

Uniwersytet Warszawski  
Wydział Fizyki

Michał Dąbrowski

Nr albumu: 290853

Przestrzenna modulacja wiązki  
o dowolnym rozkładzie amplitudy i fazy

Praca licencjacka  
na kierunku FIZYKA

w zakresie FIZYKI DOŚWIADCZALNEJ

w ramach STUDIÓW INDYWIDUALNYCH

Praca wykonana pod kierunkiem  
dra **Wojciecha Wasilewskiego**  
Zakład Optyki  
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Warszawa, sierpień 2012

## **Oświadczenie kierującego pracą**

Oświadczam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Data

Podpis kierującego pracą

## **Oświadczenie autora (autorów) pracy**

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data

Podpis autora (autorów) pracy

## **Streszczenie**

W ramach pracy zbudowano i przetestowano układ umożliwiający przestrzenne kształtowanie amplitudy i fazy wiązki światła. Omówiono zasadę działania głównego elementu układu – przestrzennego modulatora fazy (SLM). Przy użyciu transformaty Fouriera wyjaśniono możliwość kształtowania fazy wiązki światła. Omówiono zasadę działania i przykłady samodzielnie wytworzonych fazowych siatek dyfrakcyjnych. Napisano programy komputerowe umożliwiające sterowanie pracą modulatora i kamery CCD. Dokonano kalibracji układu, wyznaczając macierze ABCD układu dla różnych przekrojów powierzchni modulatora. Następnie wykonano liczne testy sprawdzające precyzję działania układu: przeanalizowano propagację wiązki gaussowskiej, możliwość precyzyjnej kontroli interferencji dwóch wiązek wytworzonych na modulatorze oraz pokazano metodę polepszenia ogniskowania wiązki wysłanej z modulatora.

## **Słowa kluczowe**

modulacja fazy, modulacja amplitudy, SLM, optyka fourierowska, hologram

## **Dziedzina pracy (kody wg programu Socrates-Erasmus)**

13.2 Fizyka

## **Klasyfikacja tematyczna**

PACS:

42.30.Kq Fourier optics

42.30.Lr Modulation and optical transfer functions

42.40.Jv Computer-generated holograms

## **Tytuł pracy w języku angielskim**

Spatial light modulation with unlimited distribution of amplitude and phase

# Spis treści

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| <b>Wprowadzenie</b>                                    | 5  |
| <b>1. Wstęp teoretyczny</b>                            | 6  |
| 1.1. Działanie soczewki w języku transformaty Fouriera | 6  |
| 1.2. Modulacja amplitudy maską fazową                  | 7  |
| 1.3. Optyka wiązek gaussowskich                        | 8  |
| <b>2. Przestrzenny modulator fazowy</b>                | 9  |
| 2.1. Zasada działania modulatora                       | 9  |
| 2.2. Schemat układu pomiarowego                        | 10 |
| <b>3. Sterowanie układem pomiarowym</b>                | 12 |
| 3.1. Program do obsługi modulatora                     | 12 |
| 3.2. Program do obsługi kamery CCD                     | 13 |
| 3.3. Skanowanie powierzchni modulatora                 | 14 |
| <b>4. Testowanie i kalibracja układu</b>               | 15 |
| 4.1. Wytwarzanie fazowych siatek dyfrakcyjnych         | 15 |
| 4.2. Odtworzenie macierzy ABCD układu                  | 17 |
| 4.3. Propagacja wiązki gaussowskiej                    | 19 |
| <b>5. Praktyczne zastosowania</b>                      | 21 |
| 5.1. Precyzyjna kontrola interferencji                 | 21 |
| 5.2. Ogniskowanie wiązki w punkcie                     | 22 |
| <b>Podsumowanie</b>                                    | 25 |
| <b>Podziękowania</b>                                   | 26 |
| <b>Bibliografia</b>                                    | 27 |

# Wprowadzenie

Celem pracy licencjackiej była budowa i wykonanie testów układu umożliwiającego wytworzenie wiązek światła o dowolnym przestrzennym rozkładzie amplitudy i fazy. Główny element układu stanowi przestrzenny modulator fazowy – urządzenie składające się z matrycy komórek wypełnionych ciekłym kryształem, które umożliwia wprowadzenie dodatkowej fazy do wiązki padającej na powierzchnię modulatora. Pozwala to na rozdzielenie natężenia światła pomiędzy poszczególne rzędy ugięcia fazowej siatki dyfrakcyjnej wytworzonej przez modulator. W ten sposób, po wyznaczeniu kalibracji układu doświadczalnego (zachowując całkowite natężenie światła), możemy otrzymać wiązkę o zadanym rozkładzie amplitudy i fazy w interesującej nas płaszczyźnie.

Zbudowany w ramach pracy układ posłuży w przyszłości do wytworzenia wiązki pompującej komórkę z parami atomów rubidu, która stanowi model pamięci kwantowej budowanej w Laboratorium Pamięci Kwantowych na Wydziale Fizyki UW. Rozważmy szklaną komórkę wypełnioną  $10^{14}$  atomami rubidu, znajdującymi się pod bardzo niskim ciśnieniem. Pompując taką komórkę silnym impulsem laserowym, na skutek przejść ramanowskich w atomach, możliwe jest wyemitowanie z komórki pojedynczego fotonu, który może być zarejestrowany detektorem. Po emisji komórka nadal zawiera informacje o właściwościach zarejestrowanego fotonu, zaś ponowne jej wzbudzenie wiązką pompującą powoduje emisję kolejnego fotonu, którego właściwości są ściśle skorelowane z poprzednim. Mając możliwość kontroli nad przestrzennym rozkładem amplitudy i fazy wzbudzenia wewnątrz szklanej komórki, jesteśmy w stanie sterować prawdopodobieństwem pojawienia się konkretnego wzbudzenia oraz względną fazą wytworzonych wzbudzeń.

Struktura pracy jest następująca. Rozdział 1 zawiera wstęp teoretyczny, w którym został przedstawiony związek transformaty Fouriera z działaniem soczewki, sposób sterowania amplitudą i względną fazą wiązki w różnych kierunkach propagacji, a także krótko przedstawione metody służące do opisu wiązek gaussowskich. Rozdział 2 omawia główny element układu, jakim jest przestrzenny modulator fazy oraz ukazuje budowę układu doświadczalnego. W Rozdziale 3 przedstawione zostały programy komputerowe napisane w środowisku LabView, służące do sterowania pracą modulatora, kamery CCD oraz ich wykorzystanie do skanowania powierzchni modulatora. Rozdział 4 poświęcony jest technice wytwarzania dyfrakcyjnych siatek fazowych oraz ich wykorzystaniu do wyznaczenia macierzy ABCD układu eksperymentalnego i sprawdzeniu dokładności jego działania. Rozdział 5 pokazuje praktyczne zastosowania zbudowanego układu, takie jak precyzyjna kontrola interferencji wiązek oraz polepszenie jakości ogniskowania. Na końcu pracy znajduje się Podsumowanie, zawierające wnioski z wykonanych doświadczeń.

# Rozdział 1

## Wstęp teoretyczny

### 1.1. Działanie soczewki w języku transformaty Fouriera

Niech na soczewkę pada płaska fala monochromatyczna opisana polem elektrycznym  $E(x, y)$ , przedstawiona na rysunku 1.1. Soczewka wprowadza pewne opóźnienie fazowe fali padającej tak, że w przybliżeniu przyosiowym pole elektryczne za soczewką wynosi [1]:

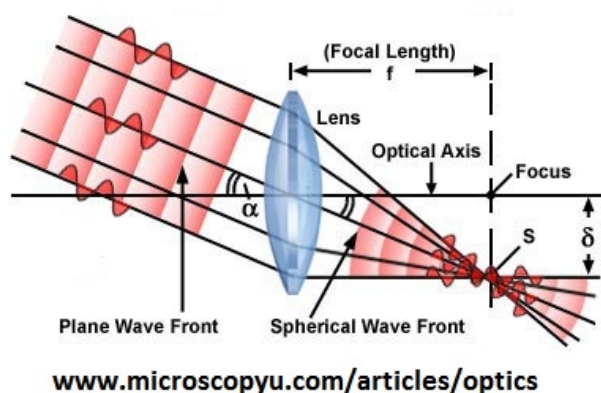
$$E'(x, y) = E(x, y)e^{i\frac{k}{2f}(x^2+y^2)} \quad (1.1)$$

gdzie:  $k$  – liczba falowa fali padającej,  $f$  – ogniskowa soczewki. Stosując przybliżenie Fresnela (dalekiego pola) można pokazać, że pole elektryczne fali w płaszczyźnie ogniskowej wyraża się wzorem [2]:

$$E(u, v) = \frac{k}{2\pi if} e^{ikf} e^{i\frac{k}{2f}(u^2+v^2)} \mathcal{F}\{E(x, y)\}\left(\frac{k}{f}u, \frac{k}{f}v\right) \quad (1.2)$$

Ponieważ mierzymy jedynie natężenie wiązki światła, możemy pominąć nieistotne czynniki fazowe, otrzymując natężenie w płaszczyźnie ogniskowej (będące kwadratem modułu natężenia pola elektrycznego):

$$|E(u, v)|^2 \sim |\mathcal{F}\{E(x, y)\}\left(\frac{k}{f}u, \frac{k}{f}v\right)|^2 \quad (1.3)$$



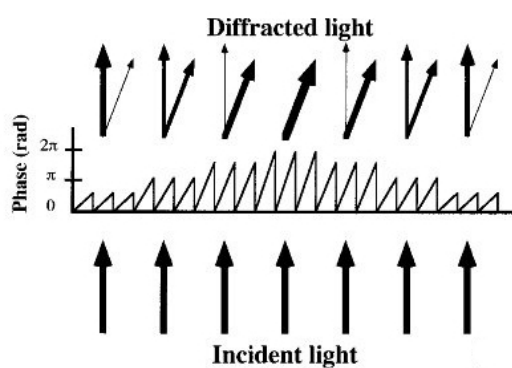
Rysunek 1.1: Monochromatyczna fala płaska padająca na soczewkę skupiającą doznaje zmiany kształtu frontów falowych, co skutkuje skupieniem się wiązki w ognisku soczewki. Pole elektryczne wiązki w ognisku jest z dokładnością do czynnika fazowego, transformatą Fouriera pola przed soczewką. Ponieważ mierzymy natężenie światła, nieistotny czynnik fazowy możemy pominąć. Zmieniając kąt pod jakim fala płaska pada na soczewkę, możemy przesuwać punkt skupienia się wiązki w płaszczyźnie ogniskowej.

Zatem, jeżeli na soczewkę pada monochromatyczna fala płaska, to obraz powstający w ognisku jest w przybliżeniu Fresnela transformatą Fouriera fali padającej. Można pokazać, że zachodzą następujące relacje [2]:

- dodanie fazy liniowej powoduje przesunięcie obrazu w płaszczyźnie ogniskowej (The Shift Theorem [1]) – rysunek 1.1,
- dodanie fazy kwadratowej powoduje przesunięcie ogniska (przewężenia) wiązki w kierunku propagacji,
- transformatą Fouriera funkcji gaussowskiej jest funkcja gaussowska – przydatne do testowania działania układu pomiarowego.

