

Dr inż. ROMUALD JÓŹWICKI

# OPTYKA INSTRUMENTALNA

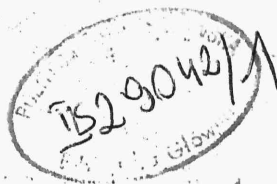


WYDAWNICTWA NAUKOWO-TECHNICZNE  
WARSZAWA

Opiniodawca  
*doc. dr Miron Gaj*  
Redaktor naukowy WNT  
*mgr inż. Ludwik Appel*  
Redaktor techniczny *Franciszek Bondaruk*  
Okładkę i obwolutę projektował *Jan Gruszczyński*

535.8: 681.4

W książce omówiono najważniejsze zjawiska optyczne oraz ich praktyczne wykorzystanie w konstrukcji przyrządów optycznych. Szczegółowo opisano zależność między optyką falową a geometryczną, zjawiska optyki geometrycznej i fizycznej, zasadę działania podstawowych przyrządów optycznych, ocenę i pomiary jakości odwzorowania oraz niektóre zagadnienia związane z konstrukcją układów optycznych. Książka przeznaczona jest dla magistrów i inżynierów o specjalności „przyrządy optyczne”, fizyków oraz studentów szkół wyższych o tych specjalnościach.



Copyright © 1970  
by Wydawnictwa Naukowo-Techniczne

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

*Printed in Poland*

WNT Warszawa 1970. Wydanie 1. Nakład 2210 egz. Ark. wyd. 36,5. Ark. druk. 27,0 (35,91/A). Format B5. Papier powlekany V kl. 80 g. Oddano do składania 5. III. 1970 r. Podpisano do druku w listopadzie 1970 r. Druk ukończono w listopadzie 1970 r. Symbol 77776/To. Cena zł. 66.—

Pozn. Zakł. Graf. im. M. K. Poznań Zam. 2389/70 — B-2/895

BŁĘDY DOSTRZEŻONE W DRUKU

Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
76	22 od góry	$i_1 = -i_2$	$i'_1 = -i_2$
76	12 od dołu	$s_1^0$	$\bar{s}_1^0$
76	9 od dołu	wersor $s_1^0$ . Podobnie przez $s_2^0$ i $s_3^0$	wersor $\bar{s}_1^0$ . Podobnie przez $s_2^0$ i $s_3^0$
76	4 od dołu	$= n \frac{0}{2} \times \bar{N}_1^0$	$= n s_2^0 \times N_1^0$
80	16 od dołu	$D'_1$	$D_1$
92	1 od dołu	$= \delta l_x^2 + \delta l_y^2$	$= \delta l_x'^2 + \delta l_y'^2$
128	15 od góry	$i_\lambda$	$i_\lambda$
210	1 od góry	$\Delta' = -\frac{u'^2 z}{2} = -\frac{\varrho'^2 z}{2r_0^2}$	$\Delta' = -\frac{u'^2 z}{2} = \frac{\varrho'^2 z}{2r_0^2}$
299	1 od dołu	$s_1^0$	$\bar{s}_1^0$
299	3 od dołu	$s$	$\bar{s}^0$
314	15 od dołu	$= -\frac{nf_m^2}{x'_{1g}}$	$= -\frac{nf_m'^2}{x'_{1g}}$
387	1 od dołu	$P'_l(x'_\nu) = N'_\nu$	$P'_l(x'_\nu) = N_\nu$

## PRZEDMOWA

Szybki rozwój optyki w ostatnim okresie stworzył nowe możliwości praktycznych zastosowań różnych zjawisk i w związku z tym spowodował rozszerzenie zainteresowań techników o nowe dziedziny, które do niedawna można było uważać za domenę fizyki. Problem koherencji promieniowania, rozchodzenia się światła w ośrodkach anizotropowych, filtrowanie częstości przestrzennych i związana z tym analiza harmoniczna, są obecnie elementami, które stały się niezbędne do zrozumienia różnych zjawisk w optyce, praktycznie wykorzystywanych w technice. Stąd niniejsza książka, której treść oparta na wykładach z optyki dla specjalistów z budowy przyrządów optycznych na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej, stawia sobie za cel wprowadzenie czytelnika we współczesną problematykę optyki stosowanej ze szczególnym uwzględnieniem tych działów, które są słabo reprezentowane w literaturze polskiej. Przewodnią myślą nie jest podanie gotowych recept na rozwiązywanie konkretnych zagadnień, ale wyjaśnienie podstawowych zjawisk w optyce i przedstawienie ich technicznego wykorzystania w konstrukcji przyrządów optycznych. Przytoczenie schematów postępowania umożliwiłoby szybsze poznanie znanych rozwiązań lecz nie dawałoby gwarancji uwzględnienia wszystkich możliwych powiązań i istotnych problemów spotykanych w praktyce.

