Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

Adam Leszczyński
Nr albumu: 320326

Analiza możliwych konfiguracji wnęk rezonansowych z samoobrazowaniem

Praca licencjacka
na kierunku FIZYKA

w ramach KOLEGIUM MIĘDZYWYDZIAŁOWYCH STUDIÓW MATEMATYCZNO-PRZYRODNICZYCH

w zakresie OPTYKI

Praca wykonana pod kierunkiem
dr Wojciecha Wasilewskiego
Zakład Optyki
Instytut Fizyki Doświadczalnej UW

Warszawa, lipiec 2014

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

Oświadczenia autora pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie 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 pracy

Streszczenie

Stosując rozszerzony formalizm macierzy ABCD oraz powiązania go z propagacją wiązki gaussowskiej udało się opracować algorytm i na jego podstawie zbudować wnękę optyczną z samoobrazowaniem. Wewnątrz wnęki został wytworzony pewien obraz, który właśnie dzięki samoobrazowaniu udało się odzyskać. Wnęka ta działa jak filtr niewrażliwy na położenie i kąt padania wiązki.

Słowa kuczowe

wnęka optyczna, samoobrazowanie, przybliżenie przyosiowe

Dziedzina pracy (kody wg programu Socrates-Erasmus)

13.2 Fizyka

Tytuł pracy w języku angielskim

Analysis of possible configurations of self-imaging optical cavities.

Spis treści

Wstęp **2**

1 Teoria **3**
1.1 Opisanie wnęki za pomocą macierzy ABCD 3
1.2 Interferometr Fabty-Pérot 5
1.3 Wiązka gaussowska 6
1.4 Powiązanie macierzy ABCD z fazą nabywaną przez wiązkę . . 9
1.4.1 Przykłady wnęk rezonansowych 9
1.4.2 Opis wnęki 10
1.5 Rozszerzenie formalizmu macierzy ABCD 13

2 Doświadczalna weryfikacja **15**
2.1 Ustawianie wnęki 17

3 Badanie własności zbudowanej wnęki - weryfikacja samoobrazowania **22**

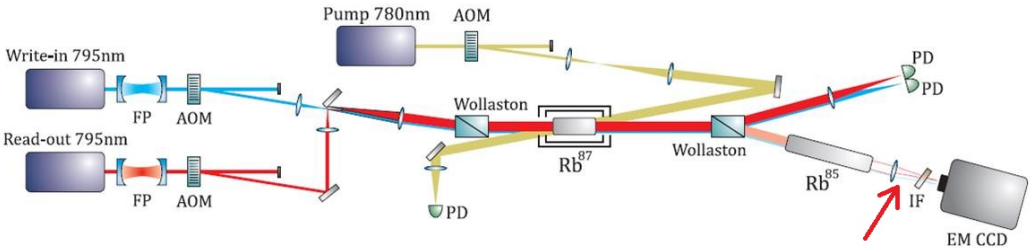
Podsumowanie **25**

Bibliografia **25**

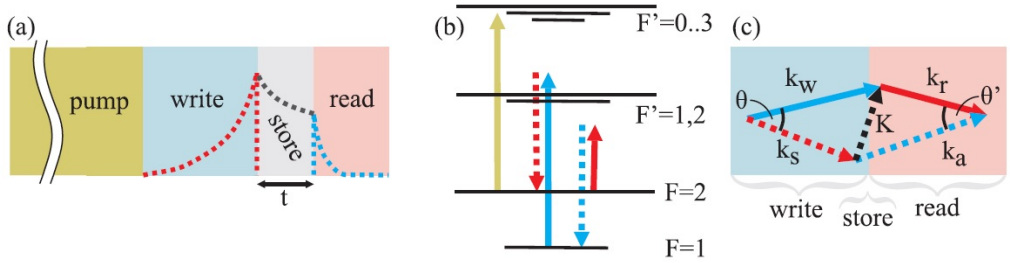
Wstęp

Przedmiotem niniejszej przcy licencjackiej jest budowa wnęki rezonansowej z samoobrazowaniem, która posłuży jako filtr interferencyjny niewrażliwy na położenie i kąt padającej na niego wiązki. Fotony, które mają zostać odfiltrowane różnią się o 6,8 GHz od częstotliwości lasera. Jest to na tyle mała różnica, że w grę wchodzą jedynie filtry interferencyjne. Z tego powodu zostanie użyta wnęka rezonansowa. Nie można niestety użyć najprostszego interferometru Fabty-Pérot, ponieważ jego działanie zależy od kąta padania wiązki. Wady tej nie posiada natomiast wnęka rezonansowa z samoobrazowaniem, będąca przedmiotem owej pracy licencjackiej. Wnęka ta zostanie umieszczona w miejscu oznaczonym strzałką na rysunku 1. Motywacją do stworzenia wnęki z samoobrazowaniem był artykuł [4] w którym opisano jak podobna wnęka została wykorzystana do zwiększenia efektywności generowania drugiej harmonicznej słabych obrazów. Pokazuje on, że jest ona możliwa do skonstruowania.