## 1.2. Modulacja amplitudy maską fazową

Przy pomocy przestrzennego modulatora fazy można wytworzyć tzw. fazowe siatki dyfrakcyjne. Zamiast modulatora odbiciowego rozważmy modulator transmisyjny, co nie zmienia istoty zagadnienia, a znacznie mniej komplikuje wygląd rysunków. Niech na powierzchnię modulatora, składającą się z rzędu komórek wypełnionych ciekłym kryształem, pada płaska monochromatyczna fala świetlna – rysunek 1.2.



**J.A. Davis, Applied Optics 38(23), 5004-5013**

Rysunek 1.2: Działanie transmisyjnej fazowej siatki dyfrakcyjnej – model jednowymiarowy. Wiązka padająca trafia na rząd pikseli modulatora, do których przyłożono odpowiednie napięcie, co skutkuje rozdzieleniem natężenia padającej wiązki pomiędzy poszczególne rzędy ugięcia siatki dyfrakcyjnej. Regulując wysokością prążków (napięciem) możemy zmieniać ilość światła trafiającą do pierwszego rzędu ugięcia.

Przykładając do każdej z komórek odpowiednie napięcie, można regulować opóźnienie fazowym  $\phi(x, y)$  fali świetlnej przechodzącej przez daną komórkę. Wiadomo, że fale mające różną fazę zależną od położenia w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku propagacji wiązki, ogniskują się w płaszczyźnie ogniskowej w różnych punktach. Dzięki temu, zmieniając przykładane do poszczególnych komórek z ciekłym kryształem napięcie, możemy wysyłać wiązkę światła o długości  $\lambda$  w wybranym przez nas kierunku. W szczególności, dodanie do padającej wiązki fazy liniowej:

$$\phi(x, y) = k_x x + k_y y \quad (1.4)$$

gdzie:  $k_x, k_y$  – wektory falowe, powoduje zmianę kierunku propagacji wiązki, natomiast dodanie fazy kwadratowej:

$$\phi(x, y) = \frac{k_0}{2R_x} x^2 + \frac{k_0}{2R_y} y^2 \quad (1.5)$$

gdzie:  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $R_x$ ,  $R_y$  – promienie krzywizny, sprawia, że wiązka staje się zbieżna lub rozbieżna. Działanie takie odpowiada zwykłej amplitudowej siatce dyfrakcyjnej – w tym jednak przypadku nie tracimy natężenia światła, a jedynie rozdzielamy je pomiędzy poszczególne rzędy ugięcia siatki dyfrakcyjnej. Szczegóły dotyczące działania dyfrakcyjnych siatek fazowych znajdują się w pracach [4] i [5] oraz na rysunku 1.2.

### 1.3. Optyka wiązek gaussowskich

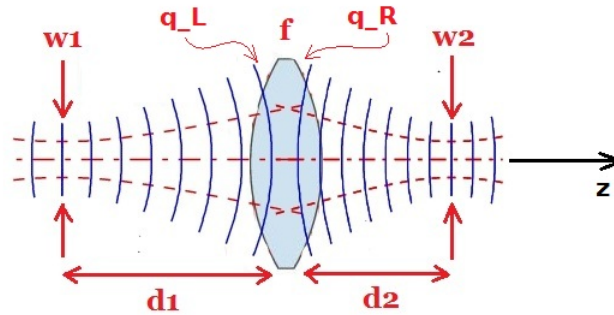
Kształt wiązki gaussowskiej możemy określić, podając jej szerokość połówkową w przewężeniu  $w_0$ , położenie przewężenia oraz jej zasięg Reyleigha, który wynosi:  $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ , gdzie  $\lambda$  - długość fali świetlnej emitowanej przez laser. Wtedy szerokość wiązki oraz jej promień krzywizny w dowolnym miejscu układu  $z$  (bez soczewki) możemy otrzymać, korzystając ze wzorów [6]:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (1.6)$$

$$R(z) = z \left[ 1 + \left(\frac{z_R}{z}\right)^2 \right] \quad (1.7)$$

Aby obliczyć parametry wiązki przy przechodzeniu przez układ optyczny, łatwiej posłużyć się parametrem  $q$  zdefiniowanym wzorem [6]:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi w^2(z)} \quad (1.8)$$



Rysunek 1.3: Rysunek przedstawia przejście wiązki gaussowskiej przez soczewkę. Znając szerokość i krzywiznę wiązki w odległości  $d_1$  przed soczewką, możemy obliczyć te parametry w odległości  $d_2$  za soczewką, korzystając z parametru Kogelnika  $q$  oraz optyki macierzy ABCD.

Dzięki parametrowi  $q$  łatwo można opisać transformowanie się wiązki w pustej przestrzeni:

$$q(z = d_1) = q(z = 0) + d_1 \quad (1.9)$$

oraz przy przejściu przez powierzchnię cienkiej soczewki o ogniskowej  $f$  – rysunek 1.3:

$$\frac{1}{q_R(z)} = \frac{1}{q_L(z)} - \frac{1}{f} \quad (1.10)$$

Uogólniając powyższe podejście, znając parametr  $q_1$  w danym punkcie propagacji wiązki przez układ optyczny, możemy wyznaczyć parametr  $q_2$  wiązki w innym miejscu układu, dysponując macierzą ABCD [6]:

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (1.11)$$

## Rozdział 2

# Przestrzenny modulator fazowy

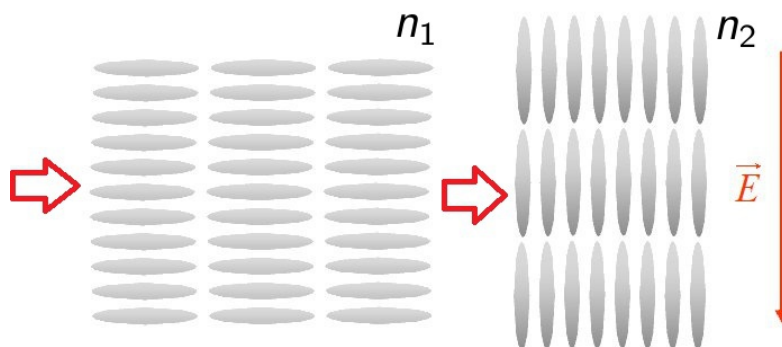
### 2.1. Zasada działania modulatora

Przestrzenny modulator fazy (SLM) to urządzenie umożliwiające w arbitralny sposób kontrolowanie fazy wiązki światła. Używany w doświadczeniu SLM Pluto (Holoeye) składa się z macierzy komórek wypełnionych ciekłym kryształem (w tym wypadku: nematykiem), umieszczonych na płaszczyźnie o wysokim współczynniku odbicia. Modulator składa się z matrycy o wymiarach 15,36mm x 8,64mm, zawierającej 1920 x 1080 pikseli pokrywających około 87% powierzchni modulatora [7]. Jest to modulator odbiciowy, zatem wiązka światła przechodzi przez niego dwukrotnie. Zdjęcie modulatora przedstawia rysunek 2.1. Zasada działania urządzenia jest następująca. W nieobecności pola elektrycznego cząsteczki nematyka (o silnie wydłużonym kształcie) tworzą strukturę helisy (oś helisy jest jednocześnie osią optyczną kryształu) powodując, że ośrodek wykazuje dwójłomność – po przejściu przez komórkę z ciekłym kryształem następuje względna zmiana fazy pomiędzy promieniami zwyczajnym i nadzwyczajnym. W obecności bardzo silnego pola elektrycznego cząsteczki nematyka ustawiają się równolegle, wzdłuż przyłożonego pola, przez co układ nie rozróżnia obu polaryzacji światła (zwyczajnej i nadzwyczajnej) i nie zostaje wprowadzone dodatkowe opóźnienie fazowe jednej z polaryzacji. Regulując odpowiednio przykładanym napięciem (proporcjonalnym do przyłożonego pola) można uzyskać dowolne opóźnienie fazowe na każdym z pikseli matrycy modulatora – rysunek 2.2.



Rysunek 2.1: PLUTO: High-Resolution LCOS Phase Only Spatial Light Modulator. Po lewej stronie wygląd zewnętrzny modulatora fazy, po prawej stronie rysunku zdjęcie przedstawiające fragment modulatora – matrycę z macierzą komórek wypełnionych ciekłym kryształem. Dla pokazania wielkości urządzenia, na fotografii znajduje się także standardowa soczewka, używana w eksperymentach.

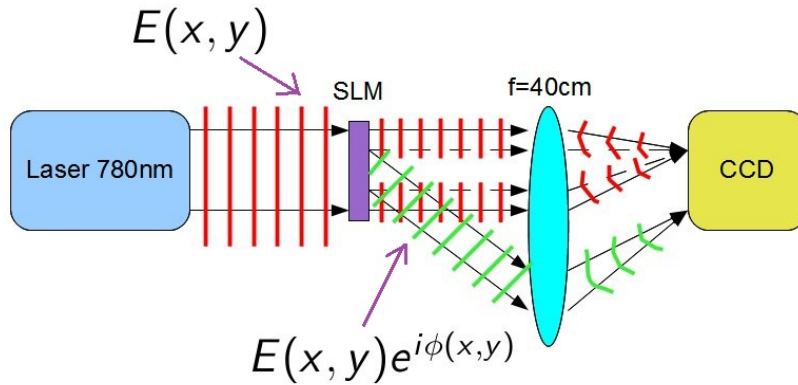
W związku ze skończonymi rozmiarami pikseli używanego w układzie modulatora, nie jest możliwe zadawanie zupełnie dowolnego rozkładu fazy wiązki. W obrębie każdego z pikseli o wymiarach  $8 \times 8 \mu\text{m}$ , przyłożone napięcie jest stałe. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt, że również modulator wprowadza pewne przesunięcie fazowe, którego nie jesteśmy w stanie kontrolować, różne dla każdego z pikseli. Problem kompensacji tej dodatkowej fazy i dokładności obrazowania powierzchni modulatora zostanie przedstawiony w dalszej części pracy.



Rysunek 2.2: Zmiana orientacji cząsteczek ciekłego kryształu pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego  $\vec{E}$ . Na komórkę z ciekłym kryształem pada wiązka światła oznaczona strzałką. Przyłożenie pola elektrycznego powoduje zmianę współczynnika załamania substancji o  $\Delta n = n_2 - n_1$ , co pozwala regulować zmianą fazy światła po przejściu przez komórkę za pomocą przykładanego napięcia.

