

# OPTIKA

PETR MALÝ



KAROLINUM

# Optika

**Petr Malý**

---

Recenzovali:

prof. RNDr. Ivan Pelant, DrSc.

doc. RNDr. Pavel Hlídek, CSc.

Vydala Univerzita Karlova, Nakladatelství Karolinum

Praha 2013

Obálka Jan Šerých

Sazba Václav Havlíček

Vydání druhé, přepracované

© Univerzita Karlova, 2013

© Petr Malý, 2013

ISBN 978-80-246-2246-0

ISBN 978-80-246-2793-9 (pdf)



Univerzita Karlova  
Nakladatelství Karolinum

[www.karolinum.cz](http://www.karolinum.cz)  
[ebooks@karolinum.cz](mailto:ebooks@karolinum.cz)



Boswell. "Then, Sir, what is poetry?" Johnson. "Why, Sir, it is much easier to say what it is not. We all *know* what light is; but it is not easy to *tell* what it is."

Boswell: „Co je tedy, pane, poezie?“ Johnson: „Víte, pane, ono je snazší říci, co poezie není. Všichni přece víme, co je světlo, ale povědět, co to je, to vůbec není snadné.“

Boswell, James: *Life of Johnson*. London, Oxford University Press, 1965, s. 744  
(11 April 1776)



# Obsah

Úvod.....	11
<b>1 Světlo jako elektromagnetické vlny.....</b>	<b>17</b>
1.1 Spektrum elektromagnetických vln.....	17
1.2 Vlnová rovnice.....	17
1.3 Rovinné vlny.....	20
1.3.1 Obecná rovinná světelná vlna.....	21
1.3.2 Harmonická rovinná světelná vlna.....	24
1.4 Princip superpozice.....	27
1.5 Komplexní reprezentace.....	27
1.6 Intenzita světla.....	29
1.7 Kulové vlny.....	30
1.8 Šíření světla ve vodivém prostředí.....	33
<b>2 Polarizace světla rovinné monochromatické vlny.....</b>	<b>39</b>
2.1 Lineární, kruhová a eliptická polarizace světla.....	39
2.2 Maticový popis polarizace světla.....	42
<b>3 Odraz a lom světla na rovinném rozhraní dvou prostředí.....</b>	<b>49</b>
<b>4 Kvazimono chromatické elektromagnetické vlny.....</b>	<b>63</b>
4.1 Spektrální rozklad světla.....	63
4.2 Grupová rychlost světla.....	65
<b>5 Interference světla.....</b>	<b>72</b>
5.1 Dvojsvazková interference.....	72
5.1.1 Interference dvou rovinných světelných vln.....	72
5.1.2 Youngův experiment.....	77
5.1.3 Další příklady dvojsvazkové interference – dělení vlnoplochy.....	79
5.1.4 Další příklady dvojsvazkové interference – dělení amplitudy.....	80
5.1.4.1 Michelsonův interferometr.....	80
5.1.4.2 Interference na dielektrických vrstvách.....	81
5.1.4.2.1 Proužky stejného sklonu.....	83
5.1.4.2.2 Proužky stejné tloušťky.....	85
5.1.4.2.3 Antireflexní vrstvy.....	86
5.2 Mnohosvazková interference.....	87
<b>6 Koherence světla.....</b>	<b>95</b>
6.1 Úvod do skalární teorie koherence.....	96
6.2 Polarizace světla.....	103

