

OPTIKA

PETR MALÝ



KAROLINUM

Optika

Petr Malý

Recenzovali:

prof. RNDr. Ivan Pelant, DrSc.

doc. RNDr. Pavel Hlíděk, 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
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
1 Světlo jako elektromagnetické vlny.....	17
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
2 Polarizace světla rovinné monochromatické vlny	39
2.1 Lineární, kruhová a eliptická polarizace světla	39
2.2 Maticový popis polarizace světla	42
3 Odraz a lom světla na rovinném rozhraní dvou prostředí.....	49
4 Kvazimonochemické elektromagnetické vlny.....	63
4.1 Spektrální rozklad světla	63
4.2 Grupová rychlost světla.....	65
5 Interference světla	72
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
6 Koherence světla	95
6.1 Úvod do skalární teorie koherence	96
6.2 Polarizace světla.....	103

7	Holografie	107
8	Difrakce světla	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
9	Princip fourierovské optiky	148
10	Základy geometrické optiky	156
10.1	Úvod do geometrické optiky	156
10.1.1	Eikónálová 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

11 Spektrální přístroje	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
12 Základy fotometrie a radiometrie	231
13 Šíření světla v anizotropních látkách	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
14 Interakce světla s látkou	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
15 Základy laserové fyziky	289
15.1 Interakce světla s látkou v případě reálných přechodů mezi energetickými stavy	289
15.2 Laser	295
16 Nelineární optika	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
17 Základy vláknové optiky	322

18 Zdroje a detektory světla	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
19 Vlnově-korpuskulární dualismus	342
19.1 Tepelné záření	342
19.2 Fotony	351
19.3 Vlnové vlastnosti částic	352
Vybrané základní fyzikální konstanty	355
Literatura	357
Rejstřík	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 zastánce 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. Známý 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