Znaczna część przytoczonych tu rozważań z uwagi na prostotę i wystarczającą ich poprawność w tym zakresie opiera się na optyce geometrycznej, lecz konieczność często równoczesnego posługiwania się aparatem pojęć i narzędzi matematycznych optyki falowej stworzyły potrzebę uwypuklenia wzajemnego ich powiązania (rozdz. 1). Powodem zamieszczenia na końcu książki uzupełnienia dotyczącego przekształcenia Fouriera jest brak podręcznika z tej dziedziny przystosowanego do rozważanych tu zagadnień i przystępnego dla absolwentów wydziałów mechanicznych Politechniki.

Symbole wielkości fizycznych i jednostek oparte są na międzynarodowym układzie SI, przy czym wyjątkiem jest tu teoria pola elektromagnetycznego, o czym mowa jest w rozdz. 1.

Dość poważny kłopot sprawiało podjęcie decyzji o oznaczeniach osi współrzędnych w przestrzeni przedmiotowej i obrazowej układu. Literatura naukowa dotycząca przekształcenia Fouriera i rozważająca jego wykorzystanie w teorii powstawania obrazu niemal całkowicie opiera się na zmiennych  $x$  i  $y$ , natomiast norma PN-62/N-02303 zaleca stosowanie w płaszczyźnie przedmiotu, czy obrazu współrzędnych  $y$  i  $z$ . Przyjęta

została tu pierwsza koncepcja, gdyż ostatnie założenie zmuszałoby czytelnika przy korelacji literatury do ciągłej transformacji współrzędnych. Wyjątkiem są przyjęte tu oznaczenia we wzorze Newtona ( $x$  i  $x'$  dla wielkości wzdłuż osi optycznej mierzonych od ognisk) z uwagi na tradycję w optyce geometrycznej i brak jednoczesnego występowania tych oznaczeń w książce.

Dużą trudność poza tym przedstawiały nazwy i określenia różnych pojęć, takich jak światło, fotometria, radiometria i inne, ponieważ zachodzą dość poważne rozbieżności między przyjętymi definicjami w literaturze polskiej i zagranicznej. Brak miejsca nie pozwala na omówienie tych problemów. Niewątpliwie decyzje jakie zostały tu podjęte nie zawsze są słuszne i autor będzie wdzięczny za wszelkie uwagi, w tym również dotyczące zagadnień merytorycznych.

Autor tą drogą chciałby podziękować profesorom J. Matysiakowi i A. Sidorowiczowi oraz swoim kolegom, magistrów inżynierom A. Szewdowskiemu i A. Wojtaszewskiemu za wszystkie uwagi i pomoc w czasie opracowywania niniejszej książki, a także pani H. Multan i panu S. Zglińskiemu za włożony wysiłek w przygotowanie maszynopisu i ilustracji.

Wdzięczny jestem również recenzentowi doc. dr M. Gajowi, którego uwagi pozwoliły mi usunąć wiele błędów i nieścisłych sformułowań.