<b>7 Holografie</b> .....	107
<b>8 Difrakce světla</b> .....	112
8.1 Fraunhoferova difrakce .....	113
8.1.1 Fraunhoferova difrakce na štěrbině .....	113
8.1.2 Difrakce na obdélníkovém otvoru .....	117
8.1.3 Difrakce na kruhovém otvoru .....	117
8.1.4 Fraunhoferova difrakce na řadě štěrbin .....	119
8.2 Fresnelova difrakce .....	123
8.2.1 Babinetův princip .....	125
8.2.2 Názorná formulace rozdílu mezi Fraunhoferovou a Fresnelovou difrakcí .....	126
8.2.3 Fresnelovy zóny .....	127
8.2.3.1 Fresnelova difrakce na kruhové apertuře .....	127
8.2.3.2 Fresnelova difrakce v případě válcových vln .....	132
8.2.3.3 Fresnelova difrakce na hraně .....	136
8.3 Matematická teorie .....	138
8.4 Difrakce vln na trojdimenzionálních periodických strukturách .....	143
<b>9 Princip fourierovské optiky</b> .....	148
<b>10 Základy geometrické optiky</b> .....	156
10.1 Úvod do geometrické optiky .....	156
10.1.1 Eikonálová rovnice .....	156
10.1.2 Zákon lomu pro paprsky .....	159
10.1.3 Intenzita světla v geometrické optice .....	160
10.1.4 Paprsková rovnice .....	161
10.1.5 Fermatův princip .....	163
10.2 Geometrická optika sférických ploch .....	165
10.2.1 Znaménková konvence .....	166
10.2.2 Abbeův invariant .....	167
10.2.3 Kardinální body optické soustavy .....	169
10.2.4 Zobrazovací rovnice .....	171
10.2.5 Zrcadlové plochy .....	172
10.2.6 Zvětšení při optickém zobrazení .....	173
10.2.7 Kombinace dvou zobrazení .....	174
10.2.8 Optická čočka .....	177
10.3 Vybrané zobrazovací přístroje .....	179
10.3.1 Lupa .....	179
10.3.2 Mikroskop .....	182
10.3.3 Teleskop (dalekohled) .....	184
10.3.4 Fotografický přístroj .....	187
10.4 Paraxiální optika maticově .....	189
10.4.1 Maticový formalismus .....	189
10.4.2 Tlustá optická čočka .....	193
10.4.3 Obecná optická soustava, kardinální body .....	194
10.4.4 Laserový rezonátor .....	199
10.5 Vady zobrazení (aberrace) .....	203
10.5.1 Monochromatické aberrace .....	205
10.5.2 Barevné vady zobrazení .....	211



<b>11 Spektrální přístroje</b> .....	214
11.1 Základy optické spektroskopie .....	214
11.2 Spektrometry .....	218
11.2.1 Optický disperzní hranol .....	220
11.2.2 Optická ohybová mřížka .....	221
11.3 Fabry-Perotův interferometr .....	226
<b>12 Základy fotometrie a radiometrie</b> .....	231
<b>13 Šíření světla v anizotropních látkách</b> .....	237
13.1 Vlastnosti tenzoru permitivity .....	238
13.2 Světelné vlny v anizotropním prostředí .....	240
13.2.1 Řádná a mimořádná vlna, Fresnelova rovnice .....	241
13.2.2 Optická indikatrix .....	246
13.2.3 Souvislost mezi geometrickou konstrukcí (indikatrix) a řešením Fresnelovy rovnice .....	247
13.2.4 Šíření světla v anizotropním prostředí: shrnutí .....	250
13.3 Lom světla při dopadu na anizotropní prostředí .....	250
13.3.1 Určení směru mimořádného paprsku pomocí normálové plochy – zdůvodnění .....	254
13.4 Použití dvojlomných látek .....	255
13.4.1 Polarizátory .....	255
13.4.2 Kompenzátory .....	257
13.4.3 Interference polarizovaných svazků .....	260
13.4.4 Fotoelastické chování .....	261
13.4.5 Kerrův jev .....	261
<b>14 Interakce světla s látkou</b> .....	264
14.1 Klasický model pro výpočet indexu lomu dielektrik .....	265
14.1.1 Lorentzův model pro výpočet indexu lomu dielektrik .....	266
14.1.2 Lokální pole .....	269
14.2 Klasický model pro výpočet indexu lomu kovů .....	270
14.3 Vysvětlení absorpce z mikroskopického hlediska .....	273
14.4 Vysvětlení existence indexu lomu z mikroskopického hlediska .....	278
14.5 Rozptyl světla .....	283
<b>15 Základy laserové fyziky</b> .....	289
15.1 Interakce světla s látkou v případě reálných přechodů mezi energetickými stavy .....	289
15.2 Laser .....	295
<b>16 Nelineární optika</b> .....	307
16.1 Nelineární optické jevy druhého řádu .....	308
16.2 Nelineární optické jevy třetího řádu .....	312
16.3 Mikroskopický model optických nelinearit druhého řádu .....	317
<b>17 Základy vláknové optiky</b> .....	322

<b>18 Zdroje a detektory světla</b> .....	328
18.1 Světelné zdroje.....	328
18.2 Detektory .....	329
18.2.1 Tepelné detektory.....	330
18.2.2 Kvantové detektory.....	330
18.2.3 Lidské oko.....	337
<b>19 Vlnově-korpuskulární dualismus</b> .....	342
19.1 Tepelné záření.....	342
19.2 Fotony .....	351
19.3 Vlnové vlastnosti částic .....	352
<b>Vybrané základní fyzikální konstanty</b> .....	355
<b>Literatura</b> .....	357
<b>Rejstřík</b> .....	359

# Úvod

Optika se zabývá světlem: jeho vznikem, šířením, detekcí a interakcí s látkami. V oblasti optiky došlo v několika posledních desetiletích k významným objevům, které přispěly jak k rozvoji fyzikálního poznání, tak k řadě aplikací, které ovlivňují významně náš každodenní život. Jmenujme například laserové čtečky čárových kódů v supermarketech, CD a DVD přehrávače, laserové tiskárny, skenery nebo optické komunikace. Optika patří k nejstarším odvětvím fyziky. Příčina je zřejmá, protože světlo hraje v životě lidí mimořádně důležitou úlohu. Většinu informací získává člověk prostřednictvím zrakového vjemu. Proto je samozřejmé, že chápání a studium světla je spojeno kromě fyziky i s rozvojem filozofie.

