

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ



## Fyzikální optika Téma - Vláknová optika

## Abstrakt

Tato práce se zabývá principy a aplikacemi vláknové optiky v rámci fyzikální optiky. V úvodu jsou popsány základní fyzikální vlastnosti světla a jeho chování při šíření různými prostředími, včetně vlnové a částicové povahy, lomu a úplného vnitřního odrazu. Následuje rozbor fyzikálních jevů, které ovlivňují přenos světla ve vlákne – jako je disperze a útlum. Dále je popsána struktura optického vlákna, použití různých materiálů pro jádro a plášť, a přehled typů vláken včetně rozdílů mezi jednovidovými a mnohovidovými konstrukcemi, či vlákny se skokovým a gradientním profilem indexu lomu.

**Klíčová slova** světlo, fyzikální optika, optické vlákna, disperze, index lomu, totální vnitřní odraz, Snellův zákon

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Základní principy</b>	<b>4</b>
2.1	Vlnová a částicová povaha světla	4
2.2	Totální vnitřní odraz	4
2.3	Lom a šíření světla v různých prostředích	5
2.4	Ztráty ve vlákne	5
2.5	Disperze	5
<b>3</b>	<b>Světlo v optických kabelech</b>	<b>7</b>
3.1	Šíření světla ve vlákne	7
3.2	Struktura optického kabelu	7
3.2.1	Materiály	8
3.3	Typy vláken	8
3.3.1	Jednovidové a mnohovidové vlákno	8
3.3.2	Gradientní a skoková změna lomu	9
<b>4</b>	<b>Optika v průmyslu</b>	<b>10</b>
4.1	Telekomunikace a internet	10
4.2	Datová centra	10
4.3	Průmyslové senzory	10
4.4	Netradiční využití	10
4.4.1	Lékařství	10
4.4.2	Obrana a letectví	10
4.4.3	Architektura	10
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>11</b>

# 1 Úvod

Vláknová optika momentálně představuje nejvýznamnější obor moderní aplikované optiky. Je založena na šíření světla, přičemž klíčovým principem je úplný vnitřní odraz na rozhraní materiálů s různým indexem lomu. Tento jev umožňuje vedení světelného signálu s velmi nízkými ztrátami i na velké vzdálenosti, a to s vysokou přenosovou kapacitou a odolností vůči elektromagnetickému rušení.

Cílem tohoto projektu je podrobně analyzovat fyzikální principy, které tvoří základ vláknové optiky, jako je vlnová povaha světla, lom, odraz, disperze a útlum. Dále je popsána struktura optického vlákna a použité materiály, přičemž je zdůrazněn rozdíl mezi jednovidovými a mnohovidovými vlákny a mezi skokovým a gradientním profilem indexu lomu.

Téma je zařazeno do širšího rámce fyzikální optiky, konkrétně oblasti šíření světla v prostředí, lomu a totálního vnitřního odrazu.

## 2 Základní principy

Světlo je základem všech optických přenosových systémů. Jeho chování v různých prostředích, interakce s materiály a vlastnosti jako vlnová délka nebo frekvence jsou klíčové pro pochopení fungování optických vláken.

### 2.1 Vlnová a částicová povaha světla

Na světlo se dá pohlížet jako na elektromagnetické vlnění, tedy na oscilaci elektrického a magnetického pole šířící se prostorem. Ve vakuu se světlo šíří rychlostí  $c$ , přibližně  $3 \times 10^8$  m/s. Elektromagnetické záření má vlnový charakter — je popsáno vlnovou délkou  $\lambda$  a frekvencí  $f$ , které spolu souvisejí podle vztahu:

$$c = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Při průchodu různými prostředími dochází ke změnám rychlosti světla v závislosti na fyzických vlastnostech materiálu. Tyto změny jsou popsány pomocí indexu lomu, který je definován jako poměr rychlosti světla ve vakuu  $c$  k rychlosti světla v daném prostředí  $v$ :

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

V kontextu vláknové optiky se světlo téměř výhradně popisuje vlnovým modelem. Částicový model zde není nutný, a proto se jím v této práci dále nebudu zabývat, mimo to, že rozsah kvantové teorie přesahuje mé schopnosti a vědomosti.

