klínů v ose x dojde k posunu optického vlákna v horizontálním i ve vertikálním směru. Výsledný pohyb konce optického vlákna je naznačen červenou šipkou. Převzato a upraveno z [15].

Je nutné si uvědomit, že optické vlákno je opět ukotveno ve statickém mechanismu (viz obrázek 1.20). Zarovnání se tedy provádí pouze na konci spojovaného optického vlákna.

Místo ukotvení tohoto vlákna určuje délku justované části, a lze tedy vypočítat tuhost nosníku optického vlákna k podobně jako u pružiny dle

$$k = \frac{3\pi Er^4}{4l^3}, \quad (1.2)$$

kde E je Youngův modul pružnosti, r je poloměr optického vlákna a l značí délku nosníku tohoto optického vlákna. Tuhost nosníku k je nutné brát v úvahu při výběru MEMS aktuátorů, které generují pohyb klínů. S délkou nosníku je spjatý i fakt, který říká, že pokud se bude délka tohoto nosníku zmenšovat, axiální vychýlení optického vlákna se bude naopak zvětšovat, což ve výsledku povede k větším ztrátám, než když by byl nosník delší. Aby k těmto ztrátám nedocházelo, doporučuje se délka nosníku alespoň 10 mm [15].



Obrázek 1.20: Schéma dvousého zarovnávacího mechanismu, který využívá působení klínů na optické vlákno. Převzato a upraveno z [15].

Jakmile je vlákno umístěno v požadované poloze, je nutné tuto pozici nějakým způsobem zafixovat. To by šlo do budoucna provést dvěma způsoby. První možností je trvalé zajištění polohy epoxidem nebo metodou pájení. Toto řešení ale znemožňuje další případnou justáž vláken. Navíc tyto metody mohou způsobovat mírné posunutí vzhledem k původní poloze. Druhým způsobem by mohl být mechanický blokační mechanismus, který by působil přímo na jednotlivé členy MEMS aktuátorů. Výhodou druhého způsobu je především skutečnost, že může docházet k opakovanému nastavování vlákna hned po odstranění zmiňované mechanické blokace. Tyto hypotézy jsou ale zatím předmětem výzkumu.

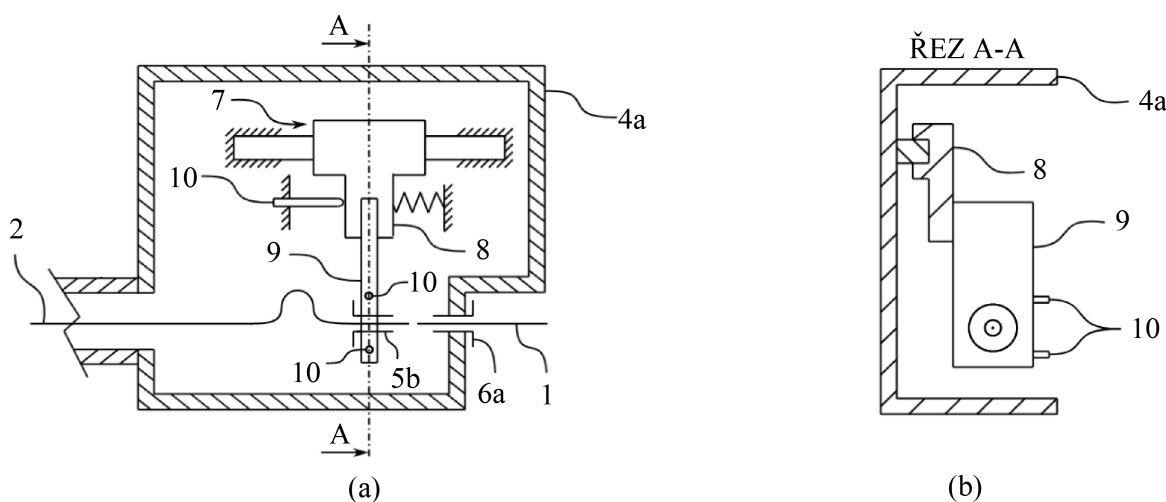
1.4. Spojení optických vláken v tlakové komoře

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tato diplomová práce je zařazena do projektu, v rámci kterého se vyvíjí speciální zařízení, díky němuž bude umožněno současné zavádění pracovního média a světla ke hrotu rastrovacího sondového mikroskopu.

Přívod pracovního média je v dnešní době stále velkou komplikací, hlavně z toho důvodu, že se ve vakuové komoře mikroskopu odehrávají difuzní a srážkové procesy při použití pracovního média [2]. Kvůli těmto procesům je velice obtížné dopravit pracovní médium na přesně určené místo vzorku. Tento problém by mohl být vyřešen zaváděním pracovního média společně se světlem.

Využívá se zde tlakové komory umístěné ve vakuovém prostoru skenovacího mikroskopu, jejíž obsah tvoří zvolené pracovní médium (plyn či kapalina). Uvnitř této tlakové komory se nachází i spojení dvou optických vláken, z nichž první je zaváděcí jednovláknové optické vlákno a druhé je duté optické vlákno [16, 17]. Tyto vlákna musí být správně sesazena, aby nedocházelo ke ztrátám zaváděného signálu.

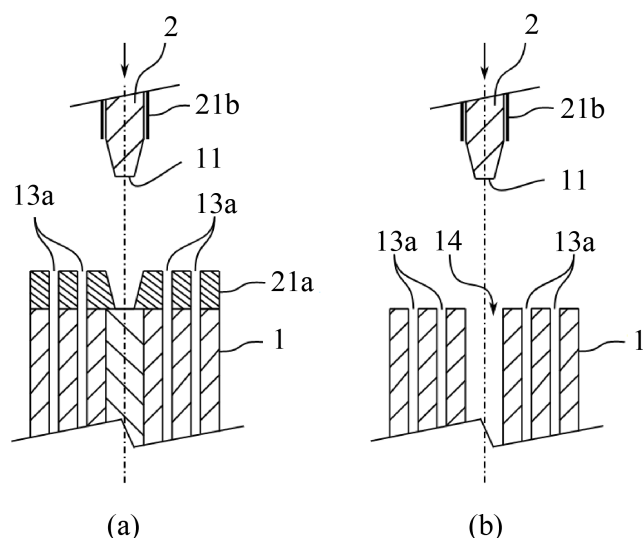
K popisu celé problematiky sesazení vláken poslouží obrázek 1.21(a), kde je vyobrazeno schéma tlakové komory, a tudíž i spojení optických vláken. Duté optické vlákno 1 je umístěno fixně v objímce boční stěny tlakové komory 4a. Naopak zaváděcí optické vlákno 2 vstupuje do tlakové komory z druhé strany. Konec zaváděcího optického vlákna 2 je opracován do tvaru hrotu s dosedací ploškou (viz obrázek 1.22) a je umístěn v přesném tříosém manipulátoru 7, díky němuž je možná justáž vlákn 2 ve třech na sebe kolmých směrech. Samotný manipulátor 7 tvoří dvě části [2], které jsou blíže znázorněny na obrázku 1.21(b). První částí je osový posuv 8, díky němuž je možný pohyb zaváděcího optického vlákna 2 v ose rovnoběžně s osou dutého optického vlákna 1. Druhou částí je příčný posuv 9, díky kterému je pomocí justážních šroubů 10 možný pohyb zaváděcího optického vlákna 2 v osách kolmých na osu dutého optického vlákna 1.



Obrázek 1.21: (a) Schéma tlakové komory umístěné ve vakuové komoře skenovacího mikroskopu. 1 - duté optické vlákno, 2 - zaváděcí optické vlákno, 4a - tlaková komora, 5b - objímka zaváděcího optického vlákna 2, 6a - objímka dutého optického vlákna, 7 - tříosý manipulátor, 8 - osový posuv, 9 - příčný posuv, 10 - justážní šrouby pro příčný posuv 9. (b) Řez tlakovou komorou 4a, kde je znázorněn princip tříosého manipulátoru 7. Převzato a upraveno z [2].

Zaváděcí optické vlákno 2 je klasické jednovláknové plné optické vlákno z křemenného skla. Je tvořeno jádrem, opláštěním a akrylátovou ochrannou vrstvou, kdy index lomu jádra musí být vždy vyšší než index lomu opláštění. Pouze v takovém případě se světelné záření díky totálnímu odrazu šíří jádrem tohoto vlákna. Je nutné si povšimnout, že hrot zaváděcího optického vlákna je pokryt vodivou vrstvou kovu 21b. Díky této vrstvě jádro vlákna neztratí své světlovodné vlastnosti, i když je opláštění tohoto vlákna před započetím justáže odstraněno.

Duté optické vlákno 1 je taktéž rozčleněno na jádro, opláštění a akrylátovou krycí vrstvu. Jádro může tvořit buď křemenné sklo (viz obrázek 1.22(a)) nebo prázdná dutina 14 (viz obrázek 1.22(b)). Justáž se touto skutečností nijak nemění, protože u obou variant je průměr jádra stejný. Opláštěním je pak nazývaná oblast s kapilárami z kře-



Obrázek 1.22: Princip spojení zaváděcího optického vlákna 2 a dutého optického vlákna 1. (a) Duté optické vlákno 1 má jádro tvořeno křemenným sklem. (b) Duté optické vlákno 1 má jádro tvořeno vzduchovou dutinou. 1 - duté optické vlákno, 2 - zaváděcí optické vlákno, 11 - dosedací ploška zaváděcího optického vlákna 2, 13a - kapiláry dutého optického vlákna 1, 14 - centrální dutina dutého optického vlákna 1, 21a - vodivá vrstva kovu na okrajích kapilár 13a, 21b - vodivá vrstva kovu nanesená na zaváděcí optické vlákno 2. Převzato a upraveno z [2].

menného skla 13a. Tyto kapiláry slouží k transportu pracovního média z tlakové komory až k pozorovanému vzorku.

Spojení zaváděcího optického vlákna 2 a dutého optického vlákna 1 musí být rozebíratelné, aby mohlo dojít k časté výměně dutého optického vlákna. Ze všech zmiňovaných zarovnávacích technik optických vláken byla jako nejlepší technika vyhodnocena metoda přímého pozorování, a to hlavně kvůli její flexibilitě. Vzhledem k výběru této techniky je nutné sestavit zvětšovací zařízení, které by bylo schopné zobrazit spojovaná optická vlákna ze dvou na sebe kolmých směrů.

2. Motivace a cíle práce

Vyvíjená přetlaková komora je unikátním zařízením, ve kterém dochází k sesazení dvou odlišných optických vláken. Jak je již známo z předchozí části této práce, signál přenášený optickými vlákny je velice slabý, a proto je nutné sesadit optická vlákna co nejpřesněji. K tomu je třeba vytvořit speciální mikroskop, který dokáže zobrazit spojení optických vláken ze dvou na sebe kolmých směrů s vysokým zvětšením. K vývoji zmíněného mikroskopu je nutné:

- navrhnout a optimalizovat optickou a mechanickou část mikroskopu,
- vytvořit výrobní dokumentaci mechanických částí mikroskopu,
- vytvořit software pro řízení mikroskopu,
- mikroskop sestavit a otestovat.

V souvislosti s vývojem mikroskopu je třeba vybrat vhodnou pozorovací techniku. Pro tento účel se bude další část práce věnovat tomuto tématu.

3. Techniky pozorování ve světelné mikroskopii

Světelná mikroskopie je zobrazovací metoda, při níž je využívána viditelná část elektromagnetického spektra k tvorbě zvětšeného obrazu daného předmětu [18]. Oblast viditelného světelného záření je ohraničena infračerveným zářením ($\lambda = 750 \text{ nm}$) a v krátkovlnné oblasti ultrafialovým zářením ($\lambda = 400 \text{ nm}$) [18]. Světlo může být obecně popsáno pomocí čtyř parametrů:

- amplitudy (intenzity),
- frekvence,
- fáze a
- polarizace [1].

Lidské oko je schopné vnímat rozdíly v amplitudě světla (intenzitě) a rozeznávat různé frekvence (vlnové délky) světelného záření. Již ale není schopno rozeznat rozdíly ve fázových posunech mezi vlnami či rozdíly ve stavu polarizace [18]. V dnešní době je ve většině případů obraz snímám na kameru, protože převod získaného signálu do digitální formy s sebou nese velké množství výhod. Jednou z nich je i kompenzace nedostatků lidského vidění a tedy získání možnosti zkoumání fáze či polarizace světla [18].

Světelné mikroskopy lze obecně rozdělit na transmisní a reflexní [19]. U transmisních mikroskopů se používá tzv. diaskopického osvětlení, což znamená, že světelné záření prochází pozorovaným předmětem, a proto se zdroj světla a detektor nachází na opačných stranách tohoto předmětu. Naopak je to u reflexních mikroskopů, kde jsou zdroj světla a kamera umístěny na stejné straně, protože se světelné záření od vzorku odrazí. Zde se využívá tzv. episkopického osvětlení [20, 19].

Mezi nejpoužívanější techniky pozorování světelné mikroskopie patří technika světlého pole, temného pole a fázového kontrastu [21]. Každá z těchto metod získává jiné informace o vzorku, a proto je někdy žádoucí metody kombinovat. Ke každé metodě je ale nutná jiná konfigurace osvětlovacího systému mikroskopu. Tato práce zmiňuje i další modifikované techniky pozorování, jako je Rheibergovo osvětlení nebo Hoffmanův modulační kontrast [20, 21].

3.1. Metoda světlého pole

Metoda světlého pole (BF - Bright Field Microscopy) je nejstarší a nejjednodušší využívanou technikou pozorování ve světelné mikroskopii. Každý světelný mikroskop se skládá z mechanické a optické části. Principem metody světlého pole je vytvoření obrazu pozorovaného předmětu, který je osvětlován osvětlovací soustavou, dále pomocí optické soustavy zvětšován a následně zaznamenáván detektorem, což může být buď lidské oko nebo kamera [20].

3.1.1. Optická soustava

Mikroskop pro pozorování ve světlém poli, někdy také nazýván jako složený mikroskop, se skládá ze dvou optických částí [1]. Prvá se nazývá osvětlovací soustava a druhou je soustava zobrazovací.