Již ve starověkém Řecku bylo známo šíření světla ve formě světelných paprsků, jejich odraz a lom. Staří Řekové řešili například otázku, jak rychle člověk vidí, čímž se myslelo, jak dlouho spatřování trvá: vidění si představovali tak, že člověk z očí vysílá paprsky, které splynou s vnějším světlem, osahají objekt a pak opět dopadnou do oka. Chápání šíření světla bylo do velké míry ovlivněno starověkou geometrií. Například známý zákon lomu pro optické paprsky byl popsán podrobně alexandrijským astronomem CLAUDIEM PTOLEMAIEM (2. stol. př. Kr.), když dával do souvislosti posloupnost úhlů dopadu ze vzduchu a úhlů lomu do vody, ovšem tak, že přiřazoval úhlům lomu hodnoty dané jistou aritmetickou řadou. Zákon lomu neformuloval správně ani JOHANNES KEPLER (1571–1630), který používal vztah platný pouze pro malé úhly. Nicméně úspěšně z něj vycházel při konstrukci teleskopu. Správně zákon lomu světla získal na základě měření WILLEBRORD SNELL (1591–1626, Snellius), na základě částicové teorie ho odvodil RENÉ DESCARTES (1596–1650) a pomocí principu nejkratší dráhy světla PIERRE DE FERMAT (1609–1665). Zákon lomu a odrazu stačí ke správnému popisu zobrazení čočkami a zrcadly, což jsou prvky, kterými jsou tvořeny zobrazovací optické přístroje. Tato oblast optiky bývá označována jako geometrická optika, protože se zde v řadě případů dá použít geometrická konstrukce chodu světelných paprsků. Stálý pokrok v konstrukci a kvalitě zobrazovacích prvků je spojen s rozvojem matematických nástrojů pro jejich popis, ať už tradičních analytických řešení a odpovídajících aproximativních metod, např. CARL FRIEDRICH GAUSS (1777–1855), ERNST ABBE (1840–1905), LUDWIG SEIDEL (1821–1896), nebo v poslední době numerických metod a počítačových programů.

Celou historii optiky provází otázka, zda je světlo ve své podstatě proud částic (korpuskulární, částicová teorie světla) nebo vlnění (vlnová teorie). Například ISAAC NEWTON (1643–1727), který ukázal ve svém známém experimentu, že se bílé světlo při průchodu skleněným hranolem rozkládá na složky různých barev, byl stejně jako starověcí vědci zastáncem korpuskulární teorie. Pozorování dalších optických jevů, jako ohyb světla, však vedlo postupně k formulaci vlnové teorie. Začíná se objevovat již v 17. století, kdy je spojena se jmény ROBERT HOOKE (1635–1703) a CHRISTIAN HUYGENS (1629–1695), ovšem zcela zvítězila začátkem 19. století. THOMAS YOUNG (1773–1829) provedl svůj známý interferenční pokus, který správně interpretoval, a dal do souvislosti interferenci a ohyb světla. ETIENNE LOUIS MALUS (1775–1812) objevil polarizaci světla (v roce 1809) a zjistil, že odporuje představě, podle níž je světlo tvořeno podélnými vlnami, jak si představoval například Huygens. Pozorování šíření světla v krystalech, které provedl DOMINIQUE FRANCOIS ARAGO (1786–1853), pak vedlo Younga k závěru, že světelné vlny jsou příčné. JEAN FRESNEL (1788–1827) provedl další experimenty s ohybem světla a rozvinul pro jejich popis metodu zón, jež se dnes nazývají Fresnelovy zóny. Vypracoval také popis šíření světla v krystalech, který se stále používá. Vlnovou teorii světla matematicky zpracoval uspokojivě ke konci 19. století GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1823–1887) a ARNOLD SOMMERFELD (1868–1951). K chápání ohybu světla přispěl svými pozorováními i JOSEPH FRAUNHOFER (1787–1826), jenž objevil optickou ohybovou mřížku (1820) a použil ji k měření vlnové délky světla. To umožnilo vznik optické spektroskopie, která je dnes mimořádně důležitá v řadě oblastí a stále se rozvíjí. V roce 1865 zformuloval JAMES CLERK MAXWELL (1831–1879) rovnice popisující elektrické a magnetické jevy, ukázal, že z nich plyne existence elektromagnetických vln, a navrhl, že k nim patří i světlo. Experimentální prokázání elektromagnetických vln a jejich vlastností shodných s vlastnostmi světla, které provedl v roce 1888 HEINRICH HERTZ (1857–1994), znamenalo jasné vítězství vlnové teorie světla. Pro popis šíření světla v látkách navrhl ještě v 19. století HENDRIK ANTOON LORENTZ (1853–1928) model, který vysvětluje interakci světla s látkou pomocí pružně vázaných nábojů v látce. Tento model však nevysvětlil dobře proces absorpce a emise světla. Ke konci devatenáctého století byla spokojenost s klasickou vlnovou teorií světla narušena zejména pozorováním tepelného záření (záření černého tělesa) a fotoelektrického jevu. GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1824–1887) dospěl v roce 1859 k závěru, že v každé dutině obklopené stejně teplými stěnami existuje elektromagnetické záření závislé pouze na teplotě stěn, a ne například na jejich materiálu. Experimentální a teoretické zkoumání tohoto záření, spojené zejména se jmény WILHELM WIEN (1863–1928), LUDWIG EDUARD

