

Spis treści

Przedmowa	15
Wprowadzenie	19
1. Prawa elektromagnetyzmu	29
1.1. Równania Maxwella dla próżni	30
1.1.1. Równania Maxwella w postaci całkowitej	31
1.1.2. Równania Maxwella w postaci różniczkowej	38
1.2. Zasada zachowania ładunku elektrycznego	39
1.3. Równania Maxwella w ośrodku materialnym	41
1.3.1. Wpływ pól E i B na atomy ośrodka	43
1.3.2. Równania Maxwella dla dielektryka	48
1.4. Warunki graniczne (brzegowe)	49
1.4.1. Granica dwóch dielektryków	52
1.4.2. Granica dielektryk – przewodnik	52
1.4.3. Wyprowadzenie warunków granicznych	53
1.5. Gęstość energii pola EM i strumień energii fali EM	55
1.6. Gęstość pędu i momentu pędu (krętu) pola EM	60
1.7. Równanie falowe dla dielektryka	61
1.7.1. Równanie falowe dla pola elektrycznego	61
1.7.2. Równanie falowe dla pola magnetycznego	62
1.7.3. Stała c w równaniu falowym	63
1.7.4. Równanie falowe jako równanie liniowe	64
1.7.5. Równanie falowe jako równanie relatywistyczne	65
1.7.6. Równanie falowe dla fali monochromatycznej	68
1.8. Podsumowanie	70
Literatura do rozdziału 1	72
2. Rozchodzenie się fali monochromatycznej w ośrodku	73
2.1. Fala płaska monochromatyczna	74
2.2. Fala elektromagnetyczna jako fala poprzeczna (TEM)	77
2.3. Wektor Poyntinga i natężenie fali harmonicznej	82
2.3.1. Natężenie biegnącej fali harmonicznej	82
2.3.2. Postać zespolona wektora Poyntinga dla fali harmonicznej	86
2.4. Wytwarzanie fali EM przez dipol Hertza	87
2.4.1. Model dipola Hertza	88
2.4.2. Rozkłady pola E i H. Pole bliskie i pole dalekie	92

2.5. Fala płaska w ośrodku stratnym (absorbującym)	96
2.6. Fala płaska w ośrodku przewodzącym	101
2.6.1. Przewodność zespolona	101
2.6.2. Czas relaksacji dielektrycznej w przewodniku	103
2.6.3. Równanie falowe dla ośrodka przewodzącego	104
2.6.4. Fala elektromagnetyczna w metalu, efekt naskórkowy	106
2.7. Odbicie i transmisja fali EM przy padaniu normalnym na granicę ośrodków	112
2.7.1. Współczynniki odbicia i transmisji pól E i H	112
2.7.2. Warunki brzegowe – wyznaczanie współczynników odbicia i transmisji	114
2.7.3. Fale częściowo stojące składowych E i H	120
2.8. Rozpraszanie światła	125
2.8.1. Rodzaje rozpraszania światła	125
2.8.2. Współczynnik tłumienia i przekrój czynny na rozpraszanie	130
2.8.3. Rozkład kątowy i polaryzacja światła w rozpraszaniu Rayleigha	132
2.8.4. Rozpraszanie Rayleigha i polaryzacja nieba	136
2.8.5. Rozpraszanie koherentne i niekoherentne. Zasięg widzialności. Kolor nieba	139
2.8.6. Rozpraszanie Miego, barwa chmur	145
2.9. Podsumowanie właściwości fali płaskiej harmoniczej	148
Literatura do rozdziału 2	150
3. Dyspersja ośrodka liniowego. Zależności dyspersyjne	152
3.1. Dyspersja i lokalność czasowa odpowiedzi ośrodka	152
3.2. Układy liniowe stacjonarne i zasada przyczynowości	156
3.3. Zasada przyczynowości i transformata Hilberta	159
3.4. Optyczne związki dyspersyjne Kramersa-Kroniga	161
3.4.1. Związki Kramersa-Kroniga dla stałych optycznych	161
3.4.2. Relacje Kramersa-Kroniga dla refleksji i przesunięcia fazowego	164
3.4.3. Reguły sum	169
3.4.4. Związki Kramersa-Kroniga w optyce nieliniowej	170
3.5. Przykład zastosowania związków dyspersyjnych – szkło kwarcowe	172
3.5.1. Właściwości optyczne szkła krzemionkowego	176
3.5.2. Model funkcji widma absorpcyjnego	177
Literatura do rozdziału 3	181