### 2.2 Totální vnitřní odraz

Totální vnitřní odraz je jev, při kterém se světlo šířící se z prostředí s vyšším indexem lomu do prostředí s nižším indexem lomu nešíří dále, ale celé se odrazí zpět do původního prostředí.[6] Tato situace nastává tehdy, když úhel dopadu  $\theta$  na rozhraní těchto dvou prostředí přesáhne mezní úhel  $\theta_c$ , který je dán vztahem:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3)$$

kde  $n_1$  je index lomu prostředí, ze kterého světlo přichází (jádro vlákna) a  $n_2$  index prostředí, do kterého se světlo snaží proniknout (plášť vlákna), přičemž  $n_1 > n_2$ .

Tento jev je klíčovým fyzikálním principem pro fungování optických vláken. Světlo, které je do vlákna navázáno pod vhodným úhlem (menším než tzv. akceptační úhel), se odráží na vnitřním rozhraní jádra a pláště a šíří se po celé délce vlákna prakticky bez úniku[6]. Rozsah tohoto úhlu je dán následující rovnicí:

$$\sin(\theta_0) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4)$$

Zatímco mezní úhel  $\theta_c$  určuje, pod jakým minimálním úhlem musí světlo dopadat na rozhraní (jádro–plášť), aby došlo k totálnímu vnitřnímu odrazu, akceptační úhel  $\theta_0$  vymezuje maximální úhel, pod kterým může světlo vstoupit z okolního prostředí (například ze vzduchu) do jádra optického vlákna tak, aby bylo následně ve vlákně vedeno. Velikost akceptačního úhlu závisí na indexech lomu jádra ( $n_1$ ), pláště ( $n_2$ ) a vnějšího prostředí ( $n_0$ ), přičemž pro vlákna ve vzduchu se často uvažuje  $n_0 \approx 1$ . Numerická apertura (NA), která určuje světelné zachycovací schopnosti vlákna, je dána vztahem [5, 1.7.1]:

$$NA = \sin(\theta_0) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5)$$

Tento vztah vychází přímo z geometrie lomu a podmínky pro úplný vnitřní odraz a bývá důležitým parametrem při navrhování optických vláken a jejich spojovacích prvků.

## 2.3 Lom a šíření světla v různých prostředích

Když světlo přechází mezi dvěma opticky odlišnými prostředími, mění svou rychlost a zpravidla i směr. Tento jev se nazývá lom světla. Směr lomu závisí na poměru indexů lomu obou prostředí. Základním zákonem, který lom popisuje, je Snellův zákon[9]:

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2) \quad (6)$$

kde  $\theta_1$  je úhel dopadu a  $\theta_2$  úhel lomu.

V optickém vlákně se tento jev uplatňuje při vstupu světla do jádra vlákna z vnějšího prostředí. Aby došlo ke správnému vedení světla, musí dopadat pod úhlem, který spadá do tzv. akceptačního kuželu. Mimo něj se světlo vlivem lomu nezachytí a vlákno opustí.

Směr šíření světla v prostředí tedy závisí na změně jeho rychlosti — čím vyšší je index lomu, tím menší je rychlost světla v tomto materiálu a tím větší je úhel lomu vůči kolmici.

## 2.4 Ztráty ve vlákně

Ačkoliv jsou vlákna navržena pro minimální ztráty, během šíření světla přesto dochází k určitým ztrátám, které snižují intenzitu signálu. Tyto ztráty lze kategorizovat do několika základních skupin:

- Absorpční ztráty – způsobené pohlcováním světelné energie materiálem vlákna (nečistoty, vodní molekuly, vibrační stavy).
- Rozptylové ztráty – světlo se rozptyluje na mikroskopických nehomogenitách ve skle, zejména ve viditelném a blízkém IR spektru.
- Ohybové ztráty – vznikají při zakřivení vlákna. Rozlišujeme:
  - *Mikroohyby* – drobné nepravidelnosti a deformace v konstrukci.
  - *Makroohyby* – větší zakřivení vlákna.