BOLTZMANN (1843–1906) a JOSEPH STEFAN (1835–1893), bylo zakončeno interpolačním (Planckovým) zákonem, který vlastnosti záření černého tělesa správně popsal. Jeho interpretace vedla v roce 1900 MAXE PLANCKA (1858–1947) k závěru, že světlo může odevzdávat nebo přijímat od látky jen určité, diskrétní hodnoty energie. Tento objev znamenal počátek kvantové teorie. Fotoelektrický jev, tedy uvolňování elektronů z povrchu látky při dopadu světla vhodné vlnové délky, jako první popsal HEINRICH HERTZ roce 1887, když pozoroval, že dopad ultrafialového světla na elektrodu jiskřiště usnadňuje přeskok jiskry mezi jeho elektrodami. Vysvětlení fotoelektrického jevu, zejména skutečnosti, že kinetická energie vyletujících elektronů nezávisí na intenzitě dopadajícího světla, ale na jeho vlnové délce, podal v roce 1905 ALBERT EINSTEIN (1879–1955), podle něhož je samo světlo tvořeno elementárními světelnými „částicemi“. Ty nazval chemik GILBERT LEWIS v roce 1926 fotony. Světlo má tedy jak částicovou, tak vlnovou podstatu, mluví se o korpuskulárně-vlnovém dualismu. Při vysvětlení interakce světla s látkami zavedl Einstein také představu stimulované emise světla, fyzikálního procesu, který je podstatou činnosti laseru. První laser ale sestrojil až v roce 1960 THEODORE HAROLD MAIMAN (1927–2007). LUISE DE BROGLIE (1892–1987) navrhl představu, že vlnově-korpuskulární dualismus se vztahuje i na hmotné objekty, což odpovídá závěrům kvantové mechaniky zformulované později. S rozvojem kvantové teorie látek se rozvíjel také kvantový popis interakce světla s látkou, kvantová elektrodynamika. Statistické vlastnosti světla, tedy optická koherence, byly studovány v souvislosti s interferenčními pokusy (korelace amplitud světelných vln) v rámci klasické fyziky. Korelační měření intenzit světelných vln vedla k rozvoji kvantové teorie optické koherence. Za její vypracování získal Nobelovu cenu za fyziku v roce 2005 ROY J. GLAUBER (nar. 1925), ovšem na jejím rozvoji pracovala řada dalších, například EMIL WOLF (nar. 1922 v Praze, dlouholetý profesor university v Rochestru). Objev laseru a rozšíření laserů s intenzivními světelnými pulzy v šedesátých letech 20. století umožnily studium celé řady nelineárních optických jevů; jako první byla pozorována generace druhé harmonické frekvence rubínového laseru. V sedmdesátých letech se začala rozvíjet kvantová nelineární optika, zabývající se zejména nelineárními jevy spojenými s jednotlivými fotony. V roce 1980 byly demonstrovány zdroje světla s potlačeným šumem (tzv. tiché světlo s fázově citlivým šumem). Optické chlazení a zachycení jednotlivých atomů světelnými svazky, rozvíjené v osmdesátých a devadesátých letech 20. století, umožnilo přesné studium interakce světla s látkou; studuje se například interakce jednoho atomu s jedním módem světla. S optikou je také úzce spojen současný rozvoj nového pojetí zpracování informace, který vede ke kvantové kryptografii a kvantovým počítačům.

