

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká fakulta

**Příprava optické dráhy pro experimenty
z kvantové mechaniky**

Bakalářská práce

Jan Štěpánek

Školitel: Mgr. Marcel Fuciman, Ph.D.

České Budějovice 2019

Štěpánek J., 2019: Příprava optické dráhy pro experimenty z kvantové mechaniky [Optical path construction for experiments of Quantum mechanics. Bc. Thesis, in Czech] – 40 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Annotation

The aim of this bachelor thesis is to build an optical path (for further experiments of quantum physics), which was demonstrated on non-linear experiment – spontaneous parametric down-conversion (SPDC). The main theoretical part summarizes the basic characteristics (types, usage, limits) of optical fibres and theory of SPDC experiment.

In the experimental part is briefly described process of optical fibres construction, which were hand-made and polished in laboratory conditions. These optic fibres were used for SPDC experiment, which occurs when the light of high intensity passes through BBO crystal. It contains the results of exploring the efficiency of down-conversion process.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 17. dubna 2019

.....

Podpis

Cíl práce

Student se naučí vyrábět optické kabely (tj. navlékání, zakončování, leštění), zprovozní laserovou diodu a zavede laserový svazek do BBO krystalu, s jehož pomocí dosáhne spontánní sestupné parametrické konverze. Výsledné svazky pak naváže do vytvořených optických kabelů.

Poděkování

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce Mgr. Marcelovi Fucimanovi, Ph.D za odborné metodické vedení práce, za předávání cenných zkušeností při práci s optickými přístroji, za rady při vyhodnocení výsledků a věnovaný čas. Zvláště oceňuji jeho vstřícnost, podporu a ochotu pomoci vždy, když bylo potřeba.

Dále bych rád poděkoval RNDr. Františkovi Adamcovi, CSc. za odborné rady a strávený čas při přípravě optické dráhy.

Děkuji také Mgr. Tomášovi Fesslovi, Ph.D za poskytnutí prostor a materiálu pro potřeby experimentu, za jeho praktické rady a pomoc pro získávání výsledků.

Na závěr bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Novákovi, CSc. za pomoc s pájením laserové diody.

OBSAH

Úvod	1
1 Teoretický úvod	2
1.1 Základní pojmy a jevy	2
1.1.1 Světlo	2
1.1.2 Snellův zákon (zákon lomu)	3
1.1.3 Disperze	4
1.1.4 Úplný (totální) odraz	4
1.1.5 Brewsterův úhel	4
1.1.6 Polarizace	5
1.1.7 Nelineární optické jevy	6
1.2 Optické kabely	6
1.2.1 Teorie optického vlákna	7
1.2.2 Základní parametry vlákna	8
1.2.3 Typy optických vláken	9
1.2.4 Ochrana optického vlákna	13
1.2.5 Spojování vláken	13
1.3 Ztráty v optických kabelech	14
1.3.1 Ohybové ztráty	15
1.3.2 Rozptylové ztráty	15
1.3.3 Absorpce vláken	15
1.3.4 Disperze ve vláknech	16
1.3.5 Poškození vlákna	16
1.4 Spontánní sestupná parametrická konverze	17

2	Výroba optických kabelů.....	19
2.1	Bezpečnost.....	20
2.2	Navlečení obalu na vlákno a připevnění koncovky.....	20
2.3	Leštění koncovky optického kabelu.....	21
2.4	Měření optických kabelů.....	24
3	Sestavení optické dráhy.....	26
4	Optimalizace sestupné konverze.....	30
5	Výsledky.....	32
6	Diskuze.....	35
	Závěr.....	37
	Seznam použité literatury.....	38
	Seznam příloh.....	40

SEZNAM ZKRATEK

SPDC = spontánní sestupná parametrická konverze (angl.: spontaneous parametric down-conversion)

SM = jednovidový (angl. singlmode)

MM = vícevidový (angl. multimode)

SPCM = čítač fotonů (angl. single-photon counting module)

FC/PC = rovný kontakt/fyzický kontakt (angl. flat contact/physical contact)

ÚVOD

Optická vlákna jsou v současné době široce využívána pro různé účely v celé škále odvětví. K jejich účinnému použití optických vláken je nezbytné seznámení s parametry daného typu (útlum, omezení) a alespoň základní znalost správného postupu manipulace s nimi a rizik jejich užívání. Za účelem hlubšího poznání funkčnosti optických vláken jsme vyrobili optické kabely na míru podle návodu firmy Thorlabs. Již samotná výroba má svá specifika a omezení, skrze která je možné ovlivnit vlastnosti přenosu signálu. V laboratorních podmínkách jsme vyrobili a proměřili kabely s vícevidovým jádrem s typem zakončení FC/PC pro přenos elektromagnetického záření blízkého viditelnému světlu. [1]

Poslední dobou začíná informatika využívat možnosti předávání informace za pomoci kvantové mechaniky. Kvantově informační experimenty jsou založeny na základních fyzikálních vlastnostech jednotlivých prvků, např. využití jednotlivých fotonů nebo kvantové stavy iontů. Využití fotonů je zvláště výhodné, neboť jsou to nejrychlejší známé částice. Získání jednotlivých fotonů s požadovanými vlastnostmi ale není jednoduchou záležitostí, neboť nelineární interakce mají příliš malou účinnost. Jednou z cest jak dosáhnout požadovaného cíle je spontánní sestupná parametrická konverze (dále jen SPDC), která i přes svou nízkou efektivitu je mnohem efektivnější než jiné zdroje fotonových párů (např. atomová emise dvou fotonů). O fotonových párech vzniklých SPDC víme, že mají stejný původ, a tedy jsou kvalitním vzorkem pro různé experimenty. [2][3]

Náplní této bakalářské práce byla příprava optické dráhy pro kvantové experimenty s ukázkou funkčnosti na experimentu SPDC. V dokumentu je nejdříve popsána teorie optických kabelů, následuje seznámení se s postupem jejich výroby pro optické účely. Dále se objevuje teorie experimentu SPDC a jeho příprava, pokračuje použitý materiál spolu se záznamem průběhu experimentu a z něj získaných výsledků a jejich následná diskuze.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

Optika je jedna z nejstarších disciplín fyziky, která studuje zákonitosti světelných jevů. V této oblasti dochází i v současné době k významným objevům a jejich aplikacím, které ovlivňují lidský život (např. laserové tiskárny, skenery, optická komunikace). Mezi nejdůležitější odvětví patří vláknová optika a její rozvoj. Pro jeho pochopení je nezbytný základní přehled v oblasti optiky. [4]

Principů vláknové optiky bylo využito i v případě experimentu sestupné konverze fotonů a jejich zavedení na detektor. Generace těchto fotonů je fyzikálně poměrně složitý proces, pro nějž jsme využili funkcí nelineární optiky a metody sestupné konverze. [3]

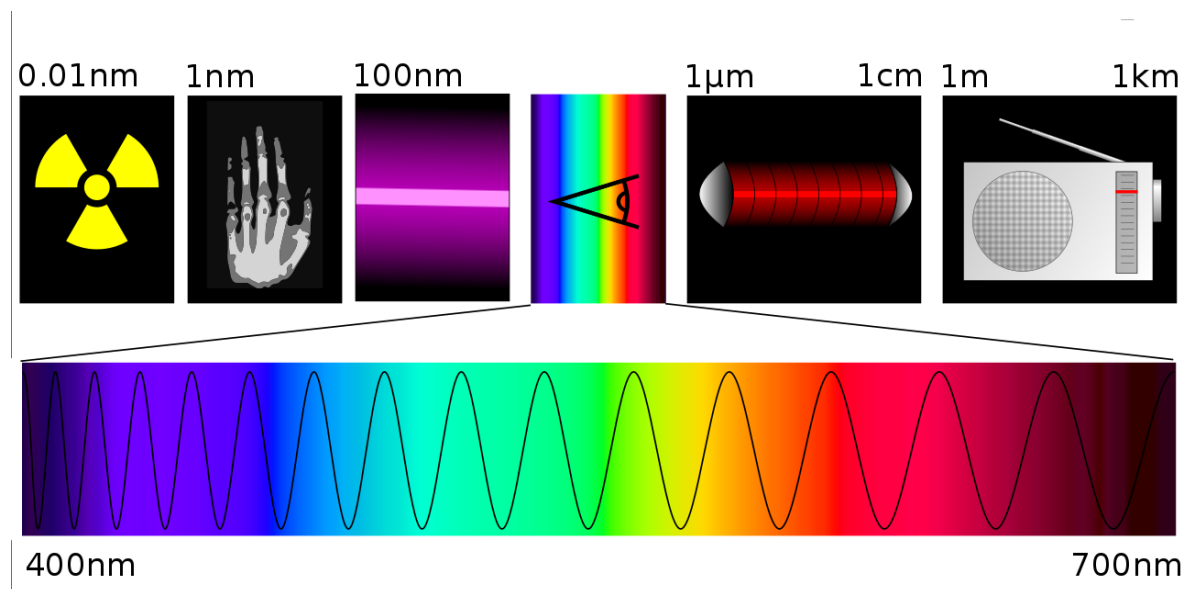
1.1 Základní pojmy a jevy

1.1.1 Světlo

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění, ve kterém je vektor intenzity elektromagnetického pole E kolmý na vektor magnetické indukce B a tyto oba jsou kolmé na směr šíření. Na světlo se dá nahlížet jako na vlnění z pohledu vlnové optiky nebo jako na částice pohledem fyziky kvantové. [5]

Vlnově-částicový dualismus je popisován jako zvláštní vlastnost našeho pohledu na svět. Ta interpretuje fakt, že některé jevy mikrosvěta se daří vysvětlit lépe, pokud na ně nahlížíme spíše jako na částice a nebo spíše jako na vlny. Dualismus znamená, že objekt má obě vlastnosti současně. Podle toho, jakému způsobu měření (druhu interakce s okolím) jej vystavíme, se nám odhalují. Z výše uvedeného vyplývá, že na světlo se dá nahlížet jako na vlnění z pohledu vlnové optiky nebo jako na částice pohledem fyziky kvantové. [6]

Elektromagnetické záření se dělí podle vlnové délky (frekvence) na gama záření, RTG záření, UV záření, viditelné světlo, mikrovlny, rádiové vlny (popořadě zleva, viz obr. 1). [7]



Obr. 1: Elektromagnetické spektrum [8]

Rychlost světla ve vakuu je rovna $c = 2,997\,924\,584 \cdot 10^8$ m/s. [7]

1.1.2 Snellův zákon (zákon lomu)

Lomený paprsek dopadající pod úhlem θ_1 se láme pod úhlem θ_2 a ty jsou spolu ve vztahu

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2, \quad (1.1)$$

kde n_1 a n_2 jsou indexy daných optických prostředí. Index lomu je bezrozměrná veličina charakterizující konkrétní prostředí, definovaná vztahem

$$n = \frac{c}{v(\lambda)}, \quad (1.2)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, $v(\lambda)$ je fázová rychlost světla určité vlnové délky v prostředí.

[7] Několik příkladů indexu lomu najdeme v tabulce 1.

Tabulka 1: Některé indexy lomu pro vlnovou délku 589 nm [4]

Látka	Index lomu (n)	Látka	Index lomu (n)
vakuum	1	typické sklo	1,52
vzduch	1,00029	chlorid sodný	1,54
voda (20 °C)	1,33	těžké flintové sklo	1,65
aceton	1,36	safír	1,77
tavený křemen	1,46	diamant	2,42

1.1.3 Disperze

Závislosti indexu lomu prostředí na vlnové délce světla $n(\nu(\lambda))$ se říká disperze prostředí. Disperze je jev, kdy se ve svazku o různých vlnových délkách láme každá vlnová délka pod různým úhlem. Obecně platí, že index lomu je větší pro kratší vlnové délky. [7]

K disperzi dochází i v prostředí optického vlnovodu (viz kap. 1.3.4).