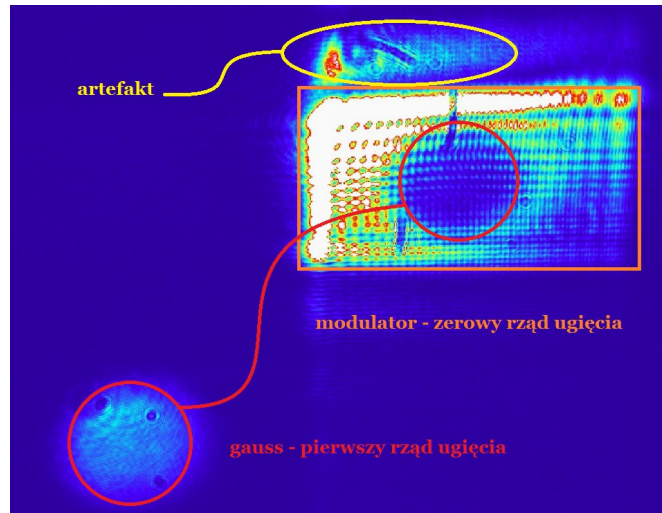
## 2.2. Schemat układu pomiarowego

W ramach pracy licencjackiej zbudowano układ eksperymentalny, pozwalający na wytworzenie zadanego rozkładu amplitudy i fazy fali świetlnej. Głównym elementem układu jest przestrzenny modulator fazy, którego działanie zostało opisane w poprzednim rozdziale. Schemat układu doświadczalnego przedstawia rysunek 2.3. Laser o mocy 30mW pracujący w podczerwieni (długość fali  $\lambda = 780\text{nm}$ ) wysyła wiązkę światła, która po uformowaniu przy pomocy przesłony oraz powiększeniu przy pomocy teleskopu soczewkowego (nie uwzględniono tych elementów na schemacie) pada na powierzchnię modulatora. Za pomocą programu komputerowego, omówionego dokładnie w dalszej części pracy, można zadawać na modulatorze określony rozkład fazy, zmieniając tym samym kształt frontu falowego za modulatorem. Tak przetworzona wiązka pada na soczewkę skupiającą, która wprowadza dodatkowe przesunięcie fazowe (patrz rozdział 1), za którą znajduje się kamera CCD, mogąca przesuwać się wzdłuż kierunku propagacji wiązki światła. Jak zostało to pokazane poprzednio, wiązki światła posiadające przed soczewką różną fazę przestrzenną  $\phi(x, y)$  ogniskują się w płaszczyźnie ogniskowej soczewki w różnych punktach (faza liniowa – wzór (1.4)), jak również w różnych odległościach wzdłuż kierunku propagacji (faza kwadratowa – wzór (1.5)). W szczególności, możemy dzięki temu podzielić natężenie padającego światła między różne punkty w płaszczyźnie kamery. Przykład takiej sytuacji przedstawia rysunek 2.4. Szczegółowe informacje dotyczące otrzymywania takich wiązek znajdują się w pracach [4] i [5].



Rysunek 2.3: Schemat budowy układu doświadczalnego (dla uproszczenia pominięto nieistotne elementy): diodowy laser półprzewodnikowy o długości fali  $\lambda = 780\text{nm}$ , SLM - modulator fazy,  $f$  – soczewka o ogniskowej 40cm, CCD - kamera z matrycą CCD. Modulator wprowadza zależną od położenia fazę  $\phi(x, y)$ , w związku z czym płaski front falowy  $E(x, y)$  padający na modulator doznaje zmiany fazy, i za modulatorem jest opisywany zależnością  $E(x, y)e^{i\phi(x, y)}$ . Za soczewką front falowy przestaje być płaski.

Rysunek 2.4 przedstawia obraz z kamery CCD znajdującej się 8cm przed ogniskiem soczewki znajdującej się w układzie. Na modulatorze ustawiono liniową fazową siatkę dyfrakcyjną dodatkowo modulowaną funkcją o profilu gaussowskim, Jak pokazano na rysunku 2.3, skutkuje to wysłaniem wiązki z tego miejsca w innym kierunku niż pozostała część wiązki oświetlającej modulator. W rezultacie zmodulowana część wiązki obrazuje się na kamerze w innym miejscu. Na rysunku widać również tzw. artefakt, pochodzący prawdopodobnie z rozpraszania światła na elementach układu doświadczalnego oraz z dyfrakcją, która w sposób nieunikniony pojawia się w układzie.



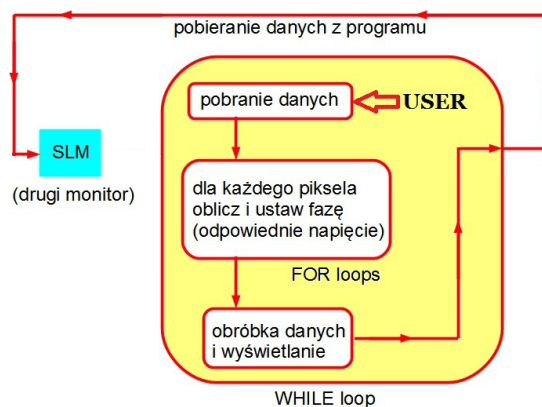
Rysunek 2.4: Obraz modulatora widziany przez kamerę, znajdującą się w odległości  $d = 8\text{cm}$  od ogniska soczewki (patrz rysunek 2.3). Na modulatorze wyświetlono wiązkę gaussowską trafiającą po pierwszego rzędu ugięcia, powierzchnia modulatora jest obrazowana w zerowym rzędzie. Natężenie światła nie jest tracone – dzielimy je pomiędzy poszczególne rzędy ugięcia. Widoczny na rysunku artefakt jest spowodowany odbiciem światła od elementów układu. Szczegółowe informacje przedstawia rozdział 4.

## Rozdział 3

# Sterowanie układem pomiarowym

### 3.1. Program do obsługi modulatora

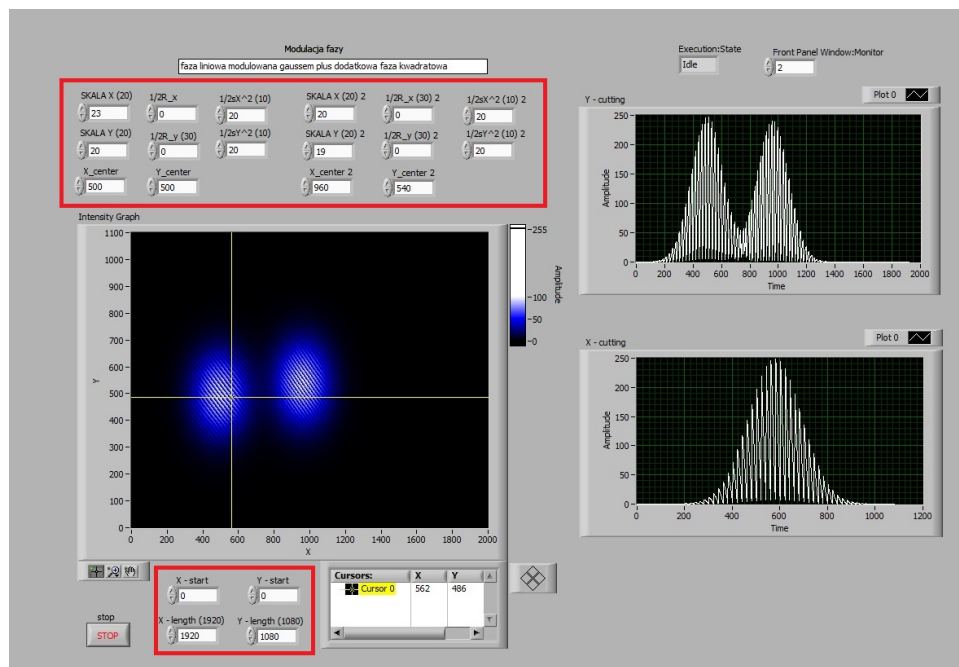
Oprogramowanie dostarczone przez producenta wraz z modulatorem [7] umożliwia wytwarzanie fazowych siatek dyfrakcyjnych o kilku prostych kształtach, lecz nie pozwala na precyzyjną kontrolę nad parametrami tworzonych siatek. W tym celu stworzono w środowisku programistycznym LabView programy służące do kontrolowania pracy modulatora oraz do analizowania danych pochodzących z kamery CCD znajdującej się w układzie. Schemat ideowy programu służącego do definiowania profili tworzonych siatek dyfrakcyjnych przedstawia rysunek 3.1. Dane z programu sterującego są wysyłane do modulatora, który jest podłączony do komputera jako drugi monitor.



Rysunek 3.1: Schemat programu w środowisku LabView służącego do generowania fazowych siatek dyfrakcyjnych. Program pobiera od użytkownika parametry siatki, następnie w pętli wyznacza dla każdego piksela modulatora odpowiednią fazę i przelicza ją na napięcie. Obliczone dane są wyświetlane na ekranie celem weryfikacji, jak również na powierzchni modulatora, podłączonego jako drugi monitor.

Na rysunku 3.2 znajduje się stworzony w LabView interfejs graficzny do sterowania modulatorem. Użytkownik ma możliwość określenia liczby wiązek gaussowskich wyświetlanych na powierzchni modulatora (na rysunku zostały wytworzone dwie takie wiązki). Każda z nich odpowiada oddzielnie tworzonej masce fazowej, które są następnie wspólnie nałożone na matrycę pikseli modulatora. W ramach każdej z takich masek możliwa jest regulacja stałej siatki (zarówno w poziomie, jak i w pionie), kierunku modulacji (czemu odpowiada kąt obrotu siatki względem prostej prostopadłej do powierzchni modulatora) – domyślnie jest to kierunek wzdłuż przekątnej modulatora. Ponadto można do każdej z siatek dodać fazę kwadratową (w kierunku poziomym lub pionowym), co przekłada

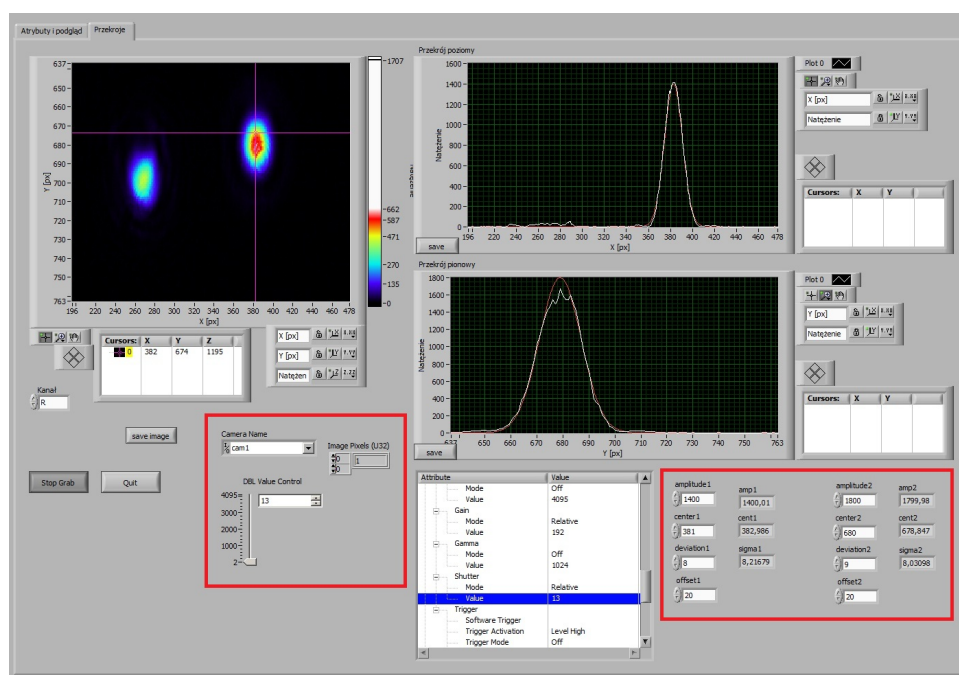
się na regulację krzywizny frontu falowego wiązki opuszczającej modulator. Użytkownik ma także możliwość regulacji położenia środka i szerokości funkcji gaussowskiej modulującej wytworzoną siatkę, a także obszaru modulatora, na którym dana maska zostaje wytworzona.