Zajímavá je historie optiky v českých zemích. K optikům světového a historického významu patří JAN MAREK MARKŮ Z LANŠKROUNA (Joannes Marcus Marci de Cronland, 1595–1667), který byl lékařem, dokonce osobním lékařem Ferdinanda III. a rektorem Karlovy univerzity. Ve vyšším věku vstoupil do jezuitského řádu. V latinském spise „Thaumantias“ z r. 1648 uvedl pozorování, že úhel lomu závisí na vlnové délce, objevil a publikoval tedy disperzi při lomu světla ještě před Newtonem. Poměrně nedávno se také prokázalo, že byl mezi prvními, kdo pozorovali ohyb světla, který objevili nezávisle tři badatelé: Marci, ROBERT BOYLE (1627–1691) a FRANCESCO M. GRIMALDI (1613–1663). AUGUSTIN L. CAUCHY (1789–1857), slavný matematik, který ovšem také vypracoval první matematickou teorii disperze (dodnes se používá tzv. Cauchyho vzorec), žil určitou dobu v Praze jako vychovatel dětí rodiny francouzského krále Karla X. Známy fyziolog JAN EVANGELISTA PURKYNĚ (1787–1869) se zabýval optikou lidského oka, objevil závislost maxima spektrální citlivosti oka na intenzitě dopadajícího světla (Purkyňův jev) a zkoumal setrvačnost zrakového vjemu. FRANTIŠEK KOLÁČEK (1851–1913, 1891 jmenován profesorem české univerzity v Praze) přispěl k teorii disperze. V Praze působili někteří významní světoví vědci v oblasti optiky. Patří k nim bezesporu CHRISTIAN DOPPLER (1803–1853), který byl profesorem v Praze v letech 1841–1848 a který v roce 1842 objevil po něm nazvaný jev, dále ERNST MACH (1838–1916), profesor experimentální fyziky na německé univerzitě v Praze v letech 1867–1895, jenž kromě známých teoretických prací předcházejících teorii relativity publikoval i práce z oblasti optiky, a konečně ALBERT EINSTEIN (na pražské německé univerzitě ve školním roce 1911–12). Z významných jmen v oblasti optiky 20. století můžeme jmenovat například VÁCLAVA DOLEJŠKA (1895–1945), profesora na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy, který pracoval v oblasti spektroskopie, nebo ANTONÍNA VAŠÍČKA (1903–1966), profesora na Přírodovědecké fakultě Masarykovy Univerzity v Brně, jenž se zabýval optikou tenkých vrstev. K předním světovým odborníkům v oblasti kvantové a nelineární optiky a teorie koherence světla patří JAN PEŘINA (nar. 1938), profesor Univerzity Palackého v Olomouci.

Výuka optiky na univerzitách je tradičně součástí základního kurzu fyziky. Je tomu tak i na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Tento text vychází z přednášky z optiky pro studenty obecné fyziky, kterou autor posledních dvacet let každý druhý rok vede. Optika zahrnuje dnes velmi širokou oblast, od geometrické a přístrojové optiky (např. mikroskop, spektroskopické přístroje), klasické vlnové optiky (problémy interference a ohybu světla) přes novější vláknovou optiku (optické komunikace), nelineární optiku (optické spínače) až po optiku kvantovou (lasery, kvantová koherence). Každý autor, resp. přednášející, stojí před

problémem, co do sylabu přednášky omezené počtem hodin nebo do učebnice omezené rozumným rozsahem zahrnout. Kromě klasických, „povinných“ částí se tak ve většině případů více či méně projeví subjektivní volba přednášejícího. Stejně je tomu i v tomto případě. Snahou autora bylo napsat text, který by byl úvodem pro další studium optiky, ale také zdrojem informací o optice pro studenty, kteří se v budoucnu budou věnovat jiným oborům, na nichž se již optika dále nevyučuje. Proto jsou do knihy zahrnuty některé kapitoly na stručné a přehledové úrovni.

