

Spis treści

Przedmowa	10
Spis oznaczeń	12
1. Podstawowe pojęcia	14
1.1. Wielkości fizyczne	14
1.1.1. Intensywność promieniowania	15
1.1.2. Luminancja energetyczna	16
1.1.3. Powierzchnia lambertowska	17
1.1.4. Egzytancja energetyczna	19
1.1.5. Natężenie napromieniowania	21
1.2. Ciało doskonale czarne i ciała rzeczywiste	23
1.2.1. Prawo Kirchhoffa	24
1.3. Prawa promieniowania	25
1.3.1. Prawo przesunięć Wiena	26
1.3.2. Aproksymacje Wiena i Rayleigha-Jeansa	27
1.3.3. Prawo Stefana-Boltzmann	29
1.4. Promieniowanie w zakresie <i>MWIR</i> i <i>LWIR</i>	29
2. Podstawy fizyczne termografii	33
2.1. Kwantowa teoria promieniowania	33
2.1.1. Zjawiska powierzchniowe i objętościowe	33
2.1.2. Wybrane elementy fizyki statystycznej	33
2.1.2.1. Dyskretne poziomy energetyczne	33
2.1.2.2. Zasada zachowania masy i energii	34
2.1.2.3. Najbardziej prawdopodobny rozkład	34
2.1.2.4. Formuła Stirlinga	35
2.1.2.5. Rozkład Boltzmann	36
2.1.3. Rozkład Boltzmann zależny od temperatury	38
2.1.4. Gęstość stanów energetycznych	40

2.1.5.	Równanie Plancka	43
2.1.6.	Prawo Plancka jako funkcja długości fali	43
2.1.7.	Strumień fotonów przenikających powierzchnię	44
2.1.8.	Prawo Lamberta	46
2.1.9.	Egzystancja energetyczna monochromatyczna	49
2.1.10.	Podejście Einsteina	49
2.2.	Wnioski wynikające z prawa Plancka	51
2.2.1.	Prawo przesunięć Wiena	51
2.2.2.	Prawo Wiena	53
2.2.3.	Prawo Rayleigha-Jeansa	53
2.2.4.	Prawo Stefana-Boltzmanna	53
2.2.4.1.	Wyznaczenie wartości funkcji ζ	54
2.2.4.2.	Sumowanie ciągu	55
2.3.	Prawo Stefana-Boltzmanna w ujęciu termodynamicznym	58
2.3.1.	Pierwsza zasada termodynamiki w układzie $T - V$	58
2.3.2.	Druga zasada termodynamiki w układzie $T - V$	59
2.3.3.	Gaz doskonały w ujęciu termodynamiki	61
2.3.4.	Gaz fotonowy w ujęciu termodynamiki	63
2.4.	Przewodzenie ciepła i konwekcja	65
2.4.1.	Uwagi ogólne	65
2.4.2.	Przewodnictwo cieplne	65
2.4.3.	Konwekcja	67
2.5.	Radiacyjna wymiana ciepła pomiędzy ciałami doskonale czarnymi	68
2.5.1.	Wprowadzenie	68
2.5.2.	Radiacyjna wymiana ciepła między dwiema równoległymi płaszczyznami	69
2.5.3.	Linearyzowana radiacyjna wymiana ciepła	70
2.5.4.	Eksperymentalne potwierdzenie prawa Lamberta	71
2.5.5.	Radiacyjna wymiana ciepła między nieskończenie małymi ciałami	74
2.5.6.	Radiacyjna wymiana ciepła pomiędzy powierzchniami izotermicznymi	75
2.5.7.	Radiacyjna wymiana ciepła w zamkniętej przestrzeni	76
2.5.8.	Brzegowe równania całkowite	79
2.5.9.	Linearyzowana radiacyjna wymiana ciepła	80
3.	Właściwości promienne ciał	81
3.1.	Objętościowa teoria promieniowania	81
3.1.1.	Wprowadzenie	81