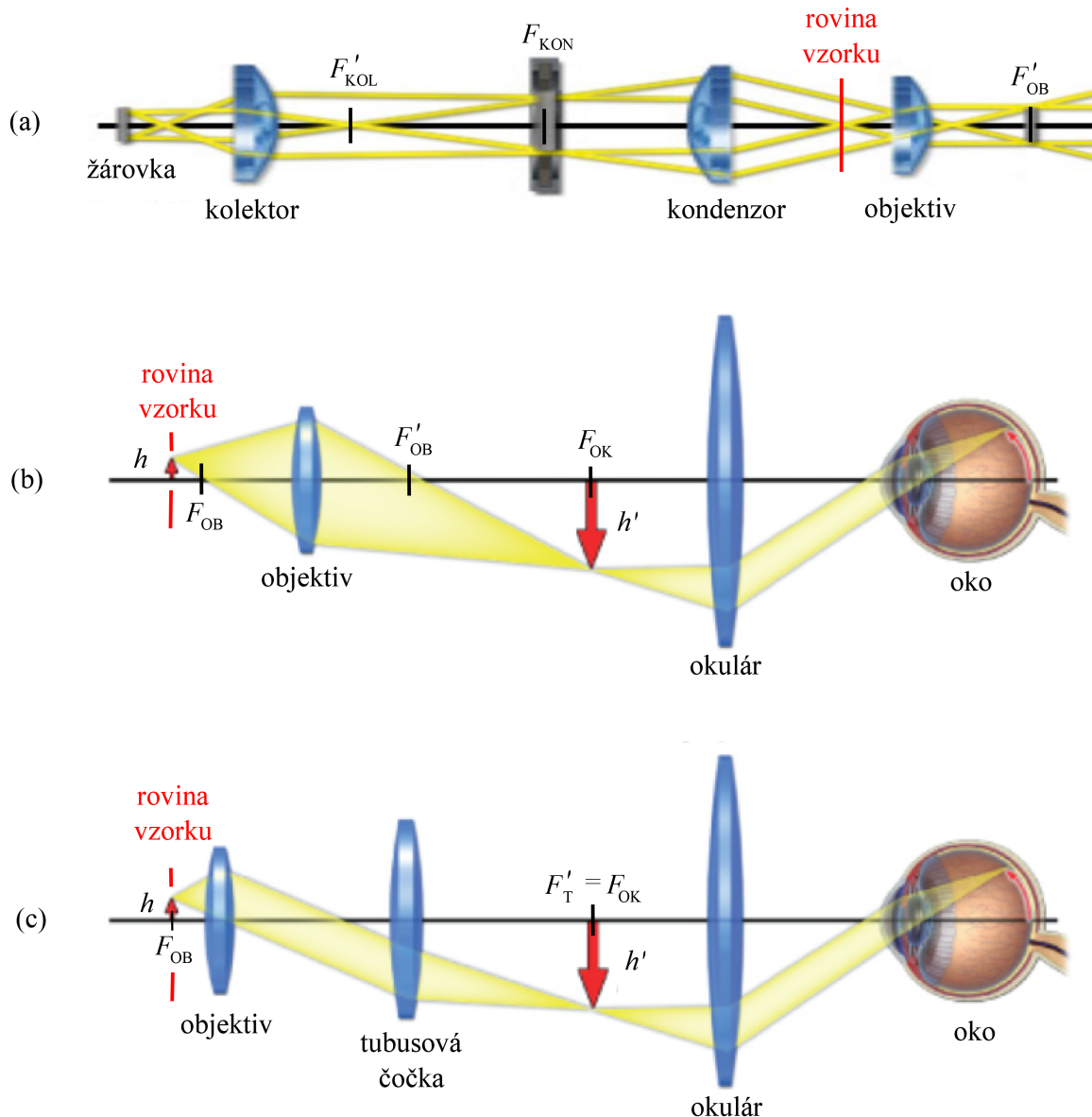
Předměty mohou být obecně rozděleny na svítící nebo osvětlené [20]. V mikroskopickém pozorování se převážně setkáváme s druhou skupinou, tedy s osvětlenými předměty [22].

Ve světelné mikroskopii se nejčastěji využívá Köhlerova typu osvětlovacího systému, jež je znázorněn na obrázku 3.1(a) [22]. Celou osvětlovací soustavu tvoří plošný světelný zdroj, kolektor a kondenzor. Kolektor zobrazuje jednotlivé body plošného světelného zdroje do zadní ohniskové roviny kondenzoru. Každý takto vzniklý bod je kondenzorem transformován na rovinnou vlnu, která osvětluje pozorovaný vzorek. Po průchodu světelného záření vzorkem vzniká obraz světelného zdroje v obrazovém ohnisku objektivu F'_{OB} . Köhlerův osvětlovací systém je omezen dvěma clonami. Aperturní clona kondenzoru, která je umístěna v předmětovém ohnisku kondenzoru, určuje numerickou aperturu osvětlovacího svazku. Druhou clonou je pak polní clona kolektoru, která je umístěna v rovině jeho ohniska F'_{KOL} , a vymezuje tak velikost osvětlovaného zorného pole [22].

Využívají se různé typy světelných zdrojů, jakými mohou být žárovky, výbojky nebo systémy LED [20]. Nejstarším z těchto světelných zdrojů je žárovka, nejčastěji halogenová. Její vlákno ale neposkytuje homogenní osvětlení, a proto je nutné použít tzv. Köhlerův osvětlovací systém, čímž dojde k rovnoměrnému osvětlení plochy vzorku [22]. Použití žárovek s sebou nese i další nevýhody. Poskytují totiž polychromatické osvětlení, což ve výsledku vede ke vzniku příčné a podélné barevné vady. Při použití achromatickejšího osvětlení, například systému LED, se již barevná vada téměř neprojevuje. Navíc dochází ke zvýšení kontrastu, což je oproti ostatním světelným zdrojům značné zvýhodnění. Kontrast lze zlepšit i použitím různých barviv v kombinaci se správným barevným filtrem [18]. Technika světlého pole obecně potřebuje silný zdroj osvětlení. Nevýhodou ale je, že světelný zdroj s vyšším výkonem produkuje i větší množství tepla, což ve výsledku může negativně ovlivnit zkoumaný vzorek.

Při transmisním režimu osvětlení dochází k prostupu světelného záření skrz pozorovaný předmět. Paprsky, které neprocházejí pozorovaným objektem pokračují dál do objektivu a tvoří světlé pozadí. Naopak paprsky, které procházejí objektem, do objektivu vstupují a slouží k jeho zobrazení [22].

Zobrazovací soustava se skládá z objektivu a okuláru, kdy objektiv leží blíže vzorku. Existují dvě konfigurace zobrazovací části složeného mikroskopu [23]. Nejjednodušším uspořádáním je mikroskop s objektivem s konečnou tubusovou délkou, který lze vidět na obrázku 3.1(b). Druhým typem je pak mikroskop s objektivem s nekonečnou tubusovou délkou, jehož schéma je vyobrazeno na obrázku 3.1(c). Tvorba obrazu u obou konfigurací je zjevná také z těchto obrázků.



Obrázek 3.1: (a) Princip Köhlerova osvětlení. F'_{KOL} - obrazové ohnisko kolektoru, F_{KON} - předmětové ohnisko kondenzoru, F'_{OB} - obrazové ohnisko objektivu. (b) Schéma složeného optického mikroskopu využívající objektiv s konečnou tubusovou délkou. h - výška předmětu, h' - výška obrazu po zobrazení objektivem, F_{OB} - předmětové ohnisko objektivu, F_{OK} - předmětové ohnisko okuláru. (c) Schéma složeného optického mikroskopu využívající objektiv s nekonečnou tubusovou délkou. $F'_T = F_{OK}$ - obrazové ohnisko tubusové čočky. Převzato a upraveno z [18, 23, 24].

U mikroskopu s objektivem s konečnou tubusovou délkou leží v rovině vzorku předmět o velikost h těsně před předmětovým ohniskem objektivu F_{OB} , aby mohl vzniknout obraz v konečné vzdálenosti. Paprsky se tedy šíří z každého bodu předmětu až k hlavním rovinám objektivu, kde jsou dále lomeny do předmětové ohniskové roviny okuláru, kde vzniká obraz o velikosti h' . Zavádí se i veličina Δ , jež značí vzdálenost obrazového ohniska objektivu F'_{OB} a předmětového ohniska okuláru F_{OK} a nazývá se optickým intervalem nebo délkou optického tubusu [20]. Objektivem vytvořený obraz, který je skutečný, zvětšený

a převrácený, se nyní stává předmětem pro okulár [1]. Jelikož leží v jeho předmětové ohniskové rovině, paprsky se po průchodu optickou soustavou okuláru šíří rovnoběžně a obraz je tedy tvořen v nekonečnu. Vystupující paprsky pak lze zachytit například okem. Nutno podotknout, že pokud by měl být obraz snímán kamerou, soustava okuláru se nahrazuje právě vhodným kamerovým systémem. Rovina čipu se pak umísťuje do obrazové roviny objektivu [1, 20, 23].

V případě, kdy je vložen předmět přímo do předmětové ohniskové roviny objektivu, je nutno použít k vytvoření reálného obrazu pozorovaného předmětu tubusovou čočku. Její ohnisková rovina, ve které vzniká obraz, je sjednocená s předmětovou ohniskovou rovinou okuláru [20]. Výhodou tohoto uspořádání je možnost vložení dalšího optického členu mezi objektiv a tubusovou čočku, aniž by měl daný optický člen vliv na zobrazení. Trasování paprsků přes okulár se již nijak neliší od předchozí konfigurace [1, 20, 23].

Na výsledném zvětšení mikroskopu Γ_m se podílí objektiv i okulár dle vzorce [20]

$$\Gamma_m = \beta'_{OB} \cdot \Gamma'_{OK}, \quad (3.1)$$

kde β'_{OB} je příčné zvětšení objektivu a Γ'_{OK} je úhlové zvětšení okuláru. Příčné zvětšení objektivu β'_{OB} lze vypočítat podle [20] pomocí optického intervalu Δ a obrazové ohniskové vzdálenosti objektivu f'_{OB} dle vztahu

$$\beta'_{OB} = -\frac{\Delta}{f'_{OB}}. \quad (3.2)$$

Naopak zvětšení okuláru Γ'_{OK} závisí na konvenční zrakové vzdálenosti l dle [20]

$$\Gamma'_{OK} = \frac{l}{f'_{OK}}, \quad (3.3)$$

kde $l = 250$ mm a f'_{OK} značí obrazovou ohniskovou vzdálenost okuláru.

Vzdálenost dvou bodů, které jsou ještě stále rozlišeny, určuje rozlišovací schopnost optické soustavy. V souvislosti s osvětlenými předměty se zavádí pro rozlišovací schopnost d pojem Raileghovo kritérium, jež lze dle [18] vypočítat pomocí vztahu

$$d = 0,61 \frac{\lambda}{NA}, \quad (3.4)$$

kde λ je vlnová délka použitého světla a NA je numerická apertura objektivu.

Společně se zvětšením (viz vztah 3.2) je charakteristickou veličinou popisující objektiv právě jeho numerická apertura NA . Je to bezrozměrná veličina, kterou lze vypočítat pomocí součinu indexu lomu n a aperturního úhlu α dle [18]

$$NA = n \cdot \sin\alpha. \quad (3.5)$$

3.1.2. Vzorčky

Technika světlého pole je vhodná pro pozorování vzorků s velkým kontrastem. Zkoumané vzorky se obecně pojmenovávají jako amplitudové objekty [18]. Důvodem je skutečnost, že tyto objekty v různé míře modulují amplitudu osvětlovacího záření.

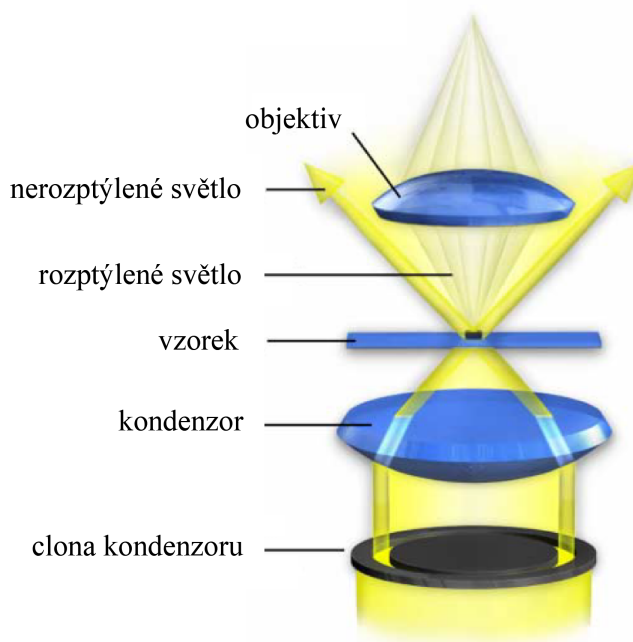
Amplitudové objekty jsou ve srovnání s jasným pozadím zobrazovány jako objekty s nízkou intenzitou a vysokým kontrastem. Pokud je ale vzorek průhledný, jako například

živá buňka, nedochází k jejich zobrazení, protože rozdíly v amplitudě mezi objektem a pozadím nejsou dostatečné. Aby však došlo k zobrazení těchto průhledných předmětů ve světlém poli, musí dojít k jejich nabarvení a tím zvýšení jejich kontrastu. Barvení ale může mít na živé buňky toxický vliv, proto se technika světlého pole pro pozorování živých transparentních organismů příliš nevyužívá. Naopak velmi dobrých výsledků je dosaženo při zobrazování neprůhledných struktur [1, 18].

Výsledný obraz metody světlého pole je tvořený paprsky modulovanými vzorkem a současně paprsky, které vzorkem ovlivněny nebyly. Výstupem tohoto mikroskopického uspořádání je tedy tmavý obraz na světlém pozadí [18].

3.2. Metoda temného pole

Metoda temného pole (DF - Dark Field Microscopy) je další technikou pozorování ve světelné mikroskopii. Mikroskop pro temné pole má stejné uspořádání jako mikroskop pro světlé pole, avšak s tím rozdílem, že se využívá různých modifikací osvětlovacího systému, konkrétně kondenzoru [18, 22, 25].



Obrázek 3.2: Chod paprsků mikroskopem při použití techniky temného pole. Převzato a upraveno z [23].

3.2.1. Optická soustava

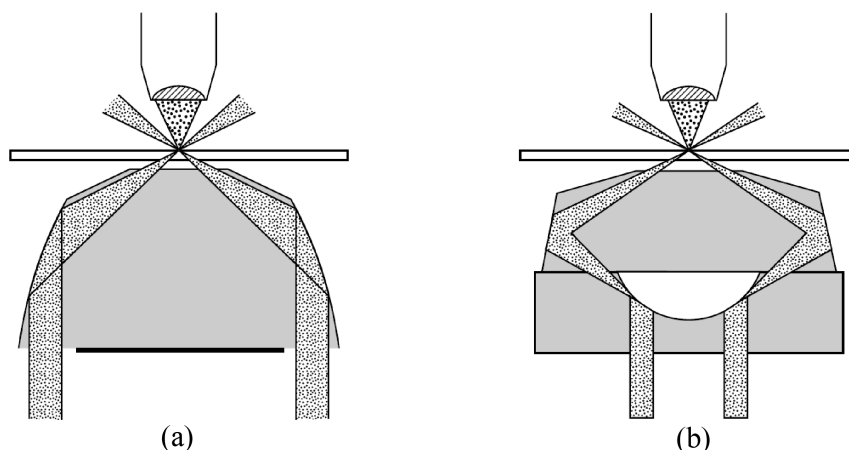
Principem metody temného pole je odstínění centrální části osvětlovacího kužele. Rovina pozorování je osvětlována nebo prosvětlována pod takovými úhly, které objektiv nemůže zachytit [20]. Aby k takové situaci došlo, musí být numerická apertura objektivu menší než numerická apertura kondenzoru. Při splnění této podmínky je bez přítomnosti vzorku zobrazováno pouze tmavé pole, odtud název techniky [18, 20, 25].

Objektiv zachycuje výhradně světlo rozptýlené vzorkem. Znamená to tedy, že se zobrazí pouze takové části pozorovaného předmětu, které rozptylují světlo tak, že je zachytáváno objektivem [18, 20, 23].

Osvětlení mikroskopu pro temné pole lze vytvořit několika způsoby [23]. Nejjednodušší princip spočívá v radiálním posunutí clony kondenzoru, díky které bude pozorovaný objekt osvětlován pouze z jedné strany šikmými paprsky. Při tomto nastavení osvětlovacího systému ale dochází k nežádoucím efektům. Vlivem jednostranného osvětlení totiž může dojít k zobrazení s určitou plastičností, kterou pozorovaný vzorek ve skutečnosti neobsahuje [18, 20].

Lepší variantou je využití speciální clony kondenzoru pro temné pole (viz obrázek 3.2), která se umísťuje do předmětové ohniskové roviny kondenzoru. Tato clona má tvar propustného mezikruží, díky kterému dojde k zastínění centrální části osvětlovacího svazku [18, 20].

Je-li vyžadováno větší zvětšení zobrazovací soustavy, využívají se různá imerzní prostředí v okolí vzorku. Kromě speciálních objektivů se využívá i zvláštních typů kondenzorů. V následujícím textu budou uvedeny dva kondenzory, které se používají ve spojení s olejovým imerzním prostředím.



Obrázek 3.3: Typy kondenzorů pro temné pole používané ve spojení s olejovou imerzí. (a) Paraboloidický kondenzor. (b) Kardioidický kondenzor. Převzato a upraveno z [18].