Ztráty se obvykle udávají v jednotkách decibelů na kilometr (dB/km). Pro kvalitní jednovidová vlákna při 1550 nm může být útlum menší než 0,2 dB/km.

## 2.5 Disperze

Disperze je jev, při kterém dochází k rozdílnému šíření různých složek světelného signálu, v důsledku čehož se optický impuls během přenosu rozšiřuje. To může způsobit překrývání impulsů a zhoršení kvality signálu. Rozlišujeme několik typů disperze[4, p.55]:

- Chromatická disperze – způsobena závislostí indexu lomu na vlnové délce. Různé vlnové délky (složky) světla se šíří různou rychlostí.
- Materiálová disperze – podtyp chromatické disperze, vyplývající z vlastností skla.

- Vlnovodová disperze – způsobena konstrukcí samotného vlákna (poměr jádra a pláště, profil indexu).
- Vidová disperze – u mnohovidových vláken. Různé vidy mají odlišné optické dráhy a dorazí k přijímači v různém čase.

Disperze je jedním z hlavních limitujících faktorů pro vysokorychlostní přenos dat na delší vzdálenosti. Moderní optická vlákna jsou navrhována tak, aby minimalizovala vliv disperze (např. vlákna s posunutou nulovou disperzí, disperzní kompenzace apod.).

## 3 Světlo v optických kabelech

### 3.1 Šíření světla ve vlákne

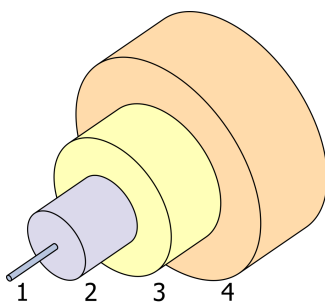
Optické vlákno využívá k vedení světla jevu totálního vnitřního odrazu, ke kterému dochází na rozhraní mezi jádrem a pláštěm. Jádro má vyšší index lomu ( $n_1$ ) než plášť ( $n_2$ ), čímž je vytvořena podmínka pro to, aby se světlo odráželo zpět do jádra a bylo vedeno podél celé délky vlákna. Světelný paprsek, který je navázán do vlákna pod vhodným úhlem, se uvnitř jádra mnohonásobně odráží na rozhraní jádra a pláště, aniž by opustil vodič.

Aby se světlo ve vlákne vůbec šířilo tímto způsobem, musí být do něj navázáno pod akceptačním úhlem. Numerická apertura udává rozsah úhlů, pod kterými může světlo z okolního prostředí vstoupit do vlákna a být vedeno bez úniku. Čím větší je numerická apertura, tím větší množství světla může být efektivně zachyceno, což je důležité při navazování světla z diodového zdroje nebo laseru.

### 3.2 Struktura optického kabelu

Optické kabely se z pravidla skládají ze tří až čtyř základních částí, které plní jak optickou, tak mechanickou a ochrannou funkci. [2]

1. **Jádro (core)** – tvořeno průhledným materiálem s vysokým indexem lomu, ve kterém dochází ke skutečnému vedení světla. Průměr jádra se pohybuje v rozmezí jednotek až desítek mikrometrů v závislosti na typu vlákna.
2. **Plášť (cladding)** – vrstva materiálu s nižším indexem lomu než jádro, která obklopuje jádro a zajišťuje totální vnitřní odraz světla zpět do jádra. Slouží jako optická bariéra.
3. **Vnitřní ochranný plášť (buffer coating)** – polymerová vrstva, která chrání optické vlákno před mechanickým poškozením, mikroohyby a vlivy prostředí, jako je vlhkost nebo změna teploty.
4. **Vnější ochranný plášť (jacket)** – poslední vrstva, která zajišťuje celkovou odolnost kabelu vůči vnějšímu mechanickému namáhání a chrání vnitřní strukturu při pokládce a manipulaci.