4. Klasyyczna teoria dyspersji – model Drudego-Lorentza . . .	182
4.1. Rodzaje polaryzacji	183
4.2. Funkcja stałej dielektrycznej ośrodka	188
4.2.1. Ogólna postać przebiegu przenikalności elektrycznej	188
4.2.2. Zależność $\epsilon_r(\omega)$ dla polaryzacja dipolowej	189
4.2.3. Widmo refrakcyjne i absorpcyjne wody	190
4.3. Model oscylatora atomowego	194
4.3.1. Atom jako oscylator harmoniczny tłumiony	194
4.3.2. Radiacyjna stała tłumienia w modelu atomu-oscyłatora . . .	197
4.3.3. Podatność i przenikalność elektryczna w modelu oscyłatorowym	198
4.3.4. Zespolony współczynnik załamania i przebieg funkcji dyspersyjnych	204
4.3.5. Model Lorentza wielu oscylatorów	209
4.4. Analityczne wzory dyspersyjne dla współczynnika załamania . . .	213
4.5. Klasyczny model gazu elektronowego w metalu	215
4.5.1. Zależności Drudego	217
4.5.2. Zespolona przewodność właściwa metalu	218
4.5.3. Właściwości optyczne metali – widma stałych optycznych	219
4.5.4. Zależności dyspersyjne $k(\omega)$ plazmy elektronowej – plazmony	222
4.5.5. Reflektancja metali i krawędź plazmowa	229
4.5.6. Model Drudego-Lorentza	231
4.6. Praca zmiennego pola elektrycznego w modelu oscylatorów	233
Literatura do rozdziału 4	237
5. Część I	
Prędkości światła	238
5.1. Współczynnik załamania – dlaczego prędkość fazowa różni się od c	238
5.1.1. Szczególna Teoria Względności a prędkość światła	239
5.1.2. Fala świetlna w ośrodku jako superpozycja fali pierwotnej i fal wtórnych	240
5.1.3. Fale wtórne i współczynnik załamania w modelu oscyłatorowym	244
5.2. Prędkości fali świetlnej w ośrodku	249
5.2.1. Fala monochromatyczna – prędkość fazowa	250
5.2.2. Paczka falowa – prędkość grupowa	251
5.2.3. Prędkość fali dla wiązek o ograniczonym przekroju poprzecznym	258
5.3. Propagacja impulsu świetlnego w ośrodku	265
5.3.1. Impuls optyczny jako superpozycja fal harmonicznych . . .	265

5.3.2. Symulacja numeryczna propagacji impulsu w ośrodku dyspersyjnym	268
5.3.3. Zasada nieoznaczoności dla impulsu	271
5.3.4. Prędkość grupowa impulsu i parametry dyspersji	281
5.4. Manipulacje prędkością grupową impulsów świetlnych	286
5.4.1. „Szybkie” światło – interpretacja fizyczna	288
5.4.2. Propagacja impulsu w ośrodku w pobliżu rezonansu	292
5.4.3. Eksperymentalna obserwacja „wolnego” i „szybkiego” światła	298

