

JERZY PLUCIŃSKI

OPTYKA  
NIEUPORZĄDKOWANYCH  
OŚRODKÓW  
SILNIE ROZPRASZAJĄCYCH

POLITECHNIKA GDAŃSKA

*monografie*

102

POLITECHNIKA GDAŃSKA

JERZY PLUCIŃSKI

OPTYKA  
NIEUPORZĄDKOWANYCH  
OŚRODKÓW  
SILNIE ROZPRASZAJĄCYCH



GDAŃSK 2010

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Romuald Szymkiewicz*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

*Janusz T. Cieśliński*

REDAKTOR SERII

*Jerzy Mazur*

RECENZENCI

*Anna Cysewska-Sobusiak*

*Tomasz Woliński*

PROJEKT OKŁADKI

*Jolanta Cieślawska*

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Gdańskiej

Pełna oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna na stronach:

[www.pg.gda.pl/wydawnictwoPG](http://www.pg.gda.pl/wydawnictwoPG), [www.naukowa24.pl](http://www.naukowa24.pl)

Wydawnictwa PG można nabywać w Księgarni PWN

Gmach Główny PG, I piętro, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk,

tel. 58 347 11 25, e-mail: [ksiegarnia.gdansk2@pwn.com.pl](mailto:ksiegarnia.gdansk2@pwn.com.pl)

oraz za pośrednictwem strony internetowej PWN [www.naukowa24.pl](http://www.naukowa24.pl)

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej  
Gdańsk 2010

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978–83–7348–300–9

# SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW .....	5
1. WPROWADZENIE DO PRZEDMIOTU ROZPRAWY .....	7
1.1. Wstęp .....	7
1.2. Cel i zakres rozprawy .....	8
2. ZAGADNIENIA PODSTAWOWE .....	10
2.1. Ogólny opis promieniowania optycznego .....	10
2.1.1. Wprowadzenie .....	10
2.1.2. Równania Maxwella, równania materiałowe, równania falowe .....	11
2.1.3. Opis stanu polaryzacji promieniowania optycznego i właściwości polaryzacyjnych ośrodków .....	20
2.2. Mechanizmy rozpraszania promieniowania optycznego w ośrodkach silnie rozpraszających .....	27
2.2.1. Wprowadzenie .....	27
2.2.2. Centra rozpraszania, absorpcji i ekstynkcji .....	30
2.2.3. Wpływ wymiarów niejednorodności i współczynnika załamania światła na rozpraszanie promieniowania optycznego .....	34
2.3. Propagacja promieniowania optycznego w ośrodkach silnie rozpraszających .....	45
3. METODY ANALIZY PROPAGACJI PROMIENIOWANIA OPTYCZNEGO W OŚRODKACH SILNIE ROZPRASZAJĄCYCH .....	50
3.1. Wprowadzenie .....	50
3.2. Metody strumieniowe .....	51
3.3. Metoda dyfuzji .....	56
3.4. Metody Monte Carlo .....	71
3.4.1. Klasyczna metoda Monte Carlo .....	71
3.4.2. Zmodyfikowane metody Monte Carlo .....	84
3.4.3. Szybka metoda bąbelkowa Monte Carlo .....	90
3.5. Podsumowanie .....	102
4. NIEKOHERENTNE METODY POMIAROWE OŚRODKÓW SILNIE ROZPRASZAJĄCYCH WYKORZYSTUJĄCE ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA O NATĘŻENIU CIĄGŁYM .....	104
4.1. Wprowadzenie .....	104
4.2. Metody wyznaczania parametrów optycznych ośrodków silnie rozpraszających oparte na pomiarze transmisji promieniowania optycznego o stałym natężeniu .....	105
4.2.1. Metody bezpośrednie .....	105
4.2.2. Metody pośrednie .....	107
4.3. Wykorzystanie promieniowania o stałym natężeniu do pomiaru obiektów niejednorodnych .....	109
4.3.1. Optyczna tomografia dyfuzyjna .....	109
4.3.2. Nietomograficzne techniki pomiarowe obiektów niejednorodnych z wykorzystaniem promieniowania rozproszonego dyfuzyjnie .....	110
4.4. Podsumowanie .....	123
5. NIEKOHERENTNE METODY POMIAROWE OŚRODKÓW SILNIE ROZPRASZAJĄCYCH WYKORZYSTUJĄCE ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA IMPULSOWEGO LUB O ZMODULOWANYM NATĘŻENIU .....	125
5.1. Wprowadzenie .....	125