1.1.4 Úplný (totální) odraz

Uvažujeme-li průchod paprsku světla z jednoho optického prostředí do druhého, tak s rostoucím úhlem dopadu se zvětšuje i úhel lomu. Maximální úhel, při kterém ještě nastává lom světla, se nazývá úhlem mezním θ_m . Pokud je úhel dopadu větší než mezní úhel, světlo se pouze odráží a dochází k úplnému odrazu. Mezní úhel lze spočítat ze vztahu (1.3), kde n_1 a n_2 jsou indexy daných prostředí. Vztah platí pouze pro $n_2 < n_1$, z čehož vyplývá, že úplný odraz nemůže nastat pokud se zdroj světla nachází v prostředí s nižším indexem lomu. [4]

$$\theta_m = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1.3)$$

Z rovnice (1.3) je zřejmé, že čím menší je mezní úhel, tím více se indexy lomů liší. V praxi se proto využívá jako obal vlákna skleněný plášť namísto vzduchu z toho důvodu, že jeho index lomu je jen o něco málo menší než má jádro (viz kap. 1.2.3). [5]

1.1.5 Brewsterův úhel

Brewsterův úhel (1.4) je speciálním případem zákona odrazu a lomu, kdy odražený a lomený paprsek jsou navzájem kolmé. Odražené světlo je úplně polarizováno.

$$\theta_B = \operatorname{arctg} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (1.4)$$

Index prostředí dopadu paprsku je n_1 , n_2 je index prostředí průchodu. [4]

1.1.6 Polarizace

Světelné vlny z běžných zdrojů nejsou polarizovány, říkáme proto že jejich vektor elektrické intenzity kmitá nahodile. Rozlišujeme polarizaci lineární, kdy vektor elektrické intenzity kmitá pouze v jedné rovině, kruhovou, kdy koncové body vektoru opisují kruh, a eliptickou, kdy koncové body opisují elipsu. Polarizace je možné dosáhnout pomocí polarizačních destiček, odrazem, lomem, dvojlomem a polaroidem (filtry). [5]

Polarizační destičkou projde pouze světlo šířící se rovnoběžně s jejím směrem polarizace, všechny kolmé paprsky jsou pohlceny. Pokud je světlo nepolarizované, intenzita polarizovaného světla I je rovna polovině hodnoty intenzity dopadajícího světla I_0 [4]

$$I = \frac{1}{2} I_0. \quad (1.5)$$

Pokud je dopadající světlo polarizováno, výsledná intenzita je závislá na úhlu θ mezi směrem polarizace destičky a světla [4]

$$I = I_0 \cos^2(\theta). \quad (1.6)$$

Odražené světlo je polarizováno v závislosti na úhlu dopadu částečně nebo plně. Úplné polarizace odrazem je možné dosáhnout jen v případě dopadu paprsku pod Brewsterovým úhlem (1.4), odražené světlo je polarizováno ve směru kolmém k rovině dopadu. [4]

Světlo, které se láme, přichází o svou kolmou složku, tudíž je světlo částečně polarizováno. Takto nikdy nemůže dojít k úplně polarizaci, ale přiblížení k tomuto jevu lze dosáhnout, když necháme světlo procházet skrz více stejných prostředí. [5]

Při průchodu nepolarizovaného světla do anizotropního prostředí dochází ke dvojlomu světla, které se tak rozdělí na dvě polarizované vlny – tzv. řádný a mimořádný paprsek. Příkladem dvojlomného krystalu může být islandský vápenec nebo některé amorfnní látky (sklo, plexisklo), které byly mechanicky namáhány. [5]

1.1.7 Nelineární optické jevy

Lineární optické jevy nastávají v lineárním prostředí, kde odezva látky na vstupní elektromagnetické záření je lineární. Toto prostředí předpokládá vztah mezi vektorem elektrické polarizace \mathbf{P} a vektorem intenzity elektrického pole \mathbf{E} ve tvaru

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E}, \quad (1.7)$$

kde ε_0 značí permitivitu vakua a χ elektrickou susceptibilitu prostředí. Lineárními jevy jsou např. absorpce, odraz, lom, otáčením polarizace. [2] [3]

Nelineární optika je vědní obor, který se zabývá přenosem optického záření s vysokou intenzitou v materiálovém prostředí, které z důvodu vysokého elektromagnetického pole mění své optické vlastnosti (např. absorpce, index lomu, samofokuse, parametrické zesílení). Nelineární jevy nelze popsat jednoduchou lineární závislostí jako $(X.Y)$, pouze pomocí vyšších mocnin rozvoje této závislosti. Vzhledem k četnosti lineárních jevů se nelineární jevy objevují s nižší frekvencí, proto jsou tyto jevy popsány pomocí polynomického rozvoje (rce XYZS), kde je první člen lineární a ostatní nelineární. Díky polynomickému popisu můžeme mluvit o maximálním řádu polynomu jako o řádu nelinearity

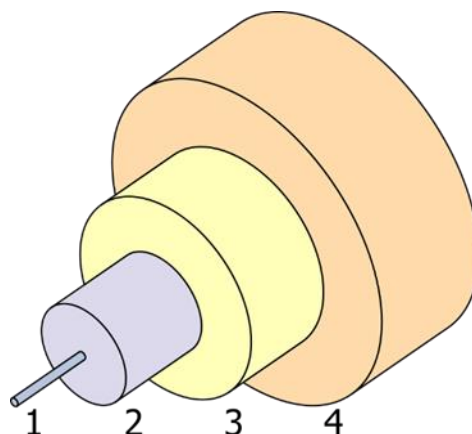
$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E}^2 + \varepsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E}^3 + \dots, \quad (1.8)$$

kde je $\chi^{(2)}$ značí susceptibilitu druhého řádu. [6] [7]

Tyto jevy často vykazují anizotropní krystaly, nejpoužívanějšími jsou BBO (β -barium borát), LiIO_3 (lithium jodát), KDP (dihydrogen fosforečnan draselný), nebo KTP (KTiOPO_4). [SPDC borci]

1.2 Optické kabely

Optické kabely jsou zařízení sloužící k vedení světelných signálů. Jejich využití je v současné době především v telekomunikacích pro přenos dat i na velkou vzdálenost, ve vláknové optice (zesilovače, lasery) a medicíně. Každý kabel je tvořen optickým vláknem a ochrannou proti poškození. Schéma struktury optického kabelu je na obr. 2.



Obr. 2: Struktura optického kabelu (1 – jádro, 2 – plášť, 3 – ochranná vrstva, 4 – obal) [9]

1.2.1 Teorie optického vlákna

Optické vlákno je podélný válcový optický vlnovod (světlovod), tvořený jádrem a pláštěm. Může přenášet světlo na velké vzdálenosti i po zakřivené dráze a chránit ho před rušením či poruchami. Výhodou optických vláken je možnost přenést obrovské množství informací i na velké vzdálenosti, galvanické oddělení (pro přenos signálu) a odolnost vůči elektrostatickému záření. [5]

Nejčastější skleněná vlákna jsou vyrobena z křemene (amorfní oxid křemičitý SiO_2), a to buď v čisté podobě nebo s příměsí. Křemen se využívá kvůli nízkým ztrátám při šíření signálu a kvůli svým mechanickým vlastnostem (odolnost vůči tahu a ohybu). Pro jiné speciální účely se používají vlákna z jiných materiálů, např. fluoridová. [10]

Většina optických vláken používaných pro optické účely má jádro s daným indexem lomu, který je vyšší než index lomu okolí (pláště). Nejjednodušším případem je vlákno se skokovým indexem lomu, kde je index lomu konstantní jak pro jádro, tak pro plášť. [10]

Rozdíl mezi jádrem a pláštěm určuje numerickou aperturu vlákna (viz kap. 1.2.2). Světlo puštěné do jádra je vedeno podél jeho středu jádra – tudíž se světlo šíří jen v prostoru jádra, ačkoliv intenzitu můžeme změřit i mimo něj. Díky vedení světla v jádře dochází k malým ztrátám v šíření, a proto se intenzita dokáže udržet téměř konstantní i na velké vzdálenosti. [10]

1.2.2 Základní parametry vlákna

Vlákna se skokovým indexem lomu mohou být popsána jen pomocí dvou parametrů – poloměru jádra a numerické apertury. Běžné hodnoty poloměru jádra jsou řádově mikrometry pro jednovidová vlákna a desítky mikrometrů pro vícevidová vlákna. [10]

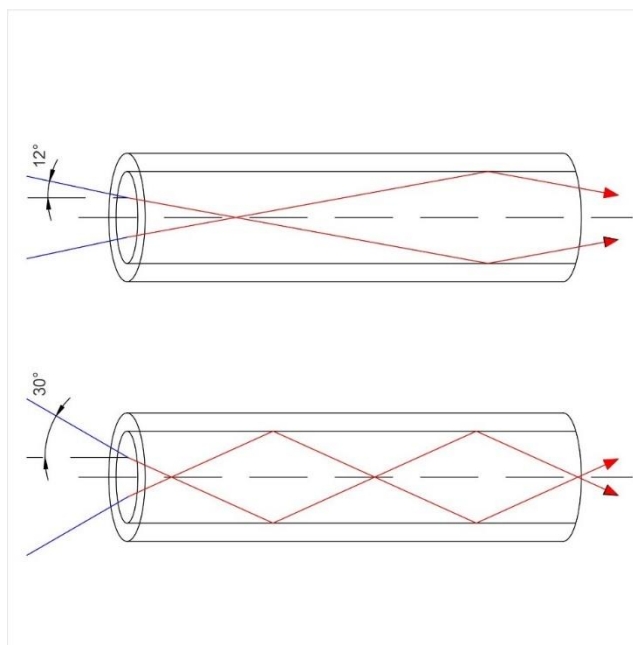
Numerická apertura NA vymezuje schopnost vlákna pojmout určité množství světla a pro vnitřek vlákna je definována vztahem

$$NA = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_{\text{jádra}}^2 - n_{\text{plášť}}^2}, \quad (1.9)$$

kde n označuje index lomu, n_0 je index lomu prostředí (v případě vzduchu téměř rovný 1). Numerická apertura je zároveň sinem maximálního možného úhlu θ_a dopadajícího paprsku vzhledem k ose vlákna v daném prostředí n_a , tedy [11]

$$NA = n_a \cdot \sin(\theta_a) \quad (1.10)$$

Běžné hodnoty NA nabývají řádu 0.1 pro jednovidová vlákna a okolo 0.3 pro vícevidová vlákna. S rostoucí hodnotou NA klesá šance ztráty signálu při ohnutí kabelu, což je způsobeno silnou vazbou vidového pole vůči jádru. [10]



Obr. 3: Vlákno s malou aperturou (nahore) a velkou aperturou (dole) [5]

Dalším důležitým parametrem je útlum optického vlákna $u(\lambda)$, který se dá spočítat ze vztahu

$$u(\lambda) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right) [dB], \quad (1.11)$$

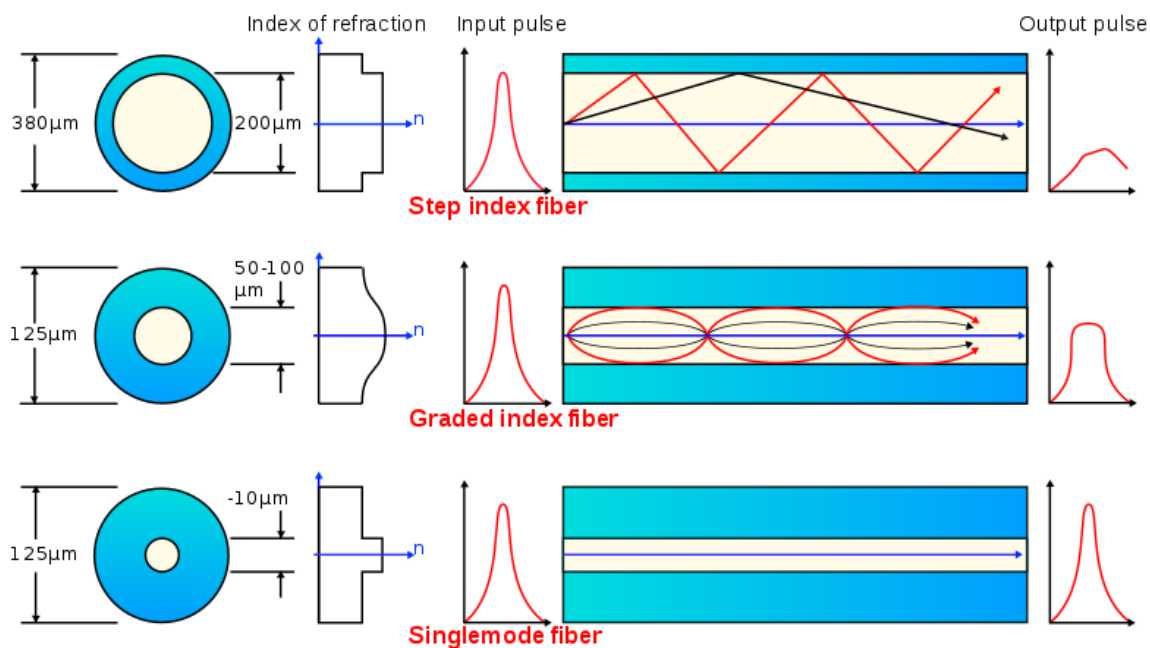
kde P_{in} je zářivý tok na začátku vlákna a P_{out} na konci. Útlum je závislý na vlnové délce, neboť ztráty jsou závislé na absorpci a rozptylu, které jsou závislé na vlnové délce. Celkový útlum je dán součtem ztrát jednotlivých složek (viz kap. 1.3). [11]