Rysunek 3.2: Interfejs graficzny do sterowania modulatorem. Zaznaczone ramkami kontrolki umożliwiają dodanie fazy liniowej, kwadratowej, modulacji wiązką gaussowską oraz określenie położenia wiązki na modulatorze. Program umożliwia tworzenie dwóch niezależnych siatek dyfrakcyjnych. W oknie programu mamy podgląd na powierzchnię modulatora, jak również przekroje w dwóch płaszczyznach.

### 3.2. Program do obsługi kamery CCD

Również do obsługi kamery CCD został napisany program z graficznym interfejsem użytkownika, przedstawionym na rysunku 3.3. Umożliwia on regulację poziomu naświetlenia matrycy kamery w czasie rzeczywistym, tak więc unikamy prześwietlania kamery bez konieczności każdorazowej wymiany filtrów znajdujących się przed kamerą. Jednak głównym celem programu jest dopasowanie profilu gaussowskiego do wiązki obserwowanej na powierzchni matrycy CCD. Umożliwi to późniejsze sprawdzenie dokładności działania układu pomiarowego oraz wyznaczenie macierzy ABCD układu doświadczalnego celem kalibracji modulatora. Przed wykonaniem procedury dopasowania użytkownik zaznacza interesujący go obszar w taki sposób, aby widoczna była jedynie wiązka, której profil chcemy odczytać. Następnie program odczytuje natężenie światła padającego na granice zaznaczonego obszaru i oblicza jego średnią, która jest potem odejmowana od natężenia światła rejestrowanego przez każdy z pikseli w zaznaczonym obszarze. W ten sposób pozbywamy się stałego podkładu tła. Ponieważ światło wysyłane z lasera wykazuje fluktuacje natężenia w czasie, obraz z kamery jest uśredniany po 10 odczytach natężenia. Użytkownik ma możliwość ustawienia wysokości progu natężenia, po przekroczeniu którego dany punkt jest brany pod uwagę w procedurze dopasowania funkcji gaussowskiej. Na koniec program dopasowuje krzywe Gaussa dla przekrojów poziomego i pionowego przechodzących przez środek padającej na kamerę wiązki.



Rysunek 3.3: Interfejs graficzny do sterowania kamerą. Zaznaczone ramkami kontrolki umożliwiają regulację czasu naświetlania matrycy CCD, jak również dopasowanie parametrów krzywej Gaussa do przekrojów wiązki gaussowskiej widzianej na kamerze, które możemy zmieniać, regulując położeniem suwaków w oknie podglądu kamery. Widoczne wiązki wytworzono za pomocą modulatora.

### 3.3. Skanowanie powierzchni modulatora

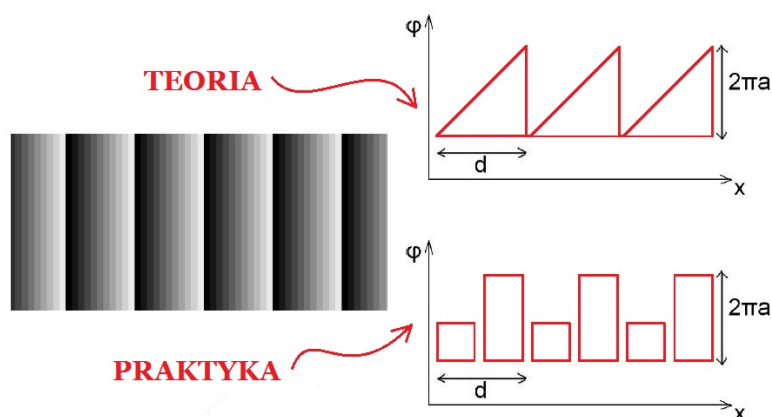
W celu zautomatyzowania pomiaru został stworzony kolejny program, mający za zadanie jednocześnie sterowanie działaniem modulatora i kamery CCD. Użytkownik ma możliwość ustawienia parametrów wiązki wyświetlanej na modulatorze – tych samym, które można zmieniać w programie sterującym modulatorem. Program działa w pętli. W jednym jej przebiegu na modulatorze zostaje wyświetlona siatka zadana przez warunki początkowe (użytkownik). Po ustawieniu parametrów siatki na modulatorze, program czeka 250ms, po czym zostaje wykonanych 10 pomiarów położenia wiązki na kamerze. Średnia z tych pomiarów jest wykorzystywana w procedurze dopasowania krzywej gaussowskiej do poszczególnych przekrojów, jak opisano powyżej, a następnie odpowiednie parametry zostają zwiększone o wartość kroku zdefiniowaną również przez użytkownika. Następnie rozpoczyna się następny przebieg pętli. Umożliwia to przeskanowanie całej powierzchni modulatora – dodatkowo w każdym położeniu środka wytworzonej siatki możemy zmieniać jej parametry, jak fazę liniową lub kwadratową. Dzięki temu w ciągu kilkudziesięciu minut możemy uzyskać wystarczającą ilość danych do kalibracji modulatora. Położenie wiązki na modulatorze, jak również środek wiązki i jej szerokość w obu przekrojach, są zapisywane w pliku tekstowym – zostaną następnie użyte do wyznaczenia kalibracji układu doświadczalnego.

## Rozdział 4

# Testowanie i kalibracja układu

### 4.1. Wytwarzanie fazowych siatek dyfrakcyjnych

W teorii można zadawać opóźnienie fazowe, przykładając odpowiednie napięcie, z nieograniczoną dokładnością. W eksperymencie ogranicza nas rozmiar pikseli modulatora, których szerokość wynosi  $8\mu\text{m}$ . W obrębie jednego piksela faza musi pozostać stała, gdyż przykładamy to samo napięcie do całej powierzchni pojedynczej komórki z ciekłym kryształem. W związku z tym nie jest możliwe zadanie dokładnie liniowo narastającej fazy, a jedynie fazy zmieniającej się skokowo, co pokazano na rysunku 4.1. Dowolność w zadawaniu fazy ogranicza również fakt, że maska fazowa wyświetlana na modulatorze jest obrazem 8-bitowym, zatem mamy do dyspozycji jedynie 256 odcieni szarości. Skutkiem niezerowych rozmiarów pojedynczych pikseli jest powielenie obrazu na kamerze. Na jakość obrazowania ma również wpływ wielkość pikseli matrycy kamery, których rozmiary wynoszą  $6,5\mu\text{m}$ .



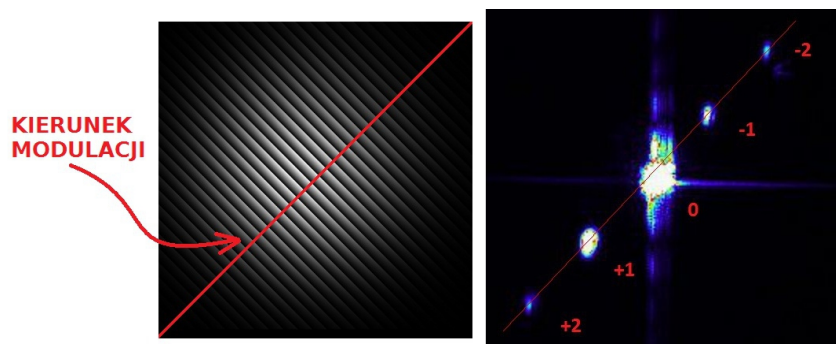
Rysunek 4.1: Fazowa siatka dyfrakcyjna wytworzona na powierzchni modulatora. Kolor czarny oznacza brak przykładanego napięcia, kolor biały – maksymalne napięcie. W teorii do sąsiednich pikseli możemy przykładać rosnące liniowo napięcie, otrzymując siatkę dyfrakcyjną o okresie prążków równym  $d$ . W praktyce ograniczeniem jest rozmiar pikseli modulatora, przez co spada rozdzielczość modulacji fazy.

W eksperymencie używano siatek dyfrakcyjnych wytworzonych za pomocą omówionego powyżej programu sterującego pracą modulatora. Początkowo ustawiono na całej powierzchni modulatora siatkę liniową o kierunku modulacji wzdłuż przekątnej modulatora, o stałej siatki wynoszącej około  $0.1\text{mm}$ . W zależności od potrzeb, do każdego z pikseli dodawano również fazę kwadratową w taki sposób, aby zwiększyć bądź zmniejszyć

promień krzywizny frontu falowego o wartość wynoszącą około 500mm – wzory (1.4) i (1.5). Na końcu tej procedury mnożono wartość fazy dodanej do każdego z pikseli (modulo  $2\pi$ ) przez wolnozmienną funkcję o profilu gaussowskim:

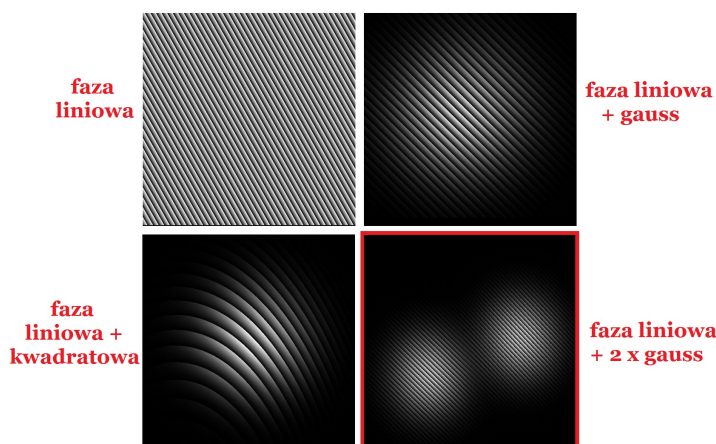
$$\phi(x, y) = \text{mod}(k_x x + k_y y + \frac{k_0}{2R_x} x^2 + \frac{k_0}{2R_y} y^2, 2\pi) \cdot e^{-\left(\frac{x^2}{w_x^2} + \frac{y^2}{w_y^2}\right)} \quad (4.1)$$

gdzie:  $w_x$ ,  $w_y$  – szerokości połówkowe wiązki. Otrzymujemy więc możliwość regulowania kierunku propagacji, szerokości w przewężeniu oraz krzywizny frontu falowego wiązki.



