Detekcja sygnałów optycznych / Antoni Rogalski, Zbigniew Bielecki. – Wydanie II. – Warszawa, Copyright © 2020

Spis treści

Przedmowa **11**

Wykaz ważniejszych oznaczeń **15**

Wykaz ważniejszych skrótów **19**

1. Radiometria **23**
1.1. Wstęp 23
1.2. Wielkości radiometryczne 27
1.3. Luminancja 33
1.4. Promieniowanie ciała doskonale czarnego 37
1.4.1. Prawo Plancka 39
1.4.2. Prawo Stefana-Boltzmanna 43
1.4.3. Prawo przesunięć Wiena 45
1.4.4. Kontrast egzytancji 45
1.5. Emisyjność 47
1.5.1. Prawo Kirchhoffa 48
1.6. Radiometryczne pomiary temperatury 50
1.6.1. Temperatura promieniowania 51
1.6.2. Temperatura egzytancyjna 52
1.6.3. Temperatura barwy 53
1.7. Propagacja promieniowania optycznego 53
1.7.1. Propagacja promieniowania optycznego przez atmosferę 54
1.7.2. Transmisja materiałów optycznych 55
Bibliografia do rozdziału pierwszego 58

2. Kryteria oceny detektorów **59**
2.1. Wprowadzenie 59
2.2. Parametry detektorów 62
2.3. Osiągi detektorów ograniczone szumem fotonowym 67
2.4. Pomiary parametrów detektorów 76
2.4.1. Pomiar czułości 76
2.4.2. Pomiar szumów 81
2.4.3. Pomiar charakterystyki częstotliwościowej mocy równoważnej szumom 86
2.4.4. Pomiar charakterystyk częstotliwościowych 87
2.4.5. Pomiar czasu narastania i opadania odpowiedzi detektora 89
Bibliografia do rozdziału drugiego 90

3. Źródła szumu **92**
3.1. Wprowadzenie 92

3.2. Szumy detektora 96
3.2.1. Szum fotonowy 97
3.2.2. Szum cieplny 100
3.2.3. Szum generacyjno-rekombinacyjny 102
3.2.4. Szum śrutowy 104
3.2.5. Szumy $1/f$ 106
3.2.6. Szum temperaturowy 107
3.2.7. Szum mikrofonowy 108
3.2.8. Szum wybuchowy 109
Bibliografia do rozdziału trzeciego 110

4. Podstawy fizyczne detekcji promieniowania optycznego 112
4.1. Wstęp 112
4.2. Klasyfikacja detektorów 115
4.3. Podstawy fizyczne działania detektorów termicznych 122
4.3.1. Termopary 126
4.3.2. Bolometry 128
4.3.3. Detektory piroelektryczne 131
4.4. Podstawy fizyczne działania detektorów fotonowych 136
4.4.1. Absorpcja promieniowania 137
4.4.2. Sprzężenie promieniowania z detektorem 142
4.4.3. Mechanizmy generacyjno-rekombinacyjne 144
4.5. Fotorezystory 150
4.6. Detektory fotowoltaiczne 155
4.6.1. Fotodiody ze złączem *p-n* 156
4.6.2. Realne fotodiody 160
4.7. Szybkość odpowiedzi 167
4.8. Fotodiody ze złączem Schottky'ego 168
4.9. Detektory fotoemisyjne 174
4.10. Fotodiody *p-i-n* 177
4.11. Fotodiody lawinowe 182
4.12. Detektory barierowe 190
Bibliografia do rozdziału czwartego 196

5. Detektory termiczne 199
5.1. Wstęp 199
5.2. Osiągi detektorów termicznych 200
5.3. Termopary 204
5.3.1. Materiały termoelektryczne 206
5.3.2. Technologia i właściwości termopar 209
5.4. Bolometry 212
5.4.1. Bolometry metalowe 214
5.4.2. Termistory 216
5.4.3. Bolometry niskotemperaturowe 218
5.4.4. Bolometry kompozytowe 220
5.4.5. Mikrobolometry krzemowe 221
5.4.6. Bolometry nadprzewodzące 228
5.5. Detektory piroelektryczne 233