R. JOŹWICKI

Grudzień 1969

## ZESTAWIENIE NAJCZĘŚCIEJ SPOTYKANYCH OZNACZEŃ <sup>1)</sup>, SYMBOLI I FUNKCJI

Oznaczenie	Nazwa	Jednostki <sup>2)</sup>	Rozdział
$A$	— odległość między ogniskami astygmatycznymi mierzona wzdłuż osi optycznej — miara astygmatyzmu	m	2, 6, 7
$A_0$	— apertura obiektywu	bezw.	2, 3, 5
$b_r, b_r'$	— graniczna odległość dwóch punktów i ich obrazów	m	3, 5
$\bar{B}$	— indukcja magnetyczna	—	1, 3
$c$	— prędkość światła w próżni	m/s	
$C$	— kontrast	bezw.	3, 4
$d$	— odległość, grubość	m	
$d(\tilde{x}, \tilde{y})$	— optyczna funkcja przenoszenia układu w świetle niekoherentnym dla częstości $\tilde{x}, \tilde{y}$	bezw.	3, 6, 7
$d_n(\tilde{x}, \tilde{y}) = \frac{d(\tilde{x}, \tilde{y})}{d(0,0)}$	— znormowana funkcja przenoszenia w świetle niekoherentnym	bezw.	3, 6, 7
$d(\tilde{x}) = d(\tilde{x}, 0)$	— optyczna funkcja przenoszenia układu w oświetleniu niekoherentnym dla rozkładów intensywności o jednym kierunku zmian	bezw.	3, 6, 7
$D$	— moc układu optycznego	1/m	2, 4, 6
$D$	— odległość przedmiotu od źrenicy wejściowej oka przy obserwacji okiem nieuzbrojonym	m	5
$D_n(P')$	— znormowana intensywność w punkcie $P'$ przestrzeni obrazowej dana przez przedmiot punktowy i układ aberracyjny w stosunku do maksymalnej intensywności w obrazie punktu dla układu bezaberracyjnego	bezw.	3, 6
$\bar{D}$	— indukcja elektryczna	—	1, 3

<sup>1)</sup> Oznaczenia zestawione są w porządku alfabetycznym; w pierwszej kolejności oznaczenia łacińskie, w drugiej — greckie.

<sup>2)</sup> Pominęto jednostki wielkości (w miejsce jednostki wstawiono —), które mają znaczenie pomocnicze przy rozważaniach prowadzonych w niniejszej książce. Powodem tego ponadto jest wprowadzenie niektórych wielkości w sposób intuicyjny. Ustalenie jednostek tych wielkości wymagałoby ścisłego sformułowania dodatkowych warunków, co z kolei niepotrzebnie z punktu widzenia prowadzonych tu rozważań skomplikowałoby treść książki.

$D(x', y')$ lub $D(w'_x, w'_y)$	— znormowany rozkład intensywności w obrazie punktu przez $D(0,0) = 1$	bezw.	3
$\bar{E}$	— natężenie pola elektrycznego	—	1, 3
$E_e$	— natężenie napromienienia	$W/m^2$	2
$E_{e,\lambda}$	— gęstość monochromatyczna natężenia napromienienia	$W/m^3$	2
$E$	— natężenie oświetlenia	lx	2, 5
$f, f'$	— ogniskowe: przedmiotowa i obrazowa	m	
$F, F'$	— ogniska: przedmiotowe i obrazowe		
$G$	— powiększenie wizualne	bezw.	
$h, h_z$	— wysokość padania promienia aperturowego i polowego na powierzchnię	m	2, 6
$H, H'$	— punkty główne: przedmiotowy i obrazowy		
$H(x, y), H'(x', y')$	— rozkłady amplitud i faz w płaszczyźnie przedmiotu i obrazu	—	3
$\bar{H}$	— natężenie pola magnetycznego	—	1,3
$i$	— kąt padania, odbicia lub załamania	rd	
$\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$	— wersory osi $x, y, z$		
$i = \sqrt{-1}$	— jednostkowa liczba urojona		
$I$	— intensywność	—	3
$I$	— światłość	cd	2, 5
$I_e$	— natężenie promieniowania	$W/sr$	2
$I_{e,\lambda}$	— gęstość monochromatyczna natężenia promieniowania	$W/sr \cdot m$	2
$k = \frac{2\pi}{\lambda}; k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$	— cykliczna liczba falowa	rd/m	1, 3, 6
$k$	— współczynnik długości rozwińnięcia pryzmatu	bezw.	6
$K_p$	— odległość południkowego ogniska astygmatycznego od płaszczyzny <i>Gaussa</i> — miara południkowej krzywizny pola	m	2, 6
$K_r$	— odległość równoleżnikowego ogniska astygmatycznego od płaszczyzny <i>Gaussa</i> — miara równoleżnikowej krzywizny pola	m	2, 6
$K = \frac{K_r + K_p}{2}$	— odległość najmniejszej plamki rozproszenia wiązki astygmatycznej od płaszczyzny <i>Gaussa</i> — miara średniej krzywizny pola	m	2, 6
$l, l'$	— długość, wysokość przedmiotu i obrazu	m	
$L$	— droga optyczna	m	1, 3
$L$	— odległość obrazu danego przez przyrząd od źrenicy wejściowej oka	m	5.1, 5.2, 5.1, 5.2, 5.3
$L$	— luminancja	nt	2, 4, 5.4
$L, L'$	— luka wejściowa i wyjściowa		
$L_e$	— luminancja energetyczna	$W/sr \cdot m^2$	
$L_{e,\lambda}$	— gęstość monochromatyczna luminancji energetycznej	$W/sr \cdot m^3$	2
$m$	— rząd interferencji	bezw.	3
$M$	— emitancja świetlna	$lm/m^2$	2
$M_e$	— emitancja promienista	$W/m^2$	2

