

Obsah

Předmluva	13
I. Úvod do kvantové elektrodynamiky	15
1. Kvantování skalárního pole	17
1.1. Definice a popis skalárního pole	17
1.2. Kvantování skalárního pole	18
1.3. Komplexní vlastní funkce	21
1.4. Vyjádření vlastních funkcí v představě rovinných vln	21
1.5. Hustota vidů a spojitě spektrum vlastních funkcí	23
2. Elektromagnetické pole jako dynamická soustava	26
2.1. Popis elektromagnetického pole Maxwellovými–Lorentzovými rovnicemi	26
2.2. Závislost změny hmotnosti částice na rychlosti a vnější síle	27
2.3. Časová změna momentu impulsu	28
2.4. Čtyřvektor impulsu	29
2.5. Tenzor Maxwellova pnutí v čtyřrozměrném prostoru	30
2.6. Zavedení potenciálů	33
2.7. Vírové a nevírové vektorové pole	34
2.8. Podélné a příčné elektromagnetické pole	36
2.9. Příčná a podélná složka Lorentzovy síly	40
2.10. Energie elektromagnetického pole	41
2.11. Impuls záření elektromagnetického pole	42
2.12. Impulsový moment záření	43
2.13. Impuls podélného pole	44
2.14. Impuls elektromagnetického pole s nabitými částicemi	46
2.15. Zákony zachování	46
2.16. Spin vektorového pole	48
2.17. Parita elektromagnetického pole	54
2.18. Popis elektromagnetického pole impulsem, impulsovým momentem, spinem a paritou	61
2.19. Polarizace elektromagnetického pole	63
3. Kvantování elektromagnetického pole	64
3.1. Hamiltonián elektromagnetického záření bez zdrojů	64

3.2.	Operátor hamiltoniánu záření bez zdrojů	66
3.3.	Hamiltonián elektromagnetického pole se souborem částic	67
3.4.	Kvantování elektromagnetického pole	68
3.5.	Důležité poučky o operátoru počtu částic, kreačním a anihilačním operátoru	70
3.6.	Vektorová báze pro reprezentaci $\{\mathbf{N}\}$	71
3.7.	Základní algebra Boseho operátorů	72
3.8.	Reprezentací matice základních operátorů v reprezentaci počtu částic	74
3.9.	Fyzikální smysl operátorů $\mathbf{N}$, $\mathbf{a}$, $\mathbf{a}^+$	76
3.10.	Reprezentace charakteristických operátorů elektromagnetického pole na bázi zobecněné souřadnice	76
3.11.	Schrödingerova rovnice kvantové soustavy elektromagnetického pole	78
3.12.	Obecná mnohovidová soustava elektromagnetického pole	82
3.13.	Vlastní stavy operátoru intenzity elektromagnetického pole	82
3.14.	Diferenciální rovnice vlnové funkce koherentních stavů	84
4.	Kvantování polí v krystalických soustavách	86
4.1.	Soustava složená z iontů a elektronů; aproximace Bornova–Oppenheimerova	86
4.2.	Fockova a Hartreeova aproximace vlnové rovnice elektronů	87
4.3.	Operátorová rovnice iontů nebo jader; zavedení pojmu fonon	90
4.4.	Blochova funkce	92
4.5.	Reciproké mříže a Brillouinovy zóny	94
4.6.	Krystaly konečných rozměrů	96
4.7.	Wannierova funkce	98
4.8.	Wannierův hamiltonián	100
4.9.	Efektivní hmotnost elektronu	103
4.10.	Rychlost elektronů ve vodivostním pásmu	104
4.11.	Jednorozměrná mříž s jednoduchým uspořádáním atomů	108
4.12.	Jednorozměrná krystalová mříž složená ze dvou skupin částic	112
4.13.	Jednorozměrná mříž složená ze skupin o mnoha částicích	115
4.14.	Šíření vln v třírozměrných periodických strukturách	117
4.15.	Okrajové podmínky lineární periodické soustavy	120
4.16.	Energetická pásma krystalů	122
4.17.	Hustota stavů v pásmu	124
5.	Kvantování soustavy elektronů	126
5.1.	Druhé kvantování a fermionové pole	126
5.2.	Hamiltonián elektronů při druhém kvantování	128
5.3.	Elektrický moment při druhém kvantování	129
5.4.	Operátor rozdílu populace hladiny při dvouhladinovém modelu	130
5.5.	Vyjádření operátoru $\mathbf{b}_i^+ \mathbf{b}_j$ v interakční reprezentaci	130
5.6.	Hamiltonián vazby mezi podsoustavou elektromagnetického pole a podsoustavou elektronů (fermionů) v pojetí druhého kvantování	132
5.7.	Operátor vazby mezi podsoustavou fermionů a disipativní podsoustavou	133
5.8.	Obecný rozbor vazebního hamiltoniánu mezi podsoustavou fermionů, podsoustavou fotonů a podsoustavou fononů	134
II.	Kvazioptické soustavy a koherence záření	137
1.	Základní vztahy pro popis elektromagnetického pole v kvazioptických soustavách	139
1.1.	Integrální rovnice vyzařování z otevřených apertur	139
1.2.	Aplikace metody geometrické optiky při šíření elektromagnetické vlny uvnitř fázových korektorů	142
1.3.	Fázové korektory ve tvaru dielektrických čoček	144