Rysunek 4.2: Dyfrakcyjna siatka fazowa wytworzona na modulatorze oraz odpowiadający jej obraz na kamerze CCD, znajdującej się w ognisku soczewki. Zaznaczono kierunek modulacji fazy oraz numery poszczególnych rzędów ugięcia światła, widziane na kamerze. Powyższa sytuacja odpowiada działaniu amplitudowej siatki dyfrakcyjnej.

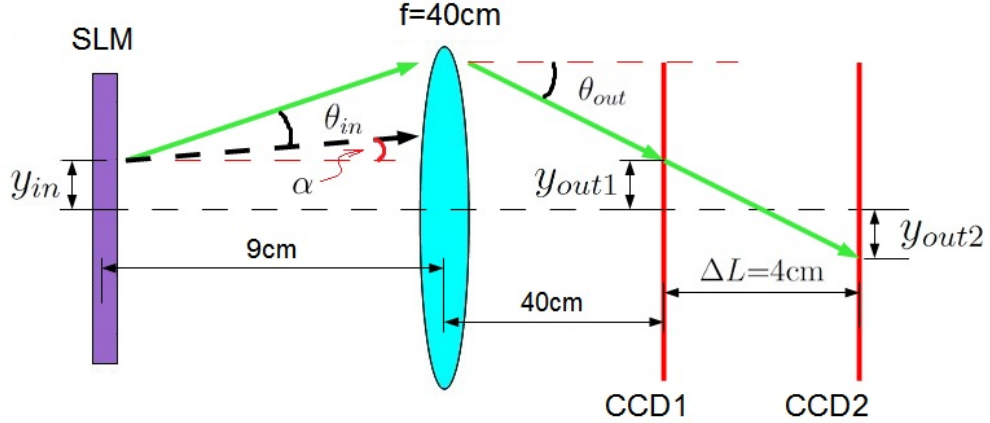
Przykład wytworzonej siatki i obrazu z kamery przedstawia rysunek 4.2. Widać, że obraz wiązki na kamerze jest z dobrym przybliżeniem transformatą Fouriera wiązki wytworzonej przez modulator [1]. Na rysunku zaznaczono kierunek modulacji fazy, który dobrze pokrywa się z kierunkiem powstawania kolejnych rzędów ugięcia siatki dyfrakcyjnej na kamerze. Inne przykłady siatek, które zostały wytworzone na modulatorze celem sprawdzenia poprawności działania układu, przedstawia rysunek 4.3. Typowa używana w doświadczeniu stała siatki dyfrakcyjnej to  $d = 0,12\text{mm}$ , zaś szerokość wiązki gaussowskiej wytwarzanej na modulatorze wynosiła  $w = 1\text{mm}$ .



Rysunek 4.3: Przykłady fazowych siatek dyfrakcyjnych wytworzonych na modulatorze. Od lewego górnego rogu: siatka liniowa (20 pikseli na prążek), siatka liniowa modulowana gaussem (przewężenie o szerokości  $w_0 = 50\mu\text{m}$  za soczewką), siatka liniowa z dodaną fazą kwadratową (przesunięcie podłużne ogniska o  $d = 2\text{cm}$ ), siatka liniowa modulowana w dwóch miejscach krzywymi Gaussa (odległymi o  $d = 2\text{mm}$ ).

## 4.2. Odtworzenie macierzy ABCD układu

W celu kalibracji układu doświadczalnego niezbędne okazuje się wyznaczenie macierzy ABCD układu. Rozważmy zmianę położenia wiązki oraz stałej siatki w kierunku pionowym. Przyjmijmy oznaczenia zgodne z tymi na rysunku 4.4, stosując przybliżenie promiowe optyki.

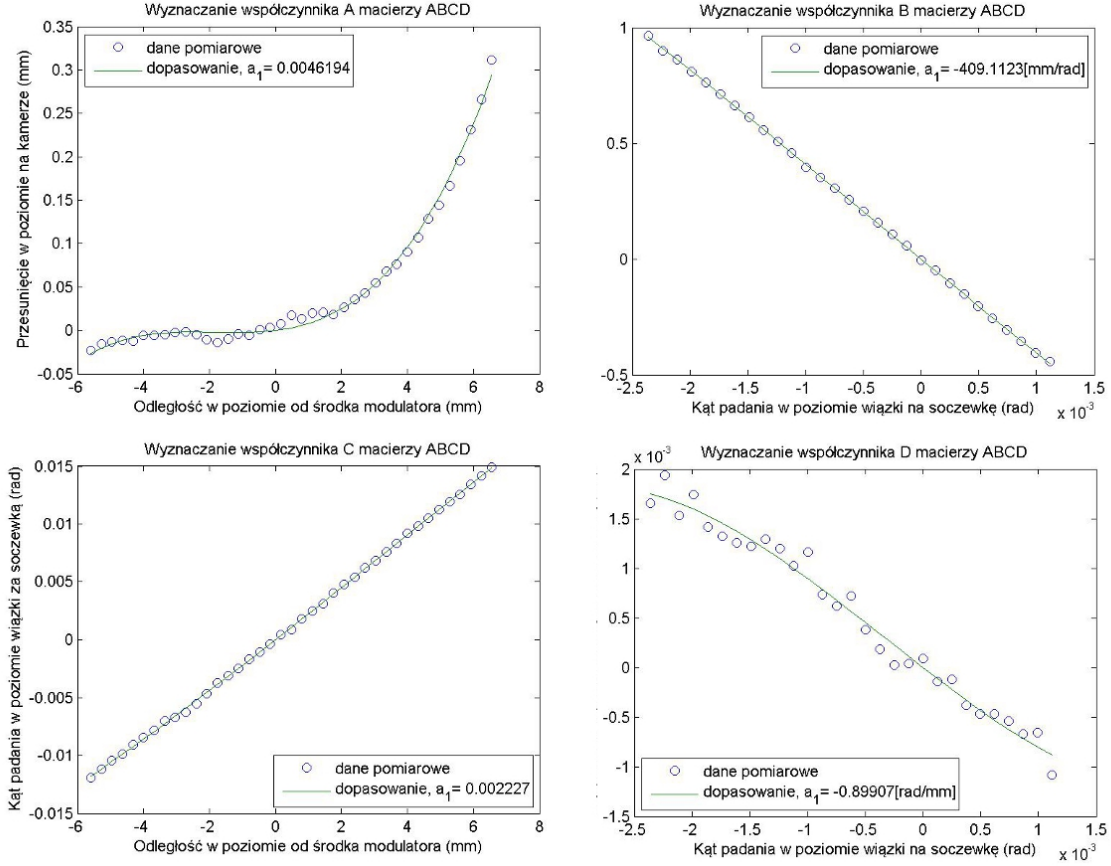


Rysunek 4.4: Schemat do zobrazowania idei wyznaczenia współczynników macierzy ABCD układu pomiarowego. Rysunek przedstawia przekrój dla ustalonego położenia wiązki w płaszczyźnie poziomej  $x = 0$  (środek modulatora) oraz ustalonej stałej siatki w płaszczyźnie poziomej  $d = 0,12\text{mm}$ . Na modulatorze SLM zmieniano położenie środka wiązki oraz stałą siatki w kierunku  $y$ , mierząc położenie wiązki w dwóch położeniach kamery  $CCD_1$  i  $CCD_2$ .

Znając stałą siatki możemy obliczyć kąt ugięcia wiązki na modulatorze jako  $\alpha = \lambda/d$ , gdzie:  $\lambda$  – długość fali,  $d$  – stała siatki dyfrakcyjnej. Mierząc położenie wiązki na kamerze ustawionej w różnej odległości od soczewki, możemy wyznaczyć kąt propagacji wiązki za soczewką jako:  $\theta_{out} = (y_{out2} - y_{out1})/\Delta L$ . Znając położenie wiązki względem środka modulatora  $y_{in}$  oraz położenie wiązki na kamerze  $y_{out1}$ , możemy wyznaczyć macierz  $(ABCD)_y$  układu od SLM1 do CCD1, rozwiązując układ równań [1]:

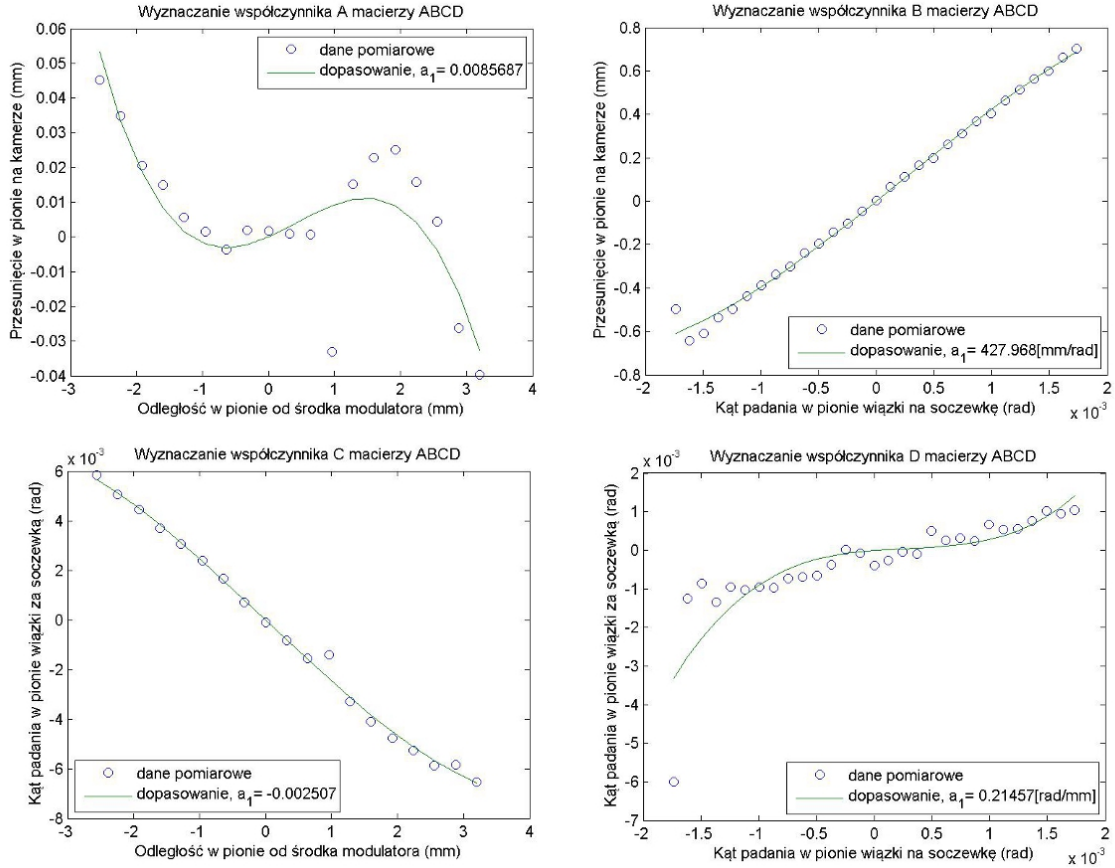
$$\begin{aligned} y_{out1} &= Ay_{in} + B\theta_{in} \\ \theta_{out} &= Cy_{in} + D\theta_{in} \end{aligned}$$