3.1.2.	Podstawowe równania	82
3.1.3.	Rozwiązanie dla stanu ustalonego	84
3.1.4.	Linearyzacja problemu	86
3.1.5.	Emisyjność ciała półnieskończonego	87
3.1.6.	Współczynnik odbicia ciała półnieskończonego	89
3.1.7.	Emisyjność cienkiej warstwy	91
3.2.	Wymiana ciepła między powierzchniami szarymi	94
3.2.1.	Radiacyjny przepływ ciepła z powierzchni szarej	95
3.2.2.	Radiacyjna wymiana ciepła w zamkniętej przestrzeni szarej	96
3.2.3.	Całkowe równanie brzegowe	97
3.3.	Radiacyjna wymiana ciepła w termowizji	98
3.3.1.	Wstęp	98
3.3.2.	Analiza geometrii stożkowej	98
3.3.3.	Bolometr sferyczny	101
3.3.4.	Interpretacja fizyczna	102
3.4.	Falowa teoria emisyjności	103
3.4.1.	Wstęp	103
3.4.2.	Równania Maxwella	103
3.4.3.	Rozwiązanie równań Maxwella	104
3.4.4.	Fala elektromagnetyczna w idealnym dielektryku	107
3.4.5.	Emisyjność normalna dielektryka	108
3.4.6.	Emisyjność kątowa dielektryka	111
3.4.7.	Emisyjność ciał pochłaniających promieniowanie	115
3.4.8.	Wpływ przewodności elektrycznej na emisyjności metali	120
3.4.9.	Wpływ przewodności elektrycznej na emisyjności metali	124
3.4.10.	Emisyjność całkowita	126
3.5.	Emisyjność cienkich warstw	128
4.	Właściwości transmisyjne atmosfery	131
4.1.	Pochłanianie promieniowania w atmosferze	131
4.2.	Wpływ wilgotności, temperatury i odległości na transmisję atmosfery w podczerwieni	133
4.3.	Pochłanianie promieniowania przez gazy	142
4.4.	Pochłanianie molekularne	144
4.5.	Widmowy współczynnik transmisji atmosfery	150
5.	Detektory podczerwieni	152
5.1.	Parametry detektorów	153

5.2.	Podstawy działania detektora termicznego	155
5.2.1.	Radiacyjna wymiana ciepła w detektorze termicznym	155
5.2.2.	Analiza czasowa	160
5.3.	Wykrywalność detektora termicznego	164
5.3.1.	Definicja temperatury	164
5.3.2.	Rozkład Maxwella	165
5.3.3.	Energia średnia	165
5.3.4.	Rozkład prawdopodobieństwa energii	167
5.3.5.	Wartość średnia energii	168
5.3.6.	Wariancja energii	169
5.3.7.	Temperatura jako zmienna losowa	170
5.3.8.	Pojemność cieplna detektora	171
5.3.9.	Fluktuacje temperatury	172
5.3.10.	Moc równoważna szumowi	173
5.3.11.	Chłodzenie detektora termicznego	176
5.3.12.	Wykrywalność maksymalna detektora termicznego	177
5.4.	Rodzaje detektorów termicznych	178
5.4.1.	Detektory bolometryczne	178
5.4.2.	Detektory piroelektryczne	179
5.4.3.	Termopary radiacyjne	179
5.5.	Podstawy działania detektora fotonowego	180
5.5.1.	Działanie detektora fotonowego	181
5.5.2.	Konstrukcja detektora fotonowego	184
5.6.	Czułość detektora fotonowego	185
5.6.1.	Liczba fotonów $N(\lambda_G)$	185
5.6.2.	Całkowita liczba fotonów $N(\infty)$	186
5.6.3.	Przybliżenie $N(\lambda_G)$ dla średnich długości fali	188
5.6.4.	Przybliżenie $N(\lambda_G)$ dla dużych długości fali	189
5.6.5.	Dokładne wyznaczenie $N(\lambda_G)$	190
5.6.6.	Wydajność kwantowa	191
5.6.7.	Moc równoważna szumowi	191
5.6.8.	Wykrywalność	194
5.6.9.	Wykrywalność znormalizowana dla średnich długości fali	194
5.6.10.	Przybliżenie wykrywalności znormalizowanej dla dużych wartości długości fali	195
5.6.11.	Wykrywalność znormalizowana dla wszystkich długości fali	196
5.6.12.	Detektor fotowoltaiczny	197
5.7.	Detektory <i>QWIP</i>	199
5.8.	Detektor fotonowy <i>SPRITE</i>	206