Poniżej znajduje się schemad układu doświadczalnego służacego do badania optycznej pamięci kwantowej w parach rubidu.



Rysunek 1: Schemat budowy układu badawczego służacego do badania optycznej pamięci kwantowej w parach rubidu[3]. W miejscu wskazywanym strzałką znajdzie się wnęka rezonansowa z samoobrazowaniem, będąca przedmiotem niniejszej pracy licencjackiej



Rysunek 2: Proces zapisu i odczytu informacji w parach rubidu [3].

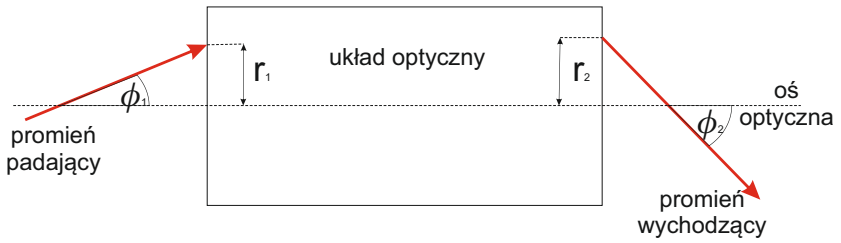
Komórka z parami rubidu jest oświetlana kolejno przez 3 wiązki. Pierwsza, zaznaczona kolorem żółtym wiązka pompująca przygotowuje ośrodek do zapisu poprzez przeniesienie wszystkich atomów do poziomu F=1 (rysunek 2 b)). Następnie pary są oświetlane wiązką zapisującą (oznaczoną kolorem niebieskim), która powoduje, że część atomów przenosi się na poziom F=2. Fotony, które uległy rozproszeniu zostawiły w ośrodku informację o tym jak zmienił się ich wektor falowy. Po fazie zapisu następuje krótka przerwa, a następnie faza odczytu. Z wiązki odczytującej (oznaczonej kolorem czerwonym) rozproszeniu ulegnie dokładnie tyle fotonów, ile podczas zapisu. po odfiltrowaniu za pomocą wnęki rezonansowej z samoobrazowaniem zostaną one zarejestrowane za pomocą kamery CCD.

Niniejsza praca składa się z trzech części. W rozdziale 1 powiedziane jest w jaki sposób dokładnie opisać działanie wnęki rezonansowej za pomocą formalizmu macierzy ABCD oraz własności wnęki z samoobrazowaniem. W rozdziale 2 opisana jest cała procedura jej budowy. W rozdziale 3 zostało zweryfikowane samoobrazowanie zbudowanej wnęki rezonansowej.

1 Teoria

1.1 Opisanie wnęki za pomocą macierzy ABCD

Działanie dowolnego układu otycznego można opisać podając relację pomiędzy połorzeniem i kątem padania promienia, który wchodzi do tego układu z położeniem i kątem promienia, który go opuszcza.

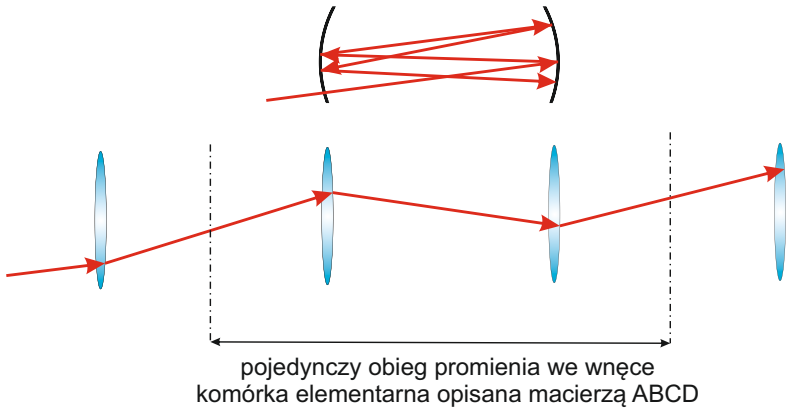


Rysunek 3: Wiązka przechodząca przez pewien układ optyczny

Jeżeli odległość promienia od osi optycznej r_1 i kąt między nim, a osią θ_1 są niewielkie można w przybliżeniu opisać działanie układu za pomocą macierzy zwanej macierzą ABCD.