Čím nižší je útlum, tím kvalitnější a přesnější bude přenos signálu. [1]

1.2.3 Typy optických vláken

Optická vlákna se dělí podle množství šířených vidů – vícevidová (MM) a jednovidová (SM) (viz obr. 4). Vid je ekvivalentem pojmu pro světelný paprsek, šířící se ve směru optického vlnovodu tak, že rozložení intenzity a elektrického a magnetického pole se nemění. Počet vidů je omezen strukturou a velikostí jádra. Vidy mohou být axiální (putují osou vlákna) nebo meridionální (světlo naráží na stěny jádra). [5]

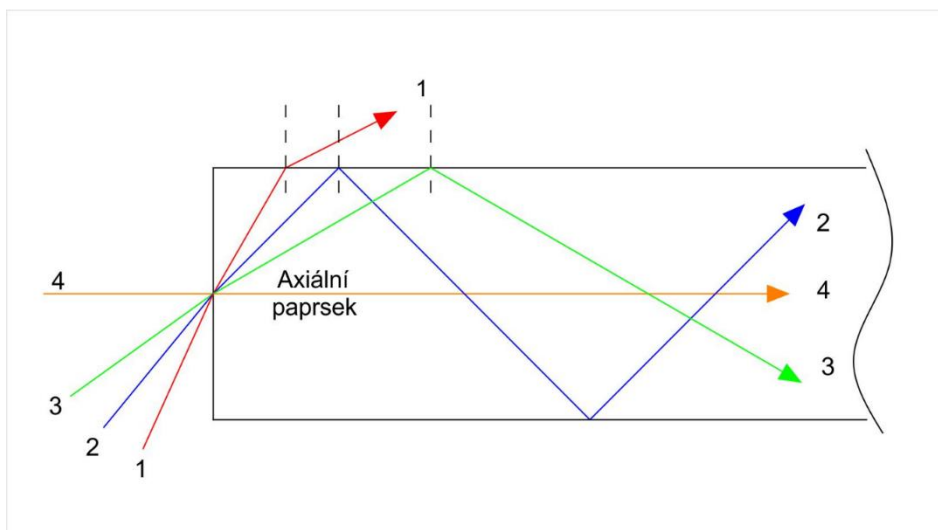
Optický kabel může mít jeden nebo více vedených vidů, jejichž uspořádání vede buď přímo v jádru a nebo okolo něj. Avšak je možné, že nepatrná část světla se bude přenášet i skrz plášť. Optická mohutnost vidů v plášti se obvykle ztratí po uražení dostatečné vzdálenosti, ale v některých případech se šíří i přes velkou vzdálenost. Ztráty vidů v plášti určuje ochranná vrstva, která bývá tvořena např. z akrylátu, křemene nebo polyimidu. [10]



Obr. 4: Typy optických vláken (angl.: *step index fiber* (nahore) – MM se skokovou změnou indexu lomu; *graded index fibre* (uprostřed) – MM s plynulou změnou indexu lomu; *singlemode fiber* (dole) – SM) [12]

Vícevidová vlákna

Vícevidová (MM) vlákna dělíme na ta se skokovou změnou indexu lomu a na ta s plynulou změnou indexu lomu (gradientní). Vlákná se skokovou změnou indexu lomu využívají pro šíření světla úplného odrazu (viz kap. 1.1). Princip šíření vidů je vidět na obr. 5. V praxi se proto využívá skleněný plášť s indexem lomu jen o něco málo menším, než je jádro. A to především proto aby byl mezní úhel co největší, což je důležité v případě ohybu vlákna. [5]



Obr. 5: Princip šíření vidů ve vlákne se skokovou změnou indexu (1 – paprsek vstupuje do vlákna pod úhlem větším, než je mezní úhel, tudíž dochází k lomu paprsku do okolního prostředí (nevýhodné); 2 – paprsek vstupuje do vlákna pod úhlem menším, než je mezní úhel, paprsek se odráží a šíří vláknem pomocí úplného odrazu; 3 – paprsek pod menším úhlem než druhý, ale také se šíří vláknem (lépe); 4 – paprsek je axiální, šíří se přímo ve směru osy vlákna bez odrazů (dokud nedojde k ohybu) [5]

Vlákna s plynulou změnou indexu lomu (gradientní vlákna) mají proměnný index lomu v jádře a to tak, že v jádře dochází k nepřetržitému ohybu světla. Čímž dojde k tzv. samoostřicímu efektu a tedy i k odstranění vidové disperze. Tato vlákna jsou mnohem vhodnější pro přenos signálu, zejména v lokálních sítích (LAN). [5]

Vícevidová vlákna se nejvíce používají pro přenos světla ze zdroje kamkoli tam, kde je ho potřeba. V komunikačních technologiích se vlákna používají více pro přenos dat na krátkou vzdálenost (v řádu budov, sítí; např. LAN). [10]

Jednovidová vlákna

Jednovidová (SM) vlákna mají odstraněny všechny vidy, které nejsou axiální, šíří pouze dominantní vid. Průměr takového vlákna by měl být menší, než je 3,6-násobek vlnové délky světla (např. pro vln. délku 1550 nm je to 5,6 μm). Výroba těchto vláken je náročná, ale za to mají nejlepší přenosové vlastnosti ze všech typů. [5]

Efektivní zavedení světla do jednovidového vlákna vyžaduje většinou laserový zdroj s kvalitním světelným paprskem a jeho přesné vyladění kvůli dosažení fázové shody. Tato vlákna se běžně používají pro vláknové lasery a optické parametrické zesilovače. V neposlední řadě je také najdeme v komunikačních technologiích zejména pro daleký přenos dat. [5]

Vlákna pro speciální účely

Některá optická vlákna mohou mít jádro s jiným než válcovitým průřezem, obvykle jádro s elipsoidním nebo obdélníkovým tvarem (na příčném řezu). To je konstruováno pro zvláštní účely často se speciálními vlastnostmi, s polarizací nebo potlačením šíření. [13]

Tabulka 2: Charakteristika optických vláken (pro představu) [5]

	MM vlákno se skokovou změnou indexu	MM vlákno s plynulou změnou indexu	SM vlákno
Průměr jádra	50 – 450 μm	30 – 60 μm	3 – 10 μm
Průměr pláště	125 – 500 μm	100 – 150 μm	125 μm
Průměr primární ochrany	250 – 1000 μm	250 – 1000 μm	250 μm
Numerická apertura	0,25 – 0,5	0,2 – 0,3	0,08 – 0,15
Index lomu jádra (přibližně)	1,48	1,48	1,46
Index lomu obalu (přibližně)	1,45	1,45	1,456
Útlum	3 – 4 dB/km při vln. délce 850 nm	2,5 dB/km při vln. délce 850 nm,, 0,5 dB při 1300 nm	0,2 – 0,5 dB/km při vln. délce 1550 nm
Šířka pásma	6 – 25 MHz pro 1 km	350 – 600 MHz pro 1 km	40 GHz na 1 km

1.2.4 Ochrana optického vlákna

Optické vlákno je velice křehká věc náchylná k mechanickému poškození, a proto má svou ochranu. Pro kabelování bývají ještě přidávány zpevňující prvky pro zvýšenou ochranu před napětím v tahu, které musí být elastické, přitom dostatečně pevné a relativně lehké (např. ocelové dráty, laminát nebo kevlar). [5]

První ochranou vrstvou je optické skleněné vlákno opatřeno již při výrobě (plášť), avšak pro praktické používání je tato ochrana nedostatečná. Proto se přidává ochrana primární (buffer), která dává vláknu pružnost, a sekundární (jacket), která může být dvojího typu – těsná nebo volná. [5]

Těsná sekundární ochranná vrstva bývá tvořena tvrdou plastickou hmotou (např. PVC, HDPE, polyuretan, teflon, hytrel, nylon) a poskytuje ochranu proti ztrátám způsobených mikroohyby. Tímto způsobem zabezpečené vlákno bývá často opatřené ještě kevlarovým opletem. Takový kabel je označován jako „suchý“. [5]

Volná sekundární ochrana vytváří dutinu, do které je vloženo vlákno chráněné ochranou primární. Pro lepší tlumení bývá dutina vyplněna gelem (silikonovou směsí). Takový kabel se označuje jako „mokrý“. [5]

1.2.5 Spojování vláken

Při spojování optických vláken je nezbytné zajistit přímou cestu světla. Spojení vláken může být trvalé nebo rozebíratelné (dočasné). Trvalé spoje bývají realizované pomocí svářeček (elektrickým obloukem), přičemž se nejčastěji využívá navaření pigtail – kusu vlákna zakončeným profesionálně vyrobeným konektorem. Rozebíratelný spoj má tu nevýhodu, že signál prochází skrz více prostředí (dochází ke ztrátám). Přesto je tento typ spoje často využíván např. pro propojení kabelu s konkrétním optickým zařízením nebo pro propojení počítače a optické zásuvky. Samotné koncovky mohou být různého materiálu podle účelu využití. [5]

Profil vlákna se může lišit a zakončení nemusí být nutně válcovité, tudíž se může lišit i index lomu. Takovým příkladem může být indexová prohlubeň ve středu vlákna (např. z důvodu výhodnějšího výparu). Některá gradientní vlákna mají index lomu snižující se vzdáleností

od středu (např. parabolický tvar), pak paprsek opisuje sinusovou křivku, což snižuje vidovou disperzi (výhodné pro vícevidová vlákna). Dalšími typy mohou být zakončení ve tvaru „W“, trojúhelníkové, lichoběžníkové, eliptické nebo Gaussovské. [10]

Při práci s optickými kabely jsou nejčastějšími problémy prach, mastnota, citlivost vlákna na mechanické poškození (především koncových ploch). [10]

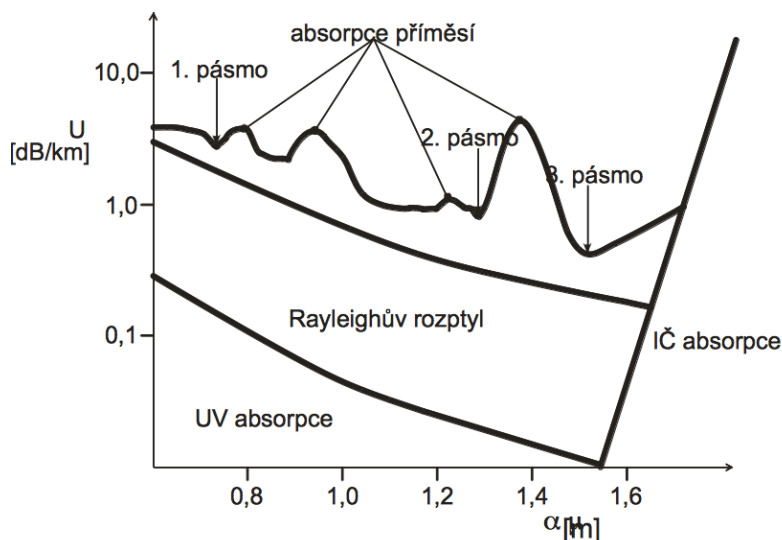
1.3 Ztráty v optických kabelech

V optických vláknech dochází k několika možnostem ztrát, které by se daly rozdělit na ohybové ztráty (způsobené přílišným ohybem vlákna), rozptylové ztráty (vznikají na nečistotách a fluktuacích krystalické mřížky při výrobě), absorpční ztráty (přeměněná světelná energie na teplo) a disperzní ztráty (jevy znehodnocující vlastnosti optických vláken). [11]

Ztráty optického vlákna jsou charakterizovány útlumem (1.11). Celkový útlum α je dán součtem ztrát jednotlivých složek

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_R + \alpha_d + \alpha_O, \quad (1.12)$$

kde jsou proměnné α_A útlum absorpcí, α_R útlum rozptylem, α_d útlum disperzí, α_O útlum ohybem a jinými deformacemi.



