

Politechnika Warszawska

W Y D Z I A Ł F I Z Y K I



Praca dyplomowa inżynierska

na kierunku Fotonika

Generowanie soczewek dyfrakcyjnych z aberracjami
przy użyciu wielomianów Zernikego.

Patryk Kowalski

Numer albumu 270628

promotor

dr inż. Agnieszka Siemion

WARSZAWA 2018

Streszczenie

Tytuł pracy: Generowanie soczewek dyfrakcyjnych z aberracjami przy użyciu wielomianów Zernikego.

Struktury dyfrakcyjne obecnie coraz częściej znajdują zastosowanie w przemyśle. Sprawdzają się w dziedzinach, w których kluczowe są rozmiary elementu obrazującego, oraz w których wykonanie soczewki refrakcyjnej jest kłopotliwe, np. ze względu na niską dostępność materiałów załamujących, jak chociażby w przypadku promieniowania rentgenowskiego.

Aberracje optyczne skutecznie ograniczają użyteczność elementów obrazujących zarówno refrakcyjnych, jak dyfrakcyjnych.

W tej pracy przedstawiam sposób generacji soczewek dyfrakcyjnych o żądanych parametrach i obarczonych aberracjami zdefiniowanymi za pomocą wielomianów Zernikego. Opisuję stworzone przeze mnie oprogramowanie automatyzujące proces generacji struktur dyfrakcyjnych.

W celu weryfikacji eksperymentalnej działania opracowanego programu porównuję symulacje funkcji rozmycia punktu (ang. Point Spread Function, PSF) wygenerowanych struktur z uzyskanym fizycznie rozkładem światła. Rzeczywistą funkcję rozmycia uzyskuję badając rozkład światła w płaszczyźnie ogniskowej, wyświetlając struktury na przestrzennym modulatorze światła (ang. Spatial Light Modulator, SLM). Wybrane soczewki dyfrakcyjne zostały również zbadane poprzez zarejestrowanie rozkładu natężenia światła zogniskowanego przez strukturę naświetloną na kłosy holograficznej.

Dodatkowo przeprowadzono obrazowanie w świetle białym i monochromatycznym z udziałem wybranych soczewek o różnych wartościach danej aberracji, aby zilustrować różnice w obrazie powstającym wzdłuż osi optycznej i pod kątem do niej.

Słowa kluczowe:

aberracje, wielomiany Zernikego, struktury dyfrakcyjne, funkcja rozmycia punktu, kinoform

(podpis opiekuna naukowego)

(podpis dyplomanta)

Abstract

Title of the thesis: Generation of diffractive lenses with aberrations using Zernike polynomials

Nowadays diffractive optical elements are finding increasingly more applications in industry. Diffractive imaging is preferred in fields where element's size is crucial, and where materials suitable for producing refractive lenses are less available.

Optical aberrations effectively decrease the usefulness of imaging instruments both diffractive and refractive.

This thesis describes the technique of generating diffractive lenses with desired parameters and aberrations described by Zernike polynomials. In order to make designing diffractive optical elements as easy as possible, a program automating the process has been created.

In order to verify the program's results I compare generated structures' simulated point spread function with physically obtained distribution of light intensity in the lens's focal plane. In order to form a real light beam using generated structures I display them on a spectral light modulator. Selected lenses were also recorded on a holographic film.

Keywords:

aberrations, Zernike polynomials, diffractive structures, point spread function, kinoform

Oświadczenie o samodzielności wykonania pracy



Politechnika Warszawska

Patryk Kowalski

270628

Fotonika

Oświadczenie

Świadomy/-a odpowiedzialności karnej za składanie fałszywych zeznań oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie, pod opieką kierującego pracą dyplomową.

Jednocześnie oświadczam, że:

- niniejsza praca dyplomowa nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym,
- niniejsza praca dyplomowa nie zawiera danych i informacji, które uzyskałem/-am w sposób niedozwolony,
- niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadawaniem dyplomów lub tytułów zawodowych,
- wszystkie informacje umieszczone w niniejszej pracy, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami,
- znam regulacje prawne Politechniki Warszawskiej w sprawie zarządzania prawami autorskimi i prawami pokrewnymi, prawami własności przemysłowej oraz zasadami komercjalizacji.

Oświadczam, że treść pracy dyplomowej w wersji drukowanej, treść pracy dyplomowej zawartej na nośniku elektronicznym (płycie kompaktowej) oraz treść pracy dyplomowej w module APD systemu USOS są identyczne.

Warszawa, dnia 27 stycznia 2018

(czytelny podpis dyplomanta)

Oświadczenie o udzieleniu Uczelni licencji do pracy



Politechnika Warszawska

Patryk Kowalski

270628

Fotonika

Oświadczam, że zachowując moje prawa autorskie udzielam Politechnice Warszawskiej nieograniczonej w czasie, nieodpłatnej licencji wyłącznej do korzystania z przedstawionej dokumentacji pracy dyplomowej w zakresie jej publicznego udostępniania i rozpowszechniania w wersji drukowanej i elektronicznej¹.

Warszawa, dnia 27 stycznia 2018

(czytelny podpis dyplomanta)

¹ Na podstawie Ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz.U. 2005 nr 164 poz. 1365) Art. 239. oraz Ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2000 r. Nr 80, poz. 904, z późn. zm.) Art. 15a. "Uczelni w rozumieniu przepisów o szkolnictwie wyższym przysługuje pierwszeństwo w opublikowaniu pracy dyplomowej studenta. Jeżeli uczelnia nie opublikowała pracy dyplomowej w ciągu 6 miesięcy od jej obrony, student, który ją przygotował, może ją opublikować, chyba że praca dyplomowa jest częścią utworu zbiorowego."

Spis treści

1.	Wstęp	13
2.	Cel i zakres pracy	14
3.	Podstawy fizyczne	15
3a.	Soczewki dyfrakcyjne.....	15
3b.	Aberracje optyczne	16
	Aberracja sferyczna	17
	Koma	18
	Astygmatyzm	20
	Krzywizna pola Petzvala	21
	Dystorsja.....	22
3c.	Opis aberracji optycznych z użyciem wielomianów Zernikego.....	23
3d.	Odpowiedź impulsowa soczewki.....	24
3e.	Formowanie wiązki świetlnej.....	25
4.	Część algorytmiczna.....	27
4a.	Wykorzystane narzędzia, platformy i biblioteki zewnętrzne	27
	Język programowania	27
	Interfejs użytkownika	27
	Generowanie plików graficznych w formacie BMP	28
	Obliczanie transformaty Fouriera	28
4b.	Klasy bazowe.....	28
	Bitmap.cpp.....	29
	DiffractiveStructure.cpp.....	29
4c.	Generacja soczewek	29
4d.	Nakładanie aberracji	30
	Reprezentacja aberracji	30
	Nakładanie aberracji na soczewki	32
4e.	Symulowanie natężeniowej odpowiedzi impulsowej.....	33
4f.	Instrukcja korzystania z programu z wykorzystaniem interfejsu graficznego	35
	Instalacja programu	35
	Generacja soczewki.....	35
	Wybór aberracji.....	37
5.	Weryfikacja eksperymentalna	38
5a.	Symulacja funkcji rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych.....	38

Użyte narzędzia.....	38
Wyniki symulacji	38
5b. Badanie funkcji rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z użyciem przestrzennego modulatora światła.....	42
Układ pomiarowy	42
Zarejestrowana funkcja rozmycia punktu.....	43
Wnioski.....	46
5c. Badanie funkcji rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych na kłiszach	46
Układ pomiarowy	46
Funkcje rozmycia punktu wybranych soczewek.....	48
Wnioski.....	49
5d. Obrazowanie w świetle monochromatycznym z użyciem wygenerowanych soczewek.....	50
Układ pomiarowy	50
Zarejestrowane obrazy	51
Wnioski.....	53
5e. Obrazowanie w świetle białym z użyciem wygenerowanych soczewek.....	54
Układ pomiarowy	54
Zarejestrowane obrazy	55
Wnioski.....	58
5f. Opracowanie niepewności pomiarowych	59
Niepewności pomiarowe dotyczące procesu naświetlania folii holograficznej	59
6. Podsumowanie	60
7. Bibliografia.....	63
8. Dodatkowe informacje	65
8a. Spis rysunków	65
8b. Spis tabel.....	65

1. Wstęp

Ze względu na swoją wszechstronną użyteczność, soczewki są wykorzystywane od czasów starożytnych. Pierwsze ślady istnienia soczewek pojawiają się w źródłach historycznych już z 424 roku p.n.e, gdzie wzmiankowane jest „pałace szkło” używane do wznieczenia ognia [1 str. 1].

Soczewki refrakcyjne są wciąż najpowszechniej używanymi elementami optycznymi [1 str. 154]. Wykorzystuje się je w celach medycznych - okulary korekcyjne, przemysłowych - skupianie wiązki laserowej, badawczych - teleskopy, a nawet artystycznych - obiektywy aparatów fotograficznych [2] [3] [4] [5].

Soczewek dyfrakcyjnych, w odróżnieniu od refrakcyjnych, nie musi charakteryzować konkretny współczynnik załamania, ani krzywizna powierzchni. Struktura amplitudowa binarna może zachowywać się w pewnym przybliżeniu jak soczewka refrakcyjna, podczas gdy opisuje ją jedynie rozkład współczynnika transmisji [6].

Aberracje optyczne stanowią podstawowe ograniczenie przydatności soczewek, co czyni niwelowanie ich kluczowym zagadnieniem. Analiza aberracji zwiększa zrozumienie ich pochodzenia, co jest pierwszym krokiem do opracowywania rozwiązań.

Idealna soczewka o nieskończonych wymiarach powinna skupiać falę płaską w punkt, czyli powinna uformować falę sferyczną zbieżną przed ogniskiem i falę sferyczną rozbieżną za ogniskiem soczewki. Rzeczywiste soczewki nie są w stanie przekształcić płaskiej wiązki w sferyczną. Odstępstwa od tego ideału tworzą aberracje oraz ograniczenie dyfrakcyjne, wynikające ze skończonej apertury elementów optycznych. Aberracje mogą być opisane na różne sposoby, jednak przeważnie wykorzystuje się wielomiany Zernikego. Umożliwiają one spójny i ścisły opis aberracji większości powszechnie stosowanych układów optycznych. Narzędzie zdolne do symulowania skutków wprowadzenia danej aberracji do układu optycznego jest użyteczne z punktu widzenia projektowania takiego układu. Umożliwia świadomego dobór komponentów optycznych tak, by zoptymalizować cenę oraz jakość obrazowania.

Możliwe jest także poprawienie istniejących układów optycznych, poprzez dodanie maski fazowej będącej złożeniem odpowiednich wielomianów Zernikego. W tym celu należałyby zbadać aberracje istniejącego układu, wygenerować strukturę równoważąca odstępstwa frontu falowego od pożąданej powierzchni i dodać ją jako element korekcyjny. Prace mające na celu precyzyjne określenie aberracji istniejących układów optycznych i przedstawienie ich za pomocą wielomianów Zernikego są aktualnie realizowane na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Należy jednak pamiętać, że rozwiązanie takie jest ścisłe zależne od długości fali światła. Struktury dyfrakcyjne zoptymalizowane są na konkretną długość fali, jednak istnieją również rozwiązania pozwalające na ich szerokopasmową pracę typu kinoformy wyższego rzędu (ang. High Order Kinoform, HOK) [7].

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy było stworzenie programu komputerowego generującego równanie oraz rozkład fazowy soczewki sferycznej z określonymi aberracjami. Uwzględnione zostało zarówno równanie soczewki sferycznej w przybliżeniu przyosiowym, jak i bez przybliżenia. Narzędzie zostało stworzone w języku C++, w standardzie z roku 2014, z wykorzystaniem bibliotek zewnętrznych. Aplikacja korzysta ze stworzonego w platformie programistycznej QT interfejsu graficznego, umożliwiającego użytkownikowi pracę interaktywną. Stworzony program pozwala na dynamiczny podgląd projektowanych soczewek oraz aberracji, co ułatwia projektowanie struktur realizujących zamierzone przekształcenia w czasie rzeczywistym.

Dodatkowo zaimplementowany został moduł pozwalający na symulowanie natężeniowej odpowiedzi impulsowej (ang. Point Spread Function, PSF) wygenerowanej struktury z poziomu aplikacji.

Zakres pracy obejmował stworzenie programu komputerowego realizującego powyższe założenia oraz przeprowadzenie symulacji komputerowych natężeniowych odpowiedzi impulsowych (PSF) wybranych soczewek oraz ich weryfikacja eksperymentalna. Sprawdzenie poprawności zasymulowanych funkcji rozmycia punktu zostało zrealizowane na dwa sposoby:

- poprzez wyświetlenie struktur fazowych na przestrzennym modulatorze światła (ang. Spatial Light Modulator, SLM) HOLOEYE PLUTO i zarejestrowanie zogniskowanego frontu falowego na matrycy kamery acA2500-14um - Basler ace.
- poprzez naświetlenie wydrukowanej struktury na folii holograficznej PFG01 z użyciem analogowego aparatu fotograficznego Minolta X-300s oraz zarejestrowanie rozkładu w płaszczyźnie ogniskowej za pomocą matrycy światłoczułej aparatu fotograficznego.

Naświetlone struktury dyfrakcyjne zostały dodatkowo przetestowane pod kątem obrazowania w długości fali, na którą zostały zaprojektowane, oraz w świetle białym.

3. Podstawy fizyczne

3a. Soczewki dyfrakcyjne

Optycznym elementem dyfrakcyjnym nazywamy taki element, który wpływa na amplitudę zespoloną przechodzącego przez niego światła poprzez dyfrakcję na mikrostrukturze elementu [8 str. 173] [9 str. 459]. W szczególności taka struktura może pełnić rolę soczewki dla określonych długości fali świetlnych.

Soczewka pełni dwie podstawowe funkcje – formuje, a w szczególności skupia światło i co za tym idzie umożliwia obrazowanie. W przypadku soczewki refrakcyjnej, dzieje się tak, że względem różnicę współczynników załamania światła soczewki i jej otoczenia. Dobierając odpowiednio kształt powierzchni i współczynnik załamania jesteśmy w stanie uformować żądany front falowy [1 str. 155].

Kromkiem w kierunku soczewek dyfrakcyjnych są soczewki Fresnela. Wypośrodkowują one zalety soczewek refrakcyjnych, uwzględniając jednocześnie zalety płynące z optyki dyfrakcyjnej, łącząc niewielki rozmiar ze zdolnością do formowania światła nie tylko monochromatycznego [10]. Jednak w odróżnieniu od soczewek dyfrakcyjnych nie jest w ich przypadku ściśle kontrolowane przesunięcie fazowe.