Prvním zástupcem je paraboloidický kondenzor, jež je tvořen pouze jedním optickým elementem (viz obrázek 3.3(a)). Clona umístěná na spodní části kondenzoru zabraňuje propouštění přímých paprsků do objektivu. Nad kondenzor se zpravidla umísťuje podložní sklíčko se vzorkem. Světlo procházející kolem clony dopadá na parabolickou odraznou plochu a je směřováno do roviny vzorku tak, aby nebylo zachycováno objektivem. Mezera mezi kondenzorem a podložním sklíčkem vyplňuje imerzní tekutina. Působením imerzní tekutiny se eliminuje sférická vada, která by se jinak projevila vlivem šikmého dopadu světla na zakřivenou boční plochu kondenzoru. Zároveň má tento typ kondenzoru zkorigovanou i barevnou vadu polohy. Nesplňuje však podmínku pro korekci komy [18, 20].

Druhým typem je kardioidický kondenzor, který je tvořený dvěma zrcadly, z nichž je jedno kulové a druhé kardioidické [20]. Výhodou použití těchto optických ploch je menší obtížnost výroby. Chod paprsků kardioidickým kondenzorem je zřejmý z obrázku 3.3(b). Svazek rovnoběžných paprsků se nejprve odráží na kulovém konvexním zrcadle a následně se šíří k povrchu periferního kardioidického zrcadla, kde se zalamuje a pokračuje přes

imerzní prostředí a krycí sklíčko až ke vzorku. Oproti předchozímu typu je u tohoto kondenzoru zkorigována i koma [18, 20].

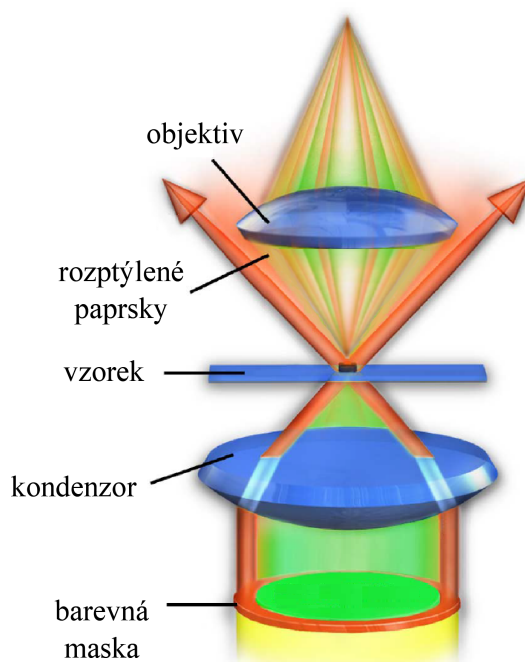
3.2.2. Vzorky

Metoda temného pole se využívá spíše k získání kvalitativních informací u vzorku. Je naprosto vhodnou technikou k zobrazování ostrých hran nebo samostatných bodových objektů. Proto se pozorování v temném poli často využívá při studiu povrchů nebo živých biologických vzorků. Výhodou je vysoká hodnota získaného signálu, což je způsobeno právě absencí pozadí [18, 19].

3.2.3. Rheinbergovo osvětlení

Rheinbergovo osvětlení je zvláštním případem techniky temného pole, který byl objeven Juliem Rheinbergem [23]. Princip spočívá v nahrazení clony temného pole barevnou clonou, která může být vyrobena z želatiny nebo ze skla.

Samotnou clonu tvoří dvě barevně odlišné části - centrální terčík a vnější prstenc. Při osvětlení vzorku získává pozadí obrazu barvu centrálního terčíku a objekty se zobrazí v barvě vnějšího prstence. Na obrázku 3.4 je použita clona se zeleným terčíkem a červeným prstencem. To tedy znamená, že se zobrazí červené objekty na zeleném pozadí [23]. Tato technika se používá pro stejný typ vzorků jako u techniky temného pole.



Obrázek 3.4: Optické schéma u metody Rheinbergova osvětlení. Převzato a upraveno z [23].

3.3. Metoda fázového kontrastu

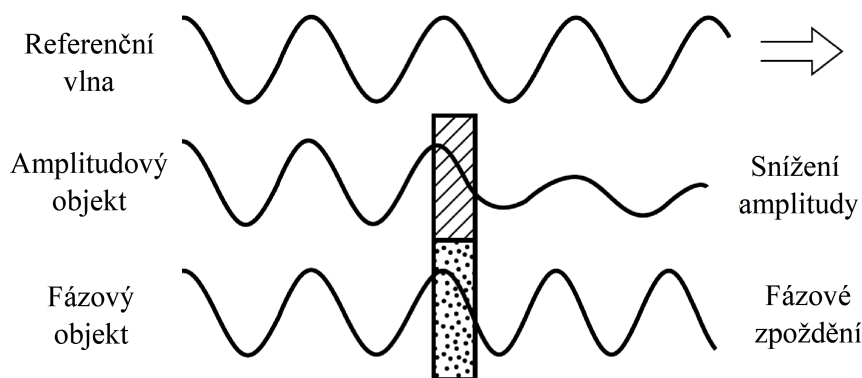
Mikroskopická technika fázového kontrastu, za jejímž objevem stojí nizozemský fyzik Frits Zernike, je někdy nazývána právě po tomto vědci jako Zernikeho fázový kontrast [23].

V roce 1935 si Zernike povšiml, že modifikací ohniskových rovin kondenzoru a objektivu lze ovlivnit fázi, případně i amplitudu vzorkem nerozptýleného záření [20]. V roce 1953 mu byla dokonce udělena Nobelova cena za fyziku [18].

Amplitudové objekty, které již byly zmiňovány v části 3.1.2, obecně mění amplitudu záření. Takové objekty jsou přirozeně nebo uměle pigmentované, tudíž mohou světelné záření do jisté míry absorbovat. Rozdíly v amplitudě jsou okem detekovány jako rozdíly v intenzitě [18, 23].

Jinak je to u fázových objektů, u kterých při průchodu světla nedochází vlivem nízké absorpce k výrazné změně amplitudy, ale pouze k fázovému posunu světelných vln. Tyto objekty jsou zpravidla transparentní. Příkladem mohou být organely, buňky či celé mikroorganismy. Fázové objekty nelze detekovat pomocí výše zmiňovaných mikroskopických technik, aniž by byly vzorky nějak upraveny. Technika fázového kontrastu přichází s řešením tohoto problému. Využívá totiž speciálního optického uspořádání, díky kterému je možné převádět rozdíly ve fázích na rozdíly v intenzitě [18]. Důležité však je, že k tomu není třeba žádného barvení, což je velká výhoda této metody [18, 23].

Problematika amplitudových a fázových objektů je znázorněna na obrázku 3.5. Vlna je obecně popsána amplitudou, vlnovou délkou a fází. Amplitudový objekt absorbuje část přenášené světelné energie, čímž se snižuje amplituda výsledné vlny. U fázového objektu dochází ke změně rychlosti šíření světla, a tedy k posunu fáze vlny.



Obrázek 3.5: Vliv amplitudových a fázových objektů na procházející světelné záření. Převzato a upraveno z [18].

Fázový objekt obecně rozděluje vlnoplochu dopadající vlny na dvě složky [18]:

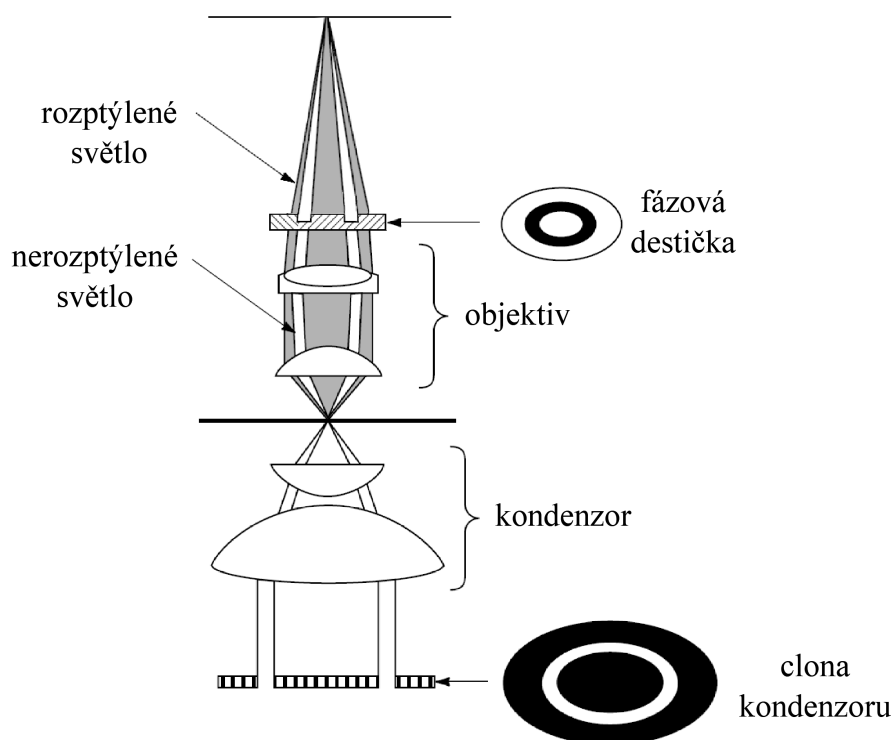
- vlnu, která se při průchodu nijak neodchyluje (S vlna, surround wave),
- vlnu, která je vzorkem rozptýlena do všech směrů (D vlna, diffracted wave).

Obě tyto vlny jsou objektivem zachyceny a fokusovány do jeho obrazové vzdálenosti, kde spolu konstruktivně či destruktivně interferují a vytváří tak výslednou vlnu P (P vlna, particle wave).

3.3.1. Optická soustava

Schéma mikroskopu pro techniku fázového kontrastu lze vidět na obrázku 3.6. Osvětlovací systém je opět vybaven clonou ve tvaru mezikruží, jako tomu bylo u techniky temného pole. Toto mezikruží je umístěno v předmětové ohniskové rovině kondenzoru a vymezuje tak kužel světelných paprsků dopadajících na vzorek. S vlny, tedy vlny neovlivněné

vzorkem, tvoří v obrazové ohniskové rovině objektivu jasný prstenec. Naopak D vlny, které jsou vlivem vzorku rozptýlovány, prochází obrazovou ohniskovou rovinou objektivu v různých místech [18].



Obrázek 3.6: Schéma mikroskopu pro fázový kontrast. Převzato a upraveno z [18].

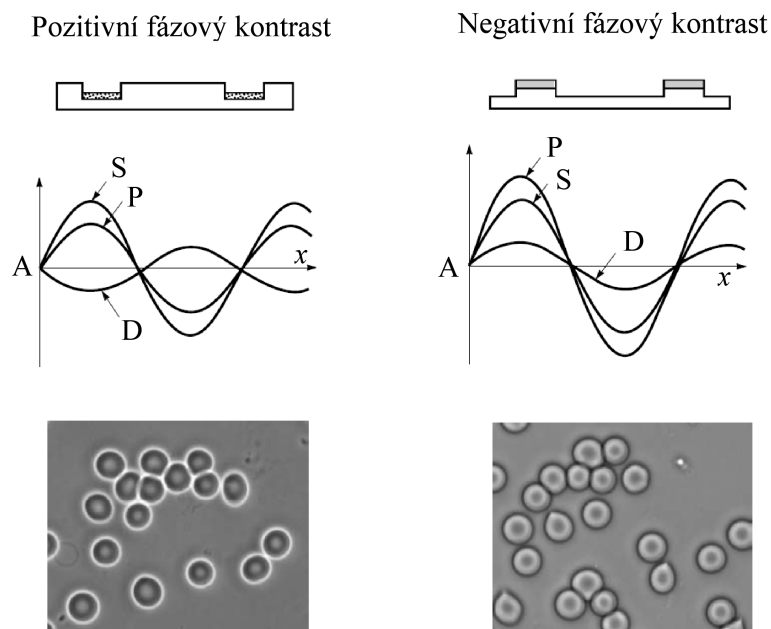
V obrazové ohniskové rovině objektivu se nachází fázová destička. Nutno podotknout, že u objektivů s větším zvětšením se fázová destička umísťuje dovnitř optické soustavy objektivu a zpravidla splývá s plochou jedné z čoček [20]. Samotnou fázovou destičku tvoří průhledný materiál, nejčastěji sklo, na kterém je nanášeno fázové mezikruží. Toto mezikruží lze vytvořit několika způsoby, avšak nejčastěji se využívá částečně propustného kovového filtru, který snižuje intenzitu S vlny až o 75 % [18]. Existují i různé velikosti fázového mezikruží. Menších rozměrů se využívá zpravidla pro suché objektivy, naopak větší rozměry lze využít ve spojení s olejovou imerzí. Je ale nutné mít na paměti, že kondenzorové mezikruží a fázová destička musí disponovat odpovídajícími průměry. Zároveň i přesné zarovnání těchto součástí hraje důležitou roli v tvorbě výsledného obrazu. Samotné vyrovnání se provádí pohybem mezikruží kondenzoru pomocí speciálních šroubů [18, 20].

Funkce fázové destičky je tedy změna fáze S vlny o $+\lambda/4$ nebo $-\lambda/4$ a zároveň částečná absorpce záření, aby se zvýšil kontrast v obraze. Je-li fázová destička konstruovaná tak, že zvětšuje optickou dráhu S vlny vzhledem k D vlně, pak nastává kladný fázový posun. Naopak pokud fázová destička zmenšuje optickou dráhu, dochází k fázovému zpoždění, tedy změně fáze o $-\lambda/4$ [18, 20].

Techniku fázového kontrastu lze tedy rozdělit na pozitivní a negativní fázový kontrast [18], což lze vidět na obrázku 3.7. Při pozitivním fázovém kontrastu dochází vlivem fázové destičky ke změně fáze S vlny o $-\lambda/4$. Celkový fázový posun vln S a D je tedy roven $-\lambda/2$, což vede k destruktivní interferenci, protože jsou zmiňované vlny v protifázi. Pozitivní fázový kontrast tedy vytváří obraz, kde se objekty s vyšším indexem lomu, než

je okolní médium, jeví jako tmavé, zatímco objekty s nižším indexem lomu jsou zobrazovány světle [18, 26].

Opakem je obraz vznikající v negativním fázovém kontrastu. Fázová destička je v tomto případě upravena tak, že fázové mezikruží je vyvýšené, a mění fázi o $\lambda/4$. Společně s faktem, že je vlna D opět vůči vlně S opožděna o $\lambda/4$, vzniká konstruktivní interference. Projevem je zobrazení objektů s vyšším indexem lomu světlo barvou (viz.obrázek 3.7 vpravo) [18, 23, 26].



Obrázek 3.7: Technika pozitivního (vlevo) a negativního (vpravo) fázového kontrastu. Na obrázku jsou shora znázorněny fázové destičky, amplitudy jednotlivých vlny (S, D a P) a ukázka výsledného obrazu v daném uspořádání. Převzato a upraveno z [18].

3.3.2. Obraz

Metoda fázového kontrastu zobrazuje rozdíly v délce optické dráhy pozorovaného vzorku. Proto je důležité si již na začátku měření uvědomit, s jakým vzorkem se pracuje. Výstupem této metody jsou vysoce kontrastní obrazy, které jsou interpretovány jako mapy hustoty.

Existují však různé nežádoucí efekty, které při této zobrazovací metodě vznikají. Tyto vady jsou nazývány fázovými artefakty [18] a projeví se intenzitou, která ale neodpovídá délce optické dráhy daného objektu.

První vadou je tzv. halo efekt, který lze vidět na okrajích zobrazovaných objektů. Halo efekt může být světlý nebo tmavý. Záleží na tom, zda je optická dráha skrz objekt větší nebo menší než optická dráha médiem. U pozitivního fázového kontrastu se okraje jeví jako světlé, naopak u negativního fázového kontrastu jsou okraje tmavé. Příčinou tvorby halo efektu je skutečnost, že určité množství rozptýlených paprsků prochází fázovou destičkou objektivu. Šířka světelného prstence generovaného neodchýlenými vlnami je totiž menší než šířka prstence fázové desky. Část rozptýlených paprsků také prochází fázovou destičkou a podílí se na tvorbě obrazu. Skutečnost, že jsou tyto vlny fázově posunuty o $\lambda/2$ způsobuje lokální obrácení kontrastu a tedy vznik halo efektu na okrajích objektů. Nejčastěji se halo efekt projevuje u velkých nízkofrekvenčních objektů, například okolo buněk. V jistých

případech lze halo efekt snížit změnou indexu lomu okolního média, například přidáním glycerolu, manitolu či dextransu [18, 23].