Obr. 6: Útlum optických vláken [14]

1.3.1 Ohybové ztráty

Ohybové ztráty jsou zapříčiněny změnou úhlu šíření ve vlákne, a tedy porušením podmínky totálního odrazu. Tyto ztráty mohou být rozděleny do dvou typů – makroohybové a mikroohybové (průměr jádra vlákna je menší než zakřivení vlákna). Ke ztrátě dále přispívá i fotoelastický jev. Jedná se o jev, kdy index lomu není konstantní, při ohybu vlákna totiž vzniká na vnitřní straně ohybu tlak a na vnější straně tahové napětí, čímž dochází ke změně indexů lomu v jádře a plášti, a tím se mění i mezní úhel šíření světla ve vlákne. [11]

Ohybové ztráty se mohou redukovat dvojitým způsobem. První způsob je určení trasy s velkými poloměry zakřivení vlákna. Druhým způsobem je zkrácení vlnové délky, přičemž ale narážíme na problém s Rayleigho rozptylem. Proto se v praxi užívá kompromis těchto dvou metod. [11]

1.3.2 Rozptylové ztráty

Rozptylové ztráty mohou být tří typů – Rayleighův rozptyl, Mieův rozptyl a rozptyl na nečistotách. Rayleigho rozptyl vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky, nedá se odstranit, pouze částečně eliminovat posunem frekvence do infračervené oblasti. Mieův rozptyl vzniká na nehomogenitách srovnatelných s vlnovou délkou. Příčinami tohoto jsou zejména mikroskopické bublinky, nečistoty a napětí ve vlákne, nedokonalá struktura vlnovodu. Pokud dochází k rozptylu na nehomogenitách větších, než je vlnová délka světla, mluvíme o rozptylu na nečistotách. Tyto ztráty lze eliminovat správnou technologií výroby (viz kap. 2). [11]

1.3.3 Absorpce vláken

Absorpce vláken se projevuje především při přenosu velkých energiích (např. laserové skalpely). Můžeme ji rozdělit do dvou skupin – absorpce vlastní a příměsová. Vlastní absorpce je způsobená absorpcí vlastním materiálem (např. SiO_2), absorpcí v ultrafialové oblasti (způsobena absorpcí valenčními elektrony) a absorpcí v infračervené oblasti (kmitání celých molekulových útvarů). Žádná z těchto absorpcí ovšem není odstranitelná. Příměsová absorpce záleží na podstatě příměsi, např. nejvíce absorbují vodní ionty (OH), čímž dělají skleněné materiály náchylné na praskání. [7] [11]

1.3.4 Disperze ve vláknech

Disperzní ztráty nezpůsobují úbytek energie, pouze rozprostírají energii navázanou do vlákna v čase. Obecně se dělí na vidovou disperzi, která je způsobena šířením se jednotlivých vidů po různých optických trasách a čas šíření je tedy různý, a chromatickou disperzi, která je způsobena závislostí indexu lomu na frekvenci, čímž se jednotlivé frekvence šíří ve vláknech po různých optických trajektoriích za rozdílný čas. [11]

Ve vícevidovém vlnovodu je hlavní příčinou disperze různá rychlost šíření energie jednotlivých vidů. Dochází k rozšíření impulsu Δt určenému jako rozdíl nejdelší a nejkratší doby šíření různých paprsků. Pro vlákno se skokovou změnou indexu lomů platí vztah

$$\Delta t \approx \frac{n_j}{2c} \left(\frac{NA}{n_j} \right)^2 L, \quad (1.13)$$

kde n_j je index lomu jádra vlákna, L je délka vlákna, NA jeho numerická apertura a c rychlost šíření světla ve vakuu. Typická hodnota $\Delta t/L$ je řádu jednotek ns/km. Pro vlákna s plynulou změnou indexu platí přibližně

$$\Delta t \approx \frac{n_j}{32c} \left(\frac{NA}{n_j} \right)^4 L, \quad (1.14)$$

kde n_j je index lomu v ose vlnovou. Tato vlákna mají hodnotu $\Delta t/L$ menší až o dva řády než vlákna se skokovou změnou. [7]

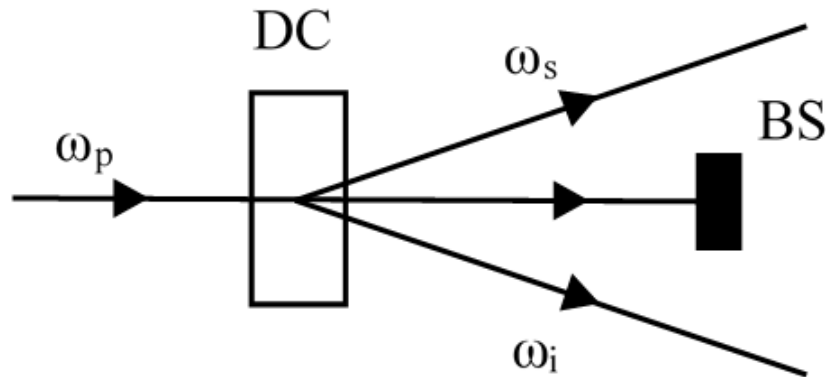
V jednovidovém vlnovodu je odstraněna vidová disperze, ale uplatňuje se chromatická disperze. Ta má dvě složky – materiálovou, která je způsobena odlišným indexem lomu pro různé vlnové délky (a tedy odlišnou rychlost světla s různou vlnovou délkou), a vlnovodovou, která je dána profilem indexu lomu v jádře a je tedy ovlivnitelná. Rozšíření impulsu Δt v jednovidovém vlnovodu je řádu jednotek ps/km. [5] [7]

1.3.5 Poškození vlákna

Poškození vlákna může nastat neopatrnou či nevhodnou manipulací (dojde k fyzickému poškození), nebo i vysokým výkonem (např. pro křemenná vlákna při překročení výkonu 4 MW). [10]

1.4 Spontánní sestupná parametrická konverze

Spontánní sestupná parametrická konverze (SPDC) je nelineární fyzikální jev, ve kterém je světlo jedné frekvence přeměněno na světlo jiné frekvence. V případě SPDC je samostatný foton o určité frekvenci přeměněn na krystalu *DC* na dva fotony o nižší frekvenci (přibližně dvakrát nižší) – viz obr. 7. [2]



Obr. 7: Princip sestupné konverze (*DC* – krystal, *BS* – stínítko, ω – úhlová frekvence) [2]

Vstupní vlnění je nazváno jako čerpací svazek (pump *p*) o úhlové frekvenci ω_p , zatímco výstupní svazky jsou nazvány jako signální (signal *s*) a volnoběžný (idler *i*) o úhlových frekvencích ω_s a ω_i . Sestupná konverze má být „spontánní“ (jako protiklad „vynucenému“), protože tu neexistuje žádné signální ani volnoběžné pole – jsou generovány spontánně uvnitř krystalu. Děj je „parametrický“, protože krystal pouze zprostředkuje vzájemnou vazbu mezi šířícími se vlnami, žádnou energii nepřijímá ani nevydává. To znamená, že je tu určitý fázový vztah mezi vstupním a výstupním polem. To je nazváno jako „sestupná konverze“, protože signální a volnoběžný paprsek jsou na nižší frekvenci, než je paprsek čerpací. [2]

Zákon zachování energie říká, že energie čerpacího fotonu je rovna součtu energií signálního a volnoběžného fotonu (1.15), kde E je energie fotonu, \hbar je redukovaná Planckova konstanta a ω je úhlová frekvence

$$\begin{aligned} E_p &= E_s + E_i \\ \hbar\omega_p &= \hbar\omega_s + \hbar\omega_i \\ \omega_p &= \omega_s + \omega_i. \end{aligned} \tag{1.15}$$

Vidíme, že zachování energie implikuje součet signální a volnoběžné frekvence jako čerpací frekvenci. Zákon zachování hybnosti vyžaduje fázovou shodu, tedy aby vlnové vektory na vstupu a výstupu splňovaly

$$\begin{aligned}\mathbf{p}_p &= \mathbf{p}_s + \mathbf{p}_i \\ \hbar\mathbf{k}_p &= \hbar\mathbf{k}_s + \hbar\mathbf{k}_i \\ \mathbf{k}_p &= \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i,\end{aligned}\tag{1.16}$$

kde \mathbf{p} značí vektor hybnosti fotonu a \mathbf{k} značí vlnový vektor fotonu. [2][15]

Víme, že frekvence a vlnové vektory jsou závislé jeden na druhém, a jsou propojeny vztahem disperze. Pro čerpací svazek máme vztah

$$\mathbf{k}_p = \frac{n_p \omega_p}{c},\tag{1.17}$$

kde n_p je index lomu BBO krystalu pro čerpací frekvenci. Podobné vztahy můžeme dostat i pro signální a volnoběžný vlnový vektor. [2]

Víme, že indexy lomu závisí na frekvenci (vlnové délce, viz kap. 1.1.2). Pokud vlny čerpací, signální a volnoběžné budou téměř kolineární (rovnoběžné), rovnice (1.15) a (1.16) implikují, že indexy lomu pro všechny tři vlny jsou téměř shodné. Pro většinu průhledných látek index lomu roste s rostoucí frekvencí (snižuje s rostoucí vlnovou délkou) v oblasti viditelného světla. Protože je čerpací paprsek na téměř dvakrát větší frekvenci než konvertované paprsky, bude mít jiný index lomu od signálního a volnoběžného paprsku. Pro zachování podmínky fázové shody musí být využito anizotropního prostředí (dvojlomný sestupně konverzní krystal). [2]

Různé směry polarizace interagujících polí definují několik typů fázové shody. V případě sestupné konverze typu I ($e \rightarrow oo$) generuje čerpací foton s polarizací e (extraordinární – mimořádnou) fotonový pár s polarizací o (ordinární – řádnou). V případě typu II ($e \rightarrow oe$) generuje čerpací foton dva fotony s polarizacemi navzájem kolmými. [3]

2 VÝROBA OPTICKÝCH KABELŮ

Pro výrobu optických kabelů pro naše potřeby bylo postupováno podle návodu od firmy Thorlabs: „Guide to Fiber Connectorization and Polishing“. Celý návod je v angličtině a je možné jej najít na stránkách firmy Thorlabs pod kódem FN96A nebo v příloze na CD této práce.