Transmitancja idealnej, cienkiej soczewki skupiającej przyjmuje postać [11]:

$$t(x, y) = P(x, y) \exp[-ik\sqrt{(x^2 + y^2 + f^2)}]. \quad (3 - 1)$$

Natomiast w przybliżeniu przyosiowym przyjmuje ona postać [11]:

$$t(x, y) = P(x, y) \exp\left[-\frac{ik}{2f}(x^2 + y^2)\right], \quad (3 - 2)$$

gdzie:

$t(x,y)$ – transmitancja zespolona soczewki po uwzględnieniu jej skończonych rozmiarów;

$P(x,y)$ – funkcja źrenicy soczewki;

k – liczba falowa;

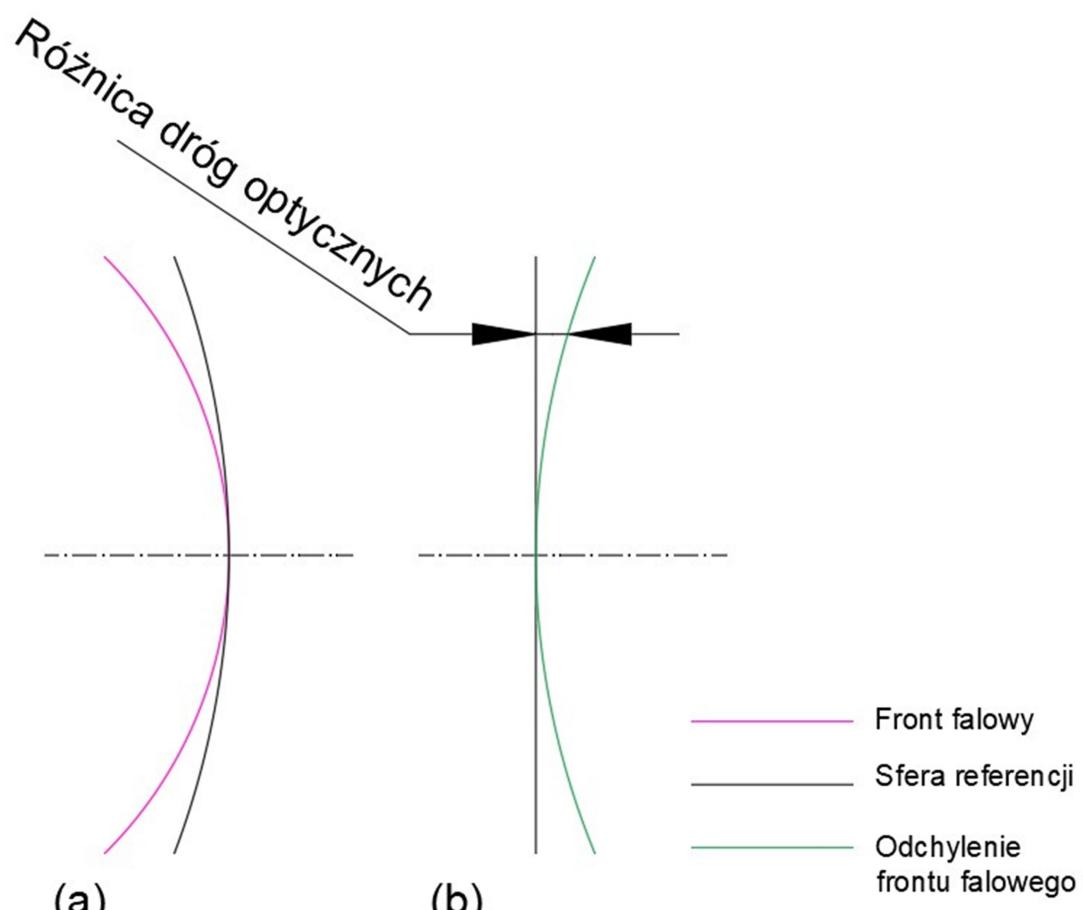
f – ogniskowa soczewki.

Zrealizowanie struktury dyfrakcyjnej o transmitancji wyrażonej powyższym wzorem jest równoznaczne wyprodukowaniu soczewki zaprojektowanej dla konkretnej długości fali (tzw. design wavelength, DWL), która zawarta jest w wyrażeniu pod postacią liczby falowej ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$).

3b. Aberracje optyczne

Wszystkie soczewki tworzone przez człowieka obarczone są aberracjami optycznymi. [12 strony 37-40] Aberracje elementu optycznego opisujemy funkcją przestrzenną, jako odległość zniekształconego frontu falowego od sfery odniesienia – zazwyczaj w jednostkach długości fali (Rys. 3-1a). Sfera odniesienia reprezentuje perfekcyjną sferę zaczepioną w płaszczyźnie obrazowej.

W celu graficznego przedstawienia odchylenia frontu falowego, często prezentuje się sferę odniesienia jako linię prostą, a odchylenie jako krzywą powstałą przez zachowanie odległości między sferą referencji, a frontem falowym, co ilustruje Rys. 3-1b [13].



(<http://www.telescope-optics.net>, zmodyfikowane)

Rys. 3-1 Rozbieżność frontu falowego względem idealnej sfery – określa aberracje

Istnieją dwa główne rodzaje aberracji:

- aberracje chromatyczne

Powstają w wyniku dyspersji. Współczynnik załamania światła ma różną wartość dla różnych długości fali, w wyniku czego ognisko soczewki umiejscowione jest w innej odległości dla każdej składowej długości fali światła.

- aberracje monochromatyczne

Występują nawet dla światła monochromatycznego. Sprawiają, że obrazem punktu nie może być punkt, a jedynie plama o kształcie zależnym od występujących aberracji. Nie wynikają one z błędów produkcyjnych.

Warto w tym miejscu dodać, że nawet dla idealnego układu obrazującego, pozbawionego aberracji zarówno chromatycznych jak i monochromatycznych, zasada obrazowania „punktu w punkt” nie może zostać zachowana w wyniku istnienia ograniczenia dyfrakcyjnego. Światło przechodzące przez aperturę ugina się na brzegach przysłony w wyniku działania dyfrakcji. W szczególności dla dyfrakcji na otworze kołowym w strefie dalekiej formuje się plamka Airego, opisana funkcją Bessela (pierwszego rzędu, pierwszego rodzaju) [11 strony 101,132] [14 strony 12-15].

Aberracje powodują transfer energii ze środka obrazu dyfrakcyjnego na pierścień lub inne kształty dyfrakcyjne, sprawiając że obraz punktu wydaje się większy i mniej kontrastowy.

Przybliżenie przyosiowe to założenie, że dla rozpatrywanych kątów $\sin \phi$ można przybliżyć z odpowiednią dokładnością samym ϕ . Sfera jest właściwą powierzchnią obrazującą tylko, gdy uwzględnione jest to przybliżenie – to znaczy w wąskim obszarze wokół osi optycznej. W innych wypadkach należałoby zaprojektować powierzchnię asferyczną, przeznaczoną do konkretnego zastosowania.

Precyzyjniejsza jest tzw. „teoria trzeciego rzędu” wymagająca zastąpienia przybliżenia przyosiowego ulepszonym przybliżeniem – dwoma pierwszymi wyrazami rozwinięcia funkcji sinus w szereg Taylora:

$$\sin \phi = \phi - \frac{\phi^3}{3!} \quad (3-3)$$

Soczewka zaprojektowana zgodnie z tą zależnością pozbawiona będzie pięciu podstawowych aberracji Seidela:

- aberracji sferycznej,
- komi,
- astygmatyzmu,
- dystorsji,
- krzywizny pola.

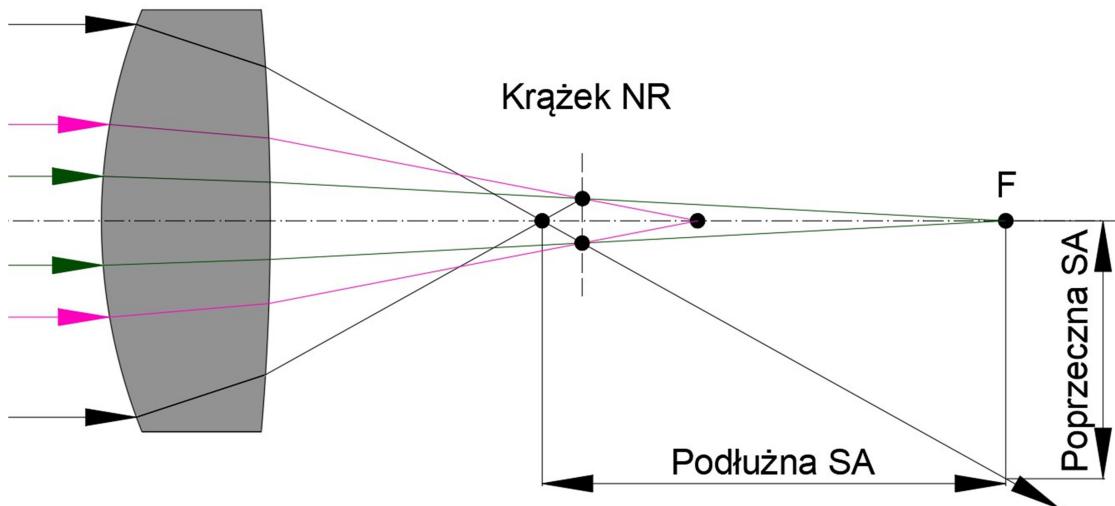
Aberracje wyższych rzędów, których wyeliminowanie wymaga uwzględnienia dodatkowych składników rozwinięcia, mają mniejszy wpływ na deformacje frontu falowego.

Aberracja sferyczna

Aberracja sferyczna jest jedną z podstawowych aberracji optycznych. Jej wynikiem jest inna moc skupiająca soczewki sferycznej dla promieni padających w różnej odległości od osi optycznej.

Przybliżenie funkcji sinus pierwszym wyrazem rozwinięcia w szereg Taylora staje się mniej trafne wraz ze wzrastającą wielkością rozpatrywanego kąta. Wynika z tego, że soczewki sferyczne precyzyjnie obrazują jedynie promienie padające na ich centrum. Pozostałe promienie świetlne obrazują się przed ogniskiem w przypadku aberracji dodatniej, bądź za ogniskiem w przypadku aberracji ujemnej. Odległość między ogniskiem soczewki, a miejscem przecięcia ugiętych przez nią promieni świetlnych z osią optyczną nazwana jest podłużną aberracją sferyczną (Podłużna SA na Rys. 3-2). Poprzeczna aberracja sferyczna to odległość między ogniskiem soczewki, a miejscem przecięcia ugiętych przez nią promieni z płaszczyzną ogniskową (Poprzeczna SA na Rys. 3-2) [1 str. 259].

W efekcie promienie świetlne skupiane przez soczewkę sferyczną zawsze ogniskują się na odcinku o jakiejś długości. W obrębie tego odcinka występuje płaszczyzna optymalna do umieszczenia tam ekranu, na której obrazowany punkt ma najmniejszą średnicę. Taki obraz nazywamy krążkiem najbliższego rozmycia (Krążek NM na Rys.3-2).



(Hecht Eugene. Optyka. Rys. 6-14, zmodyfikowany)

Rys. 3-2 Aberracja sferyczna

Koma

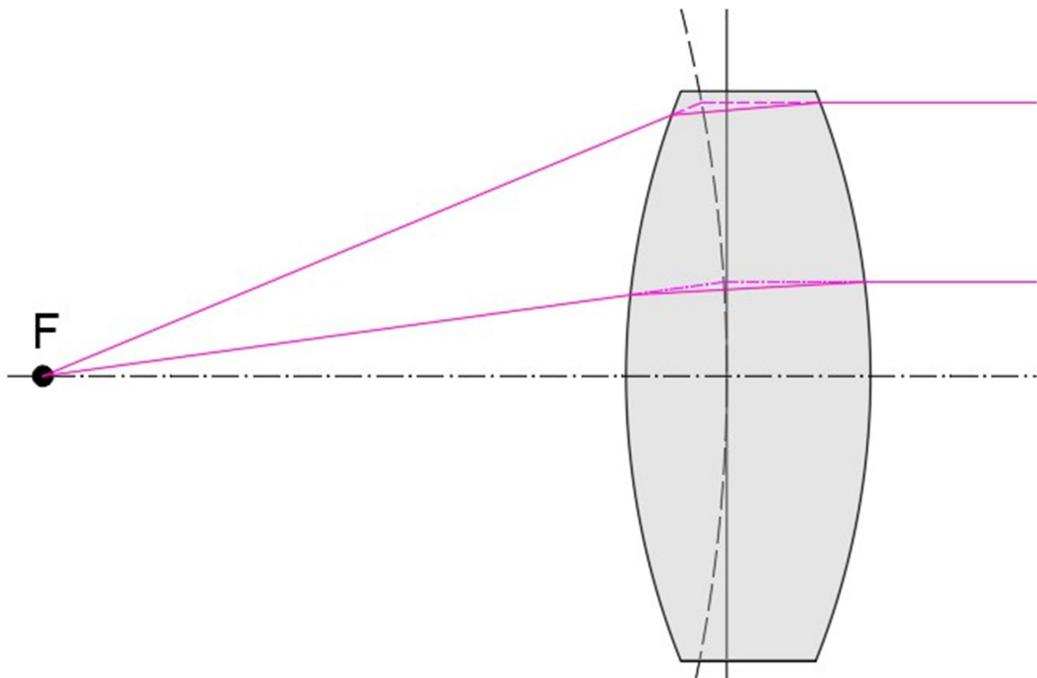
Aberracja komatyczna występuje dla promieni padających pod kątem do osi optycznej. Jest szczególnie dobrze widoczna dla obiektów położonych daleko od osi. Analogicznie do aberracji sferycznej, promienie świetlne skupiane przez soczewkę obarczoną komą ogniskują się na odcinku o jakiejś długości. W przypadku komy jednak, odcinek ten rozmieszczony jest na płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej.

Promień świetlny przebiegający przez soczewkę grubą zakrzywia swój tor na granicy ośrodków o różniących się współczynnikach załamania. Bardzo trudne jest jednak przeliczanie w ten sposób dróg wszystkich promieni świetlnych, które padają na soczewkę pod różnymi kątami, a w efekcie przebywają w ośrodku różne drogi.

Analiza refrakcji wymaga zastosowania uproszczonego modelu tego zjawiska. Z pomocą przychodzi tutaj pojęcie płaszczyzn głównych soczewki grubiej.

Płaszczyzny główne – obrazowa i obiektywna – mają interpretację powierzchni, na których następuje załamanie światła – jak w przypadku soczewki cienkiej. W ten sposób cały proces analizy ugięcia promieni świetlnych zostaje uproszczony (Rys. 3-3).

Płaszczyzna główna wejściowa



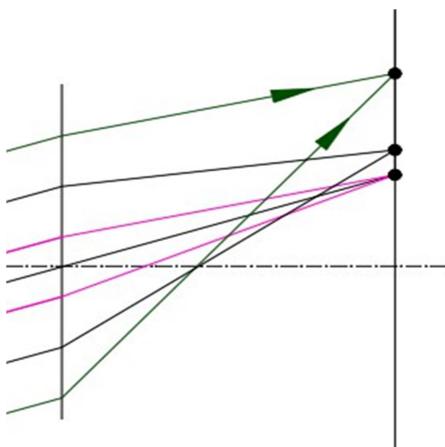
(Hecht Eugene. Optyka. Rys.6-1, zmodyfikowany)

Rys. 3-3 Płaszczyzna główna wejściowa.

Płaszczyzny główne soczewki są płaszczyznami w przybliżeniu przyosiowym. Jednakowoż, w rzeczywistości przyjmują one kształt zakrzywionej powierzchni odbiegającej od płaszczyzny wraz z odległością od osi soczewki (Rys. 3-3). Ta nieścisłość jest przyczyną powstawania aberracji komatycznej.

Obraz punktu znieksztalcony aberracją komatyczną zostaje wydłużony w płaszczyźnie prostopadłej do osi soczewki i zależy od kąta padania wiązki światła na soczewkę.

W przypadku komy dodatniej promienie świetlne przechodzące bliżej brzegów soczewki zbiegają się dalej od osi, niż promienie przebiegające przez centralną część soczewki (Rys. 3-4). Koma ujemna cechuje się odwrotną zależnością.



(Hecht Eugene. Optyka. Rys.6-21, zmodyfikowany)

Rys. 3-4 Dodatnia koma

Dostrzegalnym efektem tego rodzaju zaburzenia frontu falowego jest skupianie punktowych źródeł światła w linię, czy też tzw. *przecinek*.

Astygmatyzm

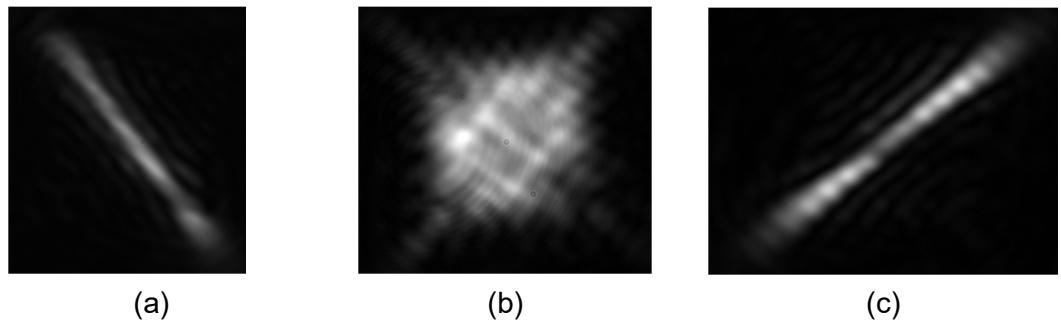
Astygmatyzm polega na ogniskowaniu promieni padających wzdłuż prostopadłych osi soczewki w dwóch różnych odległościach. Jest to aberracja trudna do skorygowania.

Płaszczyzna południkowa soczewki jest rozpięta przez oś optyczną i promień środkowy.

Płaszczyzna wzdłużna soczewki zawiera w sobie oś optyczną i jest prostopadła do płaszczyzny południkowej.

Stożek świetlny emitowany z obiektu położonego w danej odległości od osi optycznej pada na soczewkę asymetrycznie. Promienie południkowe padają na soczewkę pod większym kątem, niż promienie wzdłużne, w wyniku czego mają krótszą ogniskową [1 str. 266].