1.4.	Zrcadlové fázové korektory	146
1.5.	Kvadratické fázové korektory	147
1.6.	Integrální rovnice otevřeného vedení s fázovými korektory	150
1.7.	Integrální rovnice otevřeného rezonátoru	151
1.8.	Separace proměnných integrální rovnice otevřeného vedení a otevřeného rezonátoru	155
2.	Metody řešení integrálních rovnic otevřeného vedení a otevřených rezonátorů	157
2.1.	Iterační metoda výpočtu otevřených rezonátorů	158
2.2.	Výpočet otevřených rezonátorů převodem integrální rovnice na diferenciální rovnici se stejnými vlastními funkcemi	159
2.3.	Řešení integrálních rovnic otevřených rezonátorů rozložením jejich jader v posloupnost Schmidových funkcí	161
2.4.	Výpočet intenzity elektrického pole na aperturách otevřených rezonátorů	162
2.5.	Analýza jader jednotlivých druhů otevřených rezonátorů s obdélníkovými aperturami	164
2.6.	Otevřené rezonátory s kruhovou aperturou	170
2.7.	Stacionárnost některých funkcí integrálních rovnic otevřených rezonátorů	173
2.8.	Určení intenzity elektromagnetického pole uvnitř otevřených rezonátorů	174
3.	Výpočet hlavních parametrů otevřeného rezonátoru	180
3.1.	Konfokální zrcadla s obdélníkovou aperturou s nekonečným Fresnelovým difrakčním číslem	180
3.2.	Konfokální zrcadla s obdélníkovou aperturou s konečným Fresnelovým difrakčním číslem	188
3.3.	Otevřený rezonátor s konfokálními zrcadly kruhového průřezu s nekonečným Fresnelovým difrakčním číslem	192
3.4.	Otevřený rezonátor se stejnými zrcadly s velkým Fresnelovým difrakčním číslem	194
3.5.	Výpočet geometrického uspořádání intenzity elektrického pole a difrakčních ztrát v konfokálním rezonátoru s kruhovými aperturami s velkým Fresnelovým difrakčním číslem	200
3.6.	Otevřené rezonátory se zrcadly s různou křivostí	203
3.7.	Otevřené rezonátory s polopropustnými zrcadly (obecně)	209
3.8.	Otevřený rezonátor s dvěma stejnými polopropustnými zrcadly	212
3.9.	Otevřený rezonátor s jedním kovovým a s jedním polopropustným zrcadlem	216
4.	Buzení otevřených rezonátorů	219
4.1.	Nehomogenní Fredholmova integrální rovnice druhého druhu	219
4.2.	Buzení otevřeného rezonátoru proudovými a nábojovými zdroji	222
4.3.	Buzení otevřeného rezonátoru aktivním prostředím	225
4.4.	Buzení otevřeného rezonátoru vnějším ozářením plochy polopropustného zrcadla	228
4.5.	Otevřený rezonátor s poruchovým prvkem	233
4.6.	Přenos dvourozměrného signálu soustavou fázových korektur	237
5.	Klasická teorie koherence signálu	250
5.1.	Definice koherence; časová, prostorová i vzájemná koherence	250
5.2.	Viditelnost (ostrost) signálu	252
5.3.	Prostorové vlastnosti koherentních funkcí	253
5.4.	Huygensův vztah pro koherentní funkci	254
5.5.	Poučka Van Zittertova–Zernickeho	257
5.6.	Rozbor Greenovy funkce pro kulové souřadnice	258
5.7.	Integrální rovnice koherentní funkce při průchodu signálu soustavou fázových korektur	259