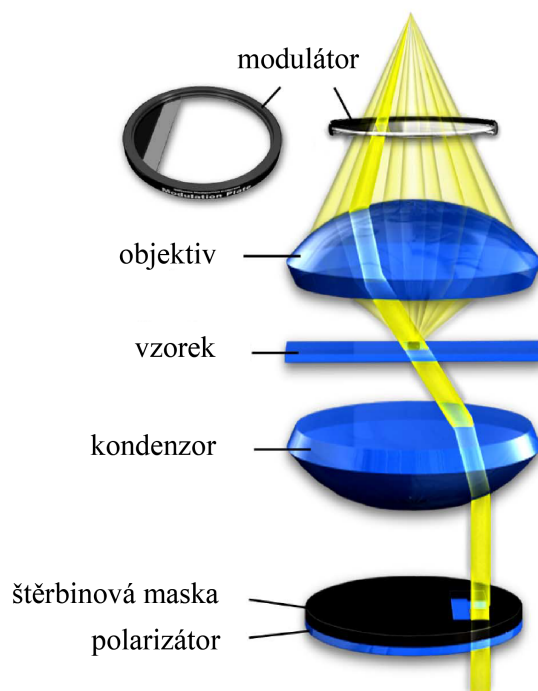
Druhým nežádoucím jevem je tzv. shade-off efekt neboli stínový efekt, který lze pozorovat u velkých a rozlehlých objektů, například u zploštělých buněk nebo planárních materiálů jako je slída či sklo [18]. Dochází totiž k tomu, že intenzita světla ve středu těchto velkých homogenních objektů bude stejná nebo podobná, jako intenzita okolního média. Světlo sice těmito objekty prochází, ale je velice málo odchylováno od původního směru. Takto nevychýlené vlnění potom vstupuje do mezikruží fázové destičky a nedochází k jeho rušení. Bez této vady by se objekt zobrazil rovnoměrně tmavý nebo světlý, podle toho, zda by byl použit pozitivní nebo negativní fázový kontrast. Vlivem stínového efektu ale dochází ke změně profilu intenzity směrem ke středu objektu [18, 23].

I přes tyto nevýhody je metoda fázového kontrastu nejvíce využívanou mikroskopickou metodou v oblasti biologie. Její největší předností je možnost pozorování živých buněk, které není nutné předem nijak upravovat [26].

3.4. Hoffmanův modulační kontrast

Hoffmanův modulační kontrast (HMC) je mikroskopická metoda, která k zobrazení fázových objektů využívá modifikaci šikmého osvětlení [23]. Tato metoda značně přispívá ke zvýšení kontrastu ve výsledném obraze.

Princip funkce mikroskopu používající Hoffmanův modulační kontrast je zřejmý z obrázku 3.8. Pozorovaný objekt je osvětlován šikmým svazkem paprsků. Jakmile světelné záření projde vzorkem, vstupuje do objektivu, ať už je rozptýlené či nikoliv. Na rozdíl od Zernikova fázového kontrastu je Hoffmanův modulátor navržen tak, aby neměnil fázi vln. Výsledný obraz se pak jeví trojrozměrně se zvýšeným kontrastem.



Obrázek 3.8: Princip funkce Hoffmanova modulačního kontrastu. Převzato a upraveno z [23].

Do předmětové ohniskové roviny kondenzoru se vkládá polarizační filtr a clona s obdélníkovou šterbinou, která je vůči středu decentrována. Pozorovaný vzorek je vlivem umístění této šterbiny osvětlován šikmým svazkem paprsků. V obrazové ohniskové rovině objektivu je umístěn modulátor, což je druhá nezbytná součást Hoffmanova modulačního kontrastu. Modulátorem je optický amplitudový prostorový filtr, na kterém jsou tři oblasti s různou propustností T pro světelné záření. Zkraje je umístěn tmavý proužek, který propouští méně než 1 % dopadajícího světla [26]. Následuje šedý proužek, jehož propustnost je asi 15 % [26]. Zároveň se tento šedý proužek překrývá s obrazem šterbiny kondenzorové masky. Zbývá část Hoffmanova modulátoru je neabsorbující, tedy propustná pro téměř 100 % procházejícího světelného záření [23, 26].

Výhodou Hoffmanova modulačního kontrastu je využití celé numerické apertury objektivu, pomocí které se objekt zobrazí s vysokým rozlišením a kontrastem. Při zúžení šterbiny ve cloně kondenzoru lze pomocí této techniky dokonce dosáhnout zaostření na jednu rovinu pozorovaného vzorku bez rušivých signálů z oblastí pod a nad touto rovinou zaostření.

3.5. Výběr vhodné techniky pro zarovnání optických vláken

Jak je již známo z části 1, pozorovaným předmětem je spojení optických vláken. Tento předmět bude pomocí osvětlovacího systému prosvětlován, a proto je nutné používat transmisní uspořádání mikroskopu. Zároveň je nutností velké zvětšení pozorovaných optických vláken, aby mohlo dojít k co nejpřesnějšímu sesazení.

Optické vlákno je vysoce transparentní předmět a tudíž ho lze zařadit do kategorie fázových objektů. V tomto ohledu by tedy bylo vhodné použít techniku fázového kontrastu. Ta ale vyžaduje zásah do osvětlovací i do zobrazovací soustavy, což není vhodné. Podobný zásah do optické části mikroskopu je nutný i u Hoffmanova modulačního kontrastu.

Optické vlákno je obecně tvořeno materiálem, jehož index lomu se liší od indexu lomu okolí. Při použití techniky temného pole bude vlivem specifického osvětlení toto vlákno zobrazeno s tmavým středem a světlými okraji. Jelikož je pozadí při této technice tmavé, vznikne velmi kontrastní obraz. Nevýhodou je ale opět nutnost použití speciální clony, tentokrát ve spojení s kondenzorem. Stejný problém vzniká i při použití Rheinbergova osvětlení.

Naopak u techniky světlého pole vznikne obraz optického vlákna se světlým středem a tmavými okraji (viz obrázek 1.17), z čehož plyne, že okraje i jádro optického vlákna budou opět dobře zřetelné a zvětšené. Metoda světlého pole však nevyžaduje žádnou modifikaci osvětlovacího systému.

Jelikož je v návrhu osvětlovacího systému použit kvůli omezenému prostoru pouze systém LED, není možné dosáhnout Köhlerova osvětlení a tudíž není možné ani zasahovat do osvětlovacího systému.

V reakci na výše zmiňovaná kritéria a zhodnocení jednotlivých metod byla jako nejvhodnější mikroskopická technika pro navrhovaný mikroskop zvolena technika světlého pole. Hlavním důvodem je jednoduchost její realizace.

4. Návrh optického systému

Před samotným optickým návrhem je nutné, abych stanovila základní požadavky pro konstruovaný mikroskop. Jak je známo z části 1.4, optická vlákna budou sesazena pomocí metody přímého pozorování. Tato metoda je založena na prosvětlování optických vláken, která jsou objektivem zvětšována a následně zobrazována na kameru. Aby došlo k co největší přesnosti nastavení, je nutné, aby byla vlákna pozorována pod velkým zvětšením. Z tohoto důvodu je nutné navrhnout mikroskop, který by byl schopen zobrazit sesazení těchto optických vláken.

4.1. Výchozí parametry optického systému

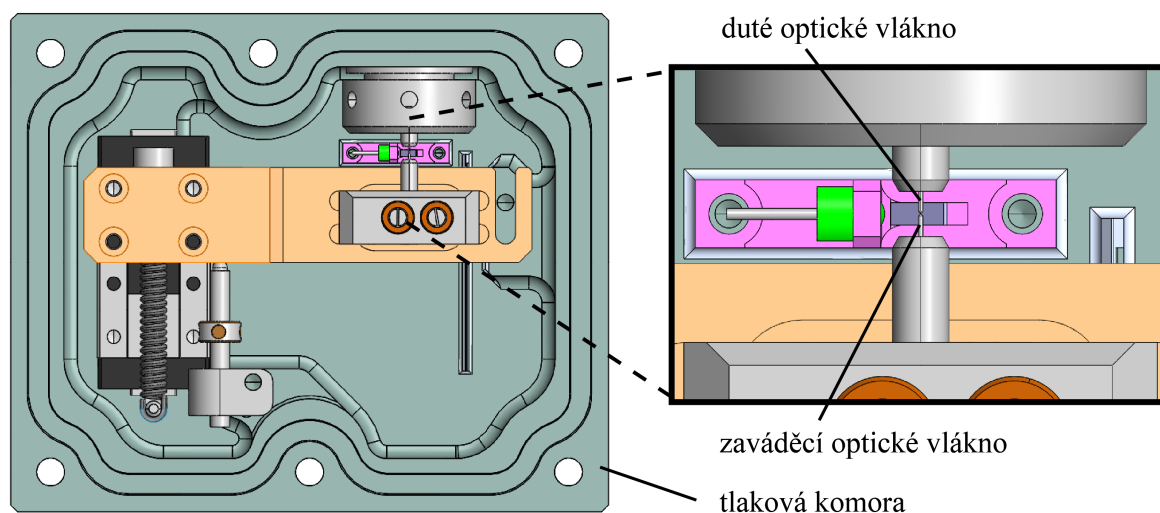
Současné řešení přetlakové komory využívá plné zaváděcí optické vlákno a duté optické vlákno, přičemž obě vlákna jsou jednovidová. Při přenosu signálu je nutné, aby docházelo k minimálním ztrátám světelného záření. Z tohoto důvodu se musí použít speciální optická vlákna, která disponují nízkým útlumem.

Zaváděcí optické vlákno typu S405-XP je konstruováno jako plné křemičité optické vlákno, které je určené pro vlnové délky od 400 nm do 680 nm. Průměr jádra vlákna je 3 μm , průměr opláštění je $125 \pm 1 \mu\text{m}$ a průměr akrylátového povlaku je $245 \pm 15 \mu\text{m}$ [16].

Druhým spojovaným vláknem je duté optické vlákno, které lze využít ve dvou konfiguracích znázorněných na obrázku 1.22. Prvním možným typem je duté optické vlákno, jehož jádro tvoří křemenné sklo. Lze využít ale i druhý typ dutého optického vlákna, jehož jádro je tvořeno prázdnou dutinou [2]. V současném řešení se využívá dutého optického vlákna LMA-5, které disponuje průměrem křemenného jádra $5 \pm 0,5 \mu\text{m}$, vnějším průměrem opláštění $125 \pm 2 \mu\text{m}$ a průměrem akrylátového povlaku $245 \pm 10 \mu\text{m}$. Tento typ vlákna lze využít pro přenos vlnových délek od 400 nm do 1700 nm [17].

Je nutné si povšimnout, že průměr zmiňovaných vláken se vzájemně liší. Je totiž nutné, aby zaváděcí optické vlákno bylo vsunuto do dutého optického vlákna, a nedocházelo tak ke ztrátám. Konec zaváděcího optického vlákna je v reakci na tento požadavek speciálně upraven seříznutím do tvaru kužele s dosedací ploškou. Zároveň jsou okraje tohoto jádra pokryty kovovou vrstvou, aby nedocházelo ke ztrátě světlovodných vlastností [2].

Sesazovaná optická vlákna jsou uložena v tlakové komoře, kterou lze vidět na obrázku 4.1. V této komoře jsou umístěny i mechanické části, které zajišťují samotnou justáž optických vláken v radiálním i axiálním směru optické osy vláken. Taktéž je zde situována osvětlovací soustava tvořená systémem LED, která emituje světelné záření o vlnové délce $\lambda = 532 \text{ nm}$. Mikroskop tedy musí být modelován s ohledem na zástavbový prostor, který je určený umístěním optických vláken v této tlakové komoře. Nutno podotknout, že návrh tlakové komory vytvořil Ing. Zbyněk Dostál, Ph.D.



Obrázek 4.1: Tlaková komora pro umístění sesazovaných optických vláken.

Jedním z hlavních parametrů, který je určený zástavbovým prostorem, je pracovní vzdálenost objektivu WD (Working Distance). Je to vzdálenost předmětu a první plochy čočky objektivu. Dle parametrů tlakové komory musí pracovní vzdálenost WD dosahovat minimální hodnoty 10,6 mm, protože bližší umístění objektivu k optickým vláknům není možné.

4.1.1. Optická vlákna jako předmět

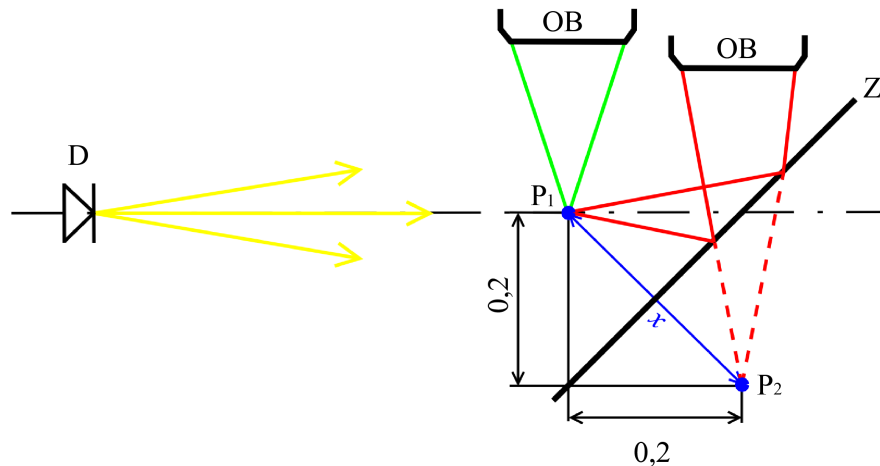
Při sesazování zmiňovaných optických vláken jsou kladeny vysoké nároky na přesnost. Pokud by mikroskop tato optická vlákna zobrazoval pouze v přímém směru pohledu, mohlo by se zdát, že jsou vůči sobě najustovaná dokonale. Avšak při bočním pohledu na tyto vlákna by justáž nemusela být zcela přesná a naopak. Pro vyřešení tohoto problému je nutné, aby mikroskop zobrazoval spojení optických vláken ve dvou na sebe kolmých směrech, k čemuž napomáhá rovinné zrcadlo Z , které je vůči optické ose osvětlovacího systému naklopeno o 45° (viz obrázek 4.2).

Výsledkem této úvahy je vznik dvou předmětů, z nichž prvním je reálné spojení optických vláken P_1 a druhým je jeho boční odraz v zrcadle P_2 . Oba tyto předměty, mezi kterými musí mikroskop přeastřovat, leží v rovině kolmé na povrch zrcadla Z .

Jsou dva způsoby, jakými lze přeastření dosáhnout. Prvním způsobem je pohyb kamery, při němž ale dochází k tvorbě obrazu v odlišných oblastech zorného pole a navíc je nutné výrazné přeastření kamery. Druhým, lepším, způsobem přeastřování je pohyb objektivu. Ke správnému sesazení optických vláken je nutné použít mikroskopický objektiv s vysokým rozlišením d a tedy s vysokou numerickou aperturou NA . Tyto objektivy ale mají malé zorné pole a současně malou hloubku ostrosti, a tudíž nejsou schopné zobrazit výše zmiňované přeastřené předměty najednou. Z tohoto důvodu je nutné, aby se objektiv OB pohyboval a tak přeastřoval mezi danými přeastřeny.