W efekcie przekrój poprzeczny wiązki po przejściu przez soczewkę nabiera kształtu elipsy, w miejsce spodziewanego okręgu. W ognisku południkowym plama świetlna zbiega się w linię o kierunku wyznaczonym przez płaszczyznę wzdłużną (Tab. 3-1a). W dalszej odległości ujrzymy prążek najmniejszego rozmycia (Tab. 3-1b), a następnie w ognisku wzdłużnym linię prostopadłą do obserwowanej poprzednio (Tab. 3-1c).



(a)

(b)

(c)

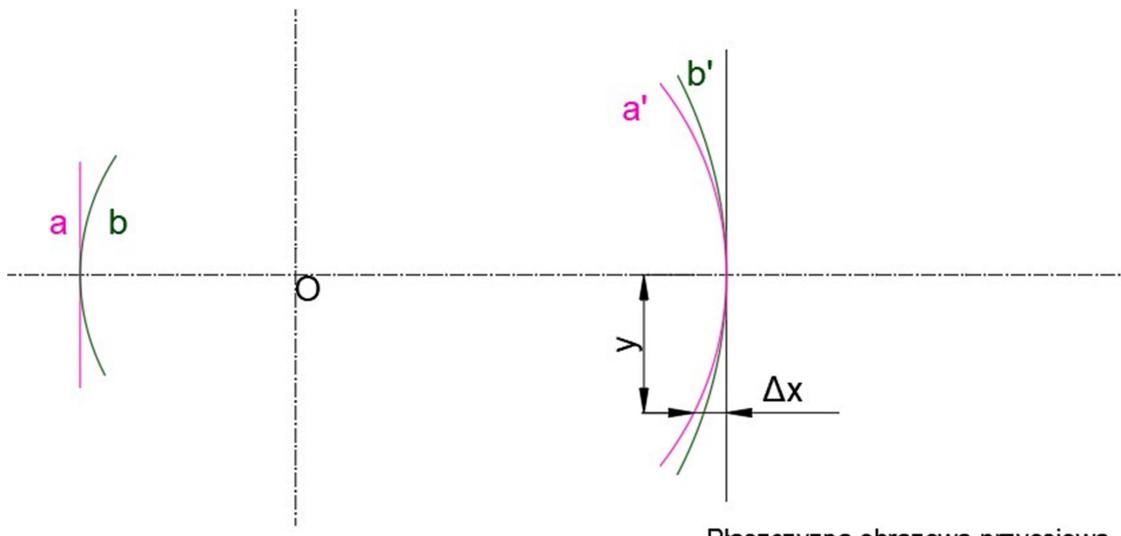
Tabela 3-1 Astygmatyzm. Zdjęcia zarejestrowane w układzie eksperymentalnym

Opisana aberracja dotyczy symetrycznych soczewek sferycznych [1 str. 266]. Soczewka dyfrakcyjna z astygmatyzmem odpowiada konfiguracji, w której obiekt znajduje się poza osią optyczną podczas obrazowania osiowego, poprzez odpowiednią modyfikację frontu falowego.

Krzywizna pola Petzvala

Krzywizna pola jest aberracją wynikającą z zapisywania paraboloidalnego obrazu na płaskiej powierzchni.

Płaszczyzna obrazowa układu optycznego jest płaszczyzną tylko w przybliżeniu przyosiowym. W przypadku przysłony o skończonym rozmiarze powierzchnia, na której powstaje obraz jest zakrzywiona. W szczególności dla soczewki skupiającej punkty na powierzchni obrazowej przybliżają się do soczewki wraz ze zwiększeniem odległości od osi układu [1 str. 269]. Jak przedstawione jest na Rys. 3-5, obiekt *b* położony na łuku okręgu o swoim centrum w punkcie O, zobrazuje się jako fragment łuku większego koncentrycznego okręgu *b'*. Jednak wyprostowanie przedmiotu do postaci odcinka *a*, spowoduje obrazowanie na powierzchni *a'* jeszcze bardziej zakrzywionej w kierunku centrum układu.



Płaszczyzna obrazowa przyosiowa

Rys. 3-5 Krzywizna pola Petzvala

(Hecht Eugene. Optyka. Rys.6-29, zmodyfikowany)

Rozbieżność między faktycznym położeniem punktu obrazu, a położeniem wyliczonym przy zastosowaniu przybliżenia przyosiowego może zostać wyliczona za pomocą wzoru [1 strony 269, równanie 6.43]:

$$\Delta x = \frac{y^2}{2} \sum_{j=1}^m \frac{1}{n_j f_j}, \quad (3 - 4)$$

gdzie:

n_j – współczynnik załamania cienkiej soczewki o indeksie j spośród tworzących układ,

f_j – ogniskowa cienkiej soczewki o indeksie j spośród tworzących układ,

y – wysokość punktu nad osią,

m – ilość soczewek tworzących układ.

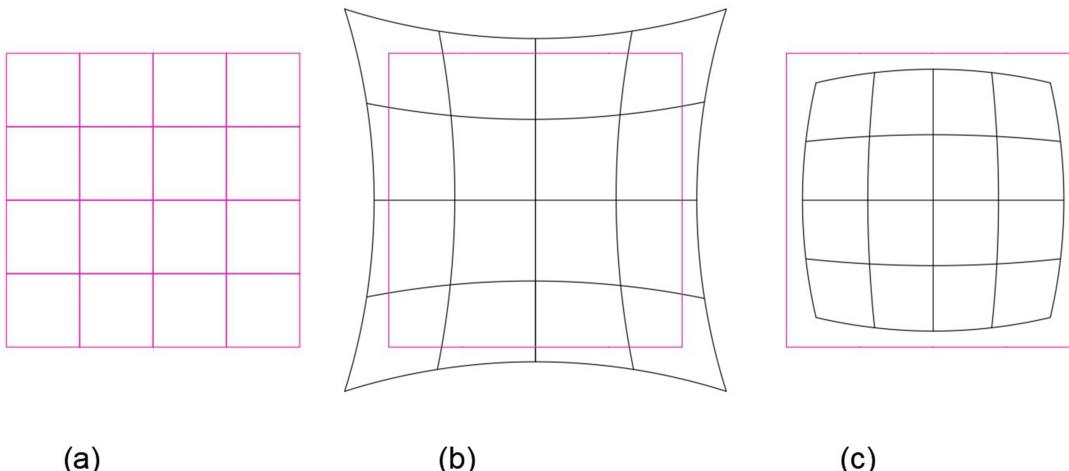
Z tej zależności wynika, że aberracje wynikające z krzywizny pola mogą być korygowane poprzez stosowanie układów soczewek wzajemnie się kompensujących.

Dystorsja

Dystorsja polega na zniekształceniu geometrycznym obrazu, w wyniku którego powiększenie fragmentów powstałego obrazu zmienia się w funkcji odległości od osi optycznej.

W przybliżeniu przyosiowym powiększenie punktu obrazu nie jest zależne od jego odległości od osi. Układ optyczny spełniający tę zasadę nazywany jest ortoskopowym. W rzeczywistości jednak może występować takie powiązanie. Różnica powiększenia jest następstwem niejednolitej ogniskowej soczewki dla jej poszczególnych obszarów.

Wyróżniamy dystorsję dodatnią, zwaną również poduszkową (Rys. 3-6b) oraz ujemną, zwaną również beczkową (Rys. 3-6c).



Rys. 3-6 Dystorsja. (a) Niezniekształcony obiekt. (b) Dystorsja dodatnia. (c) Dystorsja ujemna

(Hecht Eugene. Optyka. Rys.6-33, zmodyfikowany)

Dystorsja dodatnia odsuwa każdy punkt obrazu wzdłuż promienia wodzącego zaczepionego w jego centrum. Wartość odsunięcia zwiększa się wraz z odległością od centrum. Dystorsja ujemna działa w sposób przeciwny.

Dystorsję można z powodzeniem niwelować umieszczając w układzie optycznym przysłony. Ograniczenie apertury wymusza, aby promienie świetlne propagowały się jedynie przez centralną część soczewki realizując obrazowanie zgodne z przybliżeniem przyosiowym. Dystorsja nie występuje, gdy promień środkowy jest równocześnie promieniem głównym.

W celu wymuszenia tego warunku można umieścić przysłonę pomiędzy identycznymi soczewkami, sprawiając by wprowadzane przez nie dystorsje wzajemnie się korygowały [1 strony 271, 272].

3c. Opis aberracji optycznych z użyciem wielomianów Zernikego

Funkcja opisująca rozbieżność rozpatrywanego frontu falowego w danym przybliżeniu może zostać łatwo zdefiniowana jako suma wielomianów będących odpowiednimi składnikami rozwinięcia funkcji $\sin \varphi$ w szereg Taylora. Ten sposób opisu aberracji nie należy jednak do najwygodniejszych. Powszechnie stosowana jest konwencja, podług której funkcję rozbieżności frontu falowego rozwija się w odpowiednią sumę wielomianów Zernikego [15], [16 strony 112-114].

Opis frontu falowego za pomocą wielomianów Zernikego matematycznie przybiera postać sumy [17]:

$$W(r, \theta) = \sum_{n,m} C_n^m Z_n^m(r, \theta), \quad (3 - 5)$$

gdzie C oznacza współczynnik wielomianu, a Z wielomian. Wielomiany o poszczególnych indeksach nazywane są modami.

Wyprowadzenie poszczególnych wielomianów opisane jest m.in. w artykule [17].

Zalety wykorzystania wielomianów Zernikego do opisu aberracji [18], [17]:

- Ortogonalne na kole jednostkowym:

Rozpatrywane pod kątem występowania aberracji układy optyczne zazwyczaj ograniczone są aperturą kołową. Z tego powodu praktycznym jest wykorzystanie wielomianów ortogonalnych wewnątrz koła jednostkowego. Ułatwia to porównanie danej sumy wielomianów do danych pochodzących z eksperymentu.

Ortogonalność wielomianów w praktyce oznacza, że współczynniki Zernikego użyte do opisu frontu falowego mogą być swobodnie sumowane, nie wpływając na siebie wzajemnie.

- Znormalizowane do średniej kwadratowej (ang. Root Mean Square, RMS) na kole jednostkowym:

Współczynnik Zernikego reprezentuje średnią kwadratową błędu frontu falowego pochodzącego z danego modu aberracji. Błąd frontu falowego

liczony jest w odniesieniu do tzw. „zero mean”, tj. płaszczyzny wyznaczonej tak, by suma odchyleń w obu kierunkach miała wartość zero [19].

- Symetryczne rotacyjnie

Wielomiany Zernikego wykazują właściwości symetrii rotacyjnej. Obrót układu współrzędnych o dany kąt nie zmienia wartości wielomianu. W związku tym zazwyczaj wyraża się je we współrzędnych biegunowych.

Pomimo wymienionych zalet model opisu aberracji powinien być dobierany indywidualnie do każdego przypadku. Wielomiany Zernikego nie sprawdzają się przykładowo do opisu obrazowania przez elementy stożkowe [17].

3d. Odpowiedź impulsowa soczewki

Odpowiedź impulsowa soczewki jest zdefiniowana dla układu liniowego ze względu na amplitudę światła. Zgodnie z definicją przedstawioną w „Optycznym przetwarzaniu informacji” K. Gniadka [11 str. 74]:

„Układ nazywamy liniowym, jeżeli przekształca on liniową kombinację dowolnych sygnałów wejściowych w taką samą kombinację liniową odpowiadającą im sygnałów wyjściowych.”

Odpowiedź układu na krótki, silny impuls nazywamy odpowiedzią impulsową. W szczególności odpowiedź impulsowa soczewki ma interpretację obrazu przedmiotu punktowego. Ma ona postać plamki o średnicy i kształcie zależnym od właściwości układu obrazującego.

Dysponując wiedzą o odpowiedzi impulsowej układu optycznego jesteśmy w stanie przewidzieć jego odpowiedź na dowolny sygnał, zgodnie z zasadą superpozycji dla dwuwymiarowych układów liniowych [11 str. 75]:

„Odpowiedź układu liniowego na złożony sygnał może być wyrażona jako superpozycja odpowiedzi na poszczególne sygnały elementarne.”

Wynika z tego, że jeśli działamy w obrębie optycznego układu liniowego, odpowiedź impulsowa wystarczy do skutecznego opisu obrazowania, jakie można z jego udziałem przeprowadzić.

Układ koherencyjny przestrzennie jest liniowy ze względu na amplitudę zespoloną pola optycznego. Rozkład amplitudy zespolonej w obrazie możemy wyliczyć splatając rozkład amplitudy zespolonej w obrazie idealnym z odpowiedzią impulsową układu odwzorowującego.

Układ niekoherencyjny przestrzennie jest liniowy ze względu na natężenie światła. Rozkład natężenia w obrazie możemy wyliczyć splatając rozkład natężenia w obrazie idealnym z natężeniową odpowiedzią impulsową układu odwzorowującego. Natężeniowa odpowiedź impulsowa jest kwadratem odpowiedzi impulsowej układu i nazywana jest funkcją rozmycia punktu (PSF).

Przedmiotem niniejszej pracy są struktury dyfrakcyjne obrazujące w świetle monochromatycznym. Nie oznacza to jednak, że obliczana funkcja rozmycia punktu odpowiada amplitudowej odpowiedzi impulsowej. Obserwowana eksperymentalnie odpowiedź układu zawsze jest natężeniowa – detektor jedynie taki sygnał jest w stanie zarejestrować. Mimo, że obrazowanie jest przeprowadzane w układzie

liniowym ze względu na amplitudę zespoloną, wynikowo przedstawiany jest kwadrat modułu wyjściowej amplitudy zespolonej. Dlatego obserwowana przez nas funkcja rozmycia punktu ma interpretację natężeniowej odpowiedzi impulsowej (PSF).

Pamiętając, że natężeniowa odpowiedź impulsowa (PSF) jest równoznaczna obrazowi punktu, możemy ją znaleźć propagując falę płaską przez strukturę dyfrakcyjną o określonej transmitancji.

Możemy się posłużyć wyrażeniem opisującym dyfrakcję Fresnela [8 strony 67, wzór (4-17)]:

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} \{U(\xi, \eta) e^{j\frac{k}{2z}(\xi^2+\eta^2)}\} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta, \quad (3 - 6)$$

Powyższa formuła zawiera w sobie transformatę Fouriera iloczynu transmitancji struktury i kwadratowego czynnika fazowego. To istotne ze względu na implementację algorytmiczną.

3e. Formowanie wiązki świetlnej

Strukturę dyfrakcyjną działającą w świetle widzialnym można zrealizować na dwa sposoby:

- Z użyciem folii holograficznej

Klisza fotograficzna, a w szczególności folia holograficzna może posłużyć do modulacji frontu falowego. Zgodnie z opisem Goodmana [8 strony 174-175] składa się ona w ogólności z ziaren halogenków srebra zawieszonych w żelatynie. Strumień fotonów uderzających w powierzchnię halogenku srebra może wyzwolić efekt fotoelektryczny wewnętrzny, powodując powstanie pary elektron – dziura. Jony srebra zawarte w halogenkach srebra (np. AgBr), mają zdolność wiązania elektronów, co skutkuje powstawaniem pojedynczych atomów tego metalu. Ilość powstałych atomów srebra zależy od ilości padających fotonów, czy też innymi słowy, czasu naświetlania. W zależności od rodzaju użytej kliszy inna substancja może reagować na ekspozycję światłem o danej długości fali.

Naświetlona klisza zostaje zanurzona w związku chemicznym nazywanym „wywoływaczem”. Ziarna zawierające dostateczną ilość atomów srebra zostają zredukowane do cząsteczek metalicznego srebra.

Pozostałe w kliszy, niezredukowane ziarna halogenku srebra zostają wypłukane w tzw. „utrwalaczu”. W przeciwnym wypadku po upływie dostatecznego czasu wywołają się same w wyniku działania temperatury, zmieniając zapisany na kliszy obraz.

Wyrobaną i utrwaloną kliszę należy poddać procesowi odbielenia, w celu przekształcenia struktury amplitudowej w fazową. Zaczerniona klisza charakteryzuje się mniejszą wydajnością dyfrakcyjną, ze względu na absorbowane przez metaliczne srebro światło. [6] [20 str. 413] Proces odbielania usuwa z kliszy cząstki srebra, pozwalając światłu na swobodną transmisję. Zdolność modulowania fazy zostaje

zachowana, ze względu na zaburzenie grubości kliszy, bądź współczynnika załamania w miejscach, w których zostały wypłukane cząstki srebra.