6. Kamery termowizyjne	208
6.1. Wprowadzenie	208
6.2. Rozdzielczość termiczna	208
6.3. Korekcja niejednorodności matrycy detektorów	212
6.4. Przestrzenna rozdzielczość kamery	217
6.5. Minimalna rozróżnialna różnica temperatury	218
6.6. Kalibracja kamery termowizyjnej	221
6.7. Konstrukcja i działanie kamery termowizyjnej	226
6.7.1. Obiektyw kamery termowizyjnej	227
6.7.2. Układy całkujące	230
6.7.3. Układ zasilania detektora podczerwieni	237
6.7.4. Układy przetwarzania analogowego i sterowania detektora podczerwieni	238
6.8. Układy korekcji NUC i transmisji obrazu	240
6.8.1. Układ transmisji obrazu	243
6.9. Kamera <i>VOx384IR</i> i jej parametry	244
7. Systemy chłodzenia detektorów podczerwieni	247
7.1. Chłodzenie termoelektryczne	247
7.1.1. Podstawy fizyczne działania elementów termoelektrycznych	247
7.1.2. Analiza działania ogniwa Peltiera	251
7.2. Chłodzenie w cyklu Joula-Thomsona	258
7.3. Chłodzenie w cyklu Stirlinga	262
8. Pomiary termowizyjne	271
8.1. Pomiar temperatury za pomocą kamery termowizyjnej	271
8.2. Techniczne pomiary emisyjności	273
8.2.1. Metoda kalorymetryczna	274
8.2.2. Metoda odbiciowa	275
8.2.3. Metoda z ciałem referencyjnym	276
8.3. Pomiary emisyjności spektralnej materiałów	277
8.4. Pomiary emisyjności spektralnej cienkich powłok	280
8.5. Pirometria wielopasmowa	282
8.6. Błąd pomiaru temperatury	286
8.7. Niepewności radiometrycznego pomiaru temperatury	290

9. Analiza termogramów medycznych	293
9.1. Histogram obrazu termowizyjnego	293
9.2. Cechy obrazu termowizyjnego	295
9.2.1. Parametry statystyczne 1. rzędu	295
9.2.2. Parametry statystyczne 2. rzędu	297
9.2.3. Selekcja cech	302
9.3. Przekształcenie falkowe termogramów	302
9.4. Klasyfikacja obrazów termowizyjnych	305
9.5. Zastosowanie termowizji w badaniach przesiewowych	307
10. Termowizja w budownictwie	309
10.1. Przepływ ciepła przez przegrody budowlane	309
10.2. Współczynnik przenikania U przez przegrody budowlane	317
10.3. Rezystancja termiczna przegrody budowlanej	318
10.4. Mostki termiczne	321
10.5. Wyznaczanie współczynnika przenikania ciepła	324
10.6. Przekształcenia rzutowe termogramów	326
11. Termowizja w badaniach nieniszczących	329
11.1. Wprowadzenie	329
11.2. Podstawy fizyczne termowizji synchronicznej	331
11.3. Wymuszenie konwekcyjne	335
11.4. Częstotliwość pobudzenia termicznego	338
11.5. Analiza częstotliwościowa	343
11.6. Termografia impulsowa	345
11.6.1. Efektywna droga dyfuzji termicznej	348
11.7. Identyfikacja parametrów cienkich warstw	349
11.8. Rzeczywisty impuls wymuszenia	354
11.9. Modelowanie numeryczne	355
11.10. Przekształcenie falkowe w badaniach nieniszczących	357
11.10.1. Wyznaczanie kształtu i grubości materiałów	362
11.11. Termografia akustyczna	366
Spis literatury	368