Część II

Impulsy optyczne w światłowodach

5.5. Dyspersja impulsów optycznych w światłowodach	307
5.5.1. Dyspersja chromatyczna – poszerzenie impulsów	307
5.5.2. Charakterystyki transmisyjne światłowodów	312
5.5.3. Propagacja impulsu gaussowskiego	329
5.5.4. Impuls gaussowski i świergot częstotliwości	332
5.6. Równanie falowe propagacji obwiedni impulsu	337
5.6.1. Postać równania falowego	337
5.6.2. Nieliniowe równanie Schrödingera (NLSE)	339
5.6.3. Szczególne rozwiązania równania NLSE – soliton optyczny	341
5.7. Rzut oka na zjawiska nieliniowe w światłowodach	345
5.7.1. Samomodulacja fazy (SPM)	348
5.7.2. Skrośna modulacja fazy (XPM)	349
5.7.3. Mieszanie czterofalowe (FWM)	350
5.7.4. Wymuszone rozpraszanie Ramana (SRS)	351
5.7.5. Wymuszone rozpraszanie Brillouina (SBS)	352
Literatura do rozdziału 5 – część I	353
Literatura do rozdziału 5 – część II	354

6. Fala świetlna jako nośnik energii, masy, pędu i krętu

6.1. Gęstość strumienia energii fali EM	356
6.1.1. Wektor Poyntinga, prędkość przekazu energii, natężenie światła	356
6.1.2. Energia wiązki świetlnej – model fotonowy	358
6.2. Masa promieniowania EM	362
6.3. Pęd i ciśnienie fali elektromagnetycznej	368
6.3.1. Fala EM padająca na powierzchnię absorbera i przewodnika	369
6.3.2. Ciśnienie światła – fotony	373

6.3.3. Pęd fali świetlnej	375
6.3.4. Efekty ciśnienia światła	375
6.4. Moment pędu (kręt) promieniowania EM	402
6.4.1. Polaryzacja fali świetlnej	402
6.4.2. Dwa rodzaje momentu pędu fali EM	412
6.4.3. Spinowy moment pędu	416
6.4.4. Orbitalny moment pędu	418
6.4.5. Składowa spinowa i orbitalna momentu pędu	420
6.5. Wiązki z wirem optycznym	421
6.5.1. Wiązka Laguerre'a-Gaussa jako wiązka z wirem optycznym	421
6.5.2. Generowanie wiązek z wirem optycznym	423
Literatura do rozdziału 6	433
7. Propagacja wiązki światła w wolnej przestrzeni. Formuły dyfrakcyjne	435
7.1. Zespolone rozkłady pola optycznego wiązki	436
7.2. Równanie falowe Helmholtza i przybliżenie skalarne	437
7.3. Fala płaska, sferyczna i cylindryczna	439
7.3.1. Rozwiązanie równania falowego w postaci fali płaskiej	439
7.3.2. Rozwiązanie równania falowego w postaci fali sferycznej	441
7.3.3. Rozwiązanie równania falowego w postaci fali cylindrycznej	442
7.4. Równanie falowe w przybliżeniu przyosiowym	444
7.5. Formuła Rayleigha-Sommerfelda	447
7.5.1. Teoria dyfrakcji Kirchhoffa. Wzór Fresnela-Kirchhoffa	449
7.5.2. Wzór dyfrakcyjny w przybliżeniu Fresnela	455
7.6. Rozwiązanie równania falowego jako superpozycja fal elementarnych	457
Literatura do rozdziału 7	458
8. Transformata Fouriera	
Ogólne rozwiązanie liniowego równania falowego	459
8.1. Transformata Fouriera jako superpozycja funkcji bazowych	460
8.2. Transformata funkcji prostokątnej i funkcji Gaussa	463
8.3. Obliczanie transformaty Fouriera numerycznie z definicji	465
8.4. Dwuwymiarowa transformata Fouriera	469
8.5. Interpretacja fizyczna transformaty Fouriera	470
8.6. Podstawowe właściwości transformaty Fouriera	474
8.7. Transformaty wybranych funkcji dwuwymiarowych	477
8.8. Numeryczne algorytmy obliczania transformaty	482