W wyniku tych działań otrzymujemy strukturę czysto fazową. W przypadku zastosowania odpowiedniej ekspozycji i parametrów wywoływania, struktura ta będzie powodowała odpowiednie opóźnienie fazowe.

- Z użyciem przestrzennego modulatora światła (SLM)

Przestrzenny modulator światła to narzędzie umożliwiające przetwarzanie obrazu w czasie rzeczywistym. Istnieją różne sposoby konstrukcji tego urządzenia. W tej pracy użyty został modulator wykorzystujący wyświetlacze ciekłokrystaliczne.

Działanie takiego modulatora światła opiera się o anizotropię ciekłych kryształów. Napięcie przyłożone do komórki ciekłego kryształu jest uzależnione od wartości liczbowej („szarości”) odczytanego piksela źródłowego obrazu. Skutkuje ono nachyleniem molekuł w komórce, co ze względu na jej dwójlomność powoduje zmianę efektywnego współczynnika załamania. Faza światła przechodzącego przez SLM jest zmieniana w czasie rzeczywistym [21].

4. Część algorytmiczna

Algorytmy zostały zrealizowane w programie posiadającym graficzny interfejs użytkownika. Wyjściowa aplikacja nosi nazwę LeGenDA – Lens Generator based on Diffraction & Aberrations.

4a. Wykorzystane narzędzia, platformy i biblioteki zewnętrzne

Język programowania

Całość programu została opracowana w języku C++, w standardzie z roku 2014, z wykorzystaniem bibliotek zewnętrznych. Kod został skompilowany w środowisku MinGW 5.3.0 32bit.

Dobór języka użytego do realizacji kodu ma kluczowe znaczenie dla powodzenia projektu. Choć z całą pewnością te same założenia da się zrealizować w więcej niż jeden sposób, indywidualny dobór użytych rozwiązań pod założenia projektowe umożliwia skonstruowanie programu najwyższej jakości. Projektowana aplikacja miała za zadanie przede wszystkim realizować obliczenia w sposób efektywny.

Możliwość generowania soczewek o dowolnie sumowanych aberracjach do piątego rzędu włącznie czyni optymalizację użytych algorytmów wyjątkowo istotną. Język C++ jest stosunkowo niskopoziomowy, daje użytkownikowi jawnego dostępu do wskaźników, a co za tym idzie, wymaga od programisty świadomego zarządzania pamięcią. W związku z tym istnieje dużo dróg do przyspieszenia newralgicznych punktów algorytmu.

Wybrany został standard z roku 2014, ze względu na wprowadzoną w nim funkcjonalność w dziedzinie zarządzania wskaźnikami² [22]. Inteligentne wskaźniki – tzw. „smart pointers”, a w szczególności „unique pointers” pozwalają zminimalizować wycieki pamięci, poprzez posiadanie wyłącznej własności obiektu. Są one odpowiedzialne za dealokację pamięci obiektu, który nie jest już wykorzystywany.

Dodatkową zaletą jest dostępność bibliotek zewnętrznych, a w szczególności biblioteki FFTW [23]. FFTW znane jest jako narzędzie wykonujące szybką transformatę Fouriera w optymalny, szybki sposób.

Interfejs użytkownika

Graficzny interfejs użytkownika został zrealizowany za pośrednictwem platformy programistycznej QT w wersji 5.9.2. Do projektowania użyte zostało wbudowane w IDE QT Creator 4.4.1 narzędzie QT Designer.

² Wskaźniki inteligentne zostały wprowadzone już w standardzie z roku 2011. W pełni użyteczne stały się jednak dopiero 3 lata później, po wprowadzeniu metod umożliwiających ich bezpieczną konstrukcję – „make_unique” i „make_shared” [30].

Stworzone narzędzie nie powinno wymagać od użytkownika żadnej wiedzy programistycznej. Konfiguracja powinna być ograniczona do niezbędnego minimum, a instalacja nie powinna być wymagana do działania programu. Przejrzysty interfejs użytkownika ma za zadanie sprawiać, że nie jest wymagane przygotowanie, ani dokumentacja, do wykorzystywania możliwości oferowanych przez program. Aby te wymagania zostały spełnione, niezbędne jest stworzenie aplikacji z interfejsem graficznym.

Platforma programistyczna QT umożliwia stworzenie takiej aplikacji i dystrybucję jej w formie niewymagającej instalacji.

Generowanie plików graficznych w formacie BMP

Działanie programu jest ściśle związane z pracą z plikami graficznymi. Generowane przez użytkownika struktury zostają wyeksportowane do pliku o rozszerzeniu .bmp, po czym mogą zostać wydrukowane, bądź wyświetlane na przestrzennym modulatorze światła (SLM).

Biblioteka *EasyBMP* [24] o otwartej licencji umożliwia importowanie oraz eksportowanie bitmap.

Importowanie obrazów jest istotne ze względu na możliwość dodawania masek fazowych do projektowanych struktur. W kodzie programu zawarte są gotowe funkcje umożliwiające takie działanie, nie są one jednak obecnie dostępne z poziomu interfejsu użytkownika, ze względu na fakt, że nie jest spodziewana potrzeba ich użycia.

Eksport bitmap z użyciem biblioteki *EasyBMP* wymaga utworzenia obiektu typu BMP zdefiniowanego przez tę bibliotekę i określenia jego parametrów, pośród których znajdziemy rozmiar, głębię wyrażoną w bitach oraz wartości poszczególnych pikseli wyrażone za pomocą liczby całkowitej.

Biblioteka *EasyBMP* została wykorzystana ze względu na prostotę użytkowania, przejrzystość dostarczonych funkcji oraz wyczerpującą dokumentację dostarczoną przez autora narzędzia.

Obliczanie transformaty Fouriera

Specyfika działania programu symulującego funkcję rozmycia punktu (PSF) struktur dyfrakcyjnych wymaga efektywnej optymalizacji zastosowanych algorytmów obliczających. Z tego powodu do obliczania transformaty Fouriera zastosowana została zewnętrzna biblioteka FFTW [23].

Narzędzia dostarczane przez tę bibliotekę umożliwiają m.in. policzenie dwuwymiarowej szybkiej transformaty Fouriera (*FFT*, ang. *Fast Fourier Transform*).

4b. Klasy bazowe

Stworzenie aplikacji zgodnej z paradigmatem programowania obiektowego wymagało utworzenia szeregu klas własnych. Wyjaśnienie algorytmów jakimi posłużyono się w realizacji postawionych zadań wymaga od czytelnika zapoznania się z podstawowo wykorzystywanymi klasami. Zostały one opisane poniżej.

Bitmap.cpp

Podstawową klasą zawierającą generowane informacje jest klasa rozszerzająca funkcjonalność macierzy dwuwymiarowej, nazwana *Bitmap*.

Klasa ta, poza bazową macierzą zawierającą informacje o wyjściowych pikselach (Tabela 4-1), zawiera metody i zmienne umożliwiające dodawanie do siebie bitmap w interpretacji fazowej, ułatwiające indeksowanie, oraz niezbędne do wygenerowania z nich obrazy w formacie .bmp. Dostępne są dodatkowo metody niedostępne z poziomu interfejsu użytkownika, ułatwiające przetworzenie istniejących obrazów, a w efekcie rzutowanie ich do typów wykorzystywanych w programie. Jest to przydatne np. w przypadku importu istniejącej maski fazowej w celu jej modyfikacji.

Tabela 4-1 Macierz zawierająca informacje o pikselach

```
std::unique_ptr<double[]> bmap;
```

DiffractiveStructure.cpp

Jest to klasa nadzędna do klas zawierających soczewki i wielomiany Zernikego opisywanych poniżej.

Zastosowanie polimorfizmu poza oczywistymi korzyściami, do których zaliczyć należy uproszczenie konstrukcji klas pochodnych oraz minimalizowanie długości kodu, okazało się konieczne ze względu na wykorzystane w całości programu algorytmy.

W szczególności istotne jest, aby funkcja *Bitmap::mergeMaps* sumująca poszczególne bitmapy zawierające rozkład fazy składowych wielomianów Zernikego oraz soczewki przyjmowała jako parametr dowolną liczbę struktur dyfrakcyjnych. Struktury te, w zależności od zastosowania różnią się detalami implementacji, w wyniku czego należą do klas *Lens*, bądź *Zernike*.

Szczegóły działania funkcji *Bitmap::mergeMaps* opisane zostaną w podpunkcie 4d.

Sposobem na spełnienie powyższego warunku jest umieszczenie struktur dyfrakcyjnych w jednym wektorze. Z uwagi na fakt, że obiekt typu wektor musi składać się z obiektów tej samej klasy, jest on zrealizowany w formie wskaźników na obiekty typu *DiffractiveStructure*. Wskaźnik typu wskaźnika na obiekt klasy nadzędnej może z powodzeniem wskazywać obiekt klasy podrzędnej, co umożliwia nam przekazanie do funkcji wektora zawierającego zarówno rozkład fazy soczewek, jak i wielomianów Zernikego.

Obiekt klasy *DiffractiveStructure* zawiera informacje o rozmiarze zawartej w sobie bitmapy, oraz metodę zwracającą wskaźnik na tę bitmapę. To umożliwia nam wyjęcie rozkładu fazy z obiektu typu *Lens*, bądź *Zernike* bez wiedzy o tym, z jakim obiektem mamy do czynienia.

4c. Generacja soczewek

Wszystkie informacje o generowanej soczewce dyfrakcyjnej bez aberracji, stanowiącej podstawę do późniejszej analizy, zawarte są w klasie *Lens*.

W celu skonstruowania obiektu tej klasy konieczne jest podanie niezbędnych parametrów:

Tabela 4-2 Konstruktor soczewki.

```
Lens(int max_row, int max_col, double Lambda, double F, double  
probkowanie, double (*LensForm)(double, double, double));
```

Max_row, max_col oraz próbkowanie są parametrami przekazywanymi konstruktorowi funkcji nadzędnej – *DiffractiveStructure*. Zawierają one informacje o wymiarach tworzonej struktury. Próbkowanie umożliwia przeliczenie rozmiaru w pikselach na rozmiar fizyczny.

Dodatkowo w parametrach konstruktora zawarte są informacje o ogniskowej i długości fali na jaką projektowana jest soczewka, oraz wzór, z którego zostanie wygenerowany rozkład fazy. Wzór podany jest w formie wskaźnika funkcyjnego, który w praktyce wskazuje na statycznie zdefiniowane w tej klasie funkcje *paraxial_formula* lub *non_paraxial_formula*.

Transmitancja soczewki wyliczana jest ze wzorów wypisanych już w rozdziale 3a – wzory 3-1 i 3-2.

Tabela 4-3 Wyliczanie rozkładu fazy soczewki

```
for (int row = -MAX_ROW/2; row < MAX_ROW/2; row++) {  
    for (int col = -MAX_COL/2; col < MAX_COL/2; col++) {  
        //Apertura kołowa dopasowana do wielomianu Zernikego  
        if( (pow(row,2) + pow(col,2)) > pow(MAX_ROW/2,2) ) {  
            bitmap->  
            bmap[bitmap->index(row+MAX_ROW/2,col+MAX_COL/2)] = 0;  
            continue;  
        }  
        /* 1 - wynik, aby odzwierciedlić minus przed fazą w równaniu  
        wyrażającym transmitancję soczewki.*/  
        tmp = coeff * LensForm(row, col, f);  
        bitmap->  
        bmap[bitmap->index(row+MAX_ROW/2,col+MAX_COL/2)] = 1-(tmp-  
        floor(tmp));  
        // Operacja x - floor(x) jest optymalną implementacją operacji x%1.  
    }  
}
```

4d. Nakładanie aberracji

Reprezentacja aberracji

Zmiana rozkładu fazowego wprowadzana przez dany wielomian Zernikego zapisywana jest w obiekcie klasy *Zernike* (Tabela 4-4), będącej pochodną klasy *DiffractiveStructure*.

Konstrukcja obiektu zawierającego aberracje przebiega bardzo podobnie do przedstawionej powyżej konstrukcji obiektów *Lens*. Różnicą jest konieczność przekazania współczynnika wielomianu zamiast ogniskowej i próbkowania oraz formuły na konkretny mod wielomianu w miejsce równania soczewki.

Tabela 4-4 Konstrukcja obiektu klasy *Zernike*

```
Zernike(int max_row, int max_col, double coeff, double  
(*ZernFunc)(double, double));
```

Wartości przesunięcia fazy w każdym pikselu bitmapy wyliczone są za pomocą algorytmu (Tabela 4-5).

Tabela 4-5 Obliczenie przesunięcia fazowego wprowadzanego przez aberrację

```
for (double col = -MAX_COL/2; col < MAX_COL/2; col++) {  
    for (double row = -MAX_ROW/2; row < MAX_ROW/2; row++) {  
        /*Ograniczenie apertura kołową jest konieczne, ze względu na  
        występowanie szczególnych właściwości wielomianów Zernikego jedynie w  
        obrębie koła jednostkowego. */  
        if( (pow(row/ (MAX_ROW/2) ,2) + pow(col/ (MAX_COL/2) ,2)) > 1.0 )  
        {  
            bitmap->  
            bmap[bitmap->index(row+MAX_ROW/2,col+MAX_COL/2)] = 0;  
            continue;  
        }  
        bitmap->  
        bmap[bitmap->index(row+MAX_ROW/2,col+MAX_COL/2)] =  
        ZernFunc(row/ (MAX_ROW/2), col/ (MAX_COL/2));  
    }  
    /* Uwzględnienie współczynnika wielomianu i poddanie wyniku operacji  
    modulo. Jest ona niezbędna w celu utożsamienia przesuwu fazy o  
    wielokrotności  $2\pi$ .*/  
    double tmp;  
    for(int i = 0; i < MAX_ROW*MAX_COL; i++) {  
        tmp = bitmap->bmap[i]*coeff;  
        bitmap->bmap[i] = (tmp - floor(tmp)); //modulo 1  
    }  
}
```

Nakładanie aberracji na soczewki

Po wygenerowaniu żądanych aberracji oraz soczewki należy je połączyć. Proces opisany w tabeli 4-6.

Tabela 4-6 Przykład generacji soczewki z aberracjami

```
// soczewka - Utworzony obiekt typu Lens
// zernik - Utworzony obiekt typu Zernike
/* Utworzenie wektora pełniącego rolę kontenera grupującego elementy
przeznaczone do sumowania fazy */
std::vector<DiffractiveStructure*> toMergeLens;
/* Umieszczenie wskaźników na obiekty w przygotowanym kontenerze */
toMergeLens.push_back(soczewka.get());
toMergeLens.push_back(zernik.get());
/* Przygotowanie bitmapy, w której umieszczony zostanie wynik
sumowania */
Bitmap merge(size,size);
/* Wywołanie metody sumującej opisanej w tabeli 4-7.
merge.mergeMaps(toMergeLens);
```

Procedura w sposób jawnny korzysta z niewyjaśnionej jeszcze w pracy metody `mergeMaps`. Jest ona przedstawiona w poniższej tabeli (Tabela 4-7). Składa się z metody klasy `Bitmap`, oraz pomocniczej funkcji zewnętrznej `outerMergeMaps`. Funkcja pomocnicza realizuje dodanie zawartości dwóch bitmap, a metoda klasy wykorzystuje ją do zsumowania całej zawartości wektora w interpretacji fazowej.