5.8.	Řešení integrální rovnice koherentní funkce při průchodu uspořádanými fázovými korektory	261
5.9.	Rozbor signálů	263
5.10.	Koherentní doba a koherentní délka	265
5.11.	Přenos koherentního rozruchu periodickou soustavou fázových korektorů	266
5.12.	Přenos koherentní funkce otevřeným rezonátorem	270
5.13.	Koherentní funkce signálu vyzářeného z rovinné apertury	273
5.14.	Elektrooptické jevy v krystalech	275
5.15.	Odklánění světelného paprsku	280
5.16.	Stáčení polarizační roviny	285
5.17.	Modulace optického paprsku změnou elektrické permitivity modulačního prvku uvnitř rezonátoru	289
5.18.	Synchronizace vidů	296

III. Interakce elektromagnetického pole s aktivními kvantovými soustavami 307

1.	Rozbor kvantových soustav pomocí operátoru hustoty pravděpodobnosti ve Schrödingerově představě	311
1.1.	Diferenciální rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti v adiabatickém přiblížení	311
1.2.	Diagonální singularnost	317
1.3.	Operátor hustoty pravděpodobnosti vztažený jen na podsoustavu elektromagnetického pole a na podsoustavu aktivních částic	320
1.4.	Diferenciální rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti při složitějších operátorech vazby	323
1.5.	Pohybová rovnice vztaženého operátoru hustoty pravděpodobnosti na dynamickou podsoustavu a podsoustavu elektromagnetického pole	326
1.6.	Pohybová rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti při interakci dynamických podsoustav s podrobnější analýzou disipativní podsoustavy	331
1.7.	Modifikace pohybové rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti vztaženého jen na podsoustavu elektromagnetického pole	340
1.8.	Pohybová rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti vztaženého na podsoustavu fermionů	345
1.9.	Pohybová rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti vztaženého na podsoustavu fermionů při dvouhladinovém modelu	349
1.10.	Pohybová rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti při interakci elektromagnetického pole s dynamickou podsoustavou částic ve Schrödingerově představě	351
1.11.	Řešení pohybové rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti vztaženého jen na dynamickou podsoustavu nabitých částic	353
1.12.	Střední hodnota energie dynamické podsoustavy	355
1.13.	Semiklasické řešení interakce elektromagnetického pole s dynamickou podsoustavou částic	359
1.14.	Absorbovaný výkon dynamické soustavy, jsoucí v interakci s elektromagnetickým polem, ve stacionárním stavu	364
1.15.	Rozbor maticových členů vazebního hamiltoniánu při elektrodipólové interakci mezi dynamickou podsoustavou částic a podsoustavou elektromagnetického pole	366
1.16.	Zavedení časových konstant a úprava pohybové rovnice pro diagonální členy vztaženého operátoru hustoty pravděpodobnosti	369