Na obrázku 4.2 jsou naznačeny i základní rozměry přeastřového prostoru. Pro přeastření je nutné, aby objektiv urazil vzdálenost x , která je naznačena modrou barvou. Tuto vzdálenost lze jednoduše spočítat. Její hodnota je

$$x = 0,283 \text{ mm.} \quad (4.1)$$

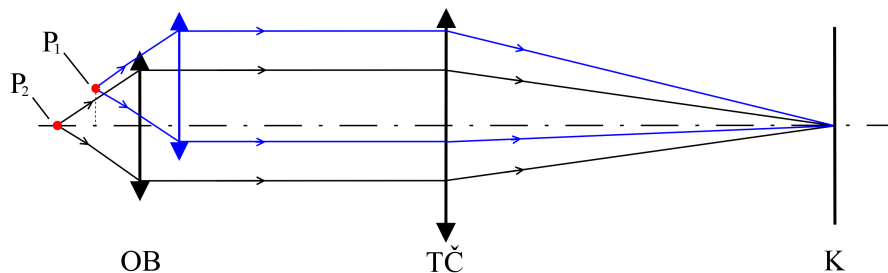


Obrázek 4.2: Schéma rozmístění předmětů P_1 a P_2 . P_1 - reálné spojení optických vláken, P_2 - odraz reálného spojení v zrcadle Z , D - dioda, OB - pohybující se objektiv, Z - rovinné zrcadlo, x - vzdálenost předmětů.

4.2. Optické schéma mikroskopu

Optická část navrhovaného mikroskopu bude využívat konfiguraci světelného mikroskopu s objektivem s nekonečnou tubusovou délkou (viz. obrázek 3.1(c)), k čemuž je třeba objektiv, tubusová čočka a kamera.

Již výše bylo zmiňováno, že mikroskop musí přeastřovat mezi dvěma předmětovými body. Kamera a tubusová čočka ale musí být fixně uloženy na svém místě, tudíž jediná optická komponenta, kterou lze pohybovat, je objektiv.



Obrázek 4.3: Paraxiální zobrazení optickou soustavou mikroskopu. P_1 - mimoosový předmětový bod, P_2 - osový předmětový bod, OB - objektiv, $TČ$ - tubusová čočka, K - kamera.

4.3. Optická simulace

Pro vytvoření modelu mikroskopu, který je výstupem práce, musí být navrženy vhodné typy optických komponent. Takto vybrané optické součásti je následně třeba zanést do optického softwaru Zemax, díky kterému dojde k vypočtení základních rozměrů optické části mikroskopu.

4.3.1. Objektiv

Prvním optickým členem mikroskopu je objektiv, jehož parametry určují rozlišovací schopnost celého mikroskopu dle vztahu 3.4. Lze tedy konstatovat, že rozlišovací schopnost

optického systému lze ovlivnit změnou vlnové délky použitého světelného záření λ nebo numerické apertury NA [1]. V současném řešení přetlakové komory je k osvětlení optických vláken využit systém LED, který emituje světelné záření o vlnové délce 532 nm. Jediným parametrem, který tedy může být zvolen, je numerická apertura objektivu NA . Je však třeba, aby její hodnota byla co nejvyšší a objektiv tak pojal co největší kužel světelného záření, které by se podílelo na vzniku výsledného obrazu.

Ke konstrukci mikroskopu pro sesazování optických vláken byl v souladu s výše zmiňovanými podmínkami vybrán objektiv Olympus LMPLFLN 20X (viz obrázek 4.4). Tento typ objektivu byl z komerčně dostupných mikroskopických objektivů nalezen jako jediný, který má jak dostatečnou numerickou aperturu NA , tak i pracovní vzdálenost WD . Objektiv disponuje zvětšením $\beta'_{OB} = -20$, numerickou aperturou $NA = 0,4$, ohniskovou vzdáleností $f = 9$ mm a pracovní vzdáleností $WD = 12$ mm [27].



Obrázek 4.4: Objektiv Olympus LMPLFLN 20X použitý pro konstrukci optické části mikroskopu [27].

4.3.2. Tubusová čočka

Je zvykem používat tubusovou čočku, která je výrobcem objektivu doporučována. Pro konstrukci mikroskopu byla vybrána tubusová čočka s označením TTL180-A (viz obrázek 4.5), která disponuje ohniskovou vzdáleností 180 mm a pracovní vzdáleností 130 mm [28]. Tuto tubusovou čočku lze využít pro rozsah vlnových délek od 400 nm do 750 nm, což je taktéž žádoucí, protože osvětlovací dioda emituje světelné záření o vlnové délce 532 nm.



Obrázek 4.5: Tubusová čočka TTL180-A použitá pro konstrukci optické části mikroskopu [28].

4.3.3. Kamera

Získaný obraz bude snímán na kameru, která umožní digitalizaci obrazu. Pro účely navrhovaného mikroskopu je vhodné použít kameru s CMOS čipem, kvůli nižšímu čtecímu šumu a obecně rychlejšímu vyčítání. Taktéž je žádoucí, aby kamera disponovala dostatečnou velikostí aktivní plochy čipu a tím dovolila pozorování předmětu s velkým zorným polem. Jelikož je pro osvětlení použit úzkopásmový zdroj, postačí monochromatický typ kamery, protože snímání barevného obrazu by nebylo efektivní.

Pro návrh mikroskopu byla vybrána kamera s označením C1-5000A od společnosti Moravian Instruments (viz obrázek 4.6). Tento typ kamery disponuje rozlišením 2464 x 2056 pixelů a hodnotou čtecího šumu $2,2 e^-$ RMS. Velikost aktivní plochy senzoru kamery je 8,50 x 7,09 mm a obsahuje pixely o velikosti 3,45 μm [29].



Obrázek 4.6: Kamera C1-5000A použitá pro konstrukci optické části mikroskopu [29].

4.3.4. Optický model v programu Zemax

Parametry optických členů byly zaneseny do softwaru Zemax, kde došlo k vypočtení základních rozměrů optického schématu mikroskopu. Bylo vytvořeno pouze paraxiální schéma optické soustavy, protože výrobce objektivu ani tubusové čočky neuvádí požadované parametry, pomocí kterých by mohlo dojít k namodelování reálného zobrazení těmito optickými komponentami.

Výpočty byly prováděny pro dvě konfigurace. První konfigurace řeší situaci, kdy mikroskop zobrazuje odraz optických vláken v rovinném zrcadle (viz tabulka 4.1). Naopak u druhé konfigurace se zobrazuje reálné spojení optických vláken (viz tabulka 4.2).

Z tabulek je zřejmé, z jakých částí se optický systém mikroskopu skládá. Jako první je rovina předmětu. Od objektivu, což je druhá část optického systému, je rovina předmětu vzdálena o jeho ohniskovou vzdálenost f_{OB} , která činí 9 mm. Jelikož je předmět umístěn přímo v předmětovém ohnisku objektivu F_{OB} , paprsky vycházející z jednoho bodu předmětu se budou po průchodu objektivem šířit rovnoběžně. Dalším povrchem je aperturní clona objektivu, která leží v obrazovém ohnisku objektivu F'_{OB} . Díky rovnoběžnému šíření paprsků může být vzdálenost objektivu a tubusové čočky, která je dalším optickým členem soustavy, zcela libovolná. Doporučuje se však, aby mezi těmito dvěma komponentami byl rozestup alespoň 100 mm [20]. Tubusová čočka následně fokusuje paprsky do své ohniskové roviny, která leží 180 mm za touto čočkou. V tomto místě leží i rovina CMOS čipu kamery, na kterou bude výsledný obraz snímán. Celkový rozměr optického systému je 305 mm.

Tabulka 4.1: Parametry optické soustavy mikroskopu - konfigurace 1.

Povrch: Typ		Poznámka	Tloušťka (mm)	Apertura (mm)	Ohnisková vzdálenost (mm)	Excentricita (mm)
OBJ	Standardní povrch	PŘEDMĚT	9,0	0,02	-	-
1	Paraxiální povrch	OBJEKTIV	9,0	7,86	9,0	0,0
STO	Standardní povrch	APERTURA	107,0	7,86	-	-
3	Zalomení souřadnicového systému	-	0,0	0,00	0,0	0,0
4	Paraxiální povrch	TUBUSOVÁ ČOČKA	180,0	35,0	180,0	0,0
IMA	Standardní povrch	KAMERA	-	0,40	-	-

Tabulka 4.2: Parametry optické soustavy mikroskopu - konfigurace 2.

Povrch: Typ		Poznámka	Tloušťka (mm)	Apertura (mm)	Ohnisková vzdálenost (mm)	Excentricita (mm)
OBJ	Standardní povrch	PŘEDMĚT	9,0	0,02	-	-
1	Paraxiální povrch	OBJEKTIV	9,0	7,86	9,0	0,0
STO	Standardní povrch	APERTURA	106,7	7,86	-	-
3	Zalomení souřadnicového systému	-	0,0	0,00	0,0	0,3
4	Paraxiální povrch	TUBUSOVÁ ČOČKA	180,0	35,0	180,0	0,0
IMA	Standardní povrch	KAMERA	-	0,40	-	-

Je však nutné si povšimnout vzdálenosti mezi aperturní clonou objektivu a tubusovou čočkou. Pro první konfiguraci je tato hodnota rovna 107 mm. Avšak u druhé konfigurace je vzdálenost mezi těmito komponentami menší a činí 106,7 mm. To je způsobeno posunem předmětu pro druhou konfiguraci o 0,3 mm. Tento rozměr byl již popisován v souvislosti s obrázkem 4.2.

Na závěr lze říci, že trasováním paprsků v softwaru Zemax byla ověřena správnost obrázku 4.3, který demonstruje optické schéma navrhovaného mikroskopu.

4.3.5. Výsledné parametry mikroskopu

Celkové zvětšení mikroskopu je vlivem absence okuláru dáno zvětšením objektivu (viz vztah č. 3.1). Jelikož objektiv vytváří převrácený obraz, i výsledné zvětšení mikroskopu Γ_m bude záporné:

$$\Gamma_m = -20. \quad (4.2)$$

Je nutné si uvědomit, že opláštění většího ze spojovaných optických vláken, tedy du-tého optického vlákna, má velikost $125 \mu\text{m}$ [17]. Lze tedy říci, že tato hodnota je velikost pozorovaného předmětu. Ze znalosti vztahu pro zvětšení mikroskopu Γ_m podle [20]

$$\Gamma_m = \frac{y'}{y}, \quad (4.3)$$

kde y je velikost předmětu a y' je velikost obrazu lze vypočítat velikost obrazu y' vytvoře-ného celým mikroskopem jako

$$y' = \Gamma_m \cdot y = -20 \cdot 125 = -2500 \mu\text{m}. \quad (4.4)$$

To tedy znamená, že výsledný obraz pokryje na CMOS čipu kamery plochu o velikosti $2,5 \text{ mm}$. Plocha CMOS čipu použité kamery má velikost $8,50 \times 7,09 \text{ mm}$, tudíž lze říci, že tato kamera je dostačující. Jelikož má jeden pixel velikost $3,45 \mu\text{m}$, lze říci, že výsledný obraz bude zobrazen na $2500/3,45 = 725$ pixelů.

Rayleighovo rozlišení mikroskopu pro zvolenou vlnovou délku a objektiv je rovno $811,3 \text{ nm}$ (viz vztah 3.4). Nejmenší detail, který bude mikroskop zobrazovat, je jádro zaváděcího optického vlákna, jehož velikost činí $3 \mu\text{m}$ [16]. Objektiv je tedy schopen rozli-šit jádro na $3,7$ bodů, což značí, že i vybraný objektiv je dostačující. Toto jádro zaváděcího optického vlákna se zobrazí na $17,4$ pixelů.

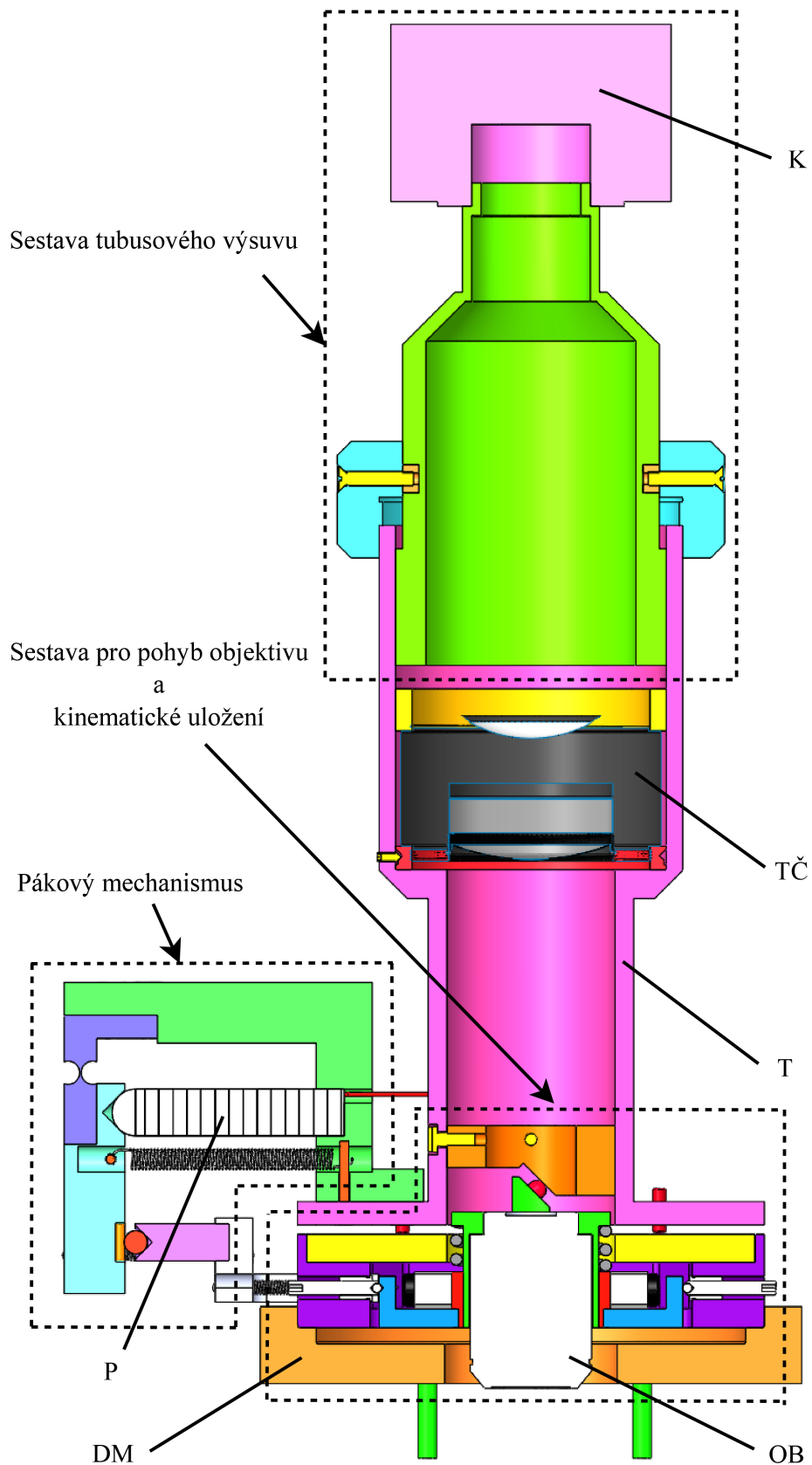
Závěrem lze říci, že společně se správným optickým návrhem mikroskopu byly vhodně zvoleny i všechny optické komponenty tvořící zobrazovací část mikroskopu.

5. Konstrukční řešení

Optické prvky, které byly zmiňovány v předchozích odstavcích, je nutné usadit do mechanických součástí. Proto se budu v další části diplomové práce věnovat konstrukčnímu řešení, které bylo použito pro modelování mikroskopu. K tvorbě trojrozměrného konstrukčního návrhu i výrobní dokumentace byl použit software SolidWorks 2019 SP05. K výrobě všech dílů byla použita slitina hliníku (EN AW 2007).