5.2. Niekoherentne metody pomiaru ośrodków silnie rozpraszających oparte na pomiarze czasu przelotu .....	126
5.2.1. Systemy mierzące czas przelotu fotonów przez ośrodki silnie rozpraszające i przykłady pomiarów .....	126
5.2.2. Wyznaczanie parametrów optycznych ośrodków silnie rozpraszających na podstawie zmierzonego rozkładu czasu przelotu fotonów .....	136
5.2.3. Systemy pracujące w dziedzinie częstotliwości .....	140
5.3. Wykorzystanie promieniowania impulsowego lub o zmodulowanym natężeniu do pomiaru obiektów niejednorodnych .....	142
5.4. Podsumowanie .....	144
<b>6. KOHERENTNE METODY POMIAROWE OŚRODKÓW SILNIE ROZPRASZAJĄCYCH ....</b>	<b>145</b>
6.1. Wprowadzenie .....	145
6.2. Analiza interferometrii niskokoherentnej w dziedzinie czasu .....	146
6.3. Analiza interferometrii niskokoherentnej w dziedzinie częstotliwości .....	150
6.4. Optyczna reflektometria niskokoherentna .....	157
6.4.1. Wprowadzenie .....	157
6.4.2. Przetwarzanie sygnału wyjściowego w dziedzinie czasu .....	160
6.4.3. Przetwarzanie sygnału wyjściowego w dziedzinie częstotliwości .....	161
6.4.4. Charakterystyka amplitudowo-fazowa badanego ośrodka a zdolność rozdzielcza interferometrii niskokoherentnej .....	167
6.5. Optyczna tomografia koherentna .....	168
6.5.1. Skanowanie i detekcja w optycznej tomografii koherentnej .....	168
6.5.2. Dobór poprzecznego rozkładu pola wiązki skanującej .....	170
6.5.3. Dynamiczne ogniskowanie .....	171
6.5.4. Systemy OCT do pomiaru właściwości polaryzacyjnych ośrodków silnie rozpraszających .....	173
6.6. Przykłady zastosowań koherentnych metod pomiarowych w badaniach ośrodków silnie rozpraszających .....	181
6.6.1. Przykład zaawansowanego systemu OCT do badań ośrodków silnie rozpraszających .....	181
6.6.2. Przykłady zastosowań koherentnych metod pomiarowych w badaniach ośrodków silnie rozpraszających .....	186
6.7. Podsumowanie .....	192
<b>7. UWAGI KOŃCOWE .....</b>	<b>194</b>
Podziękowania .....	197
Bibliografia .....	199
Streszczenie w języku polskim .....	222
Streszczenie w języku angielskim .....	223

# WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

## Oznaczenia

$a_{\text{alb}}$	– albedo
$c$	– prędkość promieniowania optycznego w ośrodku (fazowa)
$c_0$	– prędkość światła w próżni
$c_g$	– prędkość grupowa rozchodzenia się promieniowania optycznego
$D$	– współczynnik dyfuzji (wyrażany w m)
$\mathcal{E}(\mathbf{r}, t)$	– wektor natężenia pola elektrycznego
$\mathcal{E}_i (i = x, y, z)$	– współrzędne pola $\mathcal{E}$
$E_i (i = x, y, z)$	– amplitudy zespolone pola $\mathcal{E}$
$\mathbf{F}(\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_1)$	– macierz rozpraszania (dla wektora Jonesa) z kierunku $\mathbf{s}_1$ do kierunku $\mathbf{s}_2$
$F(\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_1)$	– funkcja rozpraszania z kierunku $\mathbf{s}_1$ do kierunku $\mathbf{s}_2$
$\mathbf{F}_d(\mathbf{r}, t)$	– gęstość strumienia promieniowania
$\mathbf{F}_S(\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_1)$	– macierz rozpraszania (dla wektora Stokesa) z kierunku $\mathbf{s}_1$ do kierunku $\mathbf{s}_2$
$g$	– współczynnik anizotropii rozpraszania
$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t)$	– funkcja Greena
$I$	– natężenie promieniowania optycznego
$\mathbf{i}_x, \mathbf{i}_y, \mathbf{i}_z$	– wersory o kierunku $x, y, z$
$\mathbf{J}$	– wektor Jonesa
$\mathbf{J}_d(\mathbf{r})$	– gęstość strumienia mocy promieniowania dyfuzyjnego
$k$	– liczba falowa
$\mathbf{k}$	– wektor falowy
$K_{\text{KM}}$	– współczynnikiem absorpcji Kubelka-Munka
$L(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t)$	– luminancja energetyczna wiązki propagującej w kierunku $\mathbf{s}$
$L_d(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t)$	– luminancja energetyczna wiązki rozproszonej propagującej w kierunku $\mathbf{s}$
$L_c$	– droga koherencji
$\mathbf{M}$	– macierz Muellera
$n$	– fazowy współczynnik załamania
$n_g$	– grupowy współczynnik załamania
$p(\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_1)$	– fazowa funkcja rozpraszania z kierunku $\mathbf{s}_1$ do kierunku $\mathbf{s}_2$
$Q_s, Q_a, Q_e$	– odpowiednio wydajności rozpraszania, absorpcji i ekstynkcji
$R$	– współczynnik odbicia
$\mathbf{r}$	– położenie
$\mathbf{R}[\dots]$	– macierz obrotu
$R_d$	– współczynnik odbicia promieniowania rozproszonego dyfuzyjnie
$\mathbf{S}$	– wektor Stokesa
$S(\nu), S_{11}(\nu), S_{22}(\nu)$	– gęstość widmowa mocy
$S_{\text{KM}}$	– współczynnikiem wstecznego rozpraszania Kubelka-Munka
$\mathbf{s}_1$	– kierunek promieniowania padającego
$\mathbf{s}_2$	– kierunek promieniowania rozproszonego
$S_{12}(\nu)$	– wzajemna gęstość widmowa mocy
$S_{12}(\nu)$	– spektralny stopień koherencji wzajemnej
$t$	– czas
$\mathbf{T}$	– macierz Jonesa
$T_d$	– współczynnik transmisji promieniowania rozproszonego dyfuzyjnie
$U$	– amplituda zespolona funkcji falowej $V$
$U(t)$	– sygnał analityczny
$\mathcal{U}(\mathbf{r}, t)$	– wektorowa funkcja falowa
$U_d(\mathbf{r}, t)$	– średni strumień promieniowania optycznego