Vzhledem k tomu, že text je určen posluchačům druhého ročníku, je zaměřen na klasickou (tedy ne kvantovou) optiku. Navazuje na přednášku z elektřiny a magnetismu, kde jsou již probírány elektromagnetické vlny. K nim se ještě vrací 1. kapitola. Další kapitoly (2.–5.) jsou věnovány části optiky označované jako vlnová (nebo fyzikální) optika. Ve 2. kapitole je zkoumána polarizace monochromatických rovinných světelných vln, je zaveden její popis pomocí Jonesových vektorů a maticový formalismus, který umožňuje v praktických aplikacích počítat změny polarizačního stavu světla po jeho průchodu různými optickými prvky (polarizátor, kompenzátor apod.). 3. kapitola má klasický obsah, popisuje odraz a lom rovinné vlny na optickém rozhraní mezi dvěma dielektriky. Další kapitola je věnována některým úvahám o světelných vlnách konečné spektrální šířky (kvazimonochromatické světelné signály), zavádí se zde pojem grupové rychlosti a diskutuje se o některých jejích vlastnostech. 5. kapitola popisuje interferenci (skládání) světla. Nejprve se vyšetřuje dvojsvazková interference, jistá pozornost je věnována zejména Youngovu dvojštěrbinovému experimentu a Michelsonovu interferometru, stručně jsou ale rozebírány i aplikačně významné antireflexní vrstvy. Kapitola končí mnohosvazkovou interferencí, jako důležitý příklad je uveden Fabry-Perotův interferometr. Úvodu do skalární teorie koherence světla je věnována kapitola 6., v jejímž závěru je stručně zmíněna souvislost mezi statistickými vlastnostmi a polarizací světla. V 7. kapitole je stručně vysvětlen princip holografie. Difrakci světla je věnována kapitola 8. Intuitivně je zaveden nejprve popis difrakce ve Fraunhoferově a pak Fresnelově aproximaci a jejich použití v typických případech. V závěru kapitoly jsou uvedeny úvahy, které vedou formálně k formulaci Fresnel-Kirchhoffova difrakčního integrálu. Základy fourierovské optiky a příklad jejího využití k optické filtraci obrazu popisuje stručně kapitola 9. Poměrně rozsáhlá 10. kapitola je věnována geometrické optice. Nejprve je uvedena jako limitní případ vlnové optiky pro velmi krátké vlnové délky, kdy jsou touto limitou získány základní zákony geometrické optiky, jako například zákon lomu pro paprsek. Tyto zákony jsou pak aplikovány na případ lomu a odrazu na sférických rozhraních mezi dielektriky v paraxiální aproximaci, což představuje ovšem nejklasičtější a nejjednodušší část klasické optiky, která je sem zařazena pro svůj aplikační význam. Zahrnuje popis některých základních

zobrazovacích přístrojů. Uveden je i maticový formalismus, kterého lze využít pro studium složitých optických zobrazovacích soustav. V posledním odstavci 10. kapitoly se probírají stručně vady zobrazení. Na popis zobrazovacích přístrojů navazuje 11. kapitola týkající se základních principů spektrálních přístrojů. Je zde zařazena, protože se optická spektroskopie stává v současné době součástí většiny odvětví fyziky. Kapitoly věnované geometrické a přístrojové optice uzavírá 12. kapitola stručným úvodem do fotometrie. Kapitola 13. se věnuje šíření světla v anizotropních prostředích (látkách). Při šíření světla hraje významnou roli jeho interakce s látkami. Na ní je založena optická spektroskopie, která využívá zkoumání interakce světla s látkami ke studiu vlastností látek. Proto je zařazena kapitola 14. zaměřená na interakci světla s látkou. Je zde zvolen klasický (tj. nekvantový) model oscilátoru ve světelném poli, který, jakkoliv je jednoduchý, poskytuje představu o mikroskopických procesech vedoucích k absorpci a lomu světla. Tento model se využívá ještě v kapitole 16. při výkladu nelineárních optických jevů. Obsah následujících tří kapitol lze považovat za součást tzv. moderní optiky. Zahrnují základy laserové fyziky (kapitola 15.), nelineární optiky (kapitola 16.) a vláknové optiky (kapitola 17.). Stručný přehled zdrojů a detektorů světla je uveden v kapitole 18. Závěrečná 19. kapitola shrnuje některé vlastnosti tepelného optického záření a stručně připomíná vlnově-korpuskulární povahu světla.

Text obsahuje větší objem látky, než lze zahrnout do přednášek současného rozsahu výuky na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy (3 hodiny týdně během jednoho semestru). Autor nepovažuje ovšem za rozumné označovat odstavce adjektivy rozšiřující, nepovinné apod. Nechává na čtenáři, aby si přečetl to, co sám považuje za rozumné nebo zajímavé. Je v tom obsažena autorova naděje, že zde lze něco takového nalézt.

V tomto druhém přepracovaném vydání byl text opraven a doplněn. Zejména byl rozšířen výklad gaussovských svazků v kapitole 15, a přidán nový odstavec uvádějící základy optické spektroskopie (kapitola 11). Vzhledem ke snaze o zachování původního rozsahu textu byla některá doplnění umístěna do nových poměrně dlouhých poznámek – například šíření světelného pulsu v disperzních materiálech, spektrální rozklad do rovinných vln nebo výpočet pole vyzařovaného vrstvou elektrických dipólů. Byly upraveny, resp. doplněny i některé další poznámky, několik obrázků a seznam literatury.

