

Przedmowa 13

Wykaz oznaczeń 20

Wykaz skrótów 22

1. Energia Słońca 25

1.1. Charakterystyka Słońca 25

1.2. Promieniowanie emitowane z powierzchni Słońca 26

1.3. Zależności opisujące energię Słońca 29

1.3.1. Relacje między kątami opisującymi położenie odbiornika energii względem Słońca 29

1.3.2. Składowe promieniowania słonecznego 30

1.3.3. Modele wyznaczania gęstości strumienia promieniowania słonecznego 35

1.4. Wyznaczanie optymalnego kąta pochylenia odbiornika promieniowania słonecznego ze względu na maksimum energii 38

1.4.1. Dyskusja optymalizacji orientacji przestrzennej odbiornika energii słonecznej ze względu na maksymalny zysk energetyczny 38

1.4.2. Optymalizacja ustawienia odbiornika na podstawie symulacji komputerowej 45

1.4.3. Warunki i wyniki pomiarów gęstości mocy promieniowania 50

1.4.4. Podsumowanie 54

1.5. Metody konwersji energii słonecznej 56

1.6. Zalety i wady energetyki słonecznej 56

Literatura do rozdziału 1 57

2. Ciepła energetyka słoneczna 60

2.1. Metody konwersji energii słonecznej w energię cieplną 60

2.2. Kolektory 60

2.2.1. Ogólna charakterystyka 60

2.2.2. Kolektory cieczowe 61

2.2.2.1. Kolektory płaskie i rurowe 61

2.2.2.2. Kolektory cieczowe skupiające 64

2.2.3. Kolektory powietrzne i próżniowe 65

2.3. Słoneczne instalacje cieplne na świecie 66

2.3.1. Elektrownie cieplne 66

2.3.2. Światowi potentaci 67

2.3.3. Przykłady aplikacji kolektorów cieplnych 69

2.4. Ciepła energetyka słoneczna w Polsce 72

2.4.1. Rozkład całkowitego promieniowania słonecznego 72

2.4.2. Możliwości wykorzystania energii słonecznej do celów termicznych 75

2.4.3. Przykłady aplikacji 78

Literatura do rozdziału 2 80

3. Konwersja energii słonecznej w elektryczną 82

3.1. Zjawisko fotowoltaiczne wewnętrzne 82

3.1.1. Mechanizm zjawiska 82

3.1.2. Powstawanie bariery potencjału 84

3.2. Kalendarium wydarzeń w rozwoju konwersji fotowoltaicznej 87

3.2.1. Antoine Cesar Becquerel i jego odkrycie 87

3.2.2. Badania zjawiska fotowoltaicznego w XIX wieku 88

3.2.3. Teoria Alberta Einsteina 89

- 3.2.4. Jan Czochralski i jego metoda 90
- 3.2.5. Dalszy rozwój fotowoltaiki 95
- 3.2.6. Witold Żdanowicz – pionier fotowoltaiki w Polsce 97
- 3.2.7. Najnowsze osiągnięcia 99

Literatura do rozdziału 3 101

4. Rozwiązania materiałowe, konstrukcyjne i eksploatacyjne ogniw fotowoltaicznych 103

- 4.1. Podział materiałowy i strukturalny ogniw fotowoltaicznych 103
- 4.2. Ogniwa krzemowe 104
 - 4.2.1. Ogólna charakterystyka krzemu 104
 - 4.2.2. Ogniwa mono- i polikrystaliczne 106
 - 4.2.3. Ogniwa z krzemu amorficznego 108
 - 4.2.4. Cienkowarstwowe ogniwa krystaliczne 111
 - 4.2.5. Nowe rozwiązania 112
 - 4.2.5.1. Ogniwa PERL i RP-PERC 112
 - 4.2.5.2. Ogniwo monokrystaliczno-amorficzne HIT 114
 - 4.2.5.3. Rozwiązania cienkowarstwowe sliver 115
 - 4.2.5.4. Ogniwa krzemowe Sphelar±R 117
 - 4.2.6. Właściwości ogniw fotowoltaicznych wykonanych z krzemu w różnych technologiach 118
- 4.3. Ogniwa z tellurku kadmu 118
 - 4.3.1. Ogólna charakterystyka tellurku kadmu 118
 - 4.3.2. Rozwiązania krystaliczne i cienkowarstwowe 121
- 4.4. Ogniwa z arsenku galu 123
 - 4.4.1. Ogólna charakterystyka arsenku galu 123
 - 4.4.2. Struktury krystaliczne i cienkowarstwowe 124
- 4.5. Ogniwa z diselenku indowo-miedziowego (CIS) i ich modyfikacje (CIGS) 127
- 4.6. Moduły o mocy 200 Wp 130
- 4.7. Ogniwa fotowoltaiczne typu tandem 131
- 4.8. Ogniwa fotowoltaiczne z nanorurkami 132
- 4.9. Ogniwa organiczne 133
 - 4.9.1. Ogólna charakterystyka ogniw 133
 - 4.9.2. Wybrane rozwiązania planarne i struktury 3D 134
 - 4.9.3. Ogniwo barwnikowe Grätzela 135
 - 4.9.4. Nowe rozwiązania 136
- 4.10. Ogniwo fotowoltaiczno-fototermiczne o konwersji kombinowanej 137
- 4.11. Ogniwo termofotowoltaiczne o konwersji promieniowania podczerwonego 138
- 4.12. Ogniwa zintegrowane z architekturą 139
 - 4.12.1. Charakterystyka ogniw fotowoltaicznych stosowanych w budownictwie 139
 - 4.12.2. Systemy dachowe 141
 - 4.12.3. Moduły fasadowe i transparentne okienne 144
 - 4.12.4. Nowe rozwiązania BIPV i znani producenci 145
- 4.13. Ogniwa współpracujące z koncentratorami 148
 - 4.13.1. Koncentratory w układzie nadążnym 148
 - 4.13.2. Nowe rozwiązania 151