gdzie: kąt ugięcia  $\theta_{in}$  oznacza odchylenie od kąta ugięcia wiązki na modulatorze dla stałej siatki równej  $d = 0,12\text{mm}$ . W celu wyznaczenia macierzy ABCD wykonano dwa pomiary. W obu przypadkach wykonano pomiar szerokości wiązki na kamerze przy dwóch różnych położeniach kamery, różniących się o  $\Delta L = 4\text{cm}$ . W pierwszym przeskanowano całą powierzchnię modulatora wiązką gaussowską o szerokości  $w = 1\text{mm}$ , utrzymując stałą siatki  $d = 0,12\text{mm}$  podczas całego pomiaru, co odpowiada  $\theta_{in} = 0$  oraz zmiennemu  $y_{in}$ . Pozwoliło to na wyznaczenie współczynników A oraz C. W drugim pomiarze wyświetlano wiązkę gaussowską na środku modulatora, zmieniając stałą siatki w granicach od  $0,1\text{mm}$  do  $0,15\text{mm}$ , co pozwoliło na wyznaczenie współczynników B i D. Podobne rozumowanie dla kierunku poziomego pozwala wyznaczyć macierz  $(ABCD)_x$  układu. Wyniki pomiarów są przedstawione na rysunkach 4.5 i 4.6. Błędy wyznaczenia poszczególnych współczynników macierzy ABCD wynoszą od kilku do kilkunastu procent, głównie ze względu na dużą niepewność pomiaru kątów w układzie.



Rysunek 4.5: Wyznaczenie macierzy ABCD układu doświadczalnego w płaszczyźnie poziomej. Kolejne rysunki przedstawiają dopasowanie poszczególnych współczynników macierzy (wyraz liniowy krzywej ciągłej) oraz punkty pomiarowe. Wykresy pokazują przekrój dla  $y = 0\text{mm}$  oraz  $k_y = 50\text{mm}^{-1}$  na modulatorze. Wyznacznik macierzy ABCD wynosi 0,89.

Ponieważ optyka przyosiowa jest jedynie idealizacją, w układzie doświadczalnym występują liczne aberracje trzeciego rzędu, wśród których dominuje astygmatyzm. Zakładając, że zmiana położenia wiązki na modulatorze w kierunku pionowym powoduje przesunięcie wiązki na kamerze jedynie w kierunku pionowym (analogicznie dla kierunku poziomego), punkty pomiarowe powinny układać się na krzywej będącej wykresem wielomianu trzeciego stopnia. Wyraz liniowy tego wielomianu odpowiada jednemu ze współczynników macierzy ABCD zależnie od tego, który z opisanych powyżej pomiarów wykonujemy. Przykładowe wyniki pomiarów dla przekrojów poziomego i pionowego, przechodzących przez środek modulatora, prezentują rysunki 4.5 oraz 4.6. Analogiczne pomiary zostały wykonane także dla innych przekrojów powierzchni modulatora. Wyznaczone w ten sposób współczynniki macierzy ABCD są obarczone błędami na poziomie 10%, co wynika głównie z dużej niepewności dotyczącej kąta ugięcia wiązki na modulatorze oraz kąta propagacji wiązki za soczewką. Testem dokładności wyznaczenia powyższych współczynników może być obliczenie wyznacznika macierzy ABCD, który w idealnej sytuacji jest równy  $\det(ABCD) = 1$ . Dla przekrojów przedstawionych na rysunkach 4.5 i 4.6 wyznaczniki zmierzonych macierzy wynoszą odpowiednio 0,89 oraz 1,07.

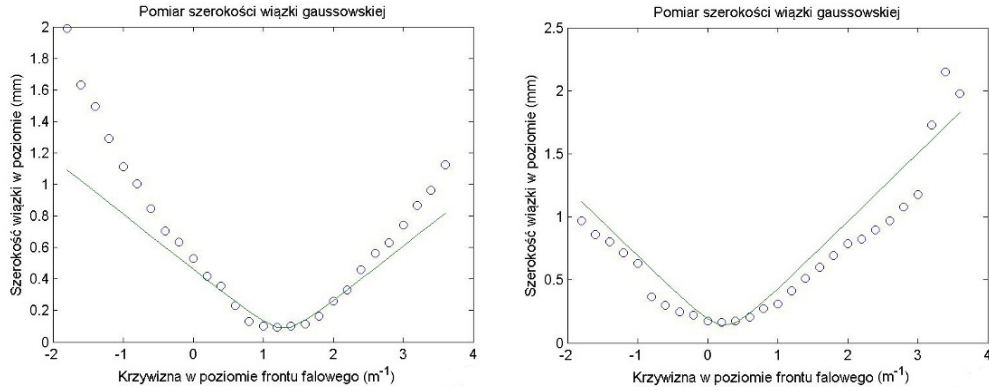


Rysunek 4.6: Wyznaczenie macierzy ABCD układu doświadczalnego w płaszczyźnie pionowej. Kolejne rysunki przedstawiają dopasowanie poszczególnych współczynników macierzy (wyraz liniowy krzywej ciągłej) oraz punkty pomiarowe. Wykresy pokazują przekrój dla  $x = 0,16 \text{ mm}$  oraz  $k_x = 50 \text{ mm}^{-1}$  na modulatorze. Wyznacznik macierzy ABCD wynosi 1,07.

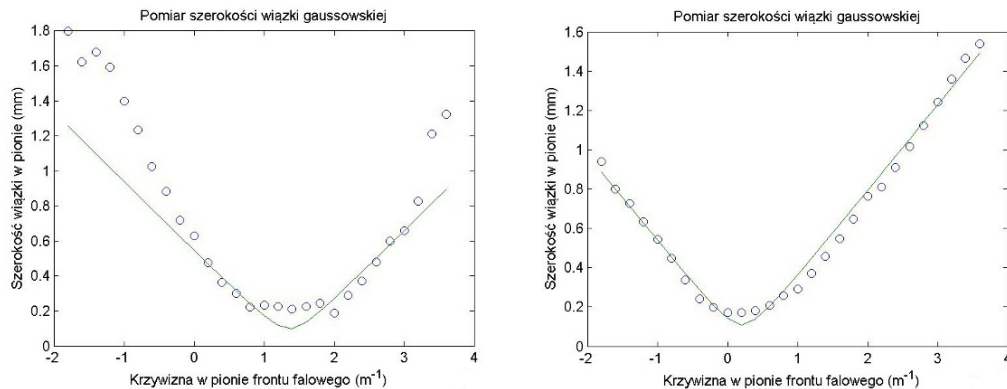
### 4.3. Propagacja wiązki gaussowskiej

Kolejnym testem dokładności działania układu, a także precyzji w wyznaczaniu elementów macierzy ABCD, jest badanie propagacji wiązki gaussowskiej przez układ doświadczalny. Przyjmując, że na powierzchni modulatora została wytworzona wiązka gaussowska o szerokości połówkowej  $w = 1 \text{ mm}$ , stosując wzory (1.9) – (1.11), możemy obliczyć szerokość wiązki gaussowskiej w kilku płaszczyznach prostopadłych do kierunku propagacji, i porównać ją ze zmierzoną na kamerze szerokością wiązki. Znając macierz  $M_1$  w odległości  $D_1$  od soczewki można w łatwy sposób wyznaczyć analogiczną macierz o odległości  $D_1 + \Delta D$  jako:  $M_2 = M_{\Delta D} M_1$ , gdzie:  $M_{\Delta D}$  jest macierzą propagacji na drodze  $\Delta D$  [1]. Do liniowej maski fazowej wyświetlanej na powierzchni modulatora dodawano dodatkową fazę kwadratową, zaś całość modulowano wolnozmienną obwiednią gaussowską – wzór (4.1). Dodatkowa faza kwadratowa powodowała, że zmieniał się efektywny promień krzywizny frontu falowego wychodzącego z powierzchni modulatora, w związku z czym można było spowodować, aby wiązka była początkowo rozbieżna, albo wręcz przeciwnie – zmniejszyć efektywną odległość, na której zachodzi jej ogniskowanie. Dodawana faza kwadratowa odpowiadała zwiększeniu promienia krzywizny frontu od wartości  $R = -500 \text{ mm}$ , aż do jego zmniejszenia o wartość  $R = 250 \text{ mm}$  (niezależnie w dwóch płaszczyznach, poziomej i pionowej). Szerokość tak zmodyfikowanej wiązki w funkcji dodanej krzywizny, mierzono

w dwóch położeniach kamery, odpowiednio 8cm przed ogniskiem soczewki oraz 12cm za ogniskiem. Pomiarów dokonywano niezależnie w dwóch płaszczyznach, poziomej i pionowej. Wyniki są przedstawione na rysunkach 4.7 i 4.8. Na rysunkach przedstawiono również szerokość wiązki obliczoną ze wzoru (1.11). Zaprezentowane na rysunkach wykresy uwzględniają fakt, że front falowy wiązki opuszczającej modulator bez dodatkowej modulacji, nie jest płaski – w płaszczyźnie poziomej promień krzywizny był większy o  $\Delta R_x = 1,3\text{m}$ , zaś w płaszczyźnie pionowej większy o  $\Delta R_y = 1,1\text{m}$ . Efekt był widoczny jako przesunięcie podłużne przewężenia wiązki – w celu zniwelowania różnicy pomiędzy pomiarami a obliczeniami dodano podaną powyżej różnicę w promieniach krzywizny frontów falowych tak, aby minima obu krzywych pokryły się. Widać, że mierzona szerokość wiązki jest większa niż obliczona wartość teoretyczna, co skłania nas do podejrzeń, że wytwarzana wiązka nie jest dokładnie wiązką gaussowską, a więc jej rozbieżność musi być większa niż postulowana teoretycznie rozbieżność wiązki gaussowskiej o tych samych rozmiarach początkowych.



Rysunek 4.7: Szerokość wiązki w płaszczyźnie poziomej w funkcji krzywizny frontu falowego dla dwóch różnych odległości wzdłuż kierunku propagacji od soczewki: lewy rysunek pokazuje sytuację 8cm przed spodziewanym ogniskiem soczewki, zaś rysunek po prawej sytuację w odległości 12cm za spodziewanym ogniskiem. Krzywa ciągła przedstawia obliczoną szerokość według wzoru (1.11).