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

Wnęka optyczna jest układem, w którym promień wielokrotnie odbija się od luster.

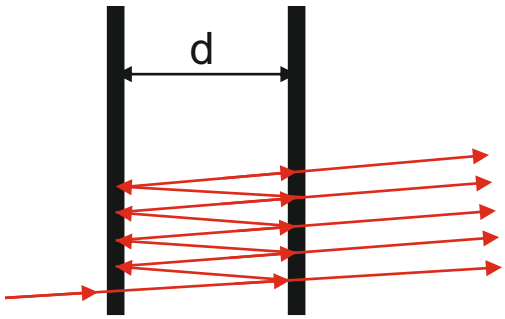


Rysunek 4: Schemat przechodzenia promienia przez wnękę rezonansową

Można to sobie wyobrazić jako układu składający się z wielu powtarzających się elementarnych komórek. Taką właśnie komórkę można opisać za pomocą macierzy ABCD. Przejście promienia przez komórkę n razy, odpowiadające n obiegom promienia we wnęce, można wtedy opisać poprzez podniesienie macierzy do n-tej potęgi.

1.2 Interferometr Fabty-Pérot

Dla wyjaśnienia dalszych zależności dobrze jest się przyjrzeć najprostrzej wnęce optycznej jaką jest interferometr Fabty-Pérot składający się z dwóch płaskich luster.



Rysunek 5: Interferometr Fabry-Pérot

Niech na interferometr pada fala płaska o amplitudzie 1 i częstości kołowej ω, t niech oznacza amplitudowy współczynnik transmisji luster, a u będzie amplitudowym współczynnikiem transmisji przestrzeni między lustrami, związanego ze stratami, o który maleje amplituda fali po pokonaniu drogi d między lustrami. Wtedy amplituda fali, która wydostała się z interferometru bez odbijania się od luster wynosi:

$$t^2 u \tag{2}$$

Fala, która odbiła się tylko raz od każdego z luster ma amplitudę:

$$t^2 u(1-t^2)u^2 e^{i\frac{2\omega d}{c}} \tag{3}$$

Ogólnie fala, która wydostała się po n obiegach wewnątrz interferometru ma amplitudę:

$$t^2(1-t^2)^n u^{2n+1} e^{i\frac{2n\omega d}{c}} \tag{4}$$

Po zsumowaniu wszystkich tych amplitud otrzymujemy amplitudowy współczynnik transmisji interferometru t_{F-P}. Współczynnik transmisji natężeniowej, wygląda następująco:

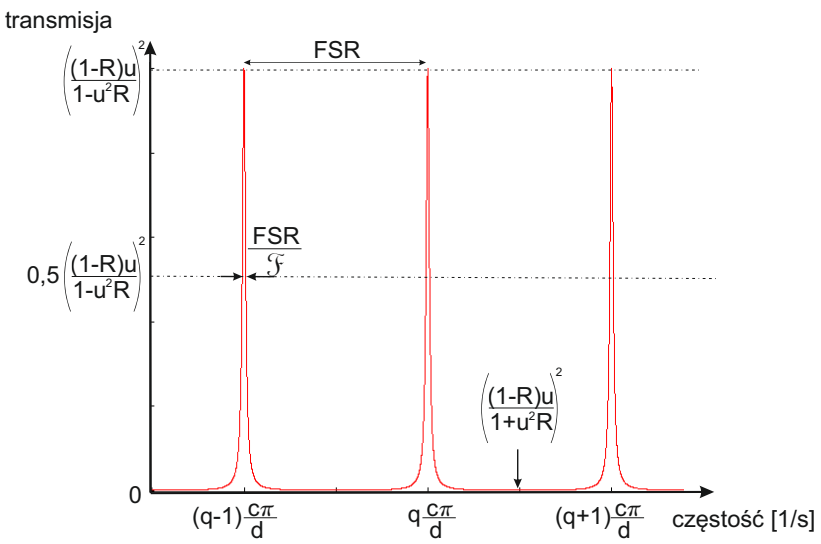
$$T = |t_{F-P}|^2 = \frac{1}{\left(\frac{1-u^2R}{(1-R)u}\right)^2 + \frac{4R}{(1-R)^2} sin^2\left(\frac{\omega d}{c}\right)} \tag{5}$$

Gdzie R jest natężeniowym współczynnikiem odbicia luster. Maksima transmisji pojawiają się tam, gdzie $\omega\frac{d}{c} = k\pi$, czyli wtedy, gdy fala po pełnym

obiegu wewnątrz wnęki nabywa fazę będącą wielokrotnościa 2π. Jest to również równoważne temu, że długość wnęki d jest wielokrotnością połowy długości fali. Odległość między maksimami wynosi:

$$FSR = \frac{c\pi}{d} \tag{6}$$

Poniżej znajduje się wykres przedstawiający transmisję interferometru w funkcji częstości.



