

# 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-Boltzmann 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
  - 5.5.5. 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 g 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 AIIIBV 311

7.8. Fotorezystory z chalcogenidków 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 AIIIBV 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. Fotoodbiorniki 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 (NEI)                      | 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