Tabela 4-7 Metoda sumowania fazy `Bitmap::mergeMaps`

```
void Bitmap::mergeMaps(std::vector<DiffractiveStructure*> &toMerge) {
/*wektor tymczasowy, umożliwia wykonanie procesu bez modyfikowania
danych w wektorze */
    std::vector<Bitmap> tmpB;
    for (auto it = toMerge.begin(); it < toMerge.end(); it++) {
/* Jako kolejne elementy wektora tymczasowego konstruowane są nowe
bitmapy na bazie podanego jako argument wektora struktur
dyfrakcyjnych. Warto zwrócić uwagę, że są to lokalnie alokowane
obiekty z zawartością będącą kopią swojego źródła, w odróżnieniu od
umieszczania w wektorze tymczasowym jedynie wskaźników na oryginalne
obiekty. Takie działanie nie zapewniłoby nienaruszalności zawartości
wektora bazowego. */
        tmpB.push_back(Bitmap(*(*it)->returnBitmap()));
    }
/* Funkcja pomocnicza sumuje po dwie bitmapy iterując po całym
wektorze. Dla n-tej iteracji, do n+1 bitmapy dodawane jest
poprzednich n, zebranych w n-tej bitmapie. */
    for (auto it = tmpB.begin() + 1; it < tmpB.end(); it++) {
        outerMergeMaps(&(*(it-1)),&(*it));
    }
/* Zawartość bitmapy, na której została wykonana metoda, zostaje
nadpisana wykonaną sumą. Dokonanie tej operacji wymagało
zdefiniowania operatora równości(operator=). */
```

```

try{
    *this = tmpB.back();
}
catch (const std::invalid_argument& e) {
    std::cerr << "exception: " << e.what() << std::endl;
}

/* Optymalna implementacja operacji modulo 1 */
double tmp = 0;
for(int i=0; i<row_count*col_count; i++) {
    tmp = this->bmap[i];
    this->bmap[i] = tmp - floor(tmp);
}

/*
/* Funkcja zewnętrzna, pomocnicza, sumująca zawartości par bitmap */
void outerMergeMaps(Bitmap* a, Bitmap* b) {
    int size = a->row_count*a->col_count;
    for(int i=0; i<size; i++)
        b->bmap[i] += a->bmap[i]; }

```

4e. Symulowanie natężeniowej odpowiedzi impulsowej

Symulowanie natężeniowej odpowiedzi impulsowej zostało zrealizowane na podstawie wzoru 3-6. Niestety, zaimplementowany algorytm najprawdopodobniej nie realizuje prawidłowo skalowania zmiennych przechodzących w formę częstotliwości przestrzennych, a co za tym idzie nie symuluje funkcji rozmycia punktu w sposób satysfakcyjny. Z tego powodu do symulacji numerycznych wykorzystany został program LightSword.

Zaimplementowane w programie będącym przedmiotem tej pracy inżynierskiej algorytmy pozwalają jednak na uzyskanie wyniku bardzo zbliżonego do pożądanego i z tego powodu zostały uwzględnione w interfejsie stworzonej aplikacji.

W tabeli 4-8 porównane zostały wyniki symulacji przeprowadzonej w programach LightSword i LeGenDA. Jak widać, obrazy wygenerowane programem LeGenDa charakteryzują się mniejszą rozdzielczością i przeskalonowanym centralnym obszarem obrazu.

Tabela 4-8 Porównanie symulacji PSF soczewki z aberracją Z20: LightSword - LeGenDA

LightSword	LeGenDA
Amplituda zespolona	Amplituda zespolona
Logarytm	Pierwiastek czwartego stopnia

Propagacja światła realizowana jest wewnątrz funkcji *fft*. Jest to funkcja zbyt rozbudowana, by umieszczać ją całą w niniejszej pracy. Została ona opatrzona komentarzami wewnątrz kodu programu. Działa w sposób następujący:

- Przygotowanie zmiennych pod transformatę zgodnie z dokumentacją biblioteki FFTW [23].
- Przemnożenie zawartości bitmapy przez kwadratowy czynnik fazowy. Ta operacja wymaga zapisania liczb zespolonych w postaci trygonometrycznej i wykonanie odpowiednich mnożeń. Dodatkowo całosć jest przemnożona przez -1^{x+y} w celu przedstawienia transformaty ze średnią wartością pośrodku bitmapy [25].

- Wykonanie transformaty funkcją FFTW.
- Przemnożenie bitmapy po transformacie przez dodatkowe zawarte we wzorze czynniki. W tym miejscu również, wyliczana wartość jest pierwiastkowana, bądź logarytmowana w celu zwiększenia dynamiki bitmapy. Jest to działanie analogiczne do zmiany długości czasu naświetlania podczas wykonywania fotografii.
- Normalizacja uzyskanych wartości do 1. Jest to działanie niezbędne ze względu na późniejszą generację pliku graficznego – wszystkie wartości mnożone są przez 255.

4f. Instrukcja korzystania z programu z wykorzystaniem interfejsu graficznego

Instalacja programu

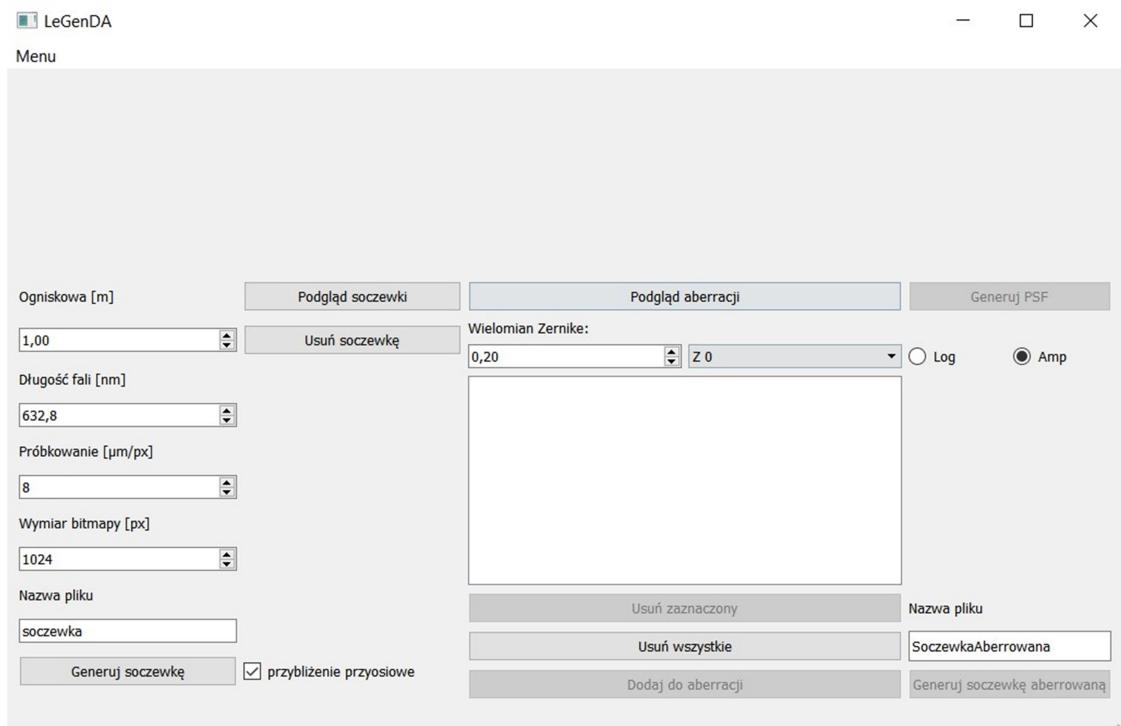
Podstawowym środowiskiem działania programu jest system operacyjny Windows 10. Nie jest sprawdzone działanie na pozostałych wersjach systemu Windows.

Nie ma przeciwskań do korzystania z programu na systemach Unixowych, wymaga to jednak własnoręcznej komplikacji z dostarczonych plików źródłowych. Program był z sukcesem testowo komplikowany na Arch Linux.

Program jest dystrybuowany w formie pliku ze wszystkimi niezbędnymi do jego działania bibliotekami i nie wymaga instalacji. Należy rozpocząć od wypakowania archiwum do wybranego katalogu. Następnie należy otworzyć plik „LeGenDA.exe”.

Generacja soczewki

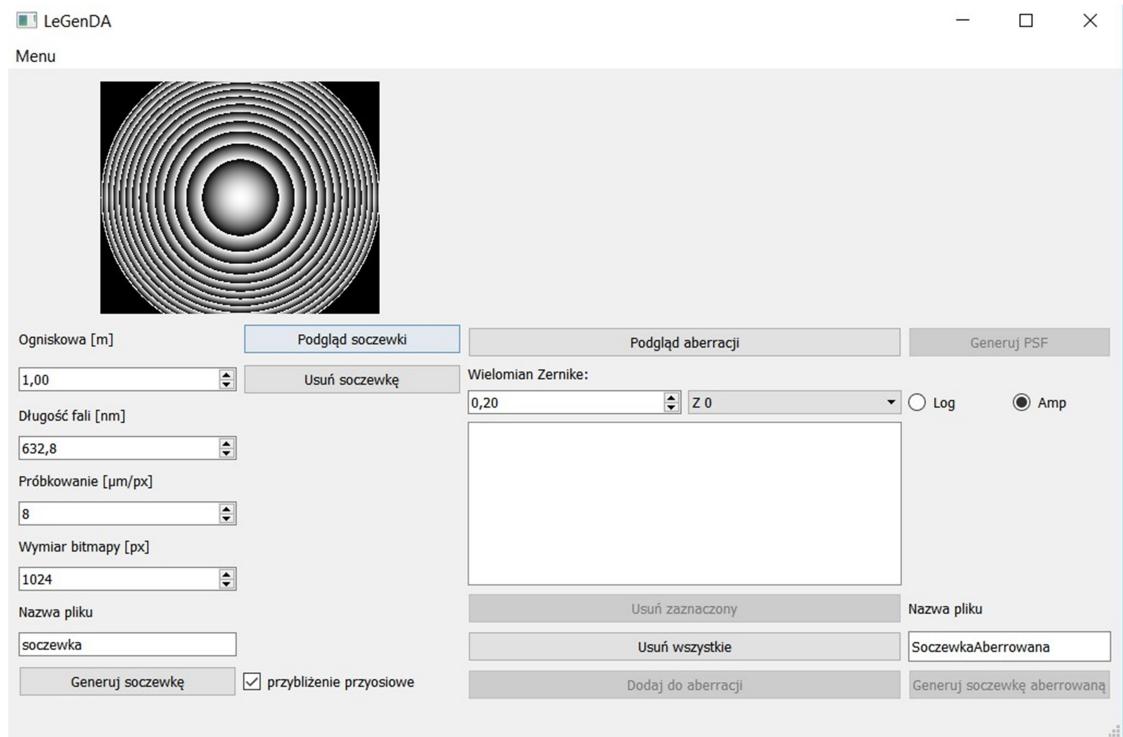
Program po otwarciu powinien wyglądać jak na rysunku 4-1.



Rys. 4-1 Okno główne programu

W pierwszej kolejności należy wybrać folder, gdzie zapisywane będą tworzone bitmapy. Można to uczynić poprzez pasek menu – wybierz folder zapisu.

Po wpisaniu parametrów soczewki w pierwszej kolumnie mamy możliwość obejrzenia tworzonej soczewki (Rys.4-2).



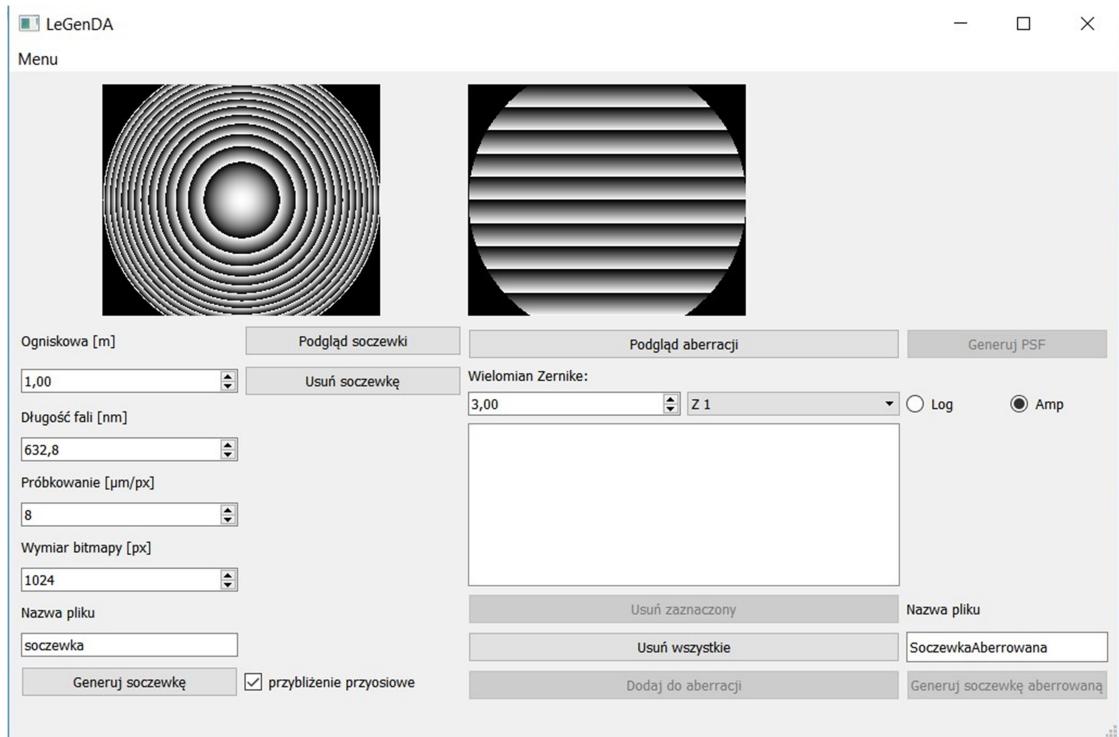
Rys. 4-2 Podgląd soczewki

Widoczny podgląd soczewki jest wygenerowaną bitmapą o rozmiarze 256×256 i próbkowaniu o wartości $\frac{\text{próbkowanie}}{\text{rozmiar bitmapy}/256}$. Ze względu na to przeskalowanie, na podględzie widoczny jest efekt Moiré, którego nie ma na bitmapie z poprawnie wygenerowaną soczewką.

Po dobraniu pożądanych parametrów w oparciu o dostępny podgląd, należy użyć przycisku *Generuj soczewkę*, po doprecyzowaniu czy ma być uwzględnione przybliżenie przyosiowe.

Wybór aberracji

Z rozwijanej listy należy wybrać rodzaj aberracji, od Z0 do Z20, a następnie wpisać współczynnik określający jej wielkość. Użytkownik ma możliwość oglądu wybranej aberracji.



Rys. 4-3 Podgląd aberracji

Po dodaniu aberracji przyciskiem „Dodaj do aberracji” do listy, użytkownik ma możliwość dodania kolejnych lub usunięcia istniejących.

Po dodaniu wszystkich zamierzonych aberracji do listy, należy posłużyć się przyciskiem „Generuj soczewkę aberrowaną” w celu utworzenia bitmapy w wybranym katalogu.

Istnieje również możliwość obliczenia funkcji rozmycia punktu wygenerowanej soczewki z aberracjami. W tym celu należy zaznaczyć generację amplitudy zespolonej, bądź jej logarytmu, a następnie potwierdzić przyciskiem „Generuj PSF”. Wszystkie wygenerowane bitmapy pojawią się w określonym przez użytkownika folderze.

5. Weryfikacja eksperimentalna

5a. Symulacja funkcji rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych

Użyte narzędzia

Symulacje zostały przeprowadzone w programie LightSword [26]. Program stworzony w ramach tej pracy umożliwia zasymulowanie funkcji rozmycia punktu, jest ona jednak mniej dokładna niż wygenerowana programem komercyjnym.

W celu uzyskania natężeniowej odpowiedzi impulsowej w programie LightSword należy przeprowadzić osiową propagację na odległość równą ogniskowej struktury.

Wyniki symulacji

Tabela 5-1 Obliczone numerycznie funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z aberracjami wyższych rzędów. Przedstawione w formie modułu amplitudy zespolonej.

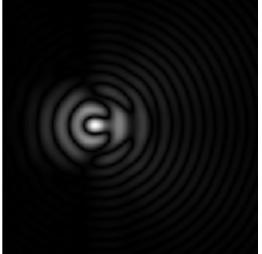
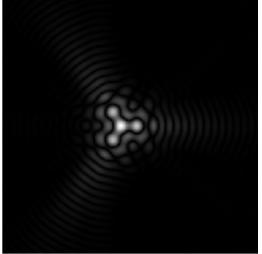
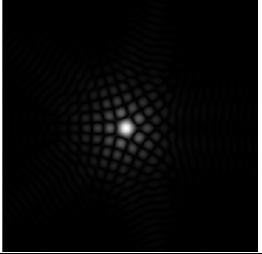
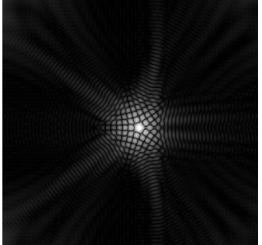
Współczynnik Zernikego	Aberracja	Ognisko
0,2	Z18	
0,2	Z19	
0,2	Z20	
0,2	Z20 (po zlogarytmowaniu)	

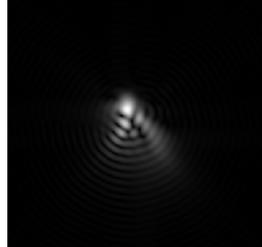
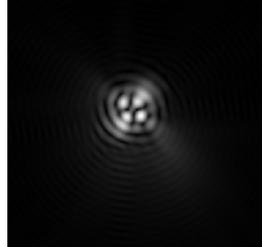
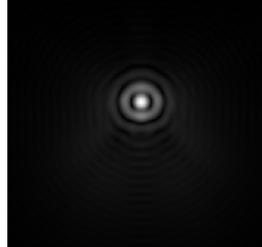
Tabela 5-2 Obliczone numerycznie funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z astygmatyzmem (Z3). Przedstawione w formie modułu amplitudy zespolonej.