Obr. 8: Hotový vyrobený optický kabel (pro ilustraci)

Naším cílem bylo vyrobit kabel s těmito parametry: cenově dostupný, krátká vzdálenost přenosu, nízké ztráty pro vlnovou délku 810 nm. Nejlépe požadavkům vyhovoval kabel obr. 8 od firmy Thorlabs s parametry v tabulce 3. [16]

Tabulka 3: Parametry vyrobených kabelů [16]

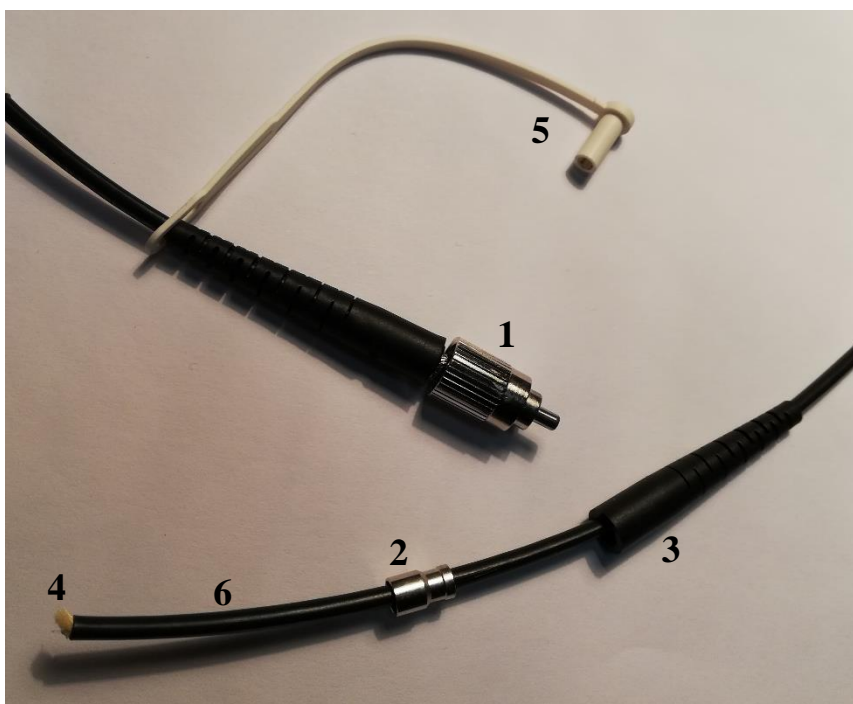
Typ vlákna	MM se skokovou změnou indexu
Numerická apertura	$0,22 \pm 0,02$
Rozsah vlnových délek	250 – 1200 nm
Jádro (core)	čistý SiO ₂ , Ø = 50 µm
Plášť (cladding)	SiO ₂ s příměsí Fluoru, Ø = 125 µm
Primární ochrana (coating)	akrylát, Ø = 250 µm
Typ koncovky	nerezová ocel, FC/PC

2.1 Bezpečnost

Během výroby optických kabelů je potřeba dbát zvýšené opatrnosti se zacházením s optickými vlákny, která jsou velice křehká. Dalším nebezpečím spojeným s optickými vlákny jsou odštípnuté konce vlákna – ostré zbytky, které mohou být neopatrným zacházením přeneseny do oka, spolknuty, mohou poškodit nebo podráždit kůži. Z těchto důvodů by se tyto nepoužitelné zbytky vlákna měly umístit do určené nádoby ihned, jakmile nějaké vzniknou. I z tohoto důvodu by se poblíž a na pracovišti nemělo pít ani jíst.

Je silně doporučeno mít nasazené rukavice a ochranné brýle (proti mechanickému poškození) po dobu celé výroby kabelů, zejména při práci s epoxidovým lepidlem a rozpouštědly, se kterými by se mělo zacházet pouze podle instrukcí výrobce.

2.2 Navlečení obalu na vlákno a připevnění koncovky



Obr. 9: Základní části kabelu (1 – koncovka (ferule), 2 – aretační prvek (crimp sleeve), 3 – ohebná tahová objímka (boot), 4 – kevlarová vlákna, 5 – plastový kryt, 6 – bužírka)

Začali jsme přípravou koncovek – očistili jsme je několikaminutovým namočením v isopropylalkoholu, poté jsme konektory vyndali na suchý povrch a nechali isopropyl vypařit.

Mezitím, co konektory usychaly, jsme nařezali bužírku na potřebně dlouhou délku (přibližně 1 m) a nasadili na ní aretační prvek a ohebnou tahovou objímku (viz obr. XY). Na každém konci jsme odstranili venkovní ochranu (PVC materiál) o přibližně 13 mm od konce tak, že kevlarová vlákna a vnitřní ochrana byly volně. Následně jsme zkrátili vnitřní ochranu na velikost venkovní (PVC) ochrany.

Nyní jsme zavedli optické vlákno dovnitř do vnitřní ochrany tak, aby vlákno přesahovalo konec bužírky o přibližně 40 mm na každé straně (a tedy přesahovalo i kevlarová vlákna).

Pomocí odizolovacích kleští odstraníme plášť konce vlákna. V našem případě by nyní měl konec kabelu vypadat tak, že kevlarová vlákna přesahují konec bužírky o 5 mm, plášť jej přesahuje o 21 mm a konec vlnovodu 31 cm.

Před upevněním koncovky je nezbytné vyzkoušet, zda každou oschlou koncovku lze nasadit na optické vlákno neboli, jestli je koncovka připravena k připevnění. Při nasazení koncovky na konec kabelu by mělo alespoň 10 mm vlákna přesahovat koncovku. V tuto chvíli jsme zastříhli kevlarová vlákna na potřebnou délku.

Připravili jsme epoxidové lepidlo, jehož pracovní doba trvá přibližně 30 min, přičemž tvrdne následných 24 hod. Epoxidové lepidlo jsme zavedli do konektoru pomocí stříkačky a vzápětí jsme protáhli optické vlákno skrz konektor s lepidlem. Jakmile se konektor nacházel ve správné poloze („sedí nadoraz“), přetáhli jsme přes konec konektoru aretační prvek a s pomocí kevlarových vláken a krimpovacích kleští upevnili koncovku. Závěrem jsme dodali malou kapku lepidla na čelní stranu koncovky a pod aretační prvek. Obdobně jsme provedli pro druhou koncovku a nechali zatvrdnout.

2.3 Leštění koncovky optického kabelu

Důkladné vyleštění koncovky optického kabelu je nezbytné pro snížení rozptylových ztrát vlákna (viz kap. 1.3)

Čistého a hladkého konce vlákna lze dosáhnout pomocí různých leštících technik. Existují techniky, pomocí nichž lze vytvořit sklon koncového profilu vlákna jiný než kolmý (např. sklon 10° od osy). Těch se využívá ke snížení koncového odrazu paprsku. [10]

Další technikou přípravy koncového profilu je odštípnutí, kdy se jedná o zatahnutí vlákna při řezání vlákna kolmo (např. diamantovým ostřím). Toto umožní oddělení vlákna převážně hladkými konci – především v oblasti jádra. Kroucením během tohoto procesu lze dosáhnout i jiného úhlu koncové plochy, avšak tato metoda není tak spolehlivá jako metoda leštění. [10]

Naším cílem bylo připravit hladký konec vlákna s plochou kolmou na osu vlákna.

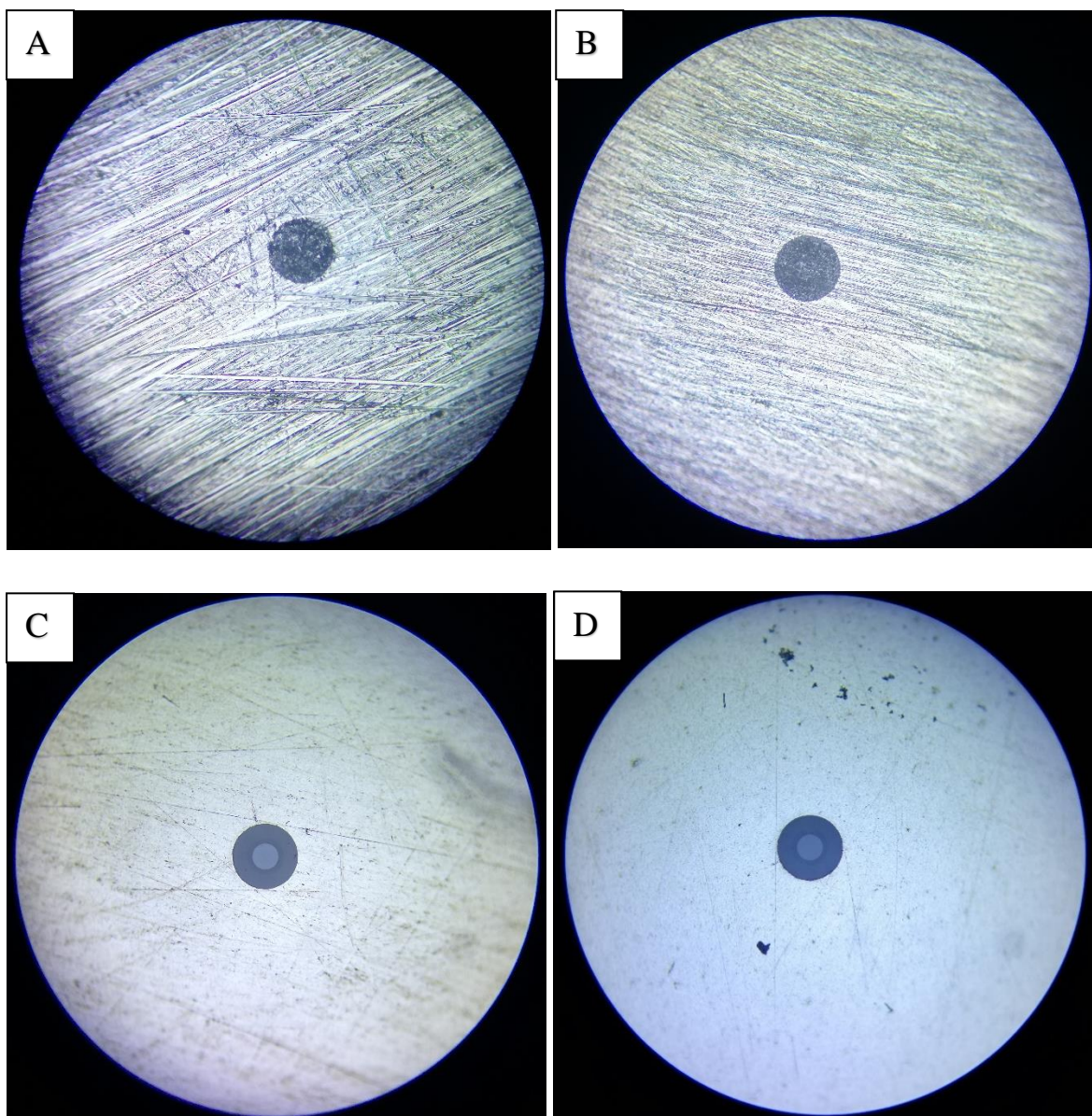
Jakmile byly koncovky bezpečně zaschlé, museli jsme zaříznout optické vlákno – k tomu jsme použili nůž a vlákno zařízli přibližně ve vzdálenosti jednoho poloměru vlákna nad lepidlem. (Zde je riziko, aby se vlákno nezlomilo, takové vlákno nelze vyleštit do hladka). Poté jsme vlákno jemně oddělili od svého zbytku zatahnutím v opačném směru.

Než jsme přešli k leštění na stole, museli jsme zarovnat přesahující vlákno s výškou zaschlého lepidla. Vlákno jsme zarovnali jemným pohybem dopředu a dozadu po 30 μ m leštícím papíře ve vzduchu, abychom vlákno nadbytečným tlakem nezlomili.

Leštění na stole probíhalo na skleněné desce přikryté gumovou podložkou. Protože jakákoli nečistota nebo prach může zabránit perfektnímu vyleštění, bylo nezbytné zachovat podložku i leštící disk co nejčistší. Čištění podložky jsme tedy prováděli několikrát během leštění.

Na podložku jsme nejprve umístili 30 μ m leštící papír, který jsme jemně přitiskli na gumovou podložku, a na něj přiložili leštící disk, do nějž jsme opatrně zasunuli optický kabel. Leštění probíhalo opisováním tvaru čísla „8“, dokud jsme nesundali všechno lepidlo. Jeden papír jsme využili podle možností, většinou až šestkrát. Následně jsme přešli na 6 μ m leštící papír. Tentokrát jsme tvar čísla „8“ opsali na papír jen desetkrát. Poté jsme se přesunuli k 3 μ m, dále k 1 μ m, a nakonec k finálnímu leštícímu papíru. Pro leštící papíry se strukturou jemnější než 3 μ m se doporučuje nanést několik kapek destilované vody na leštící papír pro lepší adhezi.

Závěrečnou kontrolu leštění jsme udělali v mikroskopu (200X). Ověřili jsme, zda nezůstalo žádné lepidlo na koncovce, vlákno je v rovině s rovinou koncovky, na vlákně nejsou vidět žádné škrábance, šupiny ani díry. Pokud jsme na vlákně našli některou z výše uvedených nedokonalostí, opakovali jsme leštění od 3 μ m papíru v lepším případě, v horším případě od 30 μ m. Proces leštění je vidět na obr. 10.



Obr. 10: Průběh leštění koncovek kabelů skrz mikroskop (*A – plocha koncovky po leštění na 30 μ m papíru; B – plocha koncovky po leštění na 6 μ m papíře; C – plocha koncovky po leštění 1 μ m papírem; D – koncovka po leštění finálním papírem*)

Je vidět, jak důležitý je každý krok leštění pro kvalitní zakončení kabelu a vyhlazení koncovky. Nezbytné je, aby nebylo poškozené vlákno a bylo vyleštěné do hladka (rozdíl mezi obr. 10B a 10C), zároveň je potřeba, aby nebyla žádná nečistota na vláknech (důkladné odstranění škrábanců obr. 10C a 10D). Připravenou (hladkou) koncovku je nutno zakrýt krytem, aby nedošlo ke zbytečnému poškrábání.