8.8.1. Dyskretna transformata Fouriera (DFT)	482
8.8.2. Szybka transformata Fouriera (FFT)	487
8.8.3. Obliczanie transformaty FFT w programie Matlab	489
8.9. Rozwiązanie równania falowego z użyciem transformaty Fouriera	492
8.9.1. Rozwiązanie równania Helmholtza dla ośrodka jednorodnego	492
8.9.2. Rozwiązanie równania falowego w przybliżeniu przyosiowym	495
Literatura do rozdziału 8	497
9. Przestrzeń swobodna jako układ liniowy dla sygnałów optycznych dwuwymiarowych	498
9.1. Przestrzeń swobodna jako układ liniowy	499
9.2. Funkcja odpowiedzi impulsowej przestrzeni i zasada Huygensa- Fresnela	501
9.3. Widmo kątowe fal płaskich i optyczna funkcja przenoszenia przestrzeni	504
9.3.1. Częstości przestrzenne fali płaskiej	504
9.3.2. Fale płaskie jednorodne i niejednorodne	507
9.3.3. Funkcja przenoszenia przestrzeni swobodnej	511
9.3.4. Widmo kątowe fal płaskich i transformata Fouriera	514
9.3.5. Znajdowanie rozkładu pola świetlnego za pomocą widma przestrzennego	517
9.3.6. Funkcja przenoszenia i odpowiedź impulsowa dla formuł Rayleigha-Sommerfelda oraz Fresnela	518
Literatura do rozdziału 9	520
10. Rozkłady dyfrakcyjne w strefach Fresnela i Fraunhofera	521
10.1. Wzór dyfrakcyjny Fresnela – pole bliskie i dalekie	525
10.2. Obszar Fresnela (pole bliskie)	528
10.3. Obszar Fraunhofera (pole dalekie)	529
10.4. Rozkład fourierowski w płaszczyźnie ogniskowej soczewki ...	531
10.5. Modelowanie propagacji światła z wykorzystaniem wzoru Fresnela	534
10.6. Obrazy dyfrakcyjne dla szczeliny i rozkładu gaussowskiego 1D	535
10.6.1. Rozkłady dyfrakcyjne w polu dalekim jako transformaty Fouriera	535
10.6.2. Dyfrakcja na szczelinie – geometryczna metoda wskazów	537
10.6.3. Całka dyfrakcyjna Fresnela jako operacja splotu $E_0 \cdot h_d$	541
10.6.4. Całka dyfrakcyjna jako transformata Fouriera z iloczynu $E_0 \cdot P_0$	542

10.6.5. Całka dyfrakcyjna jako odwrotna transformata Fouriera z $FT(E_0) \cdot H$	543
10.7. Dyfrakcja Fresnela na szczelinie i prostej krawędzi – podejście analityczne	545
10.8. Dyfrakcja na aperturach dwuwymiarowych	553
10.8.1. Dyfrakcja na otworze prostokątnym	553
10.8.2. Dyfrakcja na otworze kołowym	557
10.9. Dyfrakcja światła na siatce transmisyjnej	566
10.9.1. Konstrukcja i rodzaje siatek dyfrakcyjnych	567
10.9.2. Dyfrakcja Fraunhofera na siatce transmisyjnej	572
10.9.3. Siatka transmisyjna amplitudowa	575
10.9.4. Siatka fazowa	584
10.9.5. Efektywność dyfrakcyjna siatki	587
10.9.6. Parametry spektralne siatki dyfrakcyjnej	593
10.10. Przesłony komplementarne	596
10.10.1. Zasada Babineteta	596
10.10.2. Przeszkody w postaci szczeliny i paska – dyfrakcja Fresnela i Fraunhofera	598
10.11. Podsumowanie – zestawienie formuł dyfrakcyjnych	605
Literatura do rozdziału 10	611
11. Wiązki gaussowskie	612
11.1. Fala paraboliczna jako rozwiązanie przyosiowego równania falowego	613
11.2. Wiązka gaussowska	614
11.2.1. Właściwości wiązki gaussowskiej	616
11.2.2. Wyznaczanie parametrów wiązki gaussowskiej	625
11.3. Wiązki gaussowskie wyższego rzędu	626
11.3.1. Mody Hermite’a-Gaussa	628
11.3.2. Mody Laguerre’a-Gaussa	633
11.4. Wiązka świetlna powstająca w rezonatorze lasera	638
11.5. Definicje średnicy przekroju wiązki świetlnej	648
11.6. Rzeczywiste wiązki laserowe. Parametr M kwadrat (M^2)	650
Literatura do rozdziału 11	654
12. Transformacja wiązki gaussowskiej w układzie soczewkowym	656
12.1. Równanie soczewki cienkiej dla wiązki gaussowskiej	657
12.2. Ogniskowanie wiązki gaussowskiej	662
12.3. Równanie soczewki dla parametru zespolonego wiązki gaussowskiej	666
12.4. Zasada ABCD dla wiązki gaussowskiej	668