Autor děkuje recenzentům prof. RNDr. Ivanu Pelantovi, DrSc., a doc. RNDr. Pavlu Hlídce, CSc., za pečlivé a kritické čtení rukopisu. Autor děkuje také svému synovi Pavlovi Malému, bez něhož by obrázky v textu nemohly vzniknout. Za péči věnovanou přípravě knihy do tisku děkuje redaktorům PhDr. K. Veselé (1. vydání) a Mgr. J. Havlíčkovi (2. vydání) z nakladatelství Karolinum a RNDr. V. Havlíčkovi.



# 1 Světlo jako elektromagnetické vlny

## 1.1 Spektrum elektromagnetických vln

Elektromagnetické vlny jsou pozorovány v širokém spektrálním intervalu. Spektrální oblasti elektromagnetických vln jsou znázorněny na obr. 1.1. V každé oblasti mají jisté zvláštní projevy nebo účinky. Optika se zabývá elektromagnetickými vlnami, které jsou viditelné lidským okem (viditelná spektrální oblast), a vlnami z ultrafialové a infračervené spektrální oblasti. Mluví se někdy o *optickém záření*. Jeho jednotlivé spektrální oblasti jsou uvedeny v tabulce 1.1.

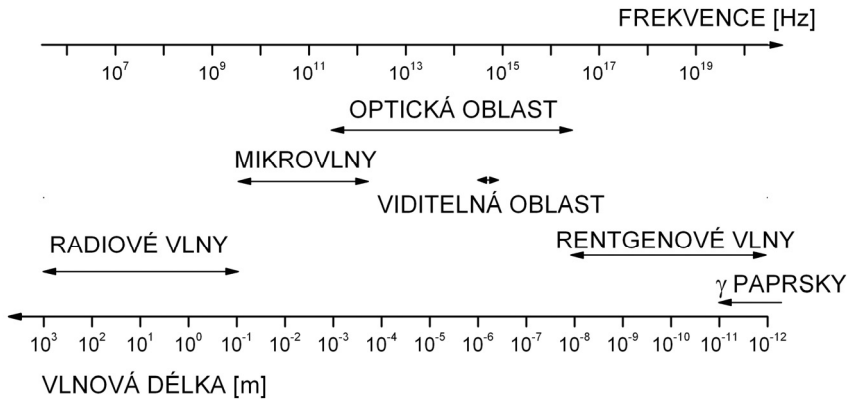
**Tabulka 1.1** Spektrální oblasti optického záření

Interval vln. délek	Název oblasti	Zkratka
25–200 nm	Vakuová ultrafialová	VUV
200–400 nm	Ultrafialová	UV
400–700 nm	Viditelná	VIS
700–1000 nm	Blízká infračervená	NIR
1–3 $\mu\text{m}$	Infračervená – krátké vlny	SWIR
3–5 $\mu\text{m}$	Infračervená – střední vlny	MWIR
5–14 $\mu\text{m}$	Infračervená – dlouhé vlny	LWIR
14–30 $\mu\text{m}$	Infračervená – velmi dlouhé vlny	VLWIR
30–100 $\mu\text{m}$	Daleká infračervená	FIR
100–1000 $\mu\text{m}$	Submilimetrová	SubMM

## 1.2 Vlnová rovnice

Šíření světla, které je speciálním případem elektromagnetických vln, popisuje vlnová rovnice, jež plyne z Maxwellových rovnic. Připomeňme si nyní, jak z Maxwellových rovnic vlnovou rovnicí dostaneme a jaký má tvar pro různá prostředí. V tomto kontextu lze prostředí rozdělit na prostředí homogenní, nehomogenní, izotropní, anizotropní, vodivá a nevodivá. Homogenní prostředí jsou taková, jejichž vlastnosti jsou ve všech mís-

tech stejné, nezávisí na prostorové souřadnici. V prostředích nehomogenních naopak na prostorové souřadnici závisí. Izotropní látky mají vlastnosti nezávislé na směru (šíření světla, polarizace apod.), v anizotropních jsou jejich vlastnosti na směru závislé. Rozdělení látek na vodivé a nevodivé



Obr. 1.1 Spektrum elektromagnetického záření

je obvyklé v učebnicích o elektřině a magnetismu kde se mluví, zpravidla o dielektrikách a vodičích. Vyjdeme z Maxwellových rovnic

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0, \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j}, \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (1.4)$$

a obvyklých materiálových vztahů

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (1.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad (1.6)$$

$$\vec{j} = \vec{\sigma} \vec{E}. \quad (1.7)$$

Zde je použité běžné značení veličin:  $\vec{E}$  je intenzita elektrického pole,  $\vec{D}$  je elektrická indukce,  $\vec{H}$  je magnetická intenzita,  $\vec{B}$  magnetická indukce,  $\vec{P}$  elektrická polarizace,  $\vec{j}$  hustota elektrického proudu,  $\rho$  hustota elektrického náboje,  $\mu$  je magnetická permeabilita,  $\epsilon_0$  permitivita vakua a  $\sigma$

elektrická vodivost. Budeme se zabývat šířením světla v látkách nemagnetických, tedy  $\mu = \mu_0$ . Ve většině případů (kromě 16. kapitoly) budeme také předpokládat lineární závislost polarizace na elektrickém poli, tedy