2.4 Měření optických kabelů

Měření optických vláken lze provést různými metodami pro získání potřebných hodnot dané charakteristiky. Pro naše účely jsme zvolili metodu vložných ztrát – jedná se o dvoustupňovou, nedestruktivní metodu, která se používá především pro měření spojek konektorů i jako metoda pro proměření trasy. Touto metodou se určují změny celkového útlumu vzhledem k vnějším vlivům. Měření vychází ze vzorce pro výpočet útlumu (1.11) (kap. 1.2.2):

Měření bylo vedeno tak, že nejprve byl svazek světla (kontinuální zdroj, 785 nm) přes čočku navázán do optického vlákna, na jehož konci byla zaznamenána maximální hodnota přeneseného výkonu. Poté bylo vlákno zavedeno do kabelové spojky a na druhý konec vložen proměřovaný kabel. Měření jednoho kabelu proběhlo dvakrát, pro druhé měření jsme prohodili strany měřeného kabelu (z důvodu nestejnomyšerného leštění koncovek a možného odrazu světelného svazku na začátku/konci vlákna při nedokonalém vyleštění).

Měření bylo provedeno pomocí měřicí konzole „Optical Power and Energy Meter“ typu PM100D a „Photodiode Power Sensor“ S120VC s detekcí pro vlnové délky 200 – 1100 nm a rozsahem 50 nW – 50 mW; s chybou měření $\pm 3\%$. [16] Výsledky jsou v tabulkách 4 a 5.

Tabulka 4: Měření optických kabelů

Označení kabelu	Maximální přenesený výkon [mW]	Měření 1 (A-B) [mW]	Ztráty měření 1 [mW]	Měření 2 (B-A) [mW]	Ztráty měření 2 [mW]
1	X	X	X	X	X
2	15,2	13,1	2,1	12,7	2,5
3	15,2	13,6	1,6	13,7	1,5
4	15,2	14	1,2	14,2	1
5	15,2	14,1	1,1	14	1,2
6	14,1	12,8	1,3	13,1	1
7	15,2	13,2	2	13,5	1,7
8	15,2	14,1	1,1	13,8	1,4
9	15,2	12,4	2,8	13,1	2,1

Tabulka 5: Vypočítané hodnoty jednotlivých kabelů

Označení kabelu	Střední hodnota měření [mW]	Střední hodnota ztrát [mW]	Účinnost přenosu světla []	Charakteristika vlákna (útlum) [dB]	Celkové ztráty []
1	X	X	X	X	X
2	12,9	2,3	0,849	0,713	0,151
3	13,65	1,55	0,898	0,467	0,102
4	14,1	1,1	0,928	0,326	0,072
5	14,05	1,15	0,924	0,342	0,076
6	12,95	1,15	0,918	0,369	0,082
7	13,35	1,85	0,878	0,564	0,122
8	13,95	1,25	0,918	0,373	0,082
9	12,75	2,45	0,839	0,763	0,161

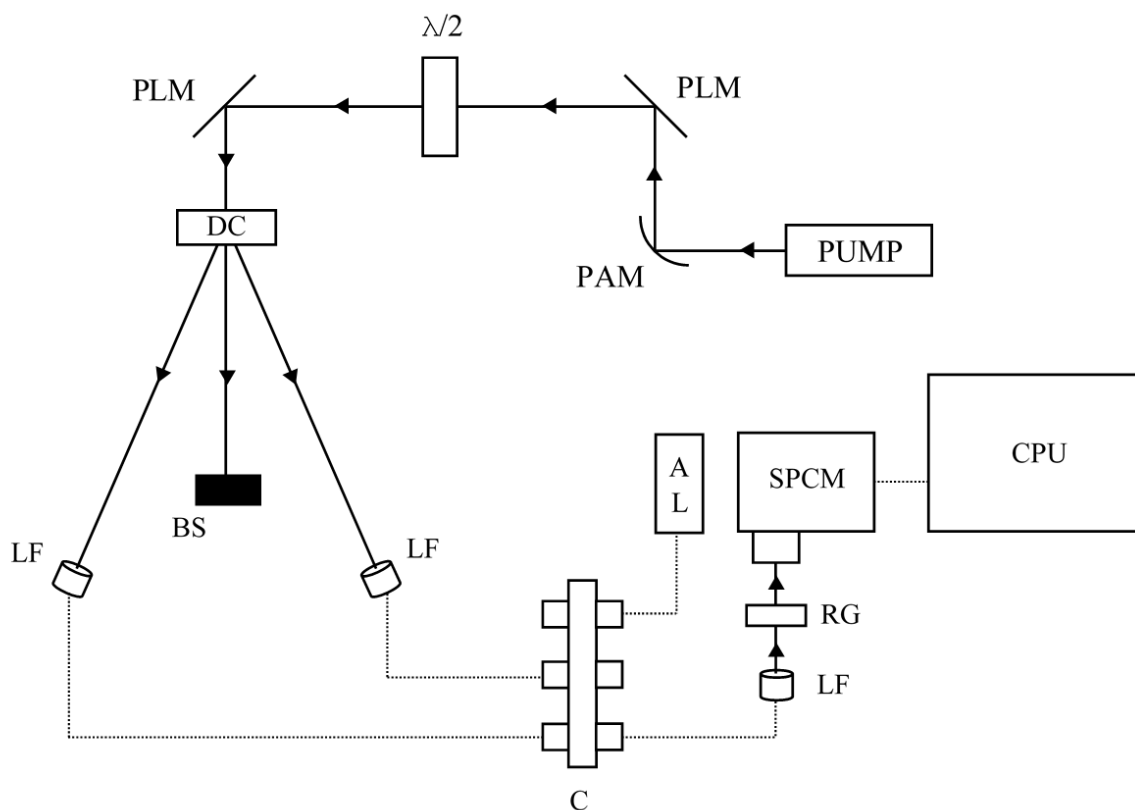
Hodnota X značí neměření hodnoty, neboť kabel č. 1 byl zkušebním kabelem, na němž byl zkoušen pracovní postup. Při nasazování druhé koncovky se ulomil konec vlákna, a z tohoto důvodu kabel nebyl dokončen a ani měřen. Hodnoty účinnosti přenosu světla pro jednotlivé kabely jsou vidět v tabulce 5, podobně jako útlum a ztráty optického kabelu. Chyby měření jsou způsobeny chybou přístroje, která je v našem případě konstantní.

Ztráty byly s největší pravděpodobností způsobeny nedokonalým přenosem energie skrz spojku kabelů, kde mohla vzniknout vzduchová šterbina. Ta u našeho typu konektorů mohla vzniknout příliš hlubokým čištěním a tedy zbroušením (zkrácením) koncovky optického kabelu. Další příčinou je rozptyl na možných nečistotách na čelní (přední/zadní) straně koncovky, které sem mohly být zaneseny při výměně stran kabelu či sundání obalu koncovky.

Hodnota útlumu při porovnání s tabulkovými hodnotami (tabulka 2) vychází naše hodnoty podstatně vyšší, tedy 300 – 800 dB/km (0,3 – 0,8 dB/m). Z důvodu předpokládaných velkých ztrát při zavádění svazku do kabelu se nemůžeme řídit hodnotami vztaženými na vzdálenost v km, tedy můžeme uvažovat hodnoty v tabulce 5 jako směrodatné a bude lepší se spíše řídit samotnou účinností přenosu. Průměrná účinnost námi vyrobených (dokončených) kabelů je přibližně 89 %, tedy ztráty jsou okolo 11 %.

3 SESTAVENÍ OPTICKÉ DRÁHY

Pro sestavení experimentu jsme postupovali podle návodu knihy „*Quantum mechanics: Theory and experiment*“ od Mark Beck. [2]



Obr. 11: Schéma konstrukce experimentu SPDC (*PUMP – laserová dioda, PAM – parabolické zrcadlo, PLM – rovinná zrcadla, $\lambda/2$ – půlvlnná destička, DC – sestupně konverzní krystal, BS – stínítka, LF – čočka navádějící paprsek do/z vlákna, C – spojka optických kabelů, RG – stínící filtr, SPCM – detektor, CPU – počítač, AL – ladící laser*)

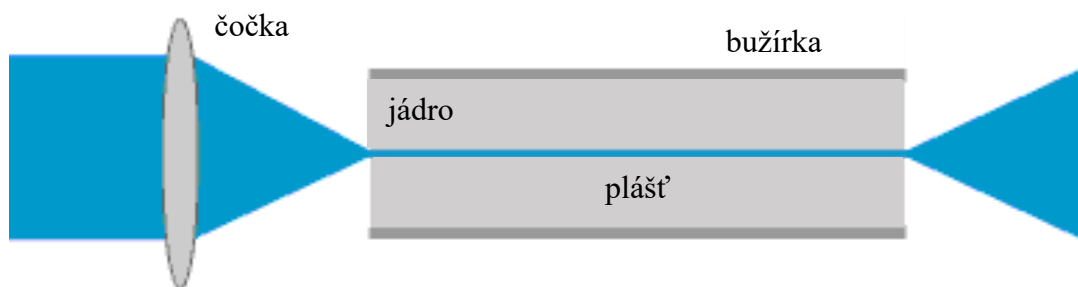
Zdroj světla (PUMP) - Jednou z nejdůležitějších součástí je zdroj čerpacího paprsku. Pro ten byla použita laserová dioda typu L405P150 s charakteristikou výstupu středních hodnot vlnové délky 405 nm a výkonu 150 mW, v TO obalu s G-pin konfigurací pro kontinuální nebo pulzní použití (pro experiment využijeme kontinuálního modu). [16]

Protože dochází k divergenci svazku (0° v rovnoběžném směru a 19° v kolmém), je nezbytné svazek světla kolimovat na co nejkratší dráze. Nejvhodnějším řešením se ukázala kolimace pomocí parabolického zrcadla (PAM) typu MPD127127-90-P01 ($\varnothing = 12,7$ mm, mimoosé, postříbřené). [16]

Půlvlnná destička ($\lambda/2$) – Pro možnost otočení polarizace čerpacího paprsku jsme použili půlvlnnou destičku nultého řádu (pro vlnovou délku 405 nm), o průměru 15,0 mm se vzduchovou výplní. [19]

Sestupně konverzní krystal (DC) – Použili jsme krystal BBO (β -barium borát – β -BaB₂O₄, TYP I; $\theta = 28,8$ deg; $\varphi = 0$ deg; AR/AR; 810/405 nm) o rozměrech 3x3x5 mm, který by měl být dostatečný pro generování dostatečného počtu fotonových párů (podle [2]). Struktura krystalu podmiňuje vznik sestupné konverze typu I ($e \rightarrow oo$) pod úhlem 3° vzhledem k incidentnímu svazku. (Pro experiment by bylo možné použít i jiný krystal, např. LiIO₃.) [19]

Optické kabely – Pro převedení světla na detektor jsme použili vyrobených kabelů (viz kap. 2) s nejlepšími vlastnostmi přenosu (tj. kabely č. 4, 5, 6). Fotony jsme navázali do optického vlákna pomocí asférické čočky ($\varnothing = 7,22$ mm, $f = 11,00$ mm, $NA = 0,25$) viz obr. 12. Pro vyladění jsme použili ladící laser (AL) o vlnové délce 785 nm. Kabely jsme pro lepší manipulaci propojili pomocí spojky optických kabelů (C). Na výstupu z vlákna jsme opět použili čočku stejného typu pro získání kolimovaného svazku. [16]



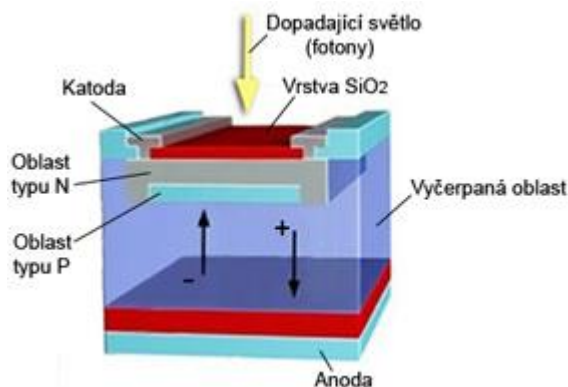
Obr. 12: Příklad zavedení kolimovaného laserového svazku do vlákna [10]