Model mikroskopu pro zavádění optických vláken, který lze vidět na obrázku 5.1, je složen z několika částí. Hlavní část mikroskopu tvoří již zmiňované optické komponenty, tedy objektiv OB, tubusová čočka TČ a kamera K. Na středovou část mikroskopu, která je tvořena tubusem T, nasedá v horní části mikroskopu sestava tubusového výsuvu, prostřednictvím kterého dochází k osovému pohybu kamery K, a tak k doostřování obrazu. V dolní části mikroskopu se nachází mechanismy, díky kterým je možné zobrazovat dva předměty. Jedná se o soustavy vykonávající radiální a axiální pohyb objektivu OB. Tento pohyb je generován piezomotorem P. Původní rozsah pohybu piezomotoru P není dostačující, a proto je nutné ho znásobit, k čemuž slouží pákový mechanismus. K nastavení kolmosti optických komponent k optické ose mikroskopu a zároveň k zaostření předmětu slouží kinematické uložení. Díky držáku mikroskopu DM lze mikroskop nasadit na tlakovou komoru 4a (viz obrázek 1.21), ve které jsou umístěna pozorovaná optická vlákna.

V následujícím textu budou podrobně rozebrány funkce jednotlivých částí mikroskopu.



Obrázek 5.1: Konstrukční řešení mikroskopu pro sesazování optických vláken. P - piezomotor, DM - držák mikroskopu, K - kamera, TČ - tubusová čočka, T - tubus, OB - objektiv.

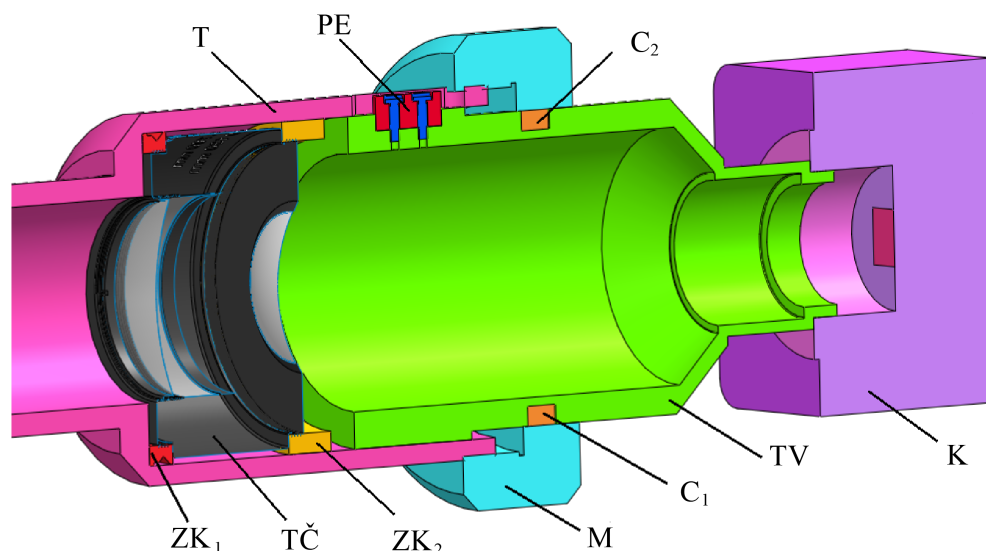
5.1. Sestava tubusového výsuvu

Sestava tubusového výsuvu slouží k doostřování obrazu. Samotné ostření je zprostředkováno posunem kamery K v osovém směru do takové polohy, kdy bude snímán ostrý obraz. K vykonání tohoto posunu je třeba několika komponent, které jsou vidět na obrázku 5.2.

Tubusový výsuv TV je pomocí závitu C-Mount připevněn ke kameře K. Z druhé strany je tubusový výsuv TV vložen do nejširší části tubusu T. Osový, nikoliv rotační, pohyb tubusového výsuvu TV a tubusu T vůči sobě je zajištěn díky peru PE. Pero PE je pevně spojeno s tubusovým výsuvem TV pomocí dvou šroubů a současně leží v drážce vytvořené v tubusu T. Toto pero PE je konstruováno tak, aby nevyčnívalo přes vnější okraj tubusu T, a nebránilo tak správné funkci matice M.

Samotný pohyb kamery K je realizován otáčením matice M, která je závitem M65x0,5 připojena k tubusu T. Zároveň je matice M pomocí dvou C-kroužků C₁ a C₂ spojena s tubusovým výsuvem TV, což dovoluje volné otáčení kolem optické osy mikroskopu.

Pohyb kamery v osovém směru a tedy doostřování obrazu může probíhat v rozsahu ± 5 mm. Tento rozměr je dán vzájemnou velikostí pera PE a drážky vytvořené v tubusu T.



Obrázek 5.2: Sestava pro ostření obrazu. T - tubus, PE - pero, C₁ a C₂ - C-kroužky, K - kamera, TV - tubusový výsuv, M - matice, ZK₂ - závitový kroužek hladký, TČ - tubusová čočka, ZK₁ - závitový kroužek s V-drážkou.

Na obrázku 5.2 je taktéž vidět uložení tubusové čočky TČ v tubusu T. Tubusová čočka TČ má na obou stranách závit typu SM2, což je označení pro závit 2.032"-40. Na tyto závity jsou na tubusovou čočku TČ z obou stran našroubovány závitové kroužky ZK₁ a ZK₂, které středí tubusovou čočku TČ v tubusu T. Závitový kroužek ZK₁, který je situován blíže k objektivu OB, je speciálně upravený. Obsahuje totiž V-drážku, na níž doléhá aretační šroub, díky kterému je zajištěna pevná poloha tubusové čočky TČ v optickém systému mikroskopu.

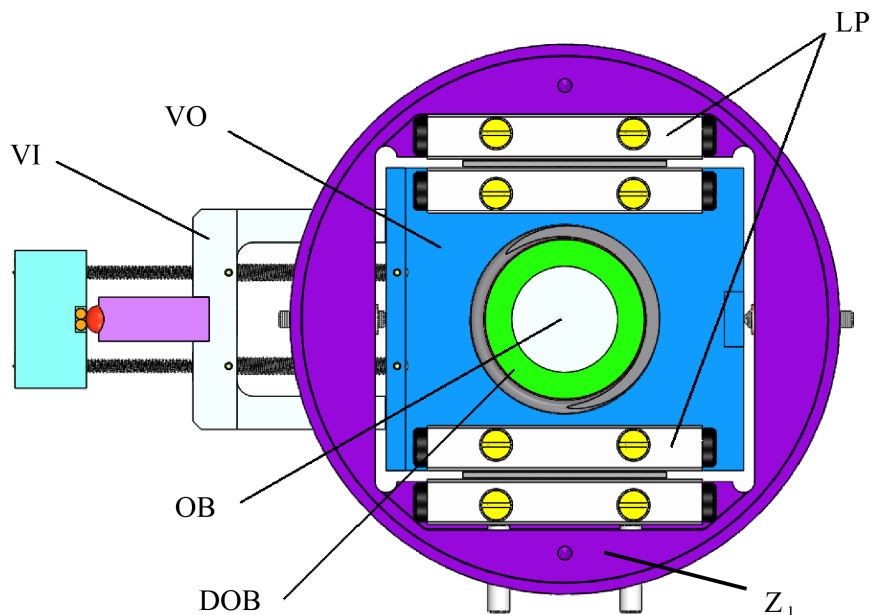
5.2. Sestava pro pohyb objektivu

Jak již bylo řečeno v části 4.1.1, mikroskop bude zobrazovat optická vlákna ze dvou na sebe kolmých směrů, čímž vznikají dva předměty. Rozmístění těchto předmětů v prostoru je popsáno na obrázku 4.2. Aby mohly být tyto dva předměty zobrazeny, je nutný pohyb objektivu, a to jak v radiálním, tak i v axiálním směru.

5.2.1. Pohyb objektivu v radiálním směru

Pro pohyb objektivu v radiálním směru je v návrhu mikroskopu použita sada lineárních posuvů LP s označením LWR 3050 od firmy SKF [30]. Jak lze vidět na obrázku 5.3, objektiv OB je pomocí závitu RMS připevněn k držáku objektivu DOB, který je pevně spojen s obdélníkovým vozíkem objektivu VO. Lineární posuvy LP zprostředkovávají pohyb vozíku VO vůči rotačně symetrické základně posuvu Z_1 , která tvoří část obalu mikroskopu.

Pohyb vozíku VO je omezen dvěma justážními šrouby tak, aby rozsah pohybu činil přesně 0,2 mm, což je radiální vzdálenost mezi pozorovanými předměty.



Obrázek 5.3: Horizontální pohyb objektivu OB. VI - vidlice, VO - vozík objektivu, LP - lineární posuvy, Z_1 - základna posuvu, DOB - držák objektivu, OB - objektiv.

5.2.2. Pohyb objektivu v axiálním směru

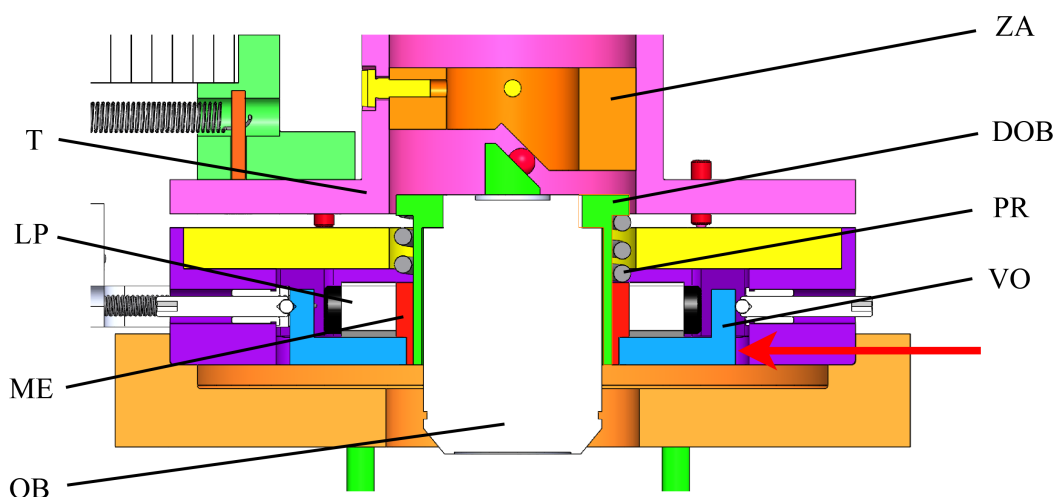
Axiální složka pohybu taktéž činí 0,2 mm, ale již není tak snadno oddělitelná jako výše zmiňovaná radiální složka pohybu.

Na obrázku 5.4, na kterém jsou naznačeny komponenty potřebné k vykonání axiálního pohybu objektivu, opět figuruje vozík VO umístěný na lineárních posunech LP. Důležitou součástí této podsestavy je mezikruží ME, které plní vícero funkcí. Společně s držákem objektivu DOB tvoří výsuv pro samotný objektiv OB. Taktéž slouží jako zá-

kladna pro tlačnou pružinu č. 13140 od firmy Sodemann [31], která naléhá na protější plochu držáku objektivu DOB a tím ho zdvihá.

V návrhu je objektiv OB uložen v držáku objektivu DOB, který ve své horní části obsahuje zešíkmení. Stejně orientovanou šikmou plochu, předlohu, má i zarážka objektivu ZA. Mezi těmito předlohami jsou umístěny kuličky o průměru 4 mm, které se zde využívají pro zmenšení smykového tření. Zároveň tyto kuličky slouží jako otočný bod objektivu OB, aby byla zaručena správná funkce kinematického uložení, které bude popsáno níže. Právě díky zmiňovaným předlohám se může objektiv OB pohybovat v axiálním směru.

Princip výsledného pohybu po diagonále, který činí 0,3 mm, je naznačen na obrázku 5.4. Pokud bude působit síla ve směru červené šipky, pak se objektiv OB vlivem působení předlohy a lineárních pojezdů LP posune vlevo a nahoru.



Obrázek 5.4: Vertikální pohyb objektivu OB. T - tubus, LP - lineární pojezd, ME - mezikruží, OB - objektiv, ZA - zarážka objektivu, DOB - držák objektivu, PR - pružina, VO - vozík.

5.3. Pákový mechanismus

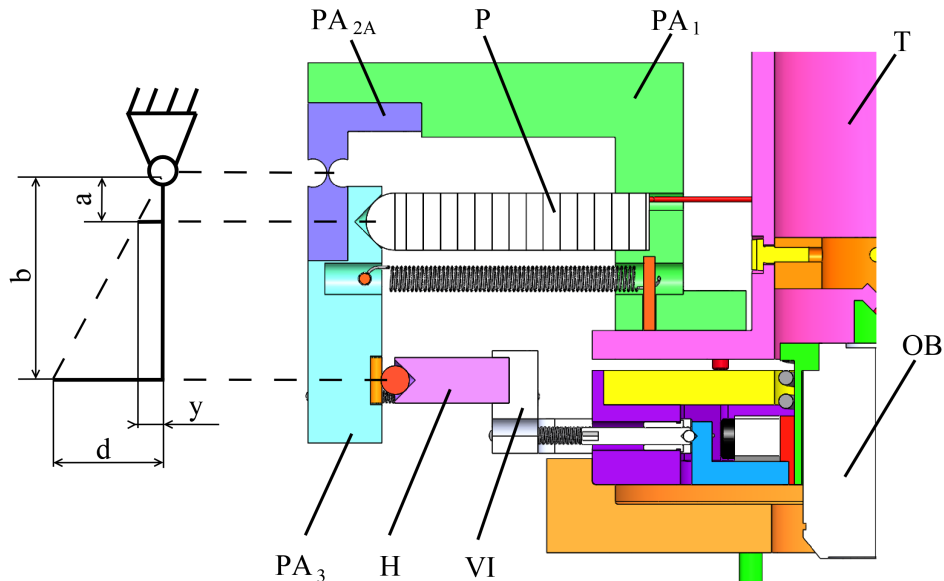
Samotný pohyb objektivu OB vykonává piezomotor P, který lze vidět na obrázku 5.5. V reakci na velikost zástavbového prostoru byl vybrán piezomotor PK4HA3P1 od firmy Thorlabs s rozměry 10,0 mm x 10,0 mm x 49,7 mm [28]. Při napětí 150 V je tento typ piezomotoru schopný výchylky 0,05 mm. Vztah 4.1 ale říká, že vzdálenost mezi předměty je 0,3 mm. V reakci na tuto skutečnost bylo nutné vytvořit pákový mechanismus, který původní rozsah pohybu piezomotoru zvětší až na požadovanou hodnotu.

Ke konstrukci jednoduchého pákového mechanismu byly použity dva pružné klouby PA_{2A} a PA_{2B} . Tato konstrukční součástka je bezvúlová, avšak pouze s omezeným rozsahem pohybu [32]. Základní vlastností pružného kloubu je vysoká ohebnost kolem jedné osy, avšak kolem dalších os se kloub neohýbá. Pružný kloub se skládá z pohyblivé a nepohyblivé části, přičemž tyto části odděluje zeslabení průřezu součásti [32].

Celý pákový mechanismus použitý v modelu mikroskopu se skládá z několika částí (viz obrázek 5.5). První díl páky PA_1 dosedá na tubus T, se kterým je pevně spojen pomocí kolíků a šroubů. Na tento díl nasedají dva identické pružné klouby PA_{2A} a PA_{2B} , které

umožňují vychýlení ramene páky PA_3 . Samotný piezomotor je pak umístěn v prvním díle páky PA_1 a dosedá na kuželové vyhloubení v rameni páky PA_3 .

Propojení objektivu OB a pákového mechanismu je zajištěno pomocí vidlice VI a na ni naléhajícího spojovacího hranolu H. Tento hranol H není pevně přichycen k rameni páky PA_3 , ale je zde využita kulička naléhající na dva válečky v drážce pro eliminaci bočního posunu místa dotyku kuličky při pohybu ramene páky PA_3 . V návrhu se využívá i několika tažných pružin od firmy Sodemann, konkrétně dva kusy č. E00940141000S, dva kusy č. E01200221250S a jeden kus č. E01800181370S, které zajišťují soudržnost jednotlivých dílů páky [31]. Tuhost těchto pružin byla zvolena tak, aby se zajistila soudržnost zmiňovaných dílů.