Literatura do rozdziału 4 152

5. Wybrane właściwości ogniw fotowoltaicznych 156

5.1. Absorpcyjność	156
5.2. Refleksyjność	161
5.3. Strumień fotonów w funkcji wybranych parametrów ogniwa	162
5.4. Gęstość fotoprądu emitera i bazy	164
5.5. Wydajność kwantowa	165
5.5.1. Wydajność zewnętrzna i wewnętrzna	165
5.5.2. Wpływ prędkości rekombinacji na wydajność kwantową	166
5.5.3. Wpływ średniej drogi dyfuzji na wydajność kwantową	168
5.6. Czynniki spektralne	169
5.7. Badania ogniw fotowoltaicznych w warunkach promieniowania o różnych długościach fali w zakresie światła widzialnego	170
5.7.1. Warunki i obiekty badań	170
5.7.2. Wyniki badań	172
5.7.3. Podsumowanie	172
<i>Literatura do rozdziału 5</i>	176

6. Schemat zastępczy, parametry i charakterystyki ogniwa fotowoltaicznego

6.1. Schemat zastępczy ogniwa i jego parametry	178
6.2. Charakterystyki prądowo-napięciowe ogniwa fotowoltaicznego	180
6.2.1. Wyznaczanie zależności prądowo-napięciowych w funkcji parametrów ogniwa	180
6.2.2. Symulacja charakterystyk wybranych ogniw w funkcji nasłonecznienia i temperatury	182
6.2.3. Parametry charakterystyczne ogniw	182
6.3. Charakterystyka mocy i sprawność ogniwa fotowoltaicznego	188
6.3.1. Wpływ nasłonecznienia i temperatury na moc	188
6.3.2. Wpływ nasłonecznienia i temperatury na sprawność	190
6.3.3. Optymalizacja pracy w wyniku kształtowania obciążenia ogniwa	191
6.4. Współpraca baterii słonecznej z silnikiem prądu stałego zasilającym wentylator	193
6.4.1. Schemat ideowy badanego układu	193
6.4.2. Model matematyczny	194
6.4.3. Przykładowe wyniki symulacji	197
6.5. Praca ogniw fotowoltaicznych w różnych konfiguracjach połączeń	200
6.6. Wpływ zacienienia na pracę modułu fotowoltaicznego	203

Literatura do rozdziału 6 203

7. Technologia produkcji

7.1. Ogniwa krzemowe	206
7.1.1. Krzem do produkcji ogniw słonecznych	206
7.1.2. Wytwarzanie bloków krzemu monokrystalicznego	210
7.1.2.1. Rodzaje technologii	210
7.1.2.2. Metoda Czochralskiego	210
7.1.2.3. Metoda topienia strefowego	213
7.1.3. Otrzymywanie bloków krzemu polikrystalicznego	214
7.1.3.1. Rodzaje technologii	214
7.1.3.2. Metoda Bridgmana	215
7.1.3.3. Metoda odlewania bloku	215
7.1.4. Cięcie bloków krzemowych na płytki	216
7.1.5. Dalsza obróbka płytek krzemowych	217