Współczynnik Zernikego	Pierwsze ognisko	Plamka najmniejszego rozmycia	Drugie ognisko
0,1			
0,2			
0,5			
1			
2			

Tabela 5-3 Obliczone numerycznie funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z rozogniskowaniem, komą oraz aberracją sferyczną. Przedstawione w formie modułu amplitudy zespolonej bądź jej logarytmu (*) dla zmaksymalizowania przejrzystości.

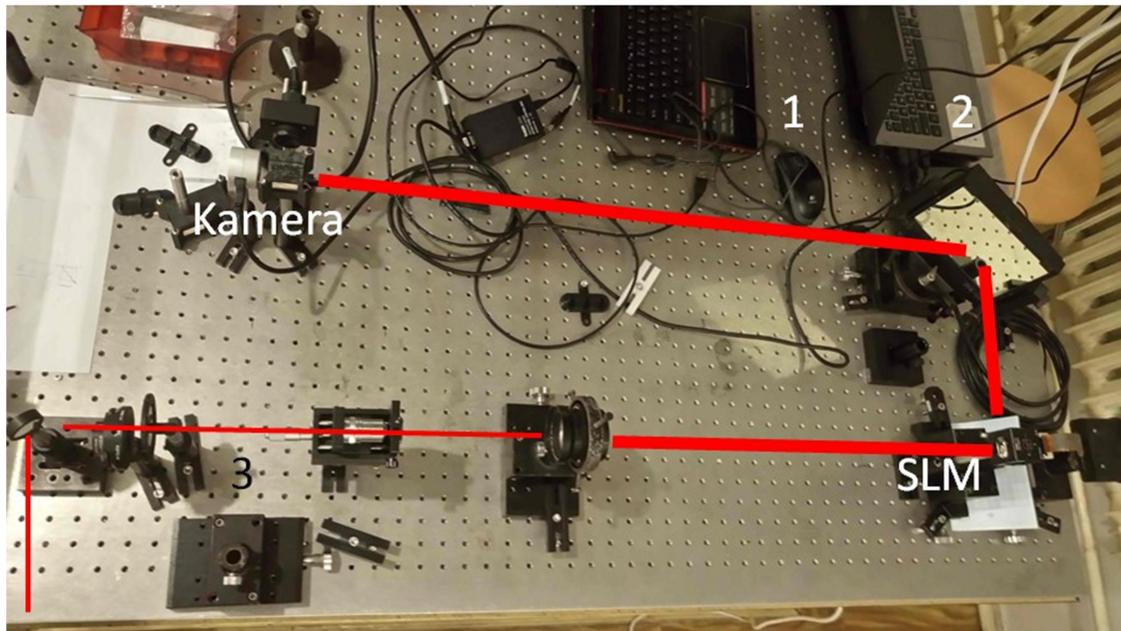
	Rozogniskowanie (Z4)	Koma (Z7)	Aberracja Sferyczna (Z12)
Współczynnik Zernikego	Ognisko	Ognisko	Ognisko
0 (soczewka)			
0,1			
0,2			
0,5			
1			
2			

Tabela 5-4 Obliczone numerycznie funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z kilkoma aberracjami podstawowymi.

Współczynnik Zernikego	Aberracja	Ognisko
0,2	Astygmatyzm + Koma + Rozogniskowanie	
0,2	Astygmatyzm + Koma + Aberracja sferyczna	
0,2	Rozogniskowanie + Koma + Aberracja sferyczna	

5b. Badanie funkcji rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z użyciem przestrzennego modulatora światła

Układ pomiarowy



Zdjęcie 5-1 Układ eksperymentalny z przestrzennym modulatorem światła (SLM).

Elementy układu:

- SLM – przestrzenny modulator światła HOLOEYE PLUTO;
- Kamera - acA2500-14 μ m - Basler ace;
- 1 – Komputer połączony z modulatorem kablem HDMI. Wyświetlane są na nim soczewki dyfrakcyjne;
- 2 – Komputer połączony z kamerą wejściem USB. Odbiera i zapisuje obraz przekazywany przez kamerę;
- 3 – Filtr + układ do generacji fali płaskiej – składa się z obiektywu skupiającego wiązkę lasera na pinholi, oraz soczewki ustawionej w odległości ogniskowej za pinholą. Do poprawnego ustawienia obiektywu formującego falę płaską została użyta płytka płasko-równoległa – tzw. „etalon”.

Odległość pomiędzy modulatorem światła, a matrycą kamery cyfrowej miała wartość 1,17 m i na taką też ogniskową zostały zaprojektowane soczewki dyfrakcyjne.

Modulator światła wymagał dodatkowego skorygowania aberracji własnych, co zostało uczynione poprzez nałożenie dodatkowej maski fazowej. Maska fazowa była dostępna w laboratorium jako narzędzie niezbędne do korzystania z modulatora.

Do oświetlenia SLM wykorzystano światło o długości 632,8nm, pochodzące z lasera He-Ne.

Zarejestrowana funkcja rozmycia punktu

Tabela 5-5 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z astygmatyzmem (Z3) wyświetlanych na SLM

Współczynnik Zernikego	Pierwsze ognisko	Plamka najmniejszego rozmycia	Drugie ognisko
0,1			
0,2			
0,5			
1			

Tabela 5-6 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z SA, rozogniskowaniem i komą wyświetlanych na SLM

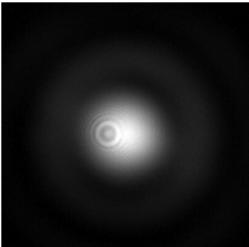
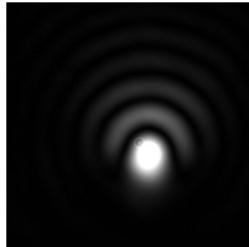
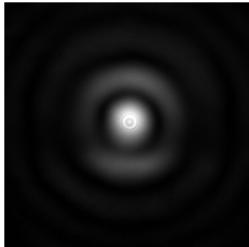
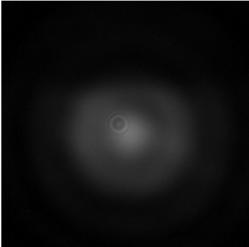
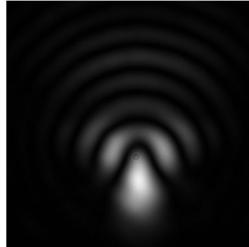
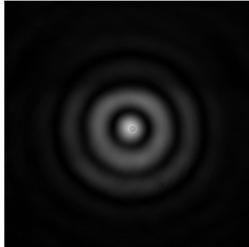
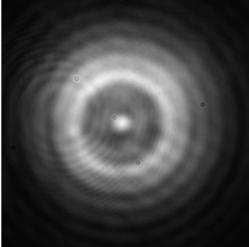
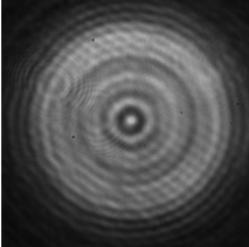
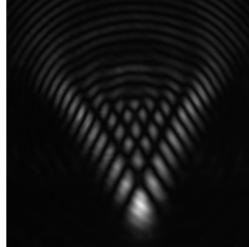
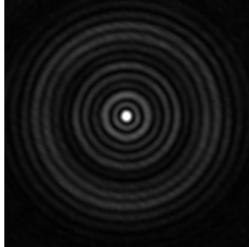
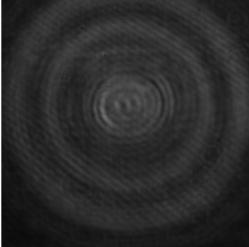
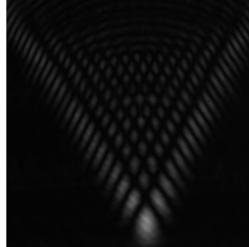
	Rozogniskowanie (Z4)	Koma (Z7)	Aberracja Sferyczna (Z12)
Współczynnik Zernikego	Ognisko	Ognisko	Ognisko
0 (soczewka)			
0,1			
0,2			
0,5			
1			
2			

Tabela 5-7 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych aberracjami wyższych rzędów wyświetlanych na SLM

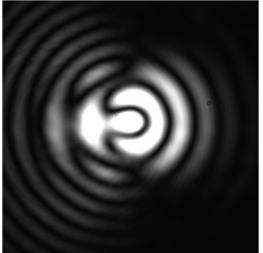
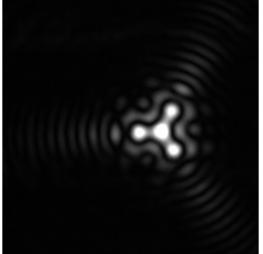
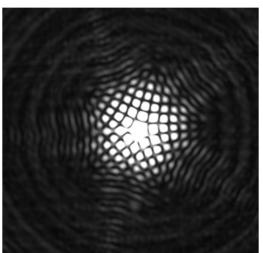
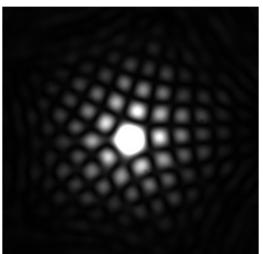
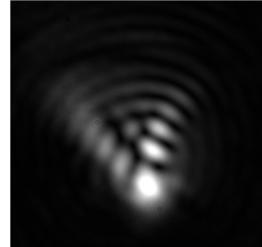
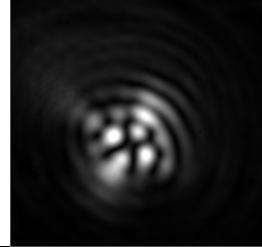
Współczynnik Zernikego	Aberracja	Ognisko
0,2	Z18	
0,2	Z19	
0,2	Z20	
0,2	Z20 mniej naświetlone	

Tabela 5-8 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z kilkoma aberracjami podstawowymi wyświetlane na SLM.

Współczynnik Zernikego	Aberracja	Ognisko
0,2	Astygmatyzm + Koma + Rozogniskowanie	
0,2	Astygmatyzm + Koma + Aberracja sferyczna	
0,2	Rozogniskowanie + Koma + Aberracja sferyczna	

Wnioski

Zarejestrowane rozkłady dyfrakcyjne zgadzają się z rozkładami zasymulowanymi. Wykazuje to, że wyświetlanie soczewek dyfrakcyjnych na przestrzennym modulatorze światła jest metodą skuteczną. Należy pamiętać, że dobre wyniki powiązane są z poprawieniem aberracji modulatora z użyciem maski fazowej.

Najmniej precyzyjnie zostało zasymulowane rozogniskowanie, a w szczególności obwiednia kształtu dyfrakcyjnego i jego centrum.

5c. Badanie funkcji rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych naświetlonych na kliszy

Układ pomiarowy

Wygenerowane soczewki dyfrakcyjne zostały wydrukowane drukarką laserową na kartce formatu A4. Następnie naświetlono struktury na folii holograficznej Slavich PFG01 przez 60s. z użyciem analogowego aparatu fotograficznego Minolta X-300s z obiektywem o ogniskowej 50mm przy przysłonie f/5,6. Do oświetlenia użyto dwóch lamp halogenowych ustawionych w odległości 72cm od kartki, po jej obu stronach. Istotne było policzenie odpowiedniej odległości pomiędzy folią holograficzną a fotografowanym obiektem, tak by zajął całą powierzchnię kłiszy. W tym celu posłużyono się równaniem soczewkowym Gaussa [1 strony 162, równanie 5.17]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}, \quad (5 - 1)$$

gdzie:

x – odległość przedmiotowa,

y – odległość obrazowa,

f – ogniskowa soczewki.

Wzór ten został użyty w celu wyznaczenia orientacyjnej odległości x, albowiem w celu wyznaczenia tej odległości precyzyjnie, wszystkie wartości odległości powinny być liczone od odpowiednich płaszczyzn głównych obiektywu.

W naszym wypadku struktury miały wymiary krótkiego boku kartki A4, tj. 21 cm, a długość krótkiego boku folii holograficznej miała wartość 2,1 cm, co skutkuje dziesięciokrotnym pomniejszeniem. Po uwzględnieniu tego warunku uzyskano żądaną odległość kartki od aparatu.

$$\frac{1}{x} + \frac{10}{x} = \frac{1}{50}, \quad (5 - 2)$$

$$x = 550\text{mm}.$$

Naświetlone struktury wywoływano w wywoływaczu Tetenal Eukobrom przez minutę i utrwalano w utrwalaczu Fomafix przez trzy minuty. Po odbielaniu w odbielaczu PBU-Amidol Bleach przez trzy minuty i wysuszeniu, ustawiony został następujący układ (Zdjęcie 5-2).



Zdjęcie 5-2 Układ eksperymentalny do rejestrowania funkcji rozmycia punktu naświetlonych soczewek dyfrakcyjnych

Układ do generacji fali płaskiej – składa się z obiektywu skupiającego wiązkę lasera na pinholi, oraz soczewki ustawionej w odległości ogniskowej za pinholą. Do poprawnego ustawienia obiektywu formującego falę płaską została użyta płytka płasko-równoległa – tzw. „etalon”.

Aparat cyfrowy – Canon EOS 650D ustawiony był w odległości ogniskowej za soczewką dyfrakcyjną. W tym wypadku odległość ta była równa 1 m, gdyż tak zostały zaprojektowane naświetlone struktury i taka była ogniskowa soczewek.

Rozmiar piksela matrycy tego aparatu to 4,29 μm. Rozdzielcość uzyskanych zdjęć to 5184 x 3456px. Zapisano obrazy bitowe o głębi 24 bity.

Funkcje rozmycia punktu wybranych soczewek

Tabela 5-9 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z astygmatyzmem (Z3) naświetlonych na folii holograficznej

Współczynnik Zernikego	Pierwsze ognisko	Plamka najmniejszego rozmycia	Drugie ognisko
1			

Tabela 5-10 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z SA, rozogniskowaniem i komą naświetlonych na folii holograficznej

	Rozogniskowanie (Z4)	Koma (Z7)	Aberracja Sferyczna (Z12)
Współczynnik Zernikego	Ognisko	Ognisko	Ognisko
0,1			
1			
2			

Tabela 5-11 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z Z18, Z19, Z20 i aberracją mieszana naświetlonych na folii holograficznej

Współczynnik Zernikego	Aberracja	Ognisko
0,2	Z18	
0,2	Z19	
0,2	Z20	
0,2	Astygmatyzm + Koma + Aberracja sferyczna	

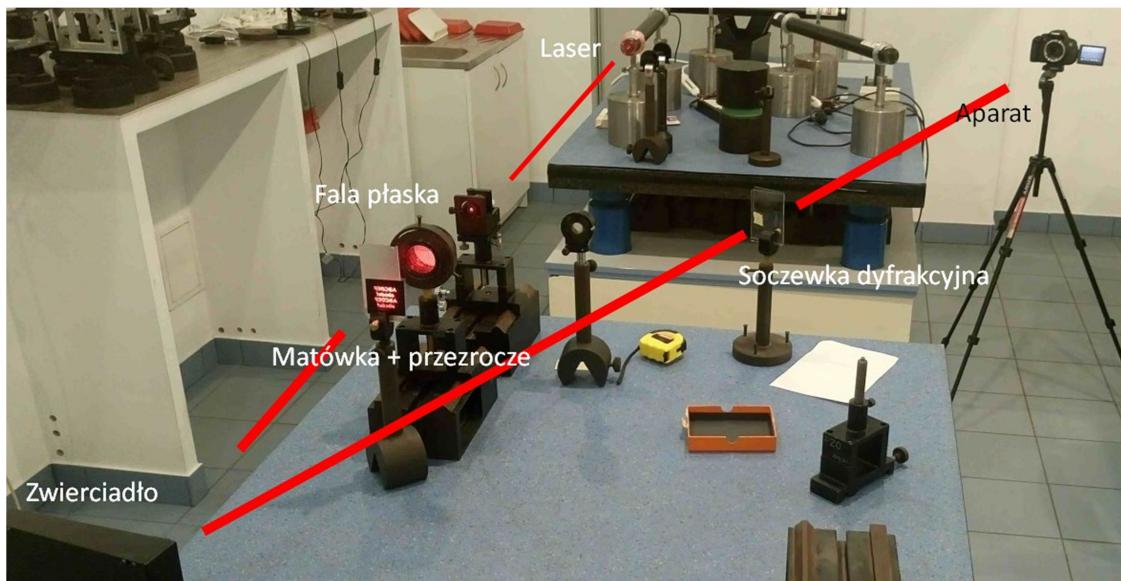
Wnioski

Zarejestrowane natężeniowe odpowiedzi impulsowe (PSF) różnią się od rozkładów natężenia pochodzących z symulacji komputerowych. Wynika to z dodatkowych aberracji wprowadzanych do układu przez elementy optyczne niezbędne do wygenerowania fali płaskiej. Nie było prostej metody poprawienia aberracji, jak w przypadku rozpatrywanym poprzednio – wyświetlanie soczewek z użyciem modulatora światła. Użyte obiektywy obarczone są przede wszystkim aberracjami podstawowymi: astygmatyzmem, aberracją sferyczną oraz komą, w związku z czym funkcje rozmycia punktu soczewek z tymi aberracjami okazały się najbardziej zbliżone do kształtu rozkładu oczekiwaneego. Wyraźniejsze efekty widoczne są dla soczewek dyfrakcyjnych z większymi aberracjami, ponieważ dają one większy wkład do kształtowania frontu falowego, niż aberracje układu optycznego.