$M_{e,\lambda}$	— gęstość monochromatyczna emitancji promienistej	W/m <sup>2</sup>	2
$n$	— współczynnik załamania	bezw.	
$n_0$	— współczynnik załamania zwyczajny	bezw.	3
$n_e$	— współczynnik załamania nadzwyczajny	bezw.	3
$p(\tilde{x}, \tilde{y}); p'(\tilde{x}, \tilde{y})$	— gęstość amplitudy harmonicznych: w płaszczyźnie przedmiotu i obrazu	—	3, 7
$P(x, y); P'(x', y')$	— rozkłady intensywności w płaszczyźnie przedmiotu i obrazu	—	3
$P'_l(x', y')$	— rozkład intensywności w obrazie linii	—	3, 6
$r$	— promień sfery	m	
$\bar{r}$	— promień wektor	m	1
$R$	— refrakcja oka	1/m	4, 5
$R$	— zdolność rozdzielcza spektroskopu	bezw.	3
$s$	— długość łuku	m	1
$s, s'$	— odległość przecięcia się promienia świetlnego przestrzeni przyosiowej (przedmiotowej i obrazowej) od płaszczyzny głównej (przedmiotowej i obrazowej)	m	
$s_{Li}; s'_{Li}$	— odległość obrazu łuki wejściowej od soczewki cienkiej i w jej przestrzeni przedmiotowej i obrazowej	m	6
$s_{zi}; s'_{zi}$	— odległości obrazu źrenicy wejściowej od soczewki cienkiej i w jej przestrzeni przedmiotowej i obrazowej	m	5, 6
$\bar{s}^0$	— wersor kierunku promienia świetlnego		
$S$	— powierzchnia	m <sup>2</sup>	2, 7, 3
$t$	— czas	s	
$t(\tilde{x}, \tilde{y})$	— funkcja przenoszenia układu w oświetleniu koherentnym dla częstości $\tilde{x}, \tilde{y}$	bezw.	3
$t(\tilde{x}) = t(\tilde{x}, 0)$	— funkcja przenoszenia układu w oświetleniu koherentnym dla rozkładów amplitud i faz o jednym kierunku zmian	bezw.	3
$T$	— okres	s	
$T(x', y')$ lub $T(w'_x, w'_y)$	— rozkład amplitud i faz w obrazie punktu	—	3
$u, u'$	— kąty aperturowe w przestrzeni przedmiotowej i obrazowej	rd	
$v$	— prędkość fazowa fali w dowolnym ośrodku	m/s	
$\bar{V}$	— wektor optyczny	—	1, 3
$V_\lambda$	— względna skuteczność świetlna promieniowania monochromatycznego	bezw.	2, 4
$V(\xi', \eta')$ lub $V(u'_\xi, u'_\eta)$	— rozkład amplitud i faz w źrenicy wyjściowej układu — funkcja źrenicy	—	3
$w$	— gęstość energii	J/m <sup>2</sup>	1, 3
$w, w'$	— kąty polowe w przestrzeni przedmiotowej i obrazowej	rd	
$w_p, w'_p$	— kąty pola widzenia w przestrzeni przedmiotowej i obrazowej	rd	