5.5.1. Czułość 233
5.5.2. Szum i wykrywalność 236
5.5.3. Wybór materiału detektora 240
5.5.4. Bolometr dielektryczny 243
4.5.5. Detektory piroelektryczne wielobarwne 246
Bibliografia do rozdziału piątego 249

6. Detektory fotoemisyjne 252
6.1. Wprowadzenie 252
6.2. Konwencjonalne fotokatody 253
6.3. Fotokatody z ujemnym powinowactwem elektronowym 258
6.4. Fotopowielacze 260
6.5. Wzmacniacze obrazu 267
6.6. Fotoemisyjne detektory krzemowe z barierą Schottky'ego 273
Bibliografia do rozdziału szóstego 277

7. Detektory fotonowe 278
7.1. Wprowadzenie 278
7.2. Detektory promieniowania *X* i promieniowania γ 283
7.3. Detektory promieniowania nadfioletowego 293
7.4. Fotodetektory zakresu widzialnego 301
7.5. Fotodiody germanowe 305
7.6. Fotodiody z InGaAs 308
7.7. Fotodiody z antymonków grupy $A^{III}B^{V}$ 311
7.8. Fotorezystory z chalkogenidków ołowiu 317
7.9. Fotodetektory z HgCdTe 320
7.9.1. Fotorezystory 320
7.9.2. Fotodiody 328
7.9.3. Fotodiody lawinowe 333
7.10. Fotorezystory domieszkowe 337
Bibliografia do rozdziału siódmego 343

8. Detektory z supersieci, studni i kropek kwantowych 346
8.1. Wprowadzenie 346
8.2. Fotodiody lawinowe z supersiecią 351
8.3. Detektory na studniach kwantowych AlGaAs/GaAs 353
8.4. Detektory z supersieci $Al^{III}B^{V}$ drugiego rodzaju 360
8.4.1. Podstawowe właściwości fizyczne supersieci drugiego rodzaju 361
8.4.2. Konfiguracje supersieci drugiego rodzaju 366
8.4.3. Fotodiody *p-i-n* 368
8.4.4. Detektory barierowe 371
8.5. Detektory z kropek kwantowych 376
8.6. Fotodetektory kaskadowe 381
Bibliografia do rozdziału ósmego 386

9. Detektory z materiałów dwuwymiarowych 388
9.1. Podstawowe właściwości fizyczne grafenu 388
9.2. Detektory grafenowe 392

9.3. Fotodetektory z alternatywnych materiałów dwuwymiarowych 400
9.4. Podsumowanie 405
Bibliografia do rozdziału dziewiątego 405

10. Detektory terahercowe 407
10.1. Detektory do zobrazowania terahercowego pracujące w temperaturze pokojowej 409
10.1.1. Diody Schottky'ego 412
10.1.2. Detektory z tranzystorów FET i CMOS 414
10.1.3. Mikrobolometry 417
10.2. Bolometry półprzewodnikowe 419
10.3. Nadprzewodzące detektory fotonowe 421
10.4. Nadprzewodzące detektory HEB i TES 422
Bibliografia do rozdziału dziesiątego 426

11. Przedwzmacniacze do detektorów promieniowania optycznego 429
11.1. Wymagania dotyczące parametrów przedwzmacniaczy stosowanych w fotoodbiornikach 429
11.2. Dobór aktywnych elementów wzmacniających 430
11.3. Przedwzmacniacze napięciowe 438
11.4. Przedwzmacniacze transimpedancyjne 443
11.5. Stopnie wejściowe fotoodbiorników z detektorami fotoprzewodzącymi 447
11.6. Stopnie wejściowe fotoodbiorników z fotodiodami 455
11.6.1. Wybrane metody zwiększenia szerokości pasma w stopniach wejściowych fotoodbiorników ze wzmacniaczami transimpedancyjnymi 459
11.6.2. Przedwzmacniacze ładunkowe 463
11.7. Przedwzmacniacze do termopar 466
11.8. Przedwzmacniacze do detektorów piroelektrycznych 469
11.9. Przedwzmacniacze do fotopowielaczy 473
11.10. Fotoodbiomiki monolityczne i hybrydowe 477
11.11. Liczniki fotonów 478
Bibliografia do rozdziału jedenastego 484