Filtr (RG) – Pro důkladné odstínění detektoru od všech ostatních fotonů z okolí jsme použili filtr typu FGL780 (barevné sklo, $\varnothing = 25$ mm, šířka 2 mm, RG780, blokující vlnové délky kratší než 780 nm) a černou páskou připevnili k detektoru k maximálnímu odstínění. [16]

Detektor (SPCM) – Pro detekci fotonů jsme použili přístroj SPCM-AQRH-14, který zaznamenává fotony v rozmezí 400 – 1060 nm. V přístroji je zabudovaná lavinová dioda (SLiK), která dosahuje nejvyšší efektivitu (70 %) při vlnových délkách kolem 700 nm na ploše 180 μm (pro oblast 810 nm se pohybuje efektivita kolem 50 %) a jejíž doba necitlivosti je méně než 25 ns. [17]

Lavinové fotodiody (APD) fungují na principu N-P přechodu (nepropustném směru), kdy se při přiložení vysokého napětí stane bariéra pro elektrony překonatelnou i s energií jednoho fotonu (obr. 12). Tedy světlo na oblast N a projde jí do oblasti P, přičemž na přechodu NP vznikne tzv. lavinový efekt. Fotony dopadají na pár díra-elektron a rozdělí je. Silné elektrické pole umožňuje elektronům projít oblastí P, kde naráží na další pár díra-elektron a zase je rozdělují. Tento jev se opakuje. Lavinový efekt vyjadřuje multiplikační činitel, který vyjadřuje průměrný počet párů rozdělených po dopadu jednoho fotonu. Závěrné napětí bývá 200 – 500 V. [5]

Detektor vyšle elektrický pulz pokaždé, když zaznamená foton. Po určitém časovém intervalu počítač vyhodnotí, kolik fotonů dopadlo na čítač.



Obr. 12: Princip lavinové fotodiody (APD) [5]

Pro lepší vizualizaci dat (četností naletěných fotonů) využijeme Poissonova rozdělení pravděpodobnosti. To se využívá pro popis náhodné veličiny, která vyjadřuje množství výskytů jevů, které nastávají nezávisle na sobě v daném intervalu (času, objemu, délky). Vychází ze vztahu

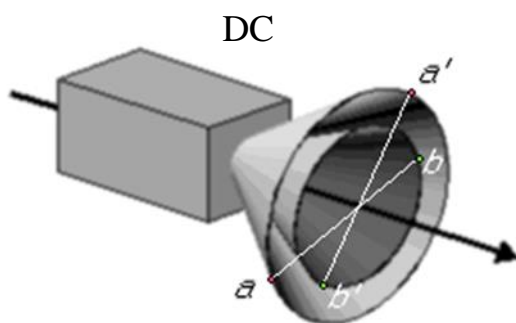
$$P(X = x) = \frac{\lambda^x}{x!} \cdot e^{-\lambda}, \quad (3.1)$$

kde x označuje množství částic náhodné veličiny X za daný úsek λ a e značí Eulerovo číslo.
[18]

Ladící laser (AL) – Jako ladící laser (pomocný, pro vyladění) jsme použili kontinuální laser od firmy Thorlabs (výkon 20 mW, vlnové délka 785 nm, třída 3B). Tato vlnová délka je velice podobná experimentové vlnové délce konvertovaných fotonů (810 nm), čímž je možné vyladit čočky téměř přesně pro požadované vlastnosti. [16]

4 OPTIMALIZACE SESTUPNÉ KONVERZE

Podle typu krystalu jsme získali sestupné konverze typu I ($e \rightarrow oo$). Kvůli symetrii leží jednotlivé generované fotony na povrchu kužele s osou ve směru čerpacího svazku (viz obr. XY). Podmínka fázové shody ukládá pro každou vlnovou délku fotonů jeden konkrétní vrcholový úhel kužele. Pro stejnou hodnotu vlnové délky obou fotonů musíme sebrat fotony z protilehlé strany. Říkáme, že dojde k degeneraci a naměříme fotony $\omega_p/2 = \omega_s = \omega_i$. [3]



Obr. 13: Kužel možného nalezení konvertovaných fotonů (*DC – BBO krystal, a, b – dvojice provázaných fotonů*) [15]

Avšak pro danou orientaci krystalu tu není jediné řešení. Součet frekvencí a vlnových vektorů je omezený, ale ne jednotlivé frekvence a vlnové vektory. Pokud frekvence volnoběžného fotonu je o málo více než polovina frekvence čerpacího fotonu, z důvodu zachování energie bude mít signální foton frekvenci o tolik menší. V případě zachování momentu hybnosti volnoběžný paprsek udělá o trochu větší úhel vzhledem čerpacímu svazku, a signální udělá o trochu menší úhel. Proto je světlo vycházející z krystalu vyzářeno do rozmezí úhlů (několika stupňů) a vlnových délek (několika nm). [2]

Sestavení experimentu je ukázáno na obr. 11 (kap. 3).

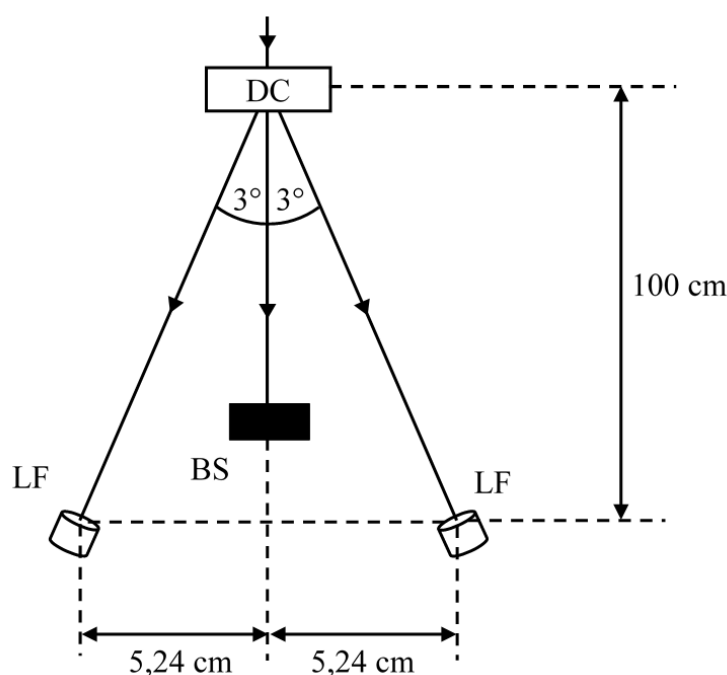
Pro celý experiment jsme nastavili výšku čerpacího svazku, aby byl v rovině nad stolem ve výšce 12,1 cm. Nezávisle na sobě jsme vyladili soustavu pro sbírání konvertovaných fotonů a detekci (pomocí ladícího laseru), a pro čerpací svazek. Pro BBO krystal a půlvlnou destičku

je nezbytné, aby dopadající paprsek byl kolmý na plochu krystalu. Toho jsme docílili pečlivým vyladěním zrcadel a za pomoci metody zpětného odrazu.

Půlvlnnou destičku jsme umístili mezi rovinná zrcadla, do prostoru lehce přístupného pro manipulaci (pro měření). Pootáčením destičky se stáčí směr polarizace příchozího paprsku, čímž můžeme jednoduše měnit úhlový rozdíl mezi vektorem polarizace a osou krystalu.

Co nejblíže zrcadlu jsme umístili BBO krystal. Osu držáku krystalu jsme nechali kolmou k rovině stolu, přesto nevíme, zda ona osa rovnoběžná s osou samotného krystalu. Do dostatečné vzdálenosti (min. 60 cm) jsme umístili stínítko pro odstínění nadbytečného laserového svazku. V tomto experimentu má čerpací paprsek vlnovou délku 405 nm, zatímco signální a volnoběžný paprsek mají každý vlnovou délku 810 nm.

Abychom v pořádku oddělili signální a volnoběžný paprsek, zvolili jsme pro zachycení fotonů největší možnou vzdálenost na stole, což odpovídá vzdálenosti čoček 5,24 cm od dráhy čerpacího paprsku ve vzdálenosti 100 cm od BBO krystalu. Zde je nezbytné myslet na výšku svazku paprsku nad stolem, nebo-li mít i sběrné čočky ve výšce 12,1 cm nad stolem.



Obr. 14: Schéma rozmístění krystalu a zavedení paprsků do vlákna

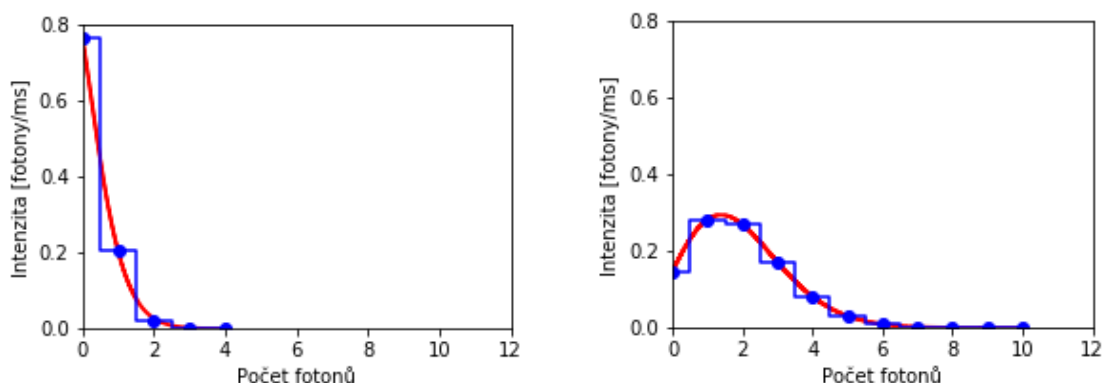
Důležitý faktor experimentu je právě správné zavedení paprsků do optických kabelů. Základem je držet stejnou vzdálenost od BBO krystalu, pro což jsme použili pravítka připevněného ke stolu, po jehož hranách jsme posunovali sběrnou čočkou s vláknem. Toto umožňuje přiměřeně přesný posun ukotvení kvůli správné pozici pod daným úhlem pro detekci sestupně konvertovaných fotonů. Sběrné čočky jsme vyladili pomocí ladícího laseru v opačném směru, než je očekávaný let konvertovaných fotonů.

Na závěr jsme ještě snížili světelné pozadí umístěním černé krabice (black-box) přes detektor. Zároveň celé měření probíhalo ve zhasnuté místnosti pouze se světlem laseru (a pomocného osvětlení – ruční svítilny).

5 VÝSLEDKY

Měření SPDC proběhlo na svazku laserové diody procházejícím půlvlnou destičkou do BBO krystalu a následným navedením konvertovaných fotonů do detektoru zmíněných v kapitole 3, v místnosti o teplotě 22 °C při snaze maximálního odstínění světelného znečištění, zdrojový svazek světla o zářivém toku 29,1 mW při napětí zdroje 4,6 V.

Měření jsme prováděli pro jednotlivé úhly půlvlnné destičky při kroku otočení 4°. Zaznamenané hodnoty pravděpodobnosti počtu fotonů odpovídají vždy časovému intervalu 1 ms. Graf 1 ukazuje hodnoty pravděpodobnosti pro nejnižší a nejvyšší zachycení konvertovaných fotonů. (Pozn.: Tyto hodnoty nejsou absolutními extrémy, jsou pouze extrémy námi naměřených hodnot.)