Obrázek 1: Schéma struktury optického kabelu [8]

Pro samotný přenos světla jsou důležité pouze první dvě vrstvy, tedy jádro a plášť. Další vrstvy slouží jako ochranné vrstvy oproti vnějším rušením a fyzickému poškození.



### 3.2.1 Materiály

Základním materiálem pro výrobu optických vláken je oxid křemičitý, tedy sklo. Vzhledem ke svým vynikajícím optickým vlastnostem, nízkému útlumu a chemické stálosti se stal standardem pro přenosová vlákna.

Pro dosažení potřebných optických vlastností se index lomu materiálu v jádru a plášti upravuje pomocí vhodných příměsí.[2] Jádro – pro zvýšení indexu lomu se čistý oxid křemičitý dopuje oxidem germanitým nebo oxidem fosforečným. Plášť – pro snížení indexu lomu se používá dopování oxidem boritým nebo fluorem. Díky tomuto řízenému rozdílu indexů mezi jádrem a pláštěm dochází vedení světla pomocí úplného vnitřního odrazu. Oba materiály jsou zároveň chemicky kompatibilní a mají podobnou tepelnou roztažnost, což zajišťuje stabilitu vlákna při změnách teploty.

Vedle skleněných vláken existují také plastová optická vlákna, která se používají především pro krátké vzdálenosti a méně náročné aplikace. Jejich výhodou je nižší cena, vyšší flexibilita a jednodušší manipulace. Jádro – tvořeno polymerem polymethylmethakrylát (PMMA). Plášť – fluorované polymery, které mají nižší index lomu než PMMA. Plastová vlákna však trpí výrazně vyšším útlumem (až stovky dB/km) než skleněná a jsou tak vhodná pouze pro přenosy na kratší vzdálenosti (řádově metry až desítky metrů). V pokročilých aplikacích, jako je dálková komunikace, senzory a datové sítě, zůstávají nadále preferovaná vlákna skleněná.

## 3.3 Typy vláken

Světlo můžeme v kontextu přenosu informace interpretovat různými způsoby. Při digitálním přenosu lze stav "svítí" chápat jako logickou jedničku a "nesvítí" jako nulu. V analogovém přenosu lze naopak informace zakódovat plynulou změnou intenzity, frekvence nebo fáze světla.

Optická vlákna se dělí podle různých kritérií. Nejčastěji se rozlišují podle počtu vedených vidů (paprsků) a podle profilu změny indexu lomu v jádře. Obě klasifikace mají přímý vliv na přenosové vlastnosti vlákna, zejména na šířku pásma, ztráty a náchylnost k disperzi. [7]

Volba vhodného typu vlákna závisí na požadované přenosové rychlosti, délce spoje a cenové dostupnosti. Následující tabulka shrnuje základní dělení optických vláken podle dvou hlavních kritérií:

Kritérium	Typ
Počet vidů	Jednovidové vlákno (single-mode) Mnohovidové vlákno (multi-mode)
Profil indexu lomu v jádře	Skoková změna (step-index) Gradientní profil (graded-index)

Tabulka 1: Základní dělení optických vláken

### 3.3.1 Jednovidové a mnohovidové vlákno

Rozdíl mezi jednovidovým a mnohovidovým vláknem spočívá v počtu vidů (tedy nezávislých trajektorií elektromagnetického vlnění), které mohou být ve vlákně vedeny.