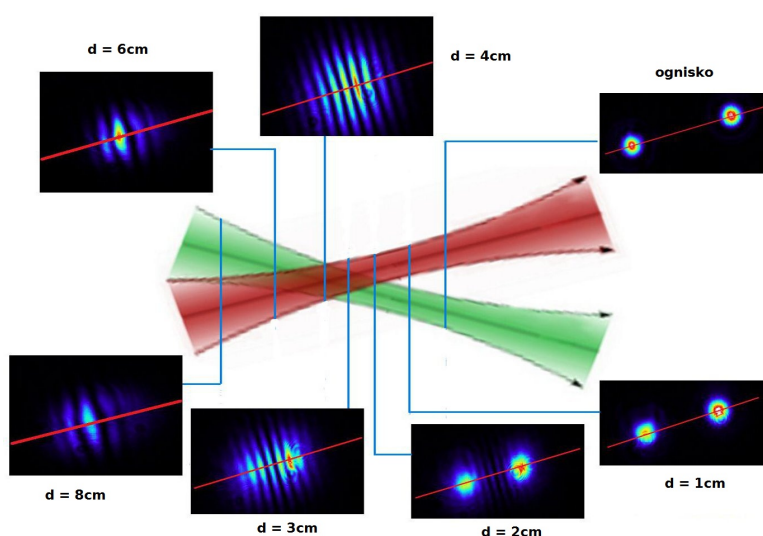
Rysunek 4.8: Szerokość wiązki w płaszczyźnie pionowej w funkcji krzywizny frontu falowego dla dwóch różnych odległości wzdłuż kierunku propagacji od soczewki: lewy rysunek pokazuje sytuację 8cm przed spodziewanym ogniskiem soczewki, zaś rysunek po prawej sytuację w odległości 12cm za spodziewanym ogniskiem. Krzywa ciągła przedstawia obliczoną szerokość według wzoru (1.11).

## Rozdział 5

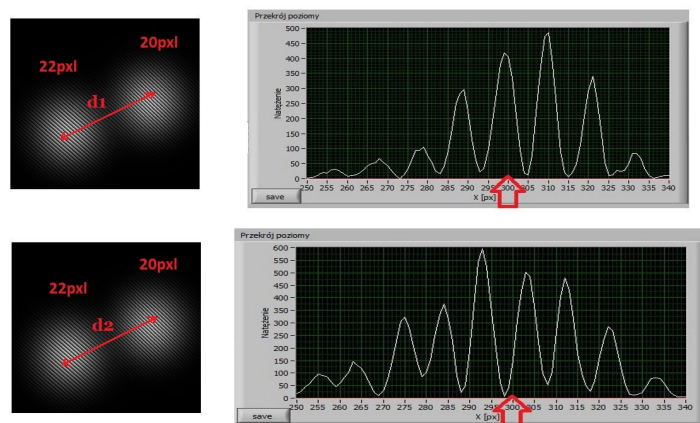
# Praktyczne zastosowania

### 5.1. Precyzyjna kontrola interferencji

Przy pomocy opisanych powyżej programów można sprawdzić, na ile dokładnie jesteśmy w stanie kontrolować parametry wytwarzanych fazowych siatek dyfrakcyjnych. Wytwarzając na powierzchni modulatora dwie liniowe siatki dyfrakcyjne o różnej szerokości prążków (odpowiednia 22 i 20 pikseli na prążek), modulowane krzywymi gaussowskimi, możemy obserwować na kamerze powstający obraz interferencyjny. Wiązki takie padają na soczewkę pod różnymi kątami, tym samym ogniskując się w różnych punktach. Sytuację dla różnych położzeń kamery względem ogniska soczewki przedstawia rysunek 5.1. Obserwowana interferencja jest efektem zastosowania siatki dyfrakcyjnej przedstawionej w lewym górnym rogu rysunku 5.2. Obok widoczny jest przekrój obrazu widzianego przez kamerę. Widać, że dla piksela kamery o numerze 300 (zaznaczony strzałką) występuje konstruktywna interferencja. Zmieniając nieznacznie odległość pomiędzy krzywymi Gaussa na modulatorze (lewy dolny róg na rysunku 5.2), w tym samym miejscu kamery obserwujemy interferencję destruktywną. Pokazuje to, że możemy kontrolować miejsce ugięcia wiązki światła z modulatora z dokładnością do pojedynczych pikseli kamery.



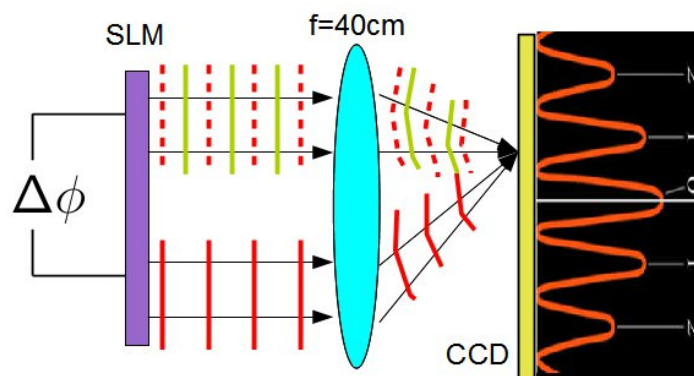
Rysunek 5.1: Interferencja dwóch wiązek gaussowskich wytworzonych na modulatorze. Zaznaczono płaszczyznę wraz z odległością od ogniska, w których znajdowała się kamera. Od prawej: początkowo widzimy oddzielne wiązki; w miarę przesuwania kamery w lewo obserwujemy ich interferencję. Dalsze przesuwanie kamery w lewo powoduje osłabienie interferencji, gdyż zmniejsza się obszar przykrywania się obu wiązek.



Rysunek 5.2: Obraz interferencji wiązek na kamerze. Lewa strona rysunku przedstawia dwie różne fazy sieci dyfrakcyjnej – inna jest odległość pomiędzy dwiema wiązkami gaussowskimi, pozostałe parametry identyczne. Po prawej stronie widzimy przekroje obrazu (w jednej płaszczyźnie) widzianego przez kamerę CCD. Warto zwrócić uwagę na piksel oznaczony strzałką – w pierwszym przypadku zachodzi interferencja konstruktywna, w drugim destruktywna.

## 5.2. Ogniskowanie wiązki w punkcie

Mając do dyspozycji nie jedną, ale kilka wiązek, możemy przy pomocy interferencji znacząco zmniejszyć rozmiar wiązki ogniskowanej na kamerze CCD. Rozważmy sytuację, w której ze środka modulatora uginamy wiązkę o szerokości 0,8mm, która ogniskuje się na powierzchni matrycy CCD. Przyjmijmy, że jest to wiązka referencyjna i oznaczmy ją indeksem  $n = 0$ . Następnie na modulatorze wzdłuż jednej prostej uginamy pod jednakowym kątem kolejne wiązki, odległe od wiązki referencyjnej o  $nd$ , gdzie:  $d$  – odległość pomiędzy najbliższymi wiązkami,  $n$  – numer wiązki,  $n = \{\pm 1, \pm 2, \dots\}$ . Pomimo, że modulator wprowadza dodatkową fazę i wiązki nie będą propagować się w jednym kierunku, możemy zniwelować ten efekt, dodając do każdej z wiązek odpowiednią fazę w taki sposób, aby interferencja każdej pary wiązek nie wprowadzała przesunięcia prążków interferencyjnych na kamerze – rysunek 5.3.

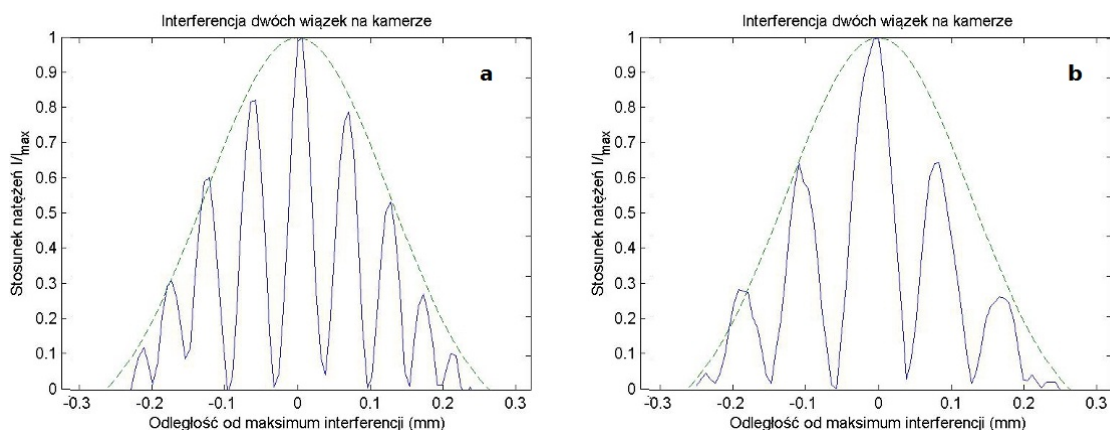


Rysunek 5.3: Kompensacja niekontrolowanej fazy wprowadzanej przez modulator. Na modulatorze uginano dwie wiązki tak, aby jedna z nich trafiała w środek kamery. Drugą z nich wyświetlano w różnych miejscach modulatora i za każdym razem dodawano taką fazę, aby prążki interferencyjne obserwowane na kamerze nie ulegały przesunięciu.

Załóżmy, że wyświetlamy kolejne wiązki wzdłuż osi poziomej (oś  $x$ ) modulatora. Zgodnie ze wzorem (1.4), każda kolejna wiązka posiada na modulatorze fazę większą od wiązki odniesienia o  $\phi_n(x) = k_x x n$  względem wiązki odniesienia, gdzie:  $k_x = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{f}$  – rzut wektora falowego na płaszczyznę kamery,  $f$  – ogniskowa,  $d$  – odległość sąsiednich wiązek na modulatorze. Zakładając jednakowe natężenie  $I_0$  wszystkich wiązek uginanych na modulatorze (gdzie  $I_0$  zawiera modulację funkcją gaussowską wzdłuż osi  $x$  każdej z wiązek), całkowite natężenie rejestrowane przez kamerę wynosi [1]:

$$I_c(x) = I_0 \left| \sum_n e^{ik_x x n} \right|^2 = I_0 \cdot \frac{\sin^2(\frac{1}{2} k_x N x)}{\sin^2(\frac{1}{2} k_x x)} \quad (5.1)$$