Obrázek 5.5: Pákový mechanismus. VI - vidlice, H - hranol, PA_3 - rameno páky, PA_{2A} - pružný kloub 1, P - piezomotor, PA_1 - první díl páky, T - tubus, OB - objektiv.

Výpočet potřebné výchylky pružného kloubu je naznačen taktéž na obrázku 5.5. Je nutné vypočítat místo působení piezomotoru tak, aby objektiv OB vykonal požadovaný pohyb a zároveň, aby nedošlo k deformaci pružných kloubů PA_{2A} a PA_{2B} . S využitím přímé úměry platí

$$\frac{a}{b} = \frac{y}{d}, \quad (5.1)$$

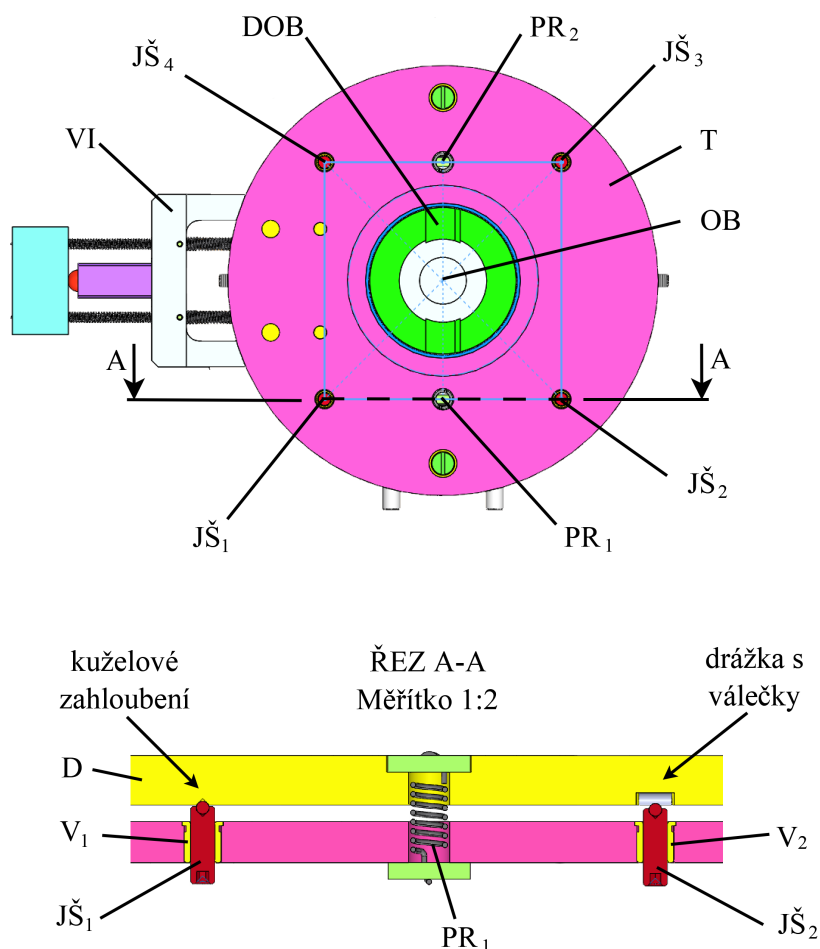
kde a značí polohu působení piezomotoru na rameno páky PA_3 , b je velikost celého ramene páky PA_3 , která vychází z konstrukčního návrhu (45 mm), d značí rozsah pohybu mikroskopického objektivu OB s rezervou (0,3 mm) a y představuje rozsah pohybu piezomotoru P (0,05 mm). Po dosazení těchto hodnot do vztahu 5.1 lze vypočítat vzdálenost $a = 7,5$ mm.

5.4. Kinematické uložení

Kinematické uložení slouží primárně k zaostření optických vláken. Zároveň je pomocí tohoto systému možný náklon tubusu T a s ním spjatých komponent vůči optické ose objektivu OB.

Ke konstrukci je využit princip klasického tříbodového kinematického uložení, avšak návrh využívá čtyř justážních šroubů JŠ namísto třech. Čtvrtý justážní šroub JŠ₄ je použitý pro větší stabilitu systému a také k lepšímu rozložení působících sil.

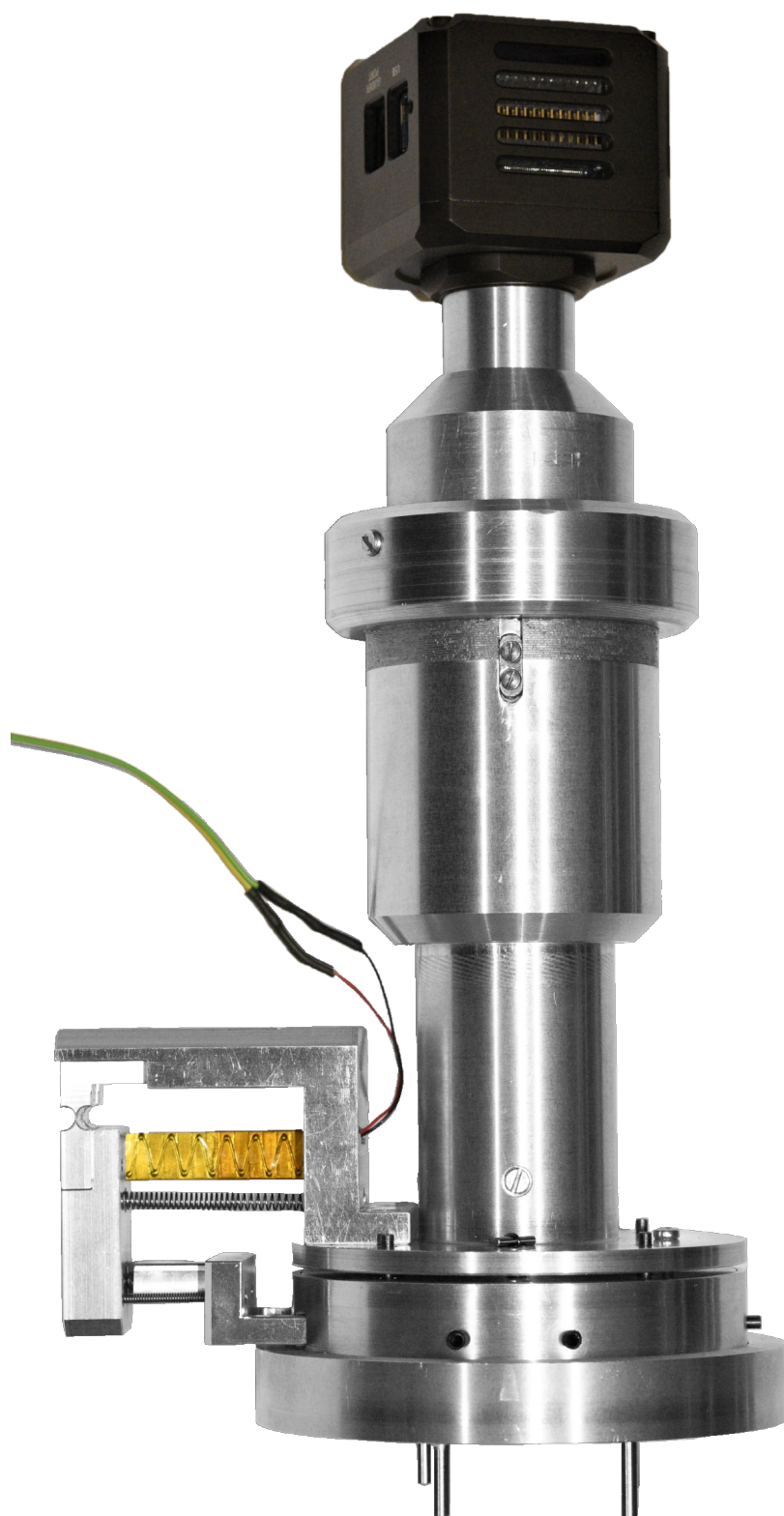
K tomuto uložení náleží i dvě tažné pružiny PR č. 41080 od firmy Sodemann, které díky vysoké tuhosti k sobě přitlačují tubus T a rotačně symetrickou desku D [31]. Rozložení justážních komponent je zřejmé z obrázku 5.6.



Obrázek 5.6: Schéma rozložení justážních komponent pro kinematické uložení mikroskopu. JŠ - justážní šrouby, V - justážní vložky, PR - tažné pružiny, DOB - držák objektivu, OB - objektiv, VI - vidlice, T - tubus, D - rotačně symetrická deska.

5.5. Montáž

Po vyrobení jednotlivých dílů dle výkresové dokumentace, která je přiložena k této práci, mohlo dojít k montáži mikroskopu. Nejdříve byly sestaveny výše zmiňované podsestavy a následně došlo ke spojení těchto podsestav do výsledné podoby mikroskopu, kterou lze vidět na obrázku 5.7.



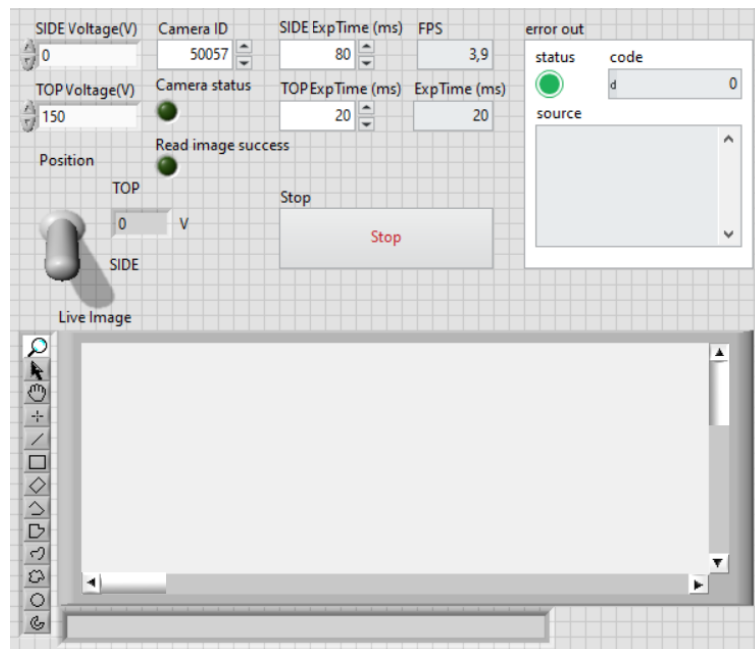
Obrázek 5.7: Výsledná podoba mikroskopu pro sesazování optických vláken.

6. Software

Je žádoucí, aby byl chod mikroskopu automatizován. Z důvodu přehlednosti programu a rychlosti programování bylo k automatizaci využito vývojové prostředí LabView 2020.

Vytvářený program se skládá ze dvou částí. První část ovládá vyčítání obrazu z použité kamery. Tato část programu byla vytvořena za pomoci knihovny gXusb.dll od firmy Moravian Instruments [29]. Druhá část programu slouží k ovládání piezomotoru skrz tříkanalový modul MDT693B od firmy Thorlabs [28]. K ovládání tříkanalového modulu byla využita knihovna MDT_COMMAND_LIB_win32.dll [28]. Obě knihovny vyžadují pro ovládání příslušných komponent za prvé inicializaci komunikace. Kamera i tříkanalový modul jsou připojeny k počítači pomocí rozhraní USB. Po úspěšné inicializaci běží v programu dvě oddělené smyčky. Prvá z nich kontinuálně vyčítá obraz z kamery, nastavuje její expozici a měří počet zachycených snímků za sekundu. Druhá smyčka pak nastavuje požadovanou hodnotu přiváděného napětí na piezomotor a tuto hodnotu kontroluje. Pro zastavení programu obě knihovny korektně ukončují komunikaci s hardwarem.

Na obrázku 6.1 lze vidět výsledný čelní panel vytvářeného programu. Nejdůležitější částí je přepínač, který mění pohled na spojení optických vláken. V momentě, kdy je tento přepínač v poloze *top*, na piezomotor je přivedeno maximální napětí a tudíž i vychýlení ramene páky PA₃ je maximální. Pro tuto polohu lze nastavit i vhodnou expozici kamery. V této poloze je objektiv zaostřen na reálné spojení optických vláken (viz bod P₁ na obrázku 4.2). Pokud je ale přepínač v poloze *side*, na piezomotor není přiváděno žádné napětí a rameno páky PA₃ je ve svislé poloze. V tento moment je objektiv zaostřen na odraz spojovaných optických vláken v zrcadle, tedy na bod P₂. I pro tuto polohu je možné nastavit vhodnou hodnotu expozice.

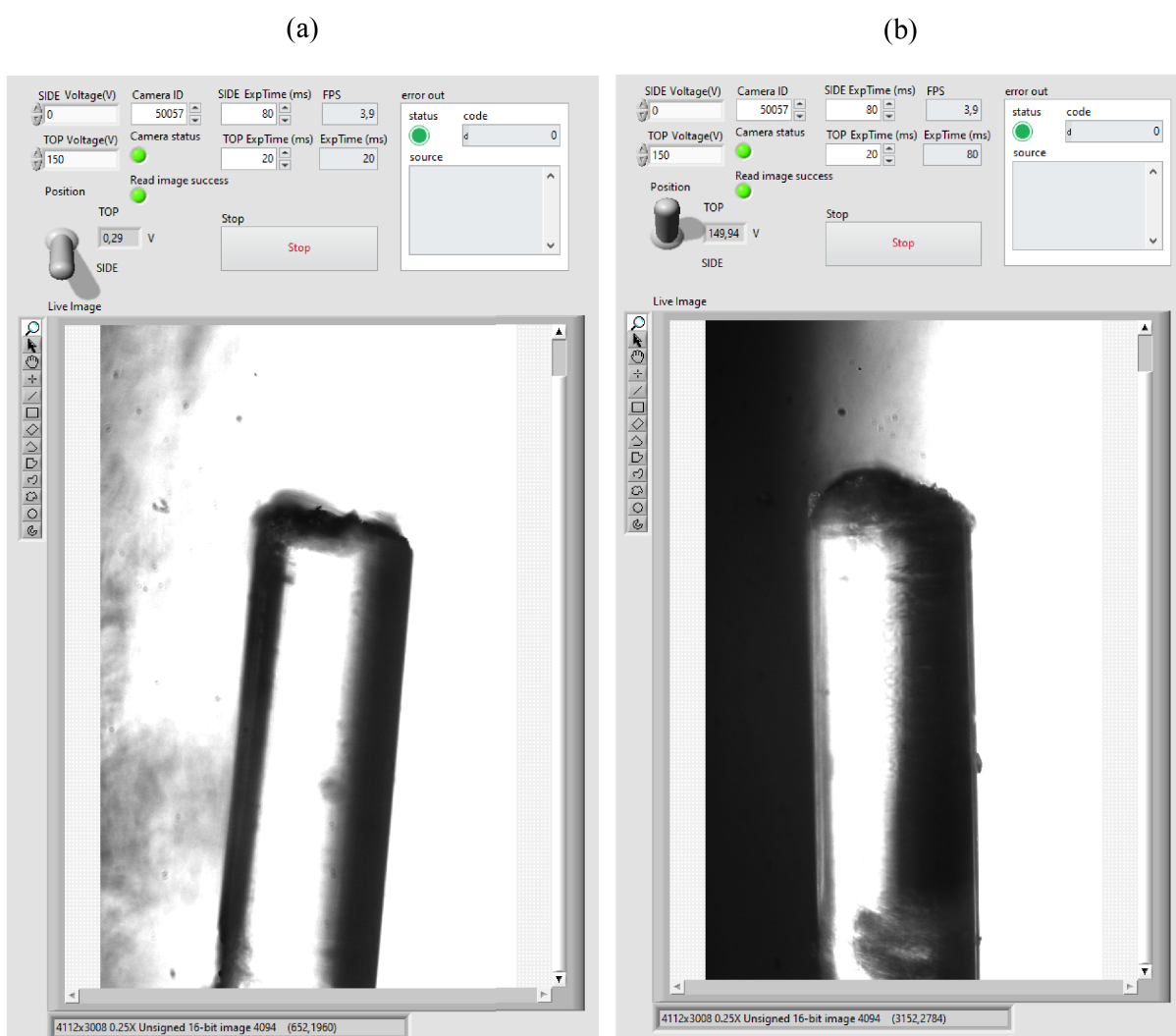


Obrázek 6.1: Čelní panel programu.