12.5. Kolimowanie wiązki gaussowskiej	671
12.5.1. Układ jednosoczewkowy	671
12.5.2. Układ dwusoczewkowy	674
12.5.3. Układ kolimatora z oczyszczaniem wiązki	680
12.6. Zestawienie najważniejszych wzorów	682
Literatura do rozdziału 12	684
13. Wiązki bezdyfrakcyjne	685
13.1. Rodzaje i właściwości wiązek bezdyfrakcyjnych	686
13.2. Wiązka Bessela	696
13.2.1. Równanie wiązki Bessela	696
13.2.2. Sposoby wytwarzania wiązki Bessela	699
13.2.3. Prędkość fazowa i grupowa wiązki Bessela	704
13.3. Wiązka Airy'ego	706
13.3.1. Funkcja Airy'ego	707
13.3.2. Matematyczna wiązka Airy'ego	710
13.3.3. Tłumiona wiązka Airy'ego	713
13.3.4. Dwuwymiarowa wiązka Airy'ego	716
13.3.5. Wytwarzanie wiązki Airy'ego	717
Literatura do rozdziału 13	719
14. Fala świetlna w kryształach anizotropowych	721
14.1. Kryształy anizotropowe – tensor podatności elektrycznej	722
14.2. Rodzaje kryształów anizotropowych	724
14.3. Propagacja fali płaskiej w kryształach anizotropowych	727
14.3.1. Równania Fresnela	727
14.3.2. Powierzchnia wektorów falowych	733
14.3.3. Powierzchnia falowa	740
14.3.4. Indykatrysa optyczna – elipsoida współczynników załamania	744
14.3.5. Podwójne załamanie światła na powierzchni kryształu anizotropowego	748
14.3.6. Konstrukcje geometryczne określania kierunków wektorów falowych i promieni	754
14.3.7. Numeryczne wyznaczanie parametrów fal o i e przy podwójnym załamaniu	756
Literatura do rozdziału 14	758

DODATEK A	
Podstawowe pojęcia z analizy wektorowej	760
DODATEK B	
Pole promieniowania przyspieszanego ładunku punktowego ...	780
DODATEK C	
Wyprowadzenie relacji Kramersa-Kroniga z twierdzenia Cauchy'ego	786
DODATEK D	
Układy liniowe	790
DODATEK E	
Delta Diraca i uogólnione transformaty Fouriera	799
DODATEK F	
Właściwości przekształcenia Fouriera i wybrane transformaty	808
DODATEK G	
Szeregi trygonometryczne funkcji prostokątnej	810
DODATEK H	
Wyprowadzenie wzoru dla wiązki Hermite'a-Gaussa	815