$U_i$ ( $i = x, y, z$ )	– amplitudy zespolone pola $\mathcal{U}$
$\mathcal{V}$	– widzialność prążków interferencyjnych
$V(\mathbf{r}, t)$	– zespolona funkcja falowa
$w$	– liczba wagowa
$x, y, z$	– współrzędne położenia
$\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$	– kierunki
$z_0$	– odwrotność zredukowanego współczynnika rozpraszania
$z_R$	– zakres Rayleigha
$\gamma(\tau)$	– zespolony stopień koherencji własnej
$\gamma_{12}(\tau)$	– zespolony stopień koherencji wzajemnej
$\Gamma(\tau)$	– funkcja koherencji własnej
$\Gamma_{12}(\tau)$	– funkcja koherencji wzajemnej
$\varepsilon_s(\mathbf{r}, t)$	– funkcja źródła promieniowania dyfuzyjnego
$\varepsilon_s(\mathbf{r}, \mathbf{s}, t)$	– funkcja źródła
$\theta$	– kąt obrotu
$\lambda$	– długość fali
$\lambda_0$	– długość fali w próżni
$\mu_a, \mu_s, \mu_e$	– odpowiednio współczynnik absorpcji, rozpraszania i ekstynkcji
$\mu_s'$	– zredukowany współczynnik rozpraszania
$\nu$	– częstotliwość
$\nu_c$	– szerokość widmowa promieniowania optycznego
$\nu_c'$	– średniokwadratowa szerokość widmowa promieniowania optycznego
$\rho$	– odległość od osi $z$ w cylindrycznym układzie odniesienia
$\rho_s, \rho_a, \rho_e$	– odpowiednio gęstość centrów rozpraszających, absorbujących i ekstynkcji
$\sigma_d(\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_1)$	– różniczkowy przekrój czynny na rozpraszanie z kierunku $\mathbf{s}_1$ do kierunku $\mathbf{s}_2$
$\sigma_g(\mathbf{s}_1)$	– geometryczny przekrój czynny dla kierunku $\mathbf{s}_1$
$\sigma_s, \sigma_a, \sigma_e$	– odpowiednio przekroje czynne na rozpraszanie, absorpcję i ekstynkcję
$\tau$	– względne opóźnienie interferujących wiązek promieniowania optycznego
$\tau_c$	– czas koherencji
$\tau_c'$	– średniokwadratowy czas koherencji
$\Phi(\mathbf{r}, t)$	– całkowity strumień promieniowania optycznego
$\omega$	– pulsacja
$\Omega$	– pełny kąt bryłowy
$\Omega_S$	– powierzchnia graniczna ośrodka
$\nabla$	– operator Nabla

### *Skróty*

CMCM	– klasyczna metoda Monte Carlo
DOP	– stopień polaryzacji
FBMCM	– szybka bąbelkowa metoda Monte Carlo
MPL	– średnia długość drogi
MTT	– średni czas przelotu
OCT	– optyczna tomografia koherentna
OLCR	– optyczna reflektometria niskokoherentna
SNR	– stosunek sygnału do szumu