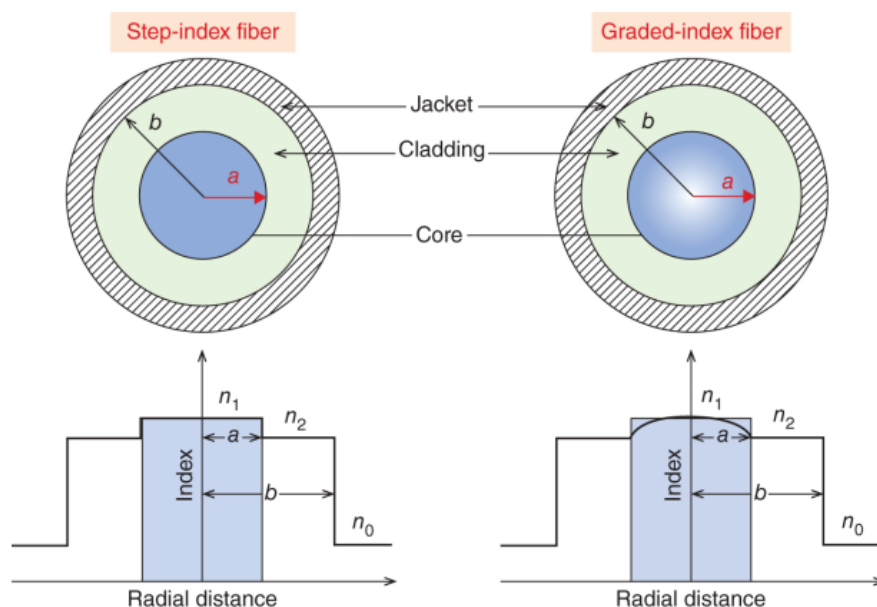
U jednovidových vláken má jádro velmi malý průměr (typicky jednotky  $\mu m$ ) a světlo se šíří pouze v jednom základním vidu[7]. Díky tomu dochází k minimální modální disperzi, což umožňuje přenos dat na velmi dlouhé vzdálenosti s vysokou přenosovou rychlostí. Používají se zejména v dálkových telekomunikačních sítích a vysokorychlostních internetových spojkách.

Mnohovidová vlákna mají větší průměr jádra (typicky desítky  $\mu m$ ), což umožňuje šíření více vidů současně.[7] To usnadňuje navázání světla a snižuje náklady na zařízení, ale zároveň vede k

větší modální disperzi a omezuje přenosovou vzdálenost (obvykle do stovek metrů). MMF se běžně používají v lokálních sítích (LAN) a pro přenosy na krátké vzdálenosti.

### 3.3.2 Gradientní a skoková změna lomu

Dalším důležitým parametrem optického vlákna je způsob, jakým se mění index lomu v oblasti jádra.



Obrázek 2: Porovnání lomu v jádru skokovým a gradientním profilem [1, p.78]

U vláken se skokovou změnou má jádro konstantní index lomu, který se na hranici s pláštěm náhle změní. Tento skok je zodpovědný za jednoduchý model vedení světla pomocí odrazů podél rozhraní. Skoková vlákna jsou jednodušší na výrobu, ale u mnohovidových vláken způsobují výraznější modální disperzi.[1]

Vlákna s gradientním profilem indexu (graded-index) - Zde se index lomu plynule snižuje od středu jádra směrem k plášti podle parabolického nebo jiného specifického profilu. Tím dochází k zakřivenému vedení světelných paprsků, což částečně kompenzuje rozdílné optické dráhy vidů a výrazně snižuje modální disperzi. Tato vlákna se často používají pro mnohovidové přenosy s vyšší šířkou pásma.

## **4 Optika v průmyslu**

### **4.1 Telekomunikace a internet**

Vláknová optika si našla široké uplatnění v moderním průmyslu, telekomunikačních sítích i specializovaných technologiích, a to zejména díky své vysoké přenosové kapacitě, odolnosti vůči elektromagnetickému rušení, bezpečnosti přenosu a spolehlivosti. Páteřní síť internetu využívají jednovláknová vlákna pro přenos dat na vzdálenosti stovek kilometrů. Existuje i optické připojení až do domu k uživateli.

### **4.2 Datová centra**

Optická vlákna umožňují extrémně rychlé a spolehlivé připojení mezi servery a úložišti. Minimalizují zpoždění a zajišťují přenosy v momentálně nejvyšších dostupných rychlostech.

### **4.3 Průmyslové senzory**

Vláknové senzory umožňují měření teploty, tlaku, vibrací či napětí v těžko přístupných nebo nebezpečných prostředích (např. jaderné elektrárny, vysokonapěťové rozvody). Jsou imunní vůči elektromagnetickému rušení a radiaci.