5d. Obrazowanie w świetle monochromatycznym z użyciem wygenerowanych soczewek

Układ pomiarowy

Obrazowanie zostało przeprowadzone w układzie $2f - 2f$ zachowującym rzeczywiste rozmiary obiektu (Zdjęcie 5-3)



Zdjęcie 5-3 Układ do obrazowania w świetle monochromatycznym z użyciem soczewek dyfrakcyjnych

Układ eksperymentalny składał się z następujących elementów:

Laser – Laser He-Ne emitujący światło o długości 632,8 nm.

Fala płaska – generowana jest za pomocą obiektywu skupiającego wiązkę lasera na pinholi, oraz soczewki ustawionej w odległości ogniskowej za pinholą. Do poprawnego ustawienia obiektywu formującego falę płaską została użyta płytka płasko-równoległa – tzw. „etalon”.

Matówka + przezrocz – matówka wstawiona przed przezroczem ma za zadanie wymusić losowy rozkład fazy i rozproszyć światło, tak by zniwelować cień geometryczny obiektu. Przezrocz jest przedmiotem obrazowanym.

Zwierciadło – jest wymagane w celu przedłużenia układu optycznego do wymaganych czterech metrów.

Soczewka dyfrakcyjna obrazuje przezrocz na matrycy aparatu cyfrowego Canon EOS 650D.

Zarejestrowane obrazy

Tabela 5-12 Obrazy przezroczu obrazowanego w świetle laserowym przez soczewki z astygmatyzmem

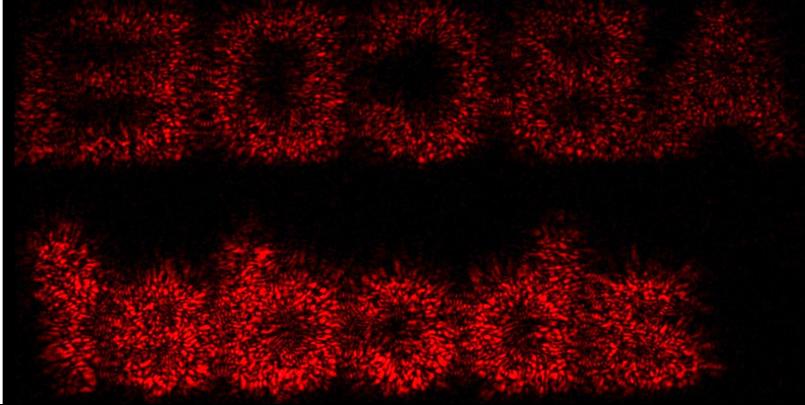
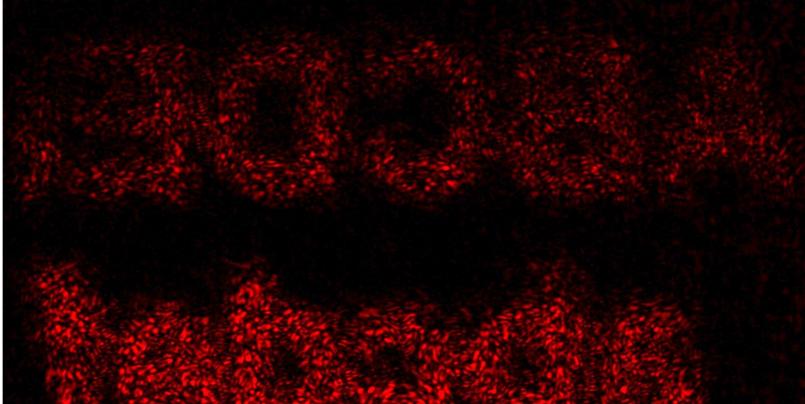
Współczynnik Zernikego	Astygmatyzm (Z3)
	Obraz
0,1	
1	

Tabela 5-13 Obrazy przezroczu obrazowanego w świetle laserowym przez soczewki z komą

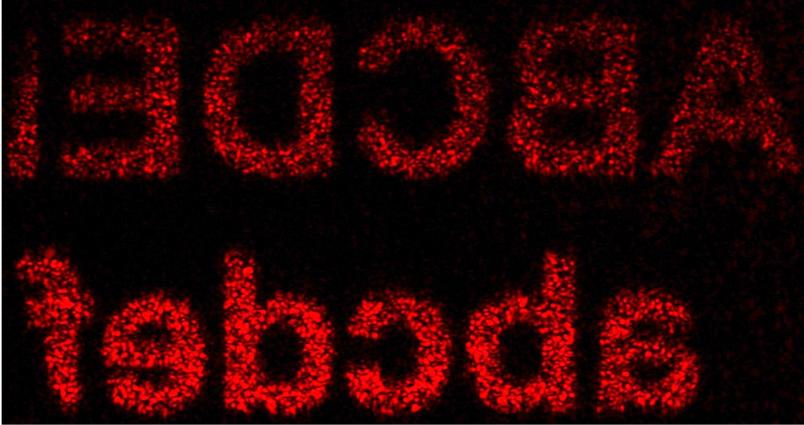
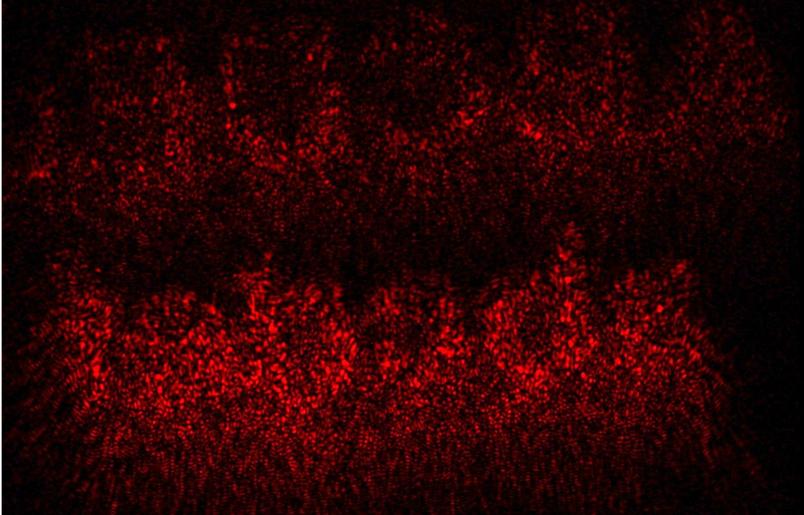
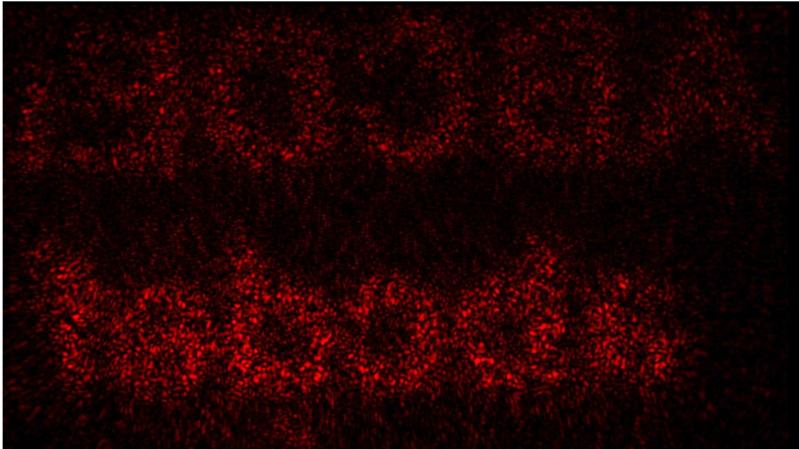
Współczynnik Zernikego	Koma (Z7) Obraz
0,1	
2	

Tabela 5-14 Obrazy przezroczu obrazowanego w świetle laserowym przez soczewki z aberracją sferyczną

Współczynnik Zernikego	Aberracja sferyczna (Z12)
	Obraz
0,1	
1	

Wnioski

Możliwe jest przeprowadzenie obrazowania w świetle monochromatycznym z wykorzystaniem soczewek dyfrakcyjnych. Zwiększenie aberracji na soczewce skutkuje wyraźnym pogorszeniem jakości obrazowania. Dodatkowym utrudnieniem w tym rodzaju obrazowania jest występowania szumu światła laserowego – tzw. spekli.

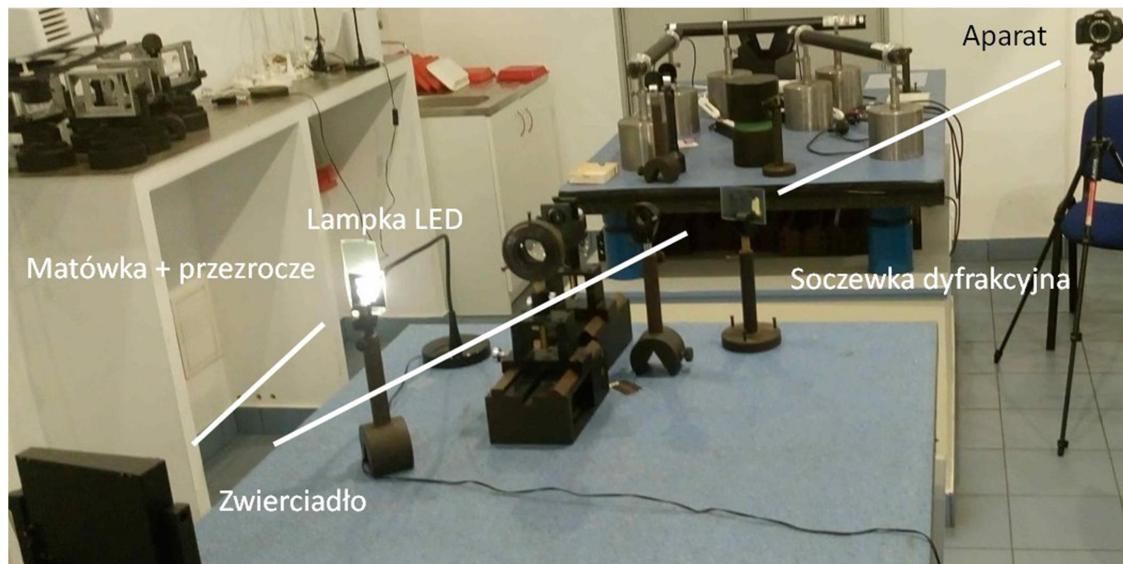
W szczególności aberracja komatyczna powoduje charakterystyczne wyciągnięcie – rozmycie w dół – obrazu.

Zarejestrowane zdjęcia potwierdzają zależność wielkości aberracji od odległości od osi optycznej. Litery znajdujące się dalej od osi optycznej są bardziej zniekształcone.

5e. Obrazowanie w świetle białym z użyciem wygenerowanych soczewek.

Układ pomiarowy

Obrazowanie zostało przeprowadzone w układzie $2f - 2f$ zachowującym rzeczywiste rozmiary obiektu (Zdjęcie 5-4)



Zdjęcie 5-4 Układ do obrazowania w świetle białym z użyciem soczewek dyfrakcyjnych

Układ eksperymentalny składał się z następujących elementów:

Lampka LED – Źródło światła białego.

Matówka + przezrocz – matówka wstawiona przed przezroczem ma za zadanie wymusić losowy rozkład fazy i rozproszyć światło, tak by zniwelować cień geometryczny obiektu. W obrazowaniu z zastosowaniem lasera było to bardziej istotne – w świetle białym front falowy od początku jest falą rozbieżną. Przezrocz jest przedmiotem obrazowanym.

Zwierciadło – jest wymagane w celu przedłużenia układu optycznego do wymaganych czterech metrów.

Soczewka dyfrakcyjna obrazuje przezrocz na matrycy aparatu cyfrowego Canon EOS 650D.

Zarejestrowane obrazy

Tabela 5-15 Obrazy przezroczego obrazowanego w świetle białym przez soczewki z astygmatyzmem

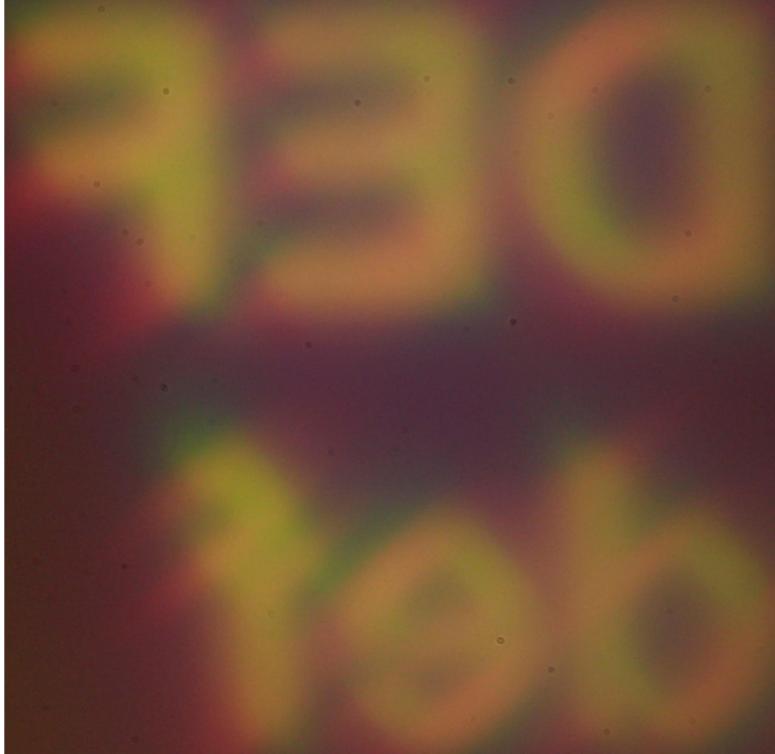
Współczynnik Zernikego	Astygmatyzm (Z3)
0,1	
1	

Tabela 5-16 Obrazy przezroczu obrazowanego w świetle białym przez soczewki z komą

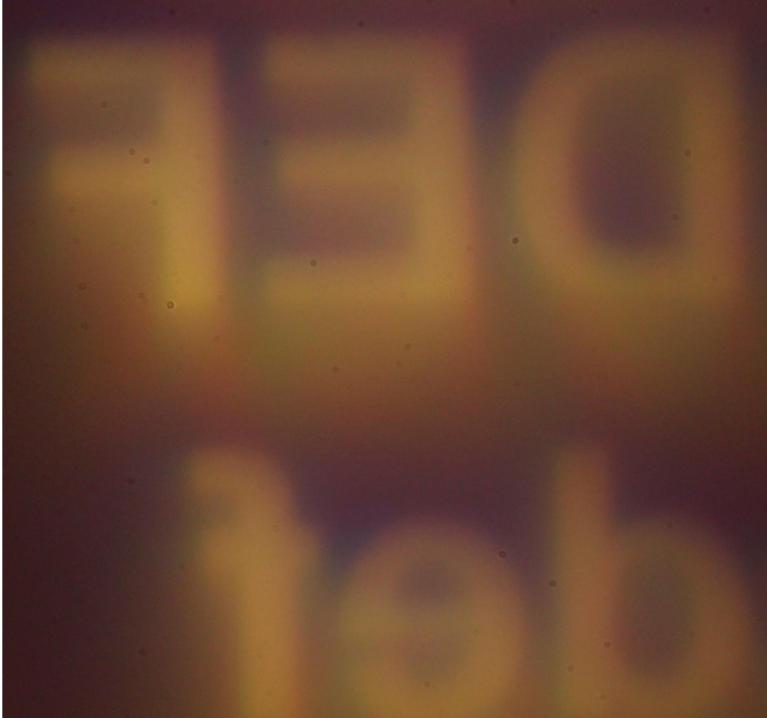
Współczynnik Zernikego	Koma (Z7)	
		Obraz
0,1		
2		

Tabela 5-17 Obrazy przezroczego obrazowanego w świetle białym przez soczewki z aberracją sferyczną

Współczynnik Zernikego	Aberracja sferyczna (Z12) Obraz
0,1	
1	

Wnioski

Możliwe jest przeprowadzenie obrazowania w świetle białym za pomocą soczewek dyfrakcyjnych. Struktury dyfrakcyjne projektowane są dla konkretnej długości fali, co skutkuje występowaniem dyspersji na powstałych obrazach. Długość ogniskowa obrazowania jest inna dla każdej długości fali. Jest to efekt widoczny na zdjęciach, jednak nie w sposób uniemożliwiający obrazowanie.