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \tilde{\chi} \vec{E}, \quad (1.8)$$

kde  $\tilde{\chi}$  je elektrická susceptibilita (obecně tenzor) a odkud je

$$\vec{D} = \varepsilon_0 (1 + \tilde{\chi}) \vec{E} = \tilde{\varepsilon} \vec{E}. \quad (1.9)$$

Permitivita  $\tilde{\varepsilon}$  je obecně tenzorová veličina závislá na prostorových souřadnicích. Výraz v kulatých závorkách v (1.9) definuje relativní permitivitu,  $(1 + \tilde{\chi}) = \tilde{\varepsilon}_r$ . Vlastnosti permitivity podle typu prostředí jsou shrnuty v tabulce 1.2.<sup>1</sup>

**Tabulka 1.2** Přehled klasifikace prostředí a odpovídající charakter permitivity

	homogenní	nehomogenní
izotropní	$\tilde{\varepsilon}(\vec{r}) = \varepsilon$	$\tilde{\varepsilon}(\vec{r}) = \varepsilon(\vec{r})$
anizotropní	$\tilde{\varepsilon}(\vec{r}) = \tilde{\varepsilon}$	$\tilde{\varepsilon}(\vec{r}) = \tilde{\varepsilon}(\vec{r})$

Nyní se budeme zabývat pouze izotropními prostředími, šíření světla anizotropními prostředími budeme podrobně zkoumat v kapitole 13. Aplikujeme-li operátor  $\nabla \times$  na rovnici (1.1) a uvážíme-li, že můžeme zaměnit pořadí derivací podle času a souřadnice, dostaneme po dosazení z rovnice (1.2)

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} + \mu \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} + \mu \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} = 0. \quad (1.10)$$

Můžeme nyní použít vektorovou identitu

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \Delta \vec{E}. \quad (1.11)$$

Obvykle se dále předpokládá, že

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0. \quad (1.12)$$

To je splněno například pro homogenní izotropní prostředí bez volného náboje, jak plyne přímo z rovnice (1.3), nebo v dobrých vodičích, kde je amplituda jakéhokoliv náboje v objemu rychle tlumena.<sup>2</sup>

Platí-li (1.12) a výše uvedené materiálové vztahy, dostáváme vlnovou rovnici ve tvaru ( $\Delta$  je Laplaceův operátor)

$$\Delta \vec{E} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} = 0. \quad (1.13)$$

Odtud můžeme získat známé tvary vlnové rovnice.<sup>3</sup> Například pro šíření světla ve vakuu je  $\vec{P}=0$  a  $\sigma=0$ . Pro homogenní izotropní dielektrikum ( $\sigma=0$ ), pro které platí (1.8), máme

$$\Delta \vec{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (1.14)$$

tedy fázová rychlost šíření je

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon}}. \quad (1.15)$$

V optice se zavádí veličina *index lomu prostředí*, jako poměr rychlosti světla ve vakuu k rychlosti světla v daném (nemagnetickém) prostředí,<sup>4</sup>

$$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\varepsilon_r}. \quad (1.16)$$

### 1.3 Rovinné vlny

Každé řešení vlnové rovnice se nazývá vlnou. Rovnost druhých partiálních derivací podle času a souřadnic (až na druhou mocninu fázové rychlosti) vede k tomu, že v argumentu funkce popisující vlnu musí být čas a prostorová souřadnice spojeny do obecné fáze vlny. To odpovídá tomu, jak chápeme vlnu intuitivně: jedná se o rozruch, který se šíří v prostoru a čase. Nabude určité velikosti v určitém místě a čase, v jiném místě nabude stejné velikosti v jiném čase, až tam vlna dorazí. Geometrické místo bodů, v nichž má obecná fáze vlny pro určitý čas konstantní hodnotu, se nazývá *vlnoplochou* (plocha konstantní fáze). V optice hrají významnou roli *vlny rovinné* (vlnoplochy jsou roviny) a *vlny kulové* (sférické, vlnoplochy jsou kulové plochy). Speciálním případem jsou pak vlny *harmonické*, které jsou popsány funkcí kosinus nebo sinus. Pokud je na vlnoploše konstantní hodnota amplitudy vlny, nazývá se vlna *homogenní*<sup>5</sup>. V případech, kdy je důležitá jen jedna kartézská složka elektrické-