$w_r, w'_r$ — graniczny kąt zdolności rozdzielczej w przestrzeni przedmiotowej i obrazowej	rd	3,5
$x, y, z$ — współrzędne	m	
$x, x'$ — odległość przedmiotu i obrazu od ogniska przedmiotowego i obrazowego	m	
$\tilde{x} = \frac{1}{X_0}, \tilde{y}$ — częstość przestrzenna	1/m	3, 7, 8
$\tilde{x}_g$ — graniczna częstość przestrzenna	1/m	3,7
$X_0$ — okres przestrzenny	m	3,8
$x, y, x', y'$ — współrzędne płaszczyzny przedmiotu i obrazu	m	
$z$ — przemieszczenie płaszczyzny obrazu poza płaszczyznę Gaussa	m	3,6
$Z, Z'$ — źrenica wejściowa i wyjściowa		
$Z = k \varrho'_0, w' = k u'_0 l'$ — znormowana współrzędna płaszczyzny obrazu	bezw.	3
$\alpha$ — powiększenie podłużne	bezw.	2,6
$\beta$ — powiększenie poprzeczne	bezw.	
$\gamma$ — powiększenie kątowe	bezw.	
$\gamma_{12}(\tau)$ — zespolony stopień koherencji	bezw.	3
$\Gamma_{12}(\tau)$ — funkcja wzajemnej koherencji	—	3
$\Delta a$ — przyrost wielkości $a$	jednostka $a$	
$\Delta, \Delta'$ — aberracja falowa	m	3, 6, 7
$\Delta$ — odległość między ogniskiem obrazowym układu poprzedzającego i ogniskiem przedmiotowym układu następnego	m	2,5
$\delta$ — faza początkowa, różnica fazowa	rd	1,3
$\delta$ — kąt odchylenia	rd	2
$\delta l'$ — aberracyjny przyrost wielkości $l'$	m	2, 6, 7
$\delta_{\sin}$ — odstępstwo układu od warunku sinusów	bezw.	6
$\delta s'$ — podłużna aberracja sferyczna	m	2, 6, 7
$\varepsilon$ — stała dielektryczna	bezw.	1,3
$\xi, \eta$ — współrzędne płaszczyzny źrenicy wejściowej	m	3
$\xi', \eta'$ — współrzędne płaszczyzny źrenicy wyjściowej	m	3
$\Theta$ — współrzędna biegunowa — kąt azymutalny	rd	
$\lambda$ — długość fali	m	
$\lambda_0$ — długość fali w próżni	m	
$\mu$ — stała magnetyczna	bezw.	1,3
$\nu$ — częstość	1/s	
$\nu_{\lambda_0}$ — współczynnik dyspersji	bezw.	2,6
$\varrho$ — współczynnik odbicia	bezw.	2,7, 3,4, 5
$\varrho$ — współrzędna biegunowa — promień	m	2,6, 3,3, 6
$\varrho_N$ — znormowana współrzędna biegunowa przez $\varrho_{Nmax} = 1$	bezw.	3,3, 6
$\sigma$ — przewodność elektryczna	—	1,3
$\tau$ — współczynnik przepuszczania	bezw.	
$\Phi$ — strumień świetlny	lm	2,5
$\Phi_z, \Phi_{z'}$ — średnice źrenicy wejściowej i wyjściowej	m	
$\Phi_{ui}$ — średnica i-tej soczewki cienkiej	m	6
$\Phi_e$ — strumień energetyczny	W	2

$\Phi_{e,\lambda}$	— gęstość monochromatyczna strumienia energetycznego	W/m	2
$\omega$	— częstotliwość kołowa	rd/s	1,3
$\omega$	— kąt bryłowy	sr	2,5

### Symbole

$R(z)$  — część rzeczywista liczby zespolonej  $z$ .

$[AB] = \int_A^B n ds$  — droga optyczna między punktami  $A$  i  $B$

$\langle a \rangle = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} a dt$  — wartość średnia  $a$  w czasie  $\Delta t$

$\langle\langle a \rangle\rangle = \frac{1}{S} \iint_S a ds$  — wartość średnia  $a$  na powierzchni  $S$

$\vec{a} \times \vec{b}$  — iloczyn wektorowy wektorów  $\vec{a}$  i  $\vec{b}$

$\vec{a} \cdot \vec{b}$  — iloczyn skalarny wektorów  $\vec{a}$  i  $\vec{b}$

$G(x) \otimes H(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x) H(x'-x) dx$  — splot funkcji  $G$  i  $H$

$g(\tilde{x}) = F[G(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} G(x) \exp(-2\pi i \tilde{x}x) dx$  — przekształcenie *Fouriera* funkcji  $G$

$G(x) = F^*[g(\tilde{x})] = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tilde{x}) \exp(2\pi i \tilde{x}x) d\tilde{x}$  — odwrotne przekształcenie *Fouriera* funkcji  $g$

### Funkcje

$$\text{sinc } x = \frac{\sin x}{x}$$

$$H(N, x) = \left( \frac{\sin Nx}{\sin x} \right)^2$$

$J_1(z)$  — funkcja *Bessela* rzędu pierwszego

$$\exp(ix) = e^{ix}$$