1.17.	Řešení pohybové rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti při periodickém průběhu vnějšího elektromagnetického pole	371
1.18.	Diferenciální rovnice střední hodnoty operátoru	374
1.19.	Diferenciální rovnice pro střední hodnotu elektrické polarizace	377
1.20.	Diferenciální rovnice obsazení (populace) hladin	381
1.21.	Diferenciální rovnice stimulované polarizace a rozdílu populace hladin při degenerované soustavě aktivních částic	383
1.22.	Řešení diferenciální rovnice stimulované polarizace a rozdílu populace hladin pro první harmonickou	385
1.23.	Komplexní amplitudy elektrické polarizace vyšších harmonických	390
1.24.	Pohybové rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti při spojitém spektru vlastních čísel hamiltoniánu	391
1.25.	Diferenciální rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti při nepřímém mezipásmovém přechodu na modelu fonono-elektronové interakce	397
1.26.	Řešení soustavy simultánních diferenciálních rovnic maticových členů operátoru hustoty pravděpodobnosti při nepřímém mezipásmovém přechodu	411
1.27.	Střední hodnota pozorovatelných operátorů v případě dvojpásmového přechodu	415
1.28.	Střední hodnota proudu vzniklého tokem nosičů náboje při mezipásmovém přechodu	428
1.29.	Proudová hustota volných nosičů náboje ve vodivostním popřípadě valenčním pásmu v nepřítomnosti vnějšího elektrického pole	435
1.30.	Určení celkového počtu nosičů náboje	440
1.31.	Výpočet vodivosti a součinitele útlumu (zesílení) při přímém mezipásmovém přechodu	444
2.	Řešení interakce kvantových soustav pomocí Fokerovy–Planckovy rovnice	451
2.1.	Wignerova distribuční funkce a z ní odvozené reprezentace	451
2.2.	Diferenciální rovnice distribuční funkce	453
2.3.	Fokerova–Planckova rovnice při interakci fermionové podsoustavy s disipativní podsoustavou	458
2.4.	Fokerova–Planckova rovnice při interakci fermionové podsoustavy s fotonovou podsoustavou	464
2.5.	Fokerova–Planckova rovnice při interakci fermionové podsoustavy s fotonovou podsoustavou a s disipativní podsoustavou	467
2.6.	Úprava Fokerovy–Planckovy rovnice při velkém počtu částic fermionové podsoustavy	468
2.7.	Určení střední hodnoty pozorovatelného operátoru pomocí distribuční funkce	473
2.8.	Časová změna střední hodnoty pozorovatelného operátoru	478
2.9.	Střední hodnota amplitudy elektrického momentu, amplitudy intenzity elektrického pole a rozdílu populace hladin	478
2.10.	Úprava Fokerovy–Planckovy rovnice, mění-li se elektrický moment a inverze adiabaticky	479
2.11.	Fokerova–Planckova rovnice vyjádřená v polárních souřadnicích	483
2.12.	Řešení Fokerovy–Planckovy rovnice	485
3.	Řešení interakce kvantových soustav v Heisenbergově reprezentaci	492
3.1.	Langevinovy stochastické síly	492
3.2.	Langevinovy stochastické síly při interakci fermionové podsoustavy s disipativní podsoustavou	498
3.3.	Diferenciální rovnice časové změny charakteristických operátorů při interakci fermionové podsoustavy s fotonovou podsoustavou v Heisenbergově reprezentaci	503