### **4.4 Netradiční využití**

#### **4.4.1 Lékařství**

V medicíně se optická vlákna využívají především v diagnostice a chirurgii [3]. Typickým příkladem je endoskopie, kdy je pomocí vláken vedeno světlo do tělní dutiny a zároveň přenášen obraz zpět. Moderní přístroje využívají vláknovou optiku i k přenosu laserového záření pro precizní chirurgické zákroky, jako je např. odstranění tkáně, léčba sítnice nebo zubní laserová terapie. Vláknová se také využívají v optických biosenzorech pro detekci chemických nebo biologických látek s vysokou citlivostí.

#### **4.4.2 Obrana a letectví**

Ve vojenském a leteckém průmyslu se vláknová optika uplatňuje tam, kde je kladen důraz na odolnost vůči elektromagnetickému rušení, nízkou hmotnost a bezpečnost přenosu [3]. Optická vedení se používají pro přenos signálů v leteckých systémech, optických gyroskopech nebo v palubní komunikaci.

#### **4.4.3 Architektura**

V architektuře nachází vláknová optika využití především v oblasti dekorativního a funkčního osvětlení

## 5 Závěr

Vláknová optika představuje moderní a vysoce efektivní technologii, která umožňuje přenos světla na dlouhé vzdálenosti s minimálními ztrátami. Tato práce se věnovala jak teoretickému základu světelného vlnění a jeho šíření v prostředí s různým indexem lomu, tak i konkrétním fyzikálním jevům, které určují vlastnosti optických vláken – zejména totálnímu vnitřnímu odrazu, disperzi a útlumu.

V projektu jsem se také konstrukci a materiálovému složení optických vláken, kde hraje klíčovou roli rozdíl indexů lomu mezi jádrem a pláštěm, stejně jako typ použitého materiálu – ať už se jedná o čistý oxid křemičitý, jeho dopanty, nebo polymery v případě plastových vláken. Na základě těchto parametrů je možné navrhovat vlákna s různými vlastnostmi, která se uplatňují v různých typech aplikací.

Z hlediska praktického použití se vláknová optika neomezuje pouze na telekomunikační zařízení. Vedle páteřních sítí a datových center je využívána i v lékařství, průmyslové senzorce, obranném průmyslu či architektuře..

Tato práce ukazuje, že porozumění základním fyzikálním principům a konstrukčním vlastnostem vláknové optiky je nezbytné pro pochopení jejího širokého využití a dalšího rozvoje. Vláknová optika tak nadále zůstává jedním z klíčových pilířů moderní techniky a vědy.

## Reference

- [1] AGRAWAL, G. P. *Fiber-optic communication systems*. John Wiley & Sons, 2012.
- [2] AVANTES. *Introduction to fiber optics* <https://www.avantes.com/support/theoretical-background/introduction-to-fiber-optics>. 2025. [Online, accessed 14-April-2025].
- [3] ELSHERIF, M.; SALIH, A. E.; MUÑOZ, M. G.; ALAM, F.; ALQATTAN, B. et al. Optical fiber sensors: Working principle, applications, and limitations. *Adv. Photonics Res.* Wiley, červenec 2022, s. 2100371.
- [4] GUPTA, S. *Textbook on optical fiber communication and its applications*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2018.
- [5] MOHAN, S.; ARJUNAN, V. a JOSE, S. p. *Fiber Optics and Optoelectronic Devices*. MJP Publisher, 2014.
- [6] PEDROTTI, F. L.; PEDROTTI, L. M. a PEDROTTI, L. S. *Introduction to optics*. Cambridge university press, 2017.
- [7] TENNESSEE, U. of. *Optical fiber* <http://labman.phys.utk.edu/phys222core/modules/m7/optical-fibers.html>. Unknown. [Online; accessed 14-April-2025].
- [8] WIKIPEDIA. *Optical fiber* — Wikipedia, The Free Encyclopedia <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Optical%20fiber&oldid=1278475754>. 2025. [Online; accessed 14-April-2025].
- [9] WIKIPEDIA. *Refraction* — Wikipedia, The Free Encyclopedia <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Refraction&oldid=1277496488>. 2025. [Online; accessed 15-April-2025].