- 7.1.6. Łączenie ogniw w moduły 220
- 7.1.7. Wytwarzanie taśm krzemowych 222
 - 7.1.7.1. Przegląd metod wyciągania taśm krzemowych 222
 - 7.1.7.2. Wytwarzanie taśmy typu WEB 223
 - 7.1.7.3. Metoda krawędziowego doprowadzania materiału 224
 - 7.1.7.4. Metoda ribbon to ribbon 225
 - 7.1.7.5. Metoda SOC 226
 - 7.1.7.6. Proces ESR 226
 - 7.1.7.7. Metoda RGS 227
- 7.1.8. Inne technologie dla ogniw krzemowych 228
 - 7.1.8.1. Uwodorniony krzem amorficzny 228
 - 7.1.8.2. Elastyczny układ krzemowy 228
 - 7.1.8.3. Technologia ogniw sliver 229
 - 7.1.8.4. Technologia ogniw Sphelar±R 230
- 7.2. Ogniw cienkowarstwowe wykonane w technologii innej niż krzemowa 230
 - 7.2.1 CdS/CdTe i CIGS 230
 - 7.2.2. Ogniw cienkowarstwowe GaAs 234
 - 7.2.3. Technologia samoczyszczenia ogniw słonecznych 236
- Literatura do rozdziału 7* 236

8. Instalacje fotowoltaiczne 240

- 8.1. Konfiguracje systemów fotowoltaicznych 240
- 8.2. Elementy instalacji fotowoltaicznej 243
 - 8.2.1. Wprowadzenie 243
 - 8.2.2. Moduły fotowoltaiczne 245
 - 8.2.3. Trackery 252
 - 8.2.4. Akumulatory 253
 - 8.2.5. Regulatory ładowania 254
 - 8.2.6. Falowniki 257
 - 8.2.7. Systemy monitorujące 262
 - 8.2.8. Zabezpieczenia systemów fotowoltaicznych 263
 - 8.2.9. Konstrukcja nośna i kable 264
- 8.3. Zestaw hybrydowy 268
- 8.4. Specyfikacja zapotrzebowania na energię. Sprawność i koszty 269
- 8.5. Montaż, obsługa i konserwacja instalacji fotowoltaicznej 270

Literatura do rozdziału 8 272

9. Obszary i przykłady zastosowań ogniw fotowoltaicznych 274

- 9.1. Dotychczasowe tempo rozwoju instalacji fotowoltaicznych i perspektywy 274
- 9.2. Ogniw słoneczne w urządzeniach powszechnego użytku małej mocy 277
- 9.3. Systemy autonomiczne 278
 - 9.3.1. Przegląd możliwości aplikacji 278
 - 9.3.2. Zasilanie oświetlenia 279
 - 9.3.3. Biletomaty i parkomaty 280
 - 9.3.4. Latarnie morskie 282
 - 9.3.5. Systemy ostrzegania i sygnalizacji 285
- 9.4. Układy współpracujące z siecią 286

9.4.1. Systemy rozproszone BIPV 286

9.4.2. Systemy scentralizowane 290

9.5. Systemy hybrydowe 294

9.6. Zastosowania w kosmonautyce 298

Literatura do rozdziału 9 299

10. Zastosowanie energii Słońca i podczerwieni do zasilania w środkach transportu 301

10.1. Samochody słoneczne 301

10.1.1. Metody zasilania 301

10.1.2. Historyczne prototypy 302

10.1.3. Samochody wyścigowe i ich parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne 303

10.2. Najważniejsze aspekty projektowania pojazdu słonecznego 310

10.2.1. Strategia projektowania i optymalizacja ruchu 310

10.2.2. Moc potrzebna do pokonania oporów jazdy 313

10.2.3. Moc pozyskiwana na drodze konwersji fotowoltaicznej 314

10.2.4. Moc uzupełniająca z akumulatora 316

10.2.5. Materiały i elementy konstrukcyjne stosowane w samochodach słonecznych 319

10.3. Charakterystyki ruchu samochodu słonecznego w funkcji jego parametrów i warunków zewnętrznych 322

10.3.1. Wpływ parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych samochodu słonecznego na jego charakterystyki ruchu 322

10.3.2. Optymalizacja doboru prędkości w samochodzie słonecznym z doładowaniem akumulatora podczas jazdy ze względu na maksymalny zasięg 325