3.4.	Diferenciální rovnice časové změny charakteristických operátorů při interakci fotonové a fermionové podsoustavy s disipativní podsoustavou v Heisenbergově představě	507
3.5.	Řešení soustavy diferenciálních rovnic charakteristických operátorů v Heisenbergově představě	509
3.6.	Rozbor stochastických členů	519
4.	Interakce elektromagnetického pole s aktivním kvantovým prostředím v mikrovlnných prostorových soustavách	521
4.1.	Nehomogenní vlnová rovnice intenzity elektromagnetického pole a magnetického sycení v prostoru s aktivním prostředím	521
4.2.	Buzení selektivní soustavy elektromagnetického pole s aktivním souborem částic s elektrickodipólovou interakcí	526
4.3.	Rychlostní rovnice energie elektromagnetického pole a populace hladin	533
4.4.	Podmínky zesílení elektromagnetické vlny ve vlnovodu zaplněném aktivním souborem částic	536
4.5.	Kvantování elektromagnetického pole v rezonátoru s aktivním prostředím	539
4.6.	Střední hodnota operátoru, který závisí jen na podsoustavě elektromagnetického pole	551
4.7.	Střední hodnota počtu fotonů jednovidové soustavy elektromagnetického pole	552
4.8.	Střední hodnota operátoru, který závisí jen na dynamické podsoustavě aktivních částic	554
4.9.	Střední hodnota operátoru počtu částic při dvouhladinovém modelu (při kvantování podsoustavy elektromagnetického pole).	554
4.10.	Postup řešení soustavy diferenciálních rovnic počtu fotonů a rozdílu populace hladin	559
4.11.	Diferenciální rovnice počtu fotonů a rozdílu populace hladin při vícevidové soustavě	560
4.12.	Diferenciální rovnice počtu fotonů a rozdílu populace hladin při velké šířce kmitočtového pásma rezonátoru	562
IV.	Nelineární interakce mezi fotonovými a fononovými, popřípadě elektronovými soustavami	567
1.	Rozptyly na kombinačních kmitočtech	569
1.1.	Rozbor vazebního hamiltoniánu při kvadratických interakcích	569
1.2.	Diferenciální rovnice amplitudy vibrací a amplitudy intenzity elektrického pole při Ramanově, popřípadě Brillouinově rozptylu při fonono-fotonové interakci	571
1.3.	Šíření rovinné Stokesovy nebo anti-Stokesovy vlny	578
1.4.	Řešení Ramanova rozptylu kvantováním fononové a fotonové soustavy	589
1.5.	Střední hodnota operátoru, který závisí jen na podsoustavě elektromagnetického pole se Stokesovým kmitočtem	597
1.6.	Střední hodnota operátoru, který závisí jen na fononové podsoustavě	598
1.7.	Střední hodnota počtu fotonů Stokesovy podsoustavy	598
1.8.	Diferenciální rovnice střední hodnoty počtu fotonů čerpací vlny	602
1.9.	Diferenciální rovnice střední hodnoty počtu fotonů při interakci s fotonovými podsoustavami Stokesovy a čerpací vlny	603
1.10.	Řešení soustavy diferenciálních rovnic počtu fotonů a počtu fononů při kvadratické interakci mezi fotonovou a fononovou soustavou	604
1.11.	Řešení diferenciální rovnice počtu fotonů a počtu fononů pro prahové hodnoty	607
1.12.	Řešení diferenciální rovnice počtu fotonů čerpacího pole	608
1.13.	Parametrické zesílení při nelineární fono-fotonové interakci (s nelineárním členem dipólového momentu)	609

2.	Ramanův rozptyl na foton-elektronové interakci	614
2.1.	Odvození diferenciální rovnice operátoru hustoty pravděpodobnosti při nelineární foton-elektronové interakci	614
2.2.	Střední hodnota operátoru, který závisí jen na podsoustavě elektromagnetického pole daného vidu l při foton-elektronové interakci	618
2.3.	Střední hodnota operátoru, který závisí jen na dynamické podsoustavě elektronů	619
2.4.	Střední hodnota operátoru, který závisí jen na podsoustavě elektromagnetického pole s kmitočtem ω_l	619
2.5.	Střední hodnota počtu fotonů podsoustavy elektromagnetického pole daného kmitočtu	620
2.6.	Diferenciální rovnice obsazení hladin	622
2.7.	Diferenciální rovnice pro počet fotonů elektromagnetického pole vidu s kmitočtem ω_k	623
2.8.	Rozbor výsledků z předešlých kapitol	625
2.9.	Samofokuse při Ramanově a Brillouinově rozptylu	628
	Dodatky	634
	Dodatek 1	634
	Dodatek 2	637
	Dodatek 3	641
	Dodatek 4	645
	Dodatek 5	647
	Dodatek 6	648
	Dodatek 7	649
	Dodatek 8	652
	Dodatek 9	653
	Dodatek 10	655
	Dodatek 11	659
	Dodatek 12	661
	Dodatek 13	664
	Dodatek 14	664
	Literatura	666
	Ruské resumé	668
	Anglické resumé	669
	Rejstřík	670