Tak jak w przypadku obrazowania w świetle monochromatycznym wyraźny jest wpływ aberracji soczewek na uzyskany obraz. W mojej subiektywnej ocenie największy wpływ na czytelność powstałego obrazu ma tutaj astygmatyzm.

Dodatkową cechą przeprowadzonego eksperymentu jest jego prostota. Jest możliwe powtórzenie tego doświadczenia w całości w warunkach domowych. Koszty takiego przedsięwzięcia są znikome, z uwagi na fakt, że większość wymaganych akcesoriów jest w posiadaniu przeciętnego człowieka – aparat analogowy, klisza fotograficzna i lampka LED.

5f. Opracowanie niepewności pomiarowych

Niepewności pomiarowe dotyczące procesu naświetlania folii holograficznej

Optymalna odległość folii holograficznej od obiektu została obliczona w równaniu 5-2 na wartość $x = 550\text{mm}$.

Wartość ta została odmierzona w układzie z wykorzystaniem metrówki o podziałce 1mm. Na tej podstawie określona została niepewność wzorcowania przyrządu na połowę wartości dzia³ki elementarnej [27]: $\Delta x = \frac{1}{2}\text{mm}$.

Niepewność pomiaru odleg³oœci okreœlam na:

$$u(x) = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} \approx 0,29\text{mm} \quad (5 - 3)$$

Maksymalny błąd pomniejszenia naświetlonej struktury to:

$$u(M) = u\left(\frac{y}{x}\right) = -\frac{y}{x^2}u(x) \approx 0,00005 \quad (5 - 4)$$

Uzyskana wartość daje nam różnicę w przyblizeniu $10,5\text{ }\mu\text{m}$ po zapisaniu obrazu na folii holograficznej. Zgodnie ze specyfikacją producenta folii holograficznej [28] jej rozdzielcoœć pozwala zapisać detale o wielkoœci $0,33\mu\text{m}$. Co za tym idzie, niepewność pomiaru odleg³oœci folii holograficznej od kartki z wydrukowaną strukturą jest wystarczaj¹ca, by nieznacznie wpływaœ na zapisany obraz.

Zmiana efektywnego pomniejszenia jest równoznaczna ze zmian¹ wartości próbkowania struktury i w efekcie wartości ogniskowej soczewki.

W przypadku, gdy generowana jest soczewka o próbkowaniu $10\text{ }\mu\text{m}$, rozmiarze $1040 \times 1040\text{ px}$ i ogniskowej 1 m , próbkowanie struktury po uwzglêdnieniu błędu wzrośnie maksymalnie do $10,01\mu\text{m}$. Ta różnica nie wpływa w zauważalny sposób na d³ugoœć ogniskowej soczewki.

Dla porównania, zgodnie z symulacjami przeprowadzonymi w programie LightSword, zwiększenie wartości próbkowania do $11\text{ }\mu\text{m}$ skutkuje zmniejszeniem wartości ogniskowej o odleg³oœć zbliżoną do 170 mm .

Podsumowując, niepewności pomiarowe nie wpłynęły na wynik eksperimentu.

6. Podsumowanie

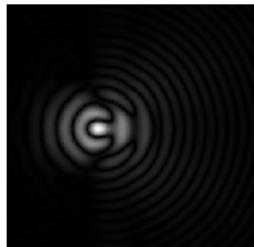
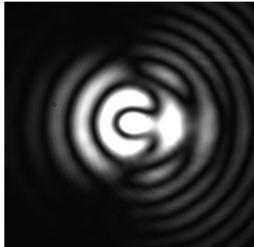
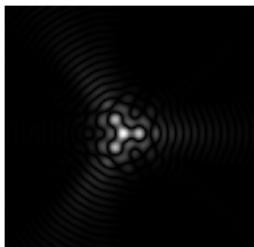
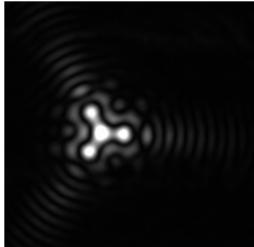
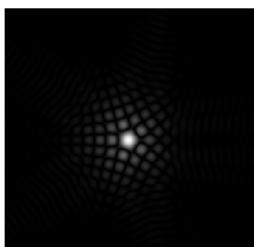
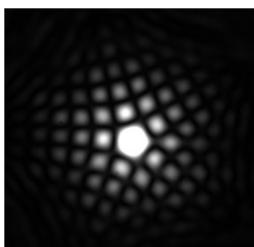
Cel pracy inżynierskiej został osiągnięty – stworzony został program komputerowy generujący rozkład fazowy soczewki sferycznej z określonymi aberracjami i zweryfikowane zostało jego działanie. Dodatkowo przeprowadzone zostało obrazowanie z użyciem wygenerowanych soczewek.

Zrealizowana aplikacja LeGenDA umożliwia generację soczewek z wybranymi aberracjami. Komersyjne oprogramowanie LightSword pozwala na precyzyjne symulowanie propagacji światła przez wygenerowane soczewki (Tab. 6-1). Najmniej wiernie zostało zasymulowane rozogniskowanie, a w szczególności obwiednia kształtu dyfrakcyjnego i jego centralny obszar.

Wykorzystując oba programy użytkownik jest w stanie zaprojektować strukturę kształtującą front falowy w pożądany sposób – przykładowo w celu poprawienia aberracji istniejącego układu.

Wykorzystanie przestrzennego modulatora światła do weryfikacji funkcji rozmycia punktu wygenerowanej struktury jest metodą bardzo precyzyjną. W celu uzyskania najlepszych wyników, konieczne jest dostosowanie dynamiki wyświetlanej bitmapy do faktycznej dynamiki modulatora, oraz poprawienie jego ewentualnych aberracji. Maska fazowa poprawiająca aberracje modulatora może z powodzeniem zostać nałożona na wygenerowaną w programie strukturę.

Tabela 6-1 Porównanie funkcji rozmycia punktu zasymulowanych w programie LightSword, ze zdjęciami uzyskanyimi w eksperymencie z użyciem przestrzennego modulatora światła.

Aberracja	Współczynnik	Symulacja LS	Weryfikacja SLM
Z18	0,2		
Z19	0,2		
Z20	0,2		

Z20 – zmniejszona dynamika	0,2		
Z7	0,2		
Z3	1		
Z3	1		
Z3	1		
Z4	1		

Z12	1		
Z3+Z7+Z4	0,2		
Z7+Z12+3	0,2		
Z4+Z7+Z12	0,2		

Program LeGenDA może również z powodzeniem zostać wykorzystany do celów dydaktycznych w zakresie zrozumienia wpływu podstawowych aberracji na jakość obrazowania. Możliwe jest wygenerowanie soczewek obarczonych różnymi kombinacjami aberracji, a następnie naświetlenie ich na folii holograficznej i przeprowadzenie obrazowania z ich udziałem, co wykazane zostało w rozdziale 5d. Warunkiem koniecznym powodzenia eksperymentu jest poprawne wykonanie procesu naświetlania, wywoływania i odbielania folii holograficznej.

Wyraźny jest wpływ poszczególnych aberracji na jakość powstałego obrazu. Czynnikiem niezbędnym do przeprowadzenia takiego eksperymentu jest posługiwanie się stosunkowo pozbawionym aberracji układem optycznym. W przeciwnym wypadku aberracje układu zasłaniają badane aberracje soczewek dyfrakcyjnych. W tym wypadku należy rozważyć wybór soczewek obarczonych dużymi aberracjami do badań, tak by ich wpływ na formowanie światła znacznie przewyższał wpływ układu optycznego.

W rozdziale 5e zostało opisane obrazowanie w świetle białym, w tym wypadku jednak separacja wpływu poszczególnych aberracji na powstały obraz jest utrudniona ze względu na występowanie dodatkowych aberracji chromatycznych.

7. Bibliografia

1. **Hecht Eugene.** *Optyka*. Warszawa : Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012. 978-83-01-17105-6.
2. **Gross Herbert.** Handbook of Optical Systems: Vol. 4 Survey of Optical Instruments. 36.9.1, str. 75.
3. [Online] <https://www.edmundoptics.com/optics/laser-optics/laser-lenses/>.
4. [Online] https://www.nikon.pl/pl_PL/product/nikkor-lenses.
5. [Online] <https://www.celestron.com/products/astro-fi-90-mm-refractor-telescope>.
6. [Online] <http://www.if.pw.edu.pl/~labopt/instrukcje/POlab10-11.pdf>.
7. **L. N. Hazra Claude A. Delisle.** Higher order kinoform lenses: diffraction efficiency and aberrational properties. *Optical Engineering*. 1997, Tom 36, 5.
8. **Goodman Joseph W.** *Introduction to Fourier Optics*. Englewood, Colorado : Roberts & Company. 0974707724.
9. **Laikin Milton.** *Lens Design*. Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2007. ISBN -10: 0-8493-8278-5.
10. **Miyamoto Kenri.** The Phase Fresnel Lens. *Journal of the Optical Society of America*. 1961, Tom 51, 1.
11. **Gniadek Kazimierz.** *Optyczne przetwarzanie informacji*. Warszawa : Wydawnictwo Naukowe PWN, 1992. 83-01-10428-7.
12. **Robert Fischer Biljana Tadic-Galeb, Paul Yoder.** *Optical System Design, Second Edition*. The McGraw-Hill , 2008 . 9780071472487.
13. [Online] http://www.telescope-optics.net/aberrations.htm#caused_by.
14. **Kingslake Rudolf.** *Optical System Design*. Londyn : Academic Press, 1983. 0-12-408-660-8.
15. **Maeda Patrick Y.** [Online]
<ftp://ftp.bioeng.auckland.ac.nz/jtur044/references/introductory/zernike-wavefront-aberrations.pdf>.
16. **Bely Pierre Y.** *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*. Nowy Jork : Springer-Verlag, 2003. 0-387-95512-7.
17. **Vasudevan Lakschminarayanan Andre Fleck.** Zernike Polynomials: A guide. *Journal of Modern Optics*. 2011, Tom 58, 7, strony 545 - 561.
18. **James C. Wyant Katherine Creath.** Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology. *Applied Optics and Optical Engineering*. Tom XI.
19. [Online] http://www.telescope-optics.net/zernike_aberrations.htm.
20. **Smith Warren J.** *Modern Optical Engineering: The Design of Optical Systems*. McGraw-Hill, 2000. 0-07-136360-2.
21. [Online] <https://holoeye.com/spatial-light-modulators/>.
22. [Online] http://en.cppreference.com/w/cpp/memory/unique_ptr.
23. [Online] <http://fftw.org/>.
24. [Online] <http://easybmp.sourceforge.net/>.

25. [Online] <http://www.fftw.org/faq/section3.html#centerorigin>.
26. [Online] <http://www.orteh.pl/strona/24/lightsword>.
27. **J. Gałzka - Friedman K. Szlachta.** *Jak opracowywać i interpretować wyniki pomiarów.* Warszawa : OWPW, 2014. 978-83-7814-264-5.
28. [Online] <https://www.integraf.com/shop/pfg-01-holographic-film-plates>.
29. [Online]
http://www.cfao.ucolick.org/pubs/presentations/eyedesign/06_Aberations_JP.pdf.
30. [Online] http://en.cppreference.com/w/cpp/memory/unique_ptr/make_unique.
31. [Online] http://www.telescope-optics.net/diffraction_pattern_and_aberrations.htm.
32. [Online] <http://www.ikea.com/pl/pl/catalog/products/50315644/>.

8. Dodatkowe informacje

8a. Spis rysunków

Rys. 3-1 Rozbieżność frontu falowego względem idealnej sfery – określa aberracje	17
Rys. 3-2 Aberracja sferyczna	19
Rys. 3-3 Płaszczyzna główna wejściowa	20
Rys. 3-4 Dodatnia koma	21
Rys. 3-5 Krzywizna pola Petzvala	22
Rys. 3-6 Dystorsja	24
Rys. 4-1 Okno główne programu	35
Rys. 4-2 Podgląd soczewki.....	36
Rys. 4-3 Podgląd aberracji.....	37

8b. Spis tabel

Tabela 3-1 Astygmatyzm. Zdjęcia zarejestrowane w układzie eksperymentalnym	21
Tabela 4-1 Macierz zawierająca informacje o pikselach.....	29
Tabela 4-2 Konstruktor soczewki.....	30
Tabela 4-3 Wyliczanie rozkładu fazy soczewki	30
Tabela 4-4 Konstrukcja obiektu klasy <i>Zernike</i>	31
Tabela 4-5 Obliczenie przesunięcia fazowego wprowadzanego przez aberrację	31
Tabela 4-6 Przykład generacji soczewki z aberracjami.....	32
Tabela 4-7 Metoda sumowania fazy Bitmap::mergeMaps	32
Tabela 4-8 Porównanie symulacji PSF soczewki z aberracją Z20: Lightsword - LeGenDA.....	34
Tabela 5-1 Obliczone numerycznie funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z aberracjami wyższych rzędów. Przedstawione w formie modułu amplitudy zespolonej	38
Tabela 5-2 Obliczone numerycznie funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z astygmatyzmem (Z3). Przedstawione w formie modułu amplitudy zespolonej.	39
Tabela 5-3 Obliczone numerycznie funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z rozogniskowaniem, komą oraz aberracją sferyczną. Przedstawione w formie modułu amplitudy zespolonej bądź jej logarytmu (*) dla zmaksymalizowania przejrzystości.....	40
Tabela 5-4 Obliczone numerycznie funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z kilkoma aberracjami podstawowymi.....	41
Tabela 5-5 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z astygmatyzmem (Z3) wyświetlanych na SLM.....	43

Tabela 5-6 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z SA, rozogniskowaniem i komą wyświetlanych na SLM	44
Tabela 5-7 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych aberracjami wyższych rzędów wyświetlanych na SLM	45
Tabela 5-8 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z kilkoma aberracjami podstawowymi wyświetlane na SLM	46
Tabela 5-9 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z astygmatyzmem (Z3) naświetlonych na folii holograficznej	48
Tabela 5-10 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z SA, rozogniskowaniem i komą naświetlonych na folii holograficznej	48
Tabela 5-11 Funkcje rozmycia punktu soczewek dyfrakcyjnych z Z18, Z19, Z20 i aberracją mieszaną naświetlonych na folii holograficznej	49
Tabela 5-12 Obrazy przezroczystego obrazowanego w świetle laserowym przez soczewki z astygmatyzmem	51
Tabela 5-13 Obrazy przezroczystego obrazowanego w świetle laserowym przez soczewki z komą	52
Tabela 5-14 Obrazy przezroczystego obrazowanego w świetle laserowym przez soczewki z aberracją sferyczną	53
Tabela 5-15 Obrazy przezroczystego obrazowanego w świetle białym przez soczewki z astygmatyzmem	55
Tabela 5-16 Obrazy przezroczystego obrazowanego w świetle białym przez soczewki z komą	56
Tabela 5-17 Obrazy przezroczystego obrazowanego w świetle białym przez soczewki z aberracją sferyczną	57
Tabela 6-1 Porównanie funkcji rozmycia punktu zasymulowanych w programie LightSword, ze zdjęciami uzyskanymi w eksperymencie z użyciem przestrzennego modulatora światła	60