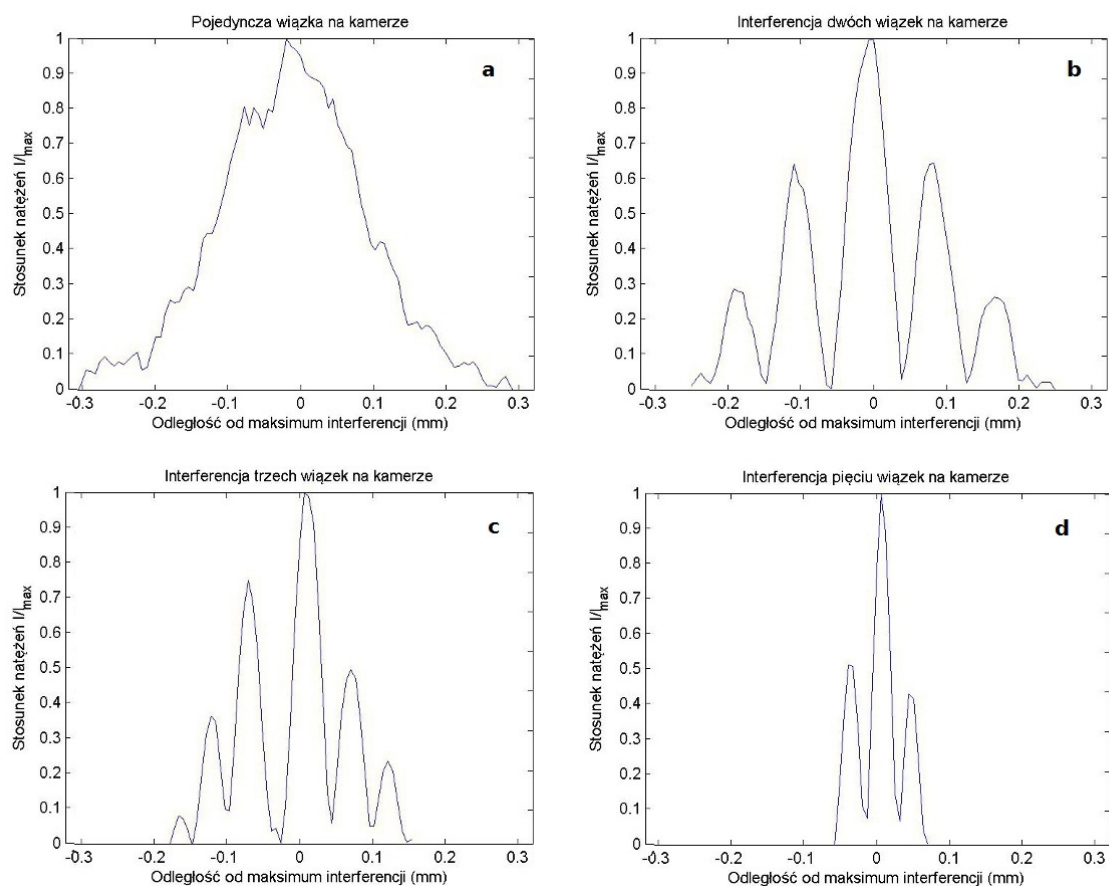
gdzie:  $N$  jest całkowitą liczbą wiązek biorących udział w interferencji. Ze wzoru wynika, że wraz ze zwiększeniem liczby interferujących wiązek maksima interferencyjne stają się coraz węższe. Zmieniając odległość między wiązkami na modulatorze zmieniamy jednocześnie kąt, pod którym wiązki padają na kamerę (ponieważ zmieniamy składową  $k_x$  wektorów falowych poszczególnych wiązek w taki sposób, aby wszystkie wiązki ogniskowały się na kamerze w tym samym miejscu), w związku z czym zmienia się również obraz interferencyjny. Przykład takiej sytuacji dla dwóch wiązek jest pokazany na rysunku 5.4. Zastosowanie wiązek, które na modulatorze wyświetlane są w różnych od siebie odległości wpływa na zmianę odległości pomiędzy minimami interferencyjnymi. Zgodnie ze wzorem (5.1) iloczyn odległości pomiędzy minimami  $x = \Delta d$  oraz odległości sąsiednich wiązek na kamerze  $d$  powinien być wielkością stałą. Kosztem coraz mniejszych rozmiarów głównego maksimum (polepszenie jakości ogniskowania) uzyskujemy coraz większą liczbę maksimów bocznych. Na rysunku zaznaczono również przerywaną krzywą obwiednię, odpowiadającą pojedynczej wiązce wysyłanej na kamerę z modulatora.



Rysunek 5.4: Porównanie interferencji dwóch wiązek uginanych na modulatorze pod różnymi kątami. W obu sytuacjach obserwujemy interferencję wiązki wysyłanej ze środka modulatora z drugą wiązką odległą o  $d = 5,28\text{mm}$  (rysunek a) lub  $d = 2,64\text{mm}$  (rysunek b) od wiązki referencyjnej. Widoczna jest zmiana liczby oraz rozmiarów maksimów interferencyjnych. Na rysunku a odległość pomiędzy minimami wynosi  $\Delta d = 0,06\text{mm}$ , natomiast na rysunku b wynosi  $\Delta d = 0,09\text{mm}$ . Natężenie zostało unormowane do jedności.

W celu usunięcia pojawiających się maksimów bocznych konieczne jest zastosowanie coraz większej liczby interferujących wiązek. Jeżeli do dwóch wiązek wyświetlanych na modulatorze w odległości  $d$  od siebie dodamy kolejne trzy wiązki w taki sposób, że odległość pomiędzy poszczególnymi wiązkami wynosi  $\frac{d}{2}$ , możemy spowodować interferencję

destruktywną pierwszej pary wiązek w trzema pozostałymi w miejscach, gdzie początkowo znajdowały się boczne maksima. Pozwala to zredukować o połowę liczbę maksimów interferencji (dla zadanej powyżej konfiguracji), przy jednoczesnym zmniejszeniu szerokości pojedynczego maksimum. Na rysunku 5.5 przedstawiono obserwowaną interferencję w przypadku różnej liczby wiązek. Oś pionowa została przeskalowana w taki sposób, aby jednostkowe natężenie odpowiadało natężeniu w maksimum interferencyjnym. Widać, że zastosowanie pięciu wiązek pozwala na prawie dziesięciokrotne zmniejszenie rozmiaru centralnej plamki na kamerze oraz skutecznie zmniejsza liczbę bocznych maksimów interferencyjnych. Dzięki temu uzyskujemy możliwość poprawy jakości ogniskowania w układzie.



Rysunek 5.5: Zmniejszenie rozmiaru wiązki ogniskowanej na kamerze. Kolejne rysunki przedstawiają pojedynczą wiązkę padającą na kamerę oraz interferencję odpowiednio dwóch, trzech i pięciu wiązek uginanych na modulatorze. Przy interferencji większej liczby wiązek maksimum staje się coraz węższe – wynosi ok. 0,5mm dla pojedynczej wiązki oraz ok. 0,05mm przy interferencji pięciu wiązek. Natężenie wiązek zostało unormowane do jedności.

# Podsumowanie

W ramach niniejszej pracy licencjackiej zbudowano i przetestowano układ eksperymentalny, służący do wytwarzania wiązek o dowolnym przestrzennym rozkładzie amplitudy i fazy. Omówiono działanie przestrzennego modulatora fazowego i korzystając z formalizmu transformaty Fouriera pokazano, jak można sterować rozkładem natężenia fali świetlnej uginanej na powierzchni modulatora. Przedstawiono wprowadzenie do optyki wiązek gaussowskich i pokazano prosty sposób na obliczanie własności wiązek gaussowskich propagowanych przez układ optyczny, przy użyciu parametru Kogelnika  $q$ . Napisano program umożliwiający wytworzenie na powierzchni modulatora precyzyjnych fazowych siatek dyfrakcyjnych, z możliwością łatwej manipulacji parametrami tworzonych siatek, jak również program służący do analizowania profilu wiązki padającej na powierzchnię matrycy kamery CCD.

Jednakże podczas testowania układu okazało się, że modulator (na skutek złego montażu mechanicznego) wprowadza dodatkową fazę, której nie jesteśmy w stanie kontrolować. Aby skompensować dodatkową fazę, korzystając z przybliżenia optyki promieni wyznaczono macierz ABCD układu, co pozwoliło na precyzyjne sterowanie parametrami wytwarzanych na modulatorze wiązek. W celu przetestowania kalibracji układu, wytwarzano na modulatorze wiązki o profilu gaussowskim i badano ich propagację przez układ. Stwierdzono, że front falowy wiązek opuszczających modulator posiada dodatkowe zakrzywienie, zamiast być płaski, co uwzględniono w dalszej analizie danych. Wyniki pomiarów wskazują, że mierzona przy pomocy kamery CCD wiązka istotnie ma kształt zbliżony do wiązki gaussowskiej, co pozwala sądzić, że wyznaczone współczynniki macierzy ABCD okazały się bliskie prawdziwym.

Na zakończenie pracy zbadano możliwość praktycznych zastosowań zbudowanego układu. Pokazano, że możliwe jest precyzyjne sterowanie interferencją dwóch wiązek z dokładnością do dziesiątych części milimetra. Następnie używając coraz większej liczby interferujących wiązek udało się otrzymać na kamerze maksimum interferencyjne kilkakrotnie węższe niż szerokość plamki rejestrowanej w przypadku użycia pojedynczej wiązki. W przyszłości zbudowany układ (po rozbudowie) posłuży do generowania hologramów w parach atomów rubidu, wykorzystywanych do budowy pamięci kwantowej w Laboratorium Pamięci Kwantowych.

# Podziękowania

Chciałbym serdecznie podziękować mojemu promotorowi dr Wojciechowi Wasilewskiemu, który jest jednocześnie moim opiekunem naukowym na Studiach Indywidualnych. Bez jego pomocy w rozwiązywaniu problemów, licznych wskazówek i zaangażowania nie byłoby możliwe powstanie niniejszej pracy. Mam nadzieję, że równie dobra współpraca będzie kontynuowana także w przyszłości.

Podziękowania należą się również moim najbliższym, którzy nieustannie motywowali mnie podczas przygotowania pracy licencjackiej oraz wspierali w trudnych momentach podczas całych moich studiów na Wydziale Fizyki. Wdzięczny jestem także mojemu nauczycielowi fizyki z liceum, mgr inż. Adamowi Sikorskiemu, który pokazał mi „ciekawą fizykę” i zainspirował do jej studiowania.

# Bibliografia

- [1] E. Hecht, Optics, 4th Edition, Addison Wesley (2002), Chapter 11.
- [2] B.E.A. Saleh, M.C.Teich, Fundamentals of Photonics, J.Wiley&Sons, Inc. (1991), Chapter 4.
- [3] J.W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill, Second Edition (1996).
- [4] J.A. Davis, D.M. Cottrell, J. Campos, M.J. Yzuel, I. Moreno, Encoding amplitude information onto phase-only filters, Appl. Opt. **23**, 5004-5013 (1999).
- [5] J.A. Davis, K.O. Valadez, D.M. Cottrell, Encoding amplitude and phase information onto a binary phase-only spatial light modulator, Appl. Opt. **11**, 2003-2008 (2003).
- [6] H.Kogelnik, T.Li, Laser beams and resonators, Appl. Opt. **10**, 1550-1567 (1966).
- [7] Holoeye, Pluto SLM manual – instrukcja obsługi ciekłokrystalicznego SLM.