7. Testování

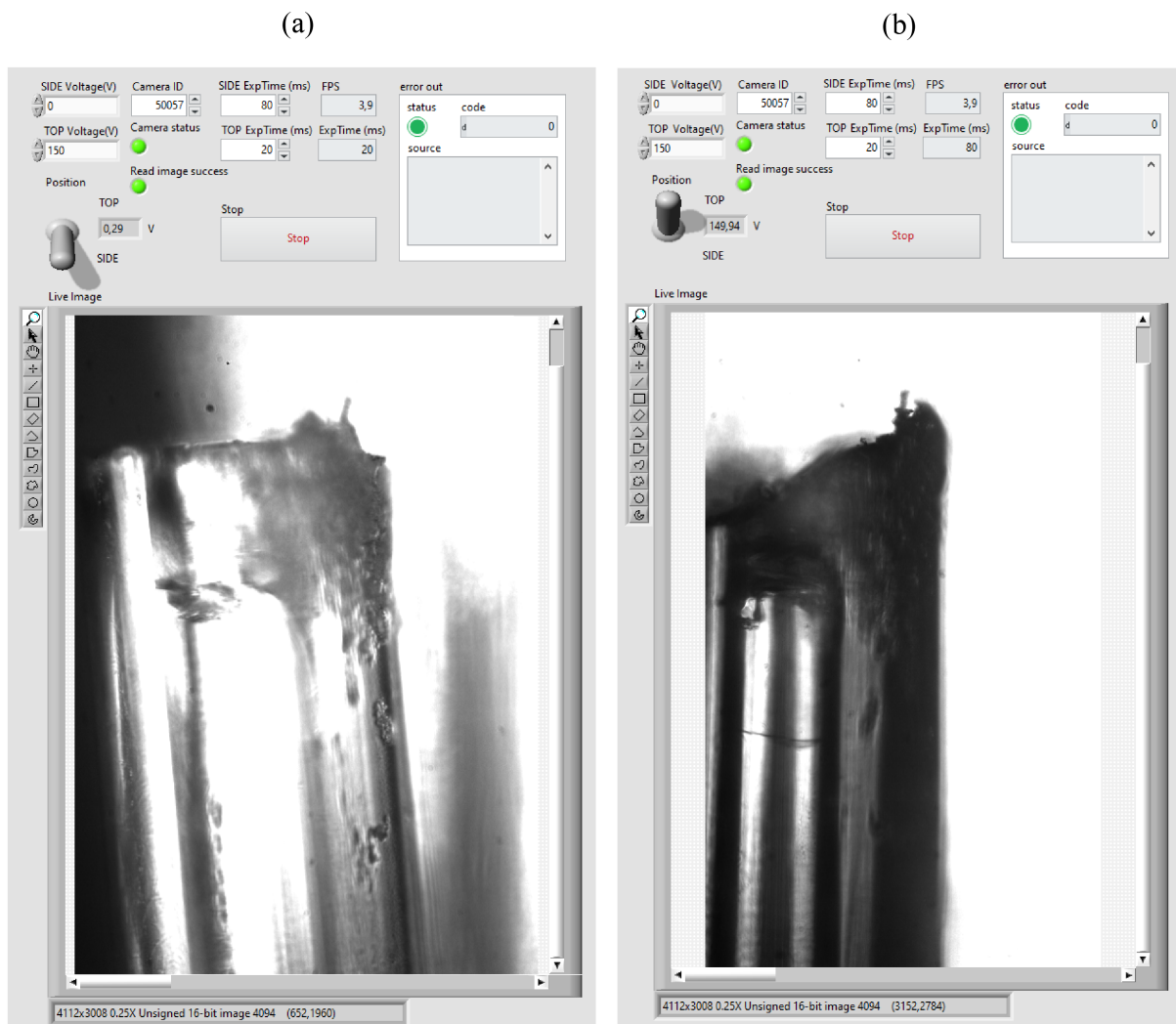
Po sestavení celého mikroskopu jsem mohla přejít k testování jeho funkčnosti. Testování proběhlo před vytvořením povrchové úpravy pomocí eloxování a to z toho důvodu, že se jedná o první funkční model mikroskopu, který bude v následujících letech dále zdokonalován.

Před začátkem měření je nutné umístit optická vlákna do tlakové komory. Jelikož zatím není zcela vyroben tříosý manipulátor, mohlo dojít pouze k testování zobrazení jednotlivých optických vláken. Taktéž je třeba připojit stávající osvětlovací systém LED s označením 204PGC2A-G5-2C od firmy Luckylight ke zdroji Manson HCS-3202, který dovoluje měnit napětí na použité diodě a tím ovlivňovat její svítivost [33]. Maximální dovolené napětí vybraného typu diody je 3,2 V, čemuž odpovídá svítivost 6500 mcd. Aby bylo možno ovládat mikroskop přes vytvořený software, je nutné připojení kamery i piezomotoru k počítači.



Obrázek 7.1: Dosažené výsledky při zobrazování jednoivového optického vlákna ze dvou na sebe kolmých směrů. (a) Zobrazení odrazu optického vlákna v zrcadle P_2 . (b) Zobrazení reálného optického vlákna P_1 .

Před započítím justování se mikroskop pomocí kolíků vsadí do otvorů tlakové komory, čímž se vymezení pracovní vzdálenosti objektivu OB. Při justáži mikroskopu se postupuje od ostření objektivem OB pomocí šroubů $J\check{S}_{1-4}$ až k doostření obrazu na kameře K pomocí tubusového výsuvu TV. Nejdříve je nutné správné zobrazení optických vláken ve svislé poloze páky, tedy v okamžiku, kdy kamera snímá odraz optických vláken P_2 v zrcadle. Následně je změněno zorné pole na pozorování reálného spojení optických vláken P_1 , které je viditelné při maximálním vychýlení ramene páky PA_3 . Opět pomocí justážních šroubů $J\check{S}_{1-4}$ je pozorovaný předmět doostřen objektivem. Proces výměny zorného pole je opakován do té doby, než jsou obrazy v obou polohách stejně ostré. Pak lze říci, že je mikroskop najustován.



Obrázek 7.2: Dosažené výsledky při zobrazování dutého optického vlákna ze dvou na sebe kolmých směrů. (a) Zobrazení odrazu optického vlákna v zrcadle P_2 . (b) Zobrazení reálného optického vlákna P_1 .

Získané výsledky jsou zobrazeny na obrázku 7.1(a) a (b), který ukazuje zobrazení jednovidových optických vláken. Naopak obrázek 7.2(a) a (b) znázorňuje zobrazení dutého optického vlákna. Při pohledu na obrázky lze říci, že byla zvolena správná technika pozorování, protože zobrazované vlákno je dobře viditelné a kontrastní vůči pozadí.

Celý mikroskop funguje správně. Existují však různé návrhy pro zlepšení mikroskopu. Za prvé by bylo vhodné zajistit hladší chod objektivu a snížit tak hranové tlaky v jeho vedení, které je tvořeno držákem objektivu DOB a mezikružím ME. Při hodnocení získaných obrazů, zvláště při pohledu na obrázek 7.2 zobrazující duté optické vlákno, lze vidět, že obraz vlákna vzniká na okraji zorného pole kamery K. Proto by bylo do budoucna lepší usadit kameru K na křížový posuv, který by dovoľoval vycentrovat získaný obraz.

Závěr

Smyslem této diplomové práce je vytvoření speciálního mikroskopu, který má sloužit pro sesazování optických vláken. Tato práce vznikla za podpory projektu Technologické agentury České republiky (číslo projektu FW03010504 – Vývoj in-situ technik pro charakterizaci materiálů a nanostruktur / Development of in-situ techniques for characterization of materials and nanostructures). Tento projekt se zabývá současným zaváděním světla a pracovního média přímo na určené místo pozorovaného vzorku v rastrovacím sondovém mikroskopu. Aby bylo tohoto cíle dosaženo, je nutné velmi přesné sesazení jednovidového a dutého optického vlákna.

Samotnému návrhu mikroskopu předchází výběr vhodné justážní metody pro sesazování optických vláken. Po pečlivém uvážení jsem vybrala metodu přímého pozorování. Tato metoda využívá optickou soustavu, pomocí které je pozorovaný předmět zvětšován, převáděn do digitální podoby a následně vyhodnocován. Z tohoto důvodu jsem vytvořila mikroskop, který dokáže zobrazit návaznost sesazovaných vláken ze dvou na sebe kolmých směrů. Zároveň je nutné vybrat vhodnou mikroskopickou techniku, která by poskytovala adekvátní zobrazení optických vláken. Pro jednoduchost realizace mikroskop využívá techniku světlého pole.

Nejprve jsem na základě zástavbového prostoru vytvořila optický návrh mikroskopu. Správnost výběru optických komponent byla ověřena optickou simulací v programu Zemax, kde byly zároveň vypočteny i základní rozměry pro konstruovaný mikroskop.

Konstrukční řešení poskytuje návrh usazení zmiňovaných optických komponent do mechanických objímek. Taktéž jsem vytvořila justážní podsestavy pro nastavení mikroskopu. Dle výkresové dokumentace, která je přiložená k této práci, byly všechny potřebné díly vyrobeny a mikroskop byl následně sestaven.

Je žádoucí, aby mikroskop pracoval automatizovaně. Proto jsem ve vývojovém prostředí LabView 2020 vytvořila program, díky kterému dochází ke kontinuálnímu snímání obrazu. V závislosti na získaných obrazových datech lze snadno justovat pozice sesazovaných optických vláken.

Nakonec byla otestována funkčnost mikroskopu. Lze konstatovat, že s pomocí vytvořeného mikroskopu lze korektně sesadit optická vlákna na základě jejich přímého pozorování ze dvou na sebe kolmých směrů.

Literatura

- [1] FUKA, J. a HAVELKA, B.: *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961. 846 s.
- [2] SPOUSTA J., ČERNEK O., DOSTÁL Z., PAVERA M., ŠIKOLA T.: *Multifunkční rastrovací sonda s dutým optickým vláknem*, zaměstnanecký vynález ev. č. VUT 2012/718, 2021.
- [3] MILLER, S. E. and CHYNOWETH, A. G.: *Optical fiber telecommunications*. Orlando: Academic Press, 1979. 705 p. ISBN 0-12-497350-7.
- [4] KIKUYA, Y., HIRANO, M., KOYABU, K. and OHIRA, F.: Micro alignment machine for optical coupling. *Proceeding IEEE Micro Electro Mechanical System* [online]. 1993, p. 36-41. [cit. 2021-04-07]. ISBN 0-7803-0957-X. DOI 10.1109/MEM-SYS.1993.296947.
- [5] FILKA, M.: *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. 462 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [6] INADA, K., WATANABE, O. and TAYA, H.: Splicing of Fibers by the Fusion Method. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* [online]. 1986, 4(5), p. 706-713. [cit. 2021-04-02]. ISSN 0733-8716. DOI 10.1109/JSAC.1986.1146381.
- [7] EGASHIRA, K. and KOBAYASHI, M.: Optical fiber splicing with a low-power $C(O)_2$ laser. *Applied Optics* [online]. 1977, 16(6), p.1636-1638. [cit. 2021-03-17]. ISSN 0003-6935. DOI 10.1364/AO.16.001636.
- [8] YABLON, A. D.: *Optical Fiber Fusion Splicing*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 306 p. ISBN 3-540-23104-8.
- [9] NICIA, A.: Lens coupling in fiber-optic devices: efficiency limits. *Applied Optics* [online]. 1981, 20(18), p. 3136-3145. [cit. 2021-04-19]. ISSN 0003-6935. DOI 10.1364/ao.20.003136.
- [10] KAWASE, M., FUCHIGAMI, T., MATSUMOTO, M., NAGASAWA, S., TOMITA, S. and TAKASHIMA, S.: Subscriber single-mode optical fiber ribbon cable technologies suitable for midspan access. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 1989, 7(11), p. 1675-1681. [cit. 2021-04-20]. ISSN 07338724. DOI 10.1109/50.45888.
- [11] AMMER, T., STRASSER, M.M., STUDER, H., ZAINA, P. and COMPARE, C.: Novel small form factor optical ribbon fiber connector for singlemode applications. *IEEE/LEOS Workshop on Fibres and Optical Passive Components* [online]. 2005, p. 339-344. [cit. 2021-04-20]. ISBN 0-7803-8949-2. DOI 10.1109/WFOPC.2005.1462151.
- [12] BOUDREAU, R. A. and BOUDREAU, S. M.: *Passive Micro-Optical Alignment Methods*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005. 394 p. ISBN 978-0-8247-0706-4.
- [13] KASAP, S. O. and SINHA, R. K.: *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*. Boston: Pearson Education Limited, 2013. 544 p. ISBN 978-0-273-77417-4.

- [14] PHYSIK INSTRUMENTE GmbH., *PI Tech Blog*[online]. 2021 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.pi-usa.us/en/>
- [15] MORGAN, B., MCGEE, J. and GHODSSI, R.: Automated Two-Axes Optical Fiber Alignment Using Grayscale Technology. *Journal of Microelectromechanical Systems* [online]. 2007, 16(1), p. 102-110. [cit. 2021-04-11]. ISSN 1057-7157. DOI 10.1109/JMEMS.2006.886035.
- [16] Newport Corporation, *online catalog* [online]. 2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.newport.com/>
- [17] NKT Photonics A/S, *online catalog* [online]. 2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.nktphotonics.com/>
- [18] MURPHY, D. B. and DAVIDSON, M. W.: *Fundamentals of light microscopy and electronic imaging*. Second edition. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2013. ISBN 978-0-471-69214-0.
- [19] MERTZ, J.: *Introduction to optical microscopy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 455 p. ISBN 978-1-108-42830-9.
- [20] KEPRT, E.: *Teorie optických přístrojů*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1966. 222 s. Učební texty vysokých škol.
- [21] LIU, Z., TIAN, L., LIU, S. and WALLER, L.: Real-time brightfield, darkfield, and phase contrast imaging in a light-emitting diode array microscope. *Journal of Biomedical Optics* [online]. 2014, 19(10). [cit. 2021-4-24]. ISSN 1083-3668. DOI 10.1117/1.JBO.19.10.106002.
- [22] SCHRÖDER, G.: *Technická optika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981. 158 p.
- [23] DAVIDSON, M. W. and ABRAMOWITZ, M.: Optical microscopy. In J.P. Horniak (Ed.): *Encyclopedia of Imaging Science and Technology*. Second edition. New York: John Wiley and Sons, 2002. 1106-1141 p. ISBN 0-471-33276-3.
- [24] Carl Zeiss Microscopy Deutschland GmbH, *Education in Microscopy and Digital Imaging* [online]. 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/lightsourcefundamentals.html>
- [25] TÖRÖK, P. and KAO, F.: *Optical imaging and microscopy: techniques and advanced systems*. Springer, 2007. 497 p. ISBN 978-3-540-69563-9.
- [26] PLÁŠEK, J.: Nové metody optické mikroskopie. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [online]. 1996, 41(1), s. 1-24. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://dml.cz/handle/10338.dmlcz/139719>
- [27] Edmund Optics Inc., *online catalog* [online]. 2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/>
- [28] Thorlabs Inc., *online catalog* [online]. 2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/>

- [29] Moravian Instruments Inc., *online catalog* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.moravinst.com/>
- [30] SKF CZ, a.s., *online catalog* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz>
- [31] SODEMANN Industrifjedre A/S, *online catalog* [online]. 2021 [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.sodemann-pruziny.cz/>
- [32] ANTOŠ, M.: Vlastnosti pružinového kloubu obdélníkového průřezu. *Jemná mechanika a optika* [online]. 2006, 51(10), s. 283-285. [cit. 2021-5-20]. ISSN 0447-6441.
- [33] LuckyLight Electronics Co., Ltd, *online catalog* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.luckylight.cn/en/>