10.3.3. Bilans mocy pojazdu elektrycznego zasilanego energią Słońca 329

10.3.4. Wnioski i uwagi do przeprowadzonych symulacji komputerowych 336

10.3.5. Samochód słoneczny „Hannibal” 338

10.4. Samochody konwencjonalne zasilane energią Słońca 339

10.4.1. Samochody elektryczne 339

10.4.1.1. „Solar Bug” 339

10.4.1.2. Jeep elektryczny 339

10.4.2. Rozwiązania hybrydowe 340

10.4.2.1. Samochodowe panele PV 340

10.4.2.2. Connector 2001 341

10.4.2.3. Peugeot BB1 Concept 342

10.4.2.4. Fisker Karma 342

10.4.2.5. Inne rozwiązania 343

10.4.2.6. Solar Energy Station 344

10.5. Inne środki transportu zasilane energią słoneczną 345

10.5.1. Pociąg słoneczny 345

10.5.2. Samoloty zasilane energią słoneczną 345

10.5.2.1. Prace NASA 345

10.5.2.2. Solar Challenger 345

10.5.2.3. Helios 345

10.5.2.4. Solar Impulse 347

10.5.2.5. Polski samolot słoneczny „Phoenix” 347

10.5.3. Jednostki pływające zasilane energią słoneczną 348

- 10.5.3.1. Katamaran „Sun” 348
- 10.5.3.2. Tramwaj wodny „Słonecznik” 348
- 10.5.3.3. Katamaran pasażerski „Solar” 350
- 10.5.3.4. Łodzie solarne Fiten Solar Team 352
- 10.5.3.5. Etapy projektowania łodzi zasilanych energią słoneczną 353

Literatura do rozdziału 10 354

11. Zagadnienia prawne, społeczne, ekonomiczne, normalizacja, edukacja i promocja, recykling 357

- 11.1. Zagadnienia prawne i społeczne 357
- 11.2. Koszt systemu PV 359
- 11.3. Koszty zewnętrzne 365
- 11.4. Normalizacja 365
- 11.5. Konwersja fotowoltaiczna w promocji i edukacji 369
- 11.6. Recykling modułów fotowoltaicznych 374
 - 11.6.1. Problemy recyklingu, koszty, technologie 374
 - 11.6.2. Linie pilotażowe odzysku i ponownego wykorzystania modułów krzemowych 376
 - 11.6.3. Metoda odzysku i ponownego wykorzystania modułów z CdTe 379

Literatura do rozdziału 11 380

12. Fotowoltaika w Polsce 382

- 12.1. Możliwości sektora fotowoltaiki 382
- 12.2. Prace naukowo-badawcze 384
 - 12.2.1. Laboratorium Fotowoltaiczne Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Kozach 384
 - 12.2.2. Prace Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych 390
 - 12.2.3. Laboratorium Energetyki Odnawialnej w Sulechowie 391
- 12.3. Największe inwestycje fotowoltaiczne w Polsce 391
 - 12.3.1. Wprowadzenie 391
 - 12.3.2. Instalacja PV Warszawa-Wawer 392
 - 12.3.3. Instalacja fotowoltaiczna na Wojewódzkim Specjalistycznym Szpitalu im. dr. Władysława Biegańskiego w Łodzi 393
 - 12.3.4. Instalacja fotowoltaiczna na wytwórni mrożonek Frosta w Bydgoszczy 393
 - 12.3.5. Instalacja PV na Politechnice Warszawskiej 395
 - 12.3.6. Instalacja PV na budynku ambasady japońskiej w Warszawie 396
 - 12.3.7. Instalacja fotowoltaiczna w Polkowicach 397
 - 12.3.8. Instalacja fotowoltaiczna w Rybniku 397
 - 12.3.9. Instalacja fotowoltaiczna w Rzeszowie 397
 - 12.3.10. Elektrownia słoneczna w Wierchosławicach 398
 - 12.3.11. Projekt elektrowni fotowoltaicznej w Gryżlinach pod Olsztynem 398
 - 12.3.12. Projekt elektrowni fotowoltaicznej na budynku hotelowym Centrum Badawczego Polskiej Akademii Nauk w Jabłonie 398
 - 12.3.13. Największa fotowoltaiczna instalacja dachowa w Polsce 399
 - 12.3.14. Elektrownia fotowoltaiczna na dachu motelu „Na Wierzyńka” w Wieliczce 399
 - 12.3.15. Panele fotowoltaiczne na hotelu „Ramka” w Poznaniu 400
 - 12.3.16. Skrzydło fotowoltaiczne – projekt z Piły 400
- 12.4. Producenci krzemu i jego stopów 400
 - 12.4.1. Warszawskie Centrum Naukowo-Produkcyjne Materiałów Elektronicznych Cemat Silicon 400
 - 12.4.2. Firma European Silicon w Katowicach 401

12.5. Producenci modułów 401

12.5.1. EKOpower21 Sp. z o.o. z Warszawy 401

12.5.2. Linia produkcyjna modułów Solar Energy w Bożepolu Wielkim 401

12.5.3. Spółka Vetro Polska 402

12.5.4. SELFA Photovoltaics ze Szczecina 402

Literatura do rozdziału 12 402

Skorowidz rzeczowy 404

Indeks nazwisk 411