12. Modele szumowe stopni wejściowych fotoodbiorników 487
12.1. Wstęp 487
12.2. Szumy w fotoodbiorniku ze wzmacniaczem napięciowym 488
12.3. Szumy w fotoodbiorniku ze wzmacniaczem transimpedancyjnym 490
12.4. Szumy stopnia wejściowego fotoodbiornika z przedwzmacniaczem ładunkowym 495
12.5. Odbiorniki z fotodiodami *p-n* i *p-i-n* 496
12.5.1. Stosunek sygnału do szumu. Ograniczenia kwantowe i termiczne 497
12.5.2. Wpływ rezystancji obciążenia na stosunek sygnału do szumu 499
12.5.3. Wpływ pojemności równoległych na stosunek sygnału do szumu 500
12.6. Odbiorniki z fotodiodami lawinowymi 501

Bibliografia do rozdziału dwunastego 507

13. Matryce detektorów 509
13.1. Wstęp 509
13.2. Mozaiki liniowe 512
13.3. Układy z opóźnieniem czasowym 513
13.4. Mozaiki detektorów z obróbką sygnału w płaszczyźnie obrazowej 515
13.4.1. Matryce monolityczne 516
13.4.2. Matryce hybrydowe 518
13.5. Podstawowe parametry matryc detektorów 521
13.5.1. Natężenie napromienienia równoważne szumom (TMEI) 521
13.5.2. Różnica temperatury równoważna szumom (NETD) 522
13.5.3. Minimalna rozróżnialna różnica temperatury (MRTD) 524
13.5.4. Funkcja przenoszenia modulacji (MTF) 525
13.5.5. Inne parametry 529
13.6. Przetworniki obrazu CCD 531
13.6.1. Wprowadzenie 531
13.6.2. Mechanizm działania CCD 531
13.6.3. Rodzaje przyrządów CCD 536
13.6.4. Techniki odczytu sygnału stosowane w matrycach CCD 541
13.6.5. Architektura układów odczytu 546
13.7. Przetworniki obrazu CMOS 555
13.7.1. Wiadomości wstępne 555
13.7.2. Rodzaje pikseli 558
13.7.3. Układy odczytu sygnału w przetwornikach CMOS 563
13.7.4. Architektura układów odczytu przetworników CMOS 574
Bibliografia do rozdziału trzynastego 578

14. Wybrane zagadnienia matryc detektorów 581
14.1. Zintegrowany zestaw detektora 582
14.2. Przetworniki CCD i CMOS 587
14.2.1. Przetworniki CCD 588
14.2.2. Przetworniki CMOS 594
14.3. Osiągi matryc detektorów podczerwieni 598
14.4. Matryce bolometryczne 607
14.5. Fotonowe matryce detektorów podczerwieni 615
14.5.1. Matryce detektorów z InGaAs 616
14.5.2. Matryce detektorów z InSb 621
14.5.3. Matryce detektorów barierowych z InAsSb 624
14.5.4. Matryce detektorów z HgCdTe 625
14.5.5. Matryce QWIP 631
14.5.6. Matryce detektorów z supersieci II typu 633
14.5.7. Matryce detektorów z półprzewodników domieszkowanych 636
Bibliografia do rozdziału czternastego 638

15. Zaawansowane metody detekcji sygnałów optycznych 642
15.1. Detekcja wolnozmiennych sygnałów optycznych poprzez całkowanie sygnału 642

15.2. Wzmacniacze selektywne 646
15.3. Detekcja fazoczuła 649
15.4. Układy detekcji z synchronicznym całkowaniem sygnału 664
15.5. Detekcja koherentna 677
15.5.1. Detekcja heterodynowa 680
15.5.2. Detekcja homodynowa 686
15.5.3. Wymagania i trudności odbioru koherentnego 689
Bibliografia do rozdziału piętnastego 691

O autorach 693

Skorowidz 695

oprac. BPK