Graf 1 – Poissonovské rozdělení pravděpodobnosti intenzity fotonů pro 320° (minimum, vlevo) a 52° (maximum, vpravo) (modrá křivka = histogram, červená křivka = proložení křivkou (fit))

Tabulka 6: Hodnoty histogramu při 320° (minimum, vlevo) a při 52° (maximum, vpravo)

Počet fotonů	Intenzita [fotony/ms]
0	0,76727412
1	0,20782899
2	0,02296590
3	0,00181739
4	0,00011359
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0

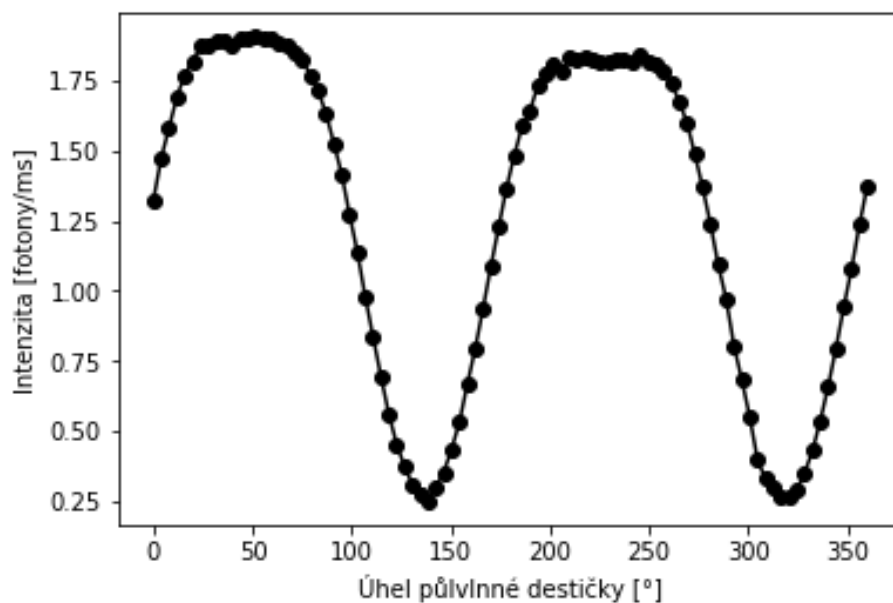
Počet fotonů	Intenzita [fotony/ms]
0	0,14815904
1	0,28272213
2	0,27224958
3	0,17237451
4	0,08017932
5	0,03101345
6	0,01021533
7	0,00257221
8	0,0004777
9	0
10	0,00003675

Z důvodu velké fluktuace hodnot na detektoru (viz graf 1) jsme využili zabudovaných metod programu SPCM 32, který vypočítal pravděpodobnost rozdělení a my uložili data. Pomocí programu Python jsme vypočítali hodnotu x pro Poissonovského rozdělení pravděpodobností (viz rce 3.1) a tím určili pravděpodobnost počtu fotonů dopadlých na detektor.

Hodnoty x najdeme v tabulce 6. Závislost počtu zaznamenaných fotonů na úhlu otočení půlvlnné destičky je znázorněna v grafu 2.

Tabulka 7: Intenzita fotonů na detektoru za interval [fotony/ms]

Úhel [°]	Intenzita [fotony/ms]	Úhel [°]	Intenzita [fotony/ms]	Úhel [°]	Intenzita [fotony/ms]
0	1,322045492	124	0,453168404	244	1,82121544
4	1,473722352	128	0,373679539	248	1,839506592
8	1,582279796	132	0,309493769	252	1,814825441
12	1,692601272	136	0,274042357	256	1,806696592
16	1,770991806	140	0,248256958	260	1,787866036
20	1,820366845	144	0,297245863	264	1,741256311
24	1,873213348	148	0,351396379	268	1,678073007
28	1,880489581	152	0,433760677	272	1,601039906
32	1,896786727	156	0,529459378	276	1,490114338
36	1,895143101	160	0,664330696	280	1,369281138
40	1,877389045	164	0,790286472	284	1,239311131
44	1,90232385	168	0,934074148	288	1,092458308
48	1,904262051	172	1,084131034	292	0,971100667
52	1,908082675	176	1,226136035	296	0,804045582
56	1,90379802	180	1,366305395	300	0,681918744
60	1,904740299	184	1,483569125	304	0,550443138
64	1,880816148	188	1,588441905	308	0,396891628
68	1,874122339	192	1,643566133	312	0,327875928
72	1,854757423	196	1,732794839	316	0,300015879
76	1,827208758	200	1,772297771	320	0,268095882
80	1,768420761	204	1,81324159	324	0,26689074
84	1,714698629	208	1,787811751	328	0,290261843
88	1,634313661	212	1,831803917	332	0,349057644
92	1,527855942	216	1,829778578	336	0,428665848
96	1,417317089	220	1,832184196	340	0,53527434
100	1,273267554	224	1,826817958	344	0,657937565
104	1,13892394	228	1,818224533	348	0,794770563
108	0,979374551	232	1,818224533	352	0,942883604
112	0,836177236	236	1,830041298	356	1,081710104
116	0,69535742	240	1,824473698	360	1,236695295
120	0,561054516				



Graf 2: Intenzita dopadajících fotonů na detektor při různých úhlech půlvlnné destičky

6 DISKUZE

Při prohlédnutí výsledků je evidentní vztah mezi polohou BBO krystalu a půlvlnné destičky. Natáčením půlvlnné destičky jsme otáčeli polarizaci čerpacího paprsku, který má při průchodu anizotropním krystalem možnost z jednoho čerpacího fotonu udělat dva – signální a volnoběžný. Pravděpodobnost toho jevu ale závisí na směru polarizace čerpacího paprsku vůči ose krystalu.

Při pohledu na graf 1 (vlevo) vidíme, že při kolmé polarizaci jsme snížili generování sestupně konvertovaných fotonů téměř o jeden řád. V tomto případě je z grafu vidět, že s větší pravděpodobností nedopadne ani jeden foton na detektor a že je téměř nemožné, aby dopadlo více fotonů než čtyři během našeho krátkého časového úseku. Naopak graf 1 (vpravo) ukazuje, kolik fotonů jsme schopni generovat při vhodné polarizaci čerpacího svazku vzhledem k ose krystalu, dokonce dochází k vyšší pravděpodobnosti dopadu konvertovaného fotonu než žádného.

Vzhledem k tomu, že nedokážeme říci, v jakém směru je polarizována laserová dioda, museli jsme pokus ověřit experimentálně pomocí půlvlnné destičky. Zároveň se zdá, že dioda je polarizována elipticky, tudíž při kolmé polarizaci na osu krystalu stále některé fotony podstupují sestupnou konverzi. Z čehož plyne, že nulových hodnot (hodnot pozadí) jsme nedosáhli a nejspíš ani nemohli dosáhnout. Hodnota intenzity samotného pozadí je rovna 0,1003613.

Naměřené hodnoty sestupně konvertovaných fotonů se odhadem opisují křivku přibližnou

$$y = A \cdot \sin^4(2(x + C)) + B, \quad (6.1)$$

kde za x dosazujeme úhel natočení půlvlnné destičky, A je konstanta daného prostředí sestupné konverze (krystalu), B je konstanta pozadí a šumu, C je rozdíl polarizace osy krystalu a půlvlnné destičky. Vypočtení konstant ovšem bylo nad naše síly.

Do našeho měření mohlo být zaneseno několik nepřesností. Vzhledem náročné práci ve tmě s velmi výkonnou diodou jsme většinu času museli nosit ochranné brýle, s nimiž je koordinace v odstíněné místnosti velice náročná, stejně tak i vyladění optické dráhy.

I přes veškerou snahu o stínění detektorů a místnosti se nepovedlo odstínit veškeré fotony dopadající do detektoru. Z toho plyne že v celkovém měření jsou i fotony pozadí/prostředí, tzv. tepelný šum. Přesto můžeme říci, že celkové měření nebylo touto systematickou chybou negativně ovlivněno, neboť závislost množství generovaných fotonů na polarizaci se nám povedlo ukázat (graf 2).

Samotným experimentem se nám povedlo dokázat funkčnost vyrobených kabelů, zprovoznit nelineární pokus SPDC a zachytit sestupně konvertované fotony a ukázat, jakým způsobem závisí generace těchto fotonů na fázovém rozdílu polarizace čerpacího svazku a osy krystalu.

ZÁVĚR

Dokument shrnuje postupy a výsledky práce při výrobě optických kabelů. Vyzkoušeli jsme si výrobu optického kabelu, vyleštění koncovky a proměřili hodnoty podle metody vložných ztrát. Naměřili jsme průměrnou úspěšnost přenosu signálu přibližně 89 %, a tedy procenta ztráty 11 %. Zároveň jsme vypočítali hodnotu útlumu jednotlivých kabelů, které činí v rozmezí 0,3 – 0,8 dB. Následně jsme zprovoznili laserovou diodu a zavedli zkolimovaný laserový paprsek do BBO krystalu, kde jsme generovali sestupné konverzní fotony. Jeden foton z páru jsme zachytili do vyrobeného optického kabelu a převedli na detektor, kde jsme jednotlivé fotony zaznamenali pomocí SPCM.

Tím jsme dosáhli nelineárního jevu SPDC, který jsme proměřili v závislosti na rozdílnému úhlu polarizace mezi světlem dopadajícím na krystal a osou krystalu. Polarizace roste dvakrát rychleji, její funkce bude pravděpodobně tvaru $\sin(2x)$ na vyšší mocninu. Zjistili jsme, že nedokážeme dosáhnout úplného minima, nejspíše z důvodu nedokonalé lineární polarizace diody. Samotný experiment slouží jako efektivní zdroj fotonových párů a může tedy posloužit dalším kvantovým experimentům (např. ukázání kvantové provázanosti fotonů (quantum entanglement) nebo důkaz existence fotonu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ROUČA, Tomáš. *Limitující faktory optického vlákna na přenosovou kapacitu optických tras* [online]. Brno, 2010 [cit. 2019-04-3]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5843/Limitujici%20faktory%20optickeho%20ovlakna%20na%20prenosovou%20kapacitu%20opticky%20tras.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce.
- [2] BECK, Mark. *Quantum mechanics: theory and experiment*. New York: Oxford University Press, 2012. ISBN isbn978-0-19-979812-4 [508 s.].
- [3] HALENKOVÁ, Eva, Antonín ČERNOCH a Jan SOUBUSTA. *Spontánní sestupná frekvenční parametrická konverze a zdroj fotonových párů podle návrhu P.G. Kwiaty*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3111-6.
- [4] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika (část 4): Elektromagnetické vlny – Optika – Relativita*. 1. české vyd. Brno: VUTIUM, 2006. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [5] ELUC, kol. autorů. *Elektronická učebnice (části: Optika, Optoelektrotechnika)* [online]. Olomouc: 2015 [cit. 2019-03-29]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/>.
- [6] MALÝ, Petr. *Optika*. 1. vyd. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0 [361 s.].
- [7] VRBOVÁ, Miroslava a kol. *Lasery a moderní optika*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1994. Oborová encyklopedie. ISBN 80-85849-56-9 [474 s.].
- [8] Wikimedia Commons contributors. *File:Spectre.svg* [online]. Wikimedia Commons [cit. 2019-03-29]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Spectre.svg&oldid=292632056>.
- [9] Wikimedia Commons contributors, *File:Singlemode fibre structure.png* [online]. Wikimedia Commons [cit. 2019-03-29]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Singlemode_fibre_structure.png&oldid=146588894.

- [10] PASCHOTTA, Rüdiger. *Fibers*. RP Photonics Encyclopedia [online]. 2004 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/fibers.html>.
- [11] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [12] Wikimedia Commons contributors, 'File:Optical fiber types.svg'[online]. Wikimedia Commons [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Optical_fiber_types.svg&oldid=119286429
- [13] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Optické vlákno* [online]. 2018 [citováno 2019-04-02]. Dostupný z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Optick%C3%A9_vl%C3%A1kno&oldid=16790434.
- [14] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika*. Brno: Code Creator, 2015. ISBN 978-80-88058-20-5.
- [15] DUŠEK, Miloslav. *Parametrická frekvenční konverze (down-conversion)* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://muj.optol.cz/dusek/predn/kokt/dc1.htm>
- [16] THORLABS, Inc. *thorlabs.com* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/>
- [17] EXCELITAS, Inc. SPCM-AQRH. *excelitas.com* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: http://www.excelitas.com/downloads/DTS_SPCM-AQRH.pdf
- [18] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Poissonovo rozdělení* [online]. 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupný z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Poissonovo_rozd%C4%9Blen%C3%AD&oldid=16978069
- [19] NEWLIGHT PHOTONICS, Inc. *newlightphotonics.com* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.newlightphotonics.com/>

SEZNAM PŘÍLOH

1. Lešticí papíry

2. (CD) „*Guide to Fiber Connectorization and Polishing*“ Thorlabs

Příloha 1 – leštící papíry (6 μm nahoře, 1 μm vlevo, final vpravo)