Rysunek 6: Wykres transmisji interferometru Fabry-Pérot w funkcji częstości

Stosunek maksimum transmisji do minimum transmisji wynosi:

$$\left(\frac{1+u^2R}{1-u^2R}\right)^2 \cong \frac{4}{(1-u^2R)^2} \tag{7}$$

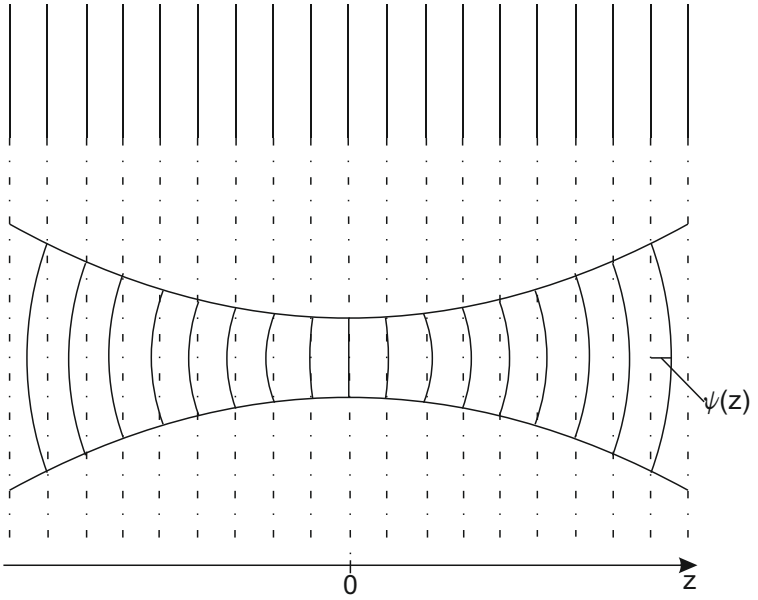
Stosunek FSR do szerokości pojedynczego piku w połowie wysokości jest nazywany finezją i jest funkcją współczynnika odbicia luster R i współczynnika u, związanego ze stratami.

$$\mathcal{F} = \frac{\pi u\sqrt{R}}{(1-u^2R)} \tag{8}$$

1.3 Wiązka gaussowska

Do budowy docelowej wnęki rezonansowej zostały użyte lustra sferyczne. Z tego powodu spodziewamy się, że modami własnymi będą wiązki gaussow-

skie, które posiadają sferyczne fronty falowe, dopasowuące się do powierzchni zwierciadeł.



Rysunek 7: Porównanie frontów falowych fali płaskiej na górze rysunku i wiązki gaussowskiej na dole rysunku.$\psi(z)$ oznacza fazę Guoy'a

Faza nabywana podczas propagacji przez wiązkę gaussowską różni się od fazy jaką nabywa fala płaska o tej samej częstości. Różnica ta jest nazywana fazą Guoy'a. Okazuje się, że różne mody wiązki gaussowskiej mają różną fazę Guoy'a. Wyraża się ona następującym wzorem

$$\psi_{m,n}(z) = (m + n + 1)\psi_{0,0}(z) \tag{9}$$

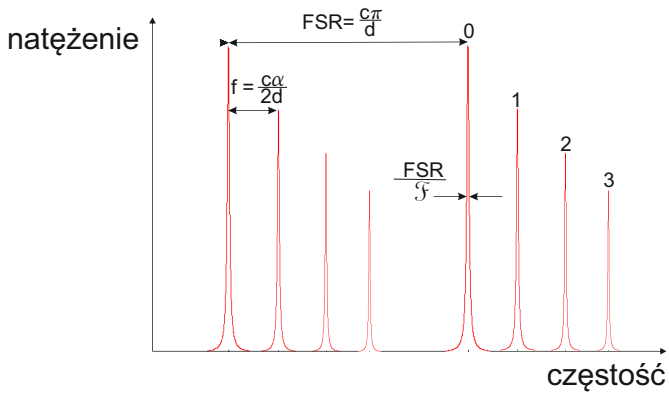
gdzie (m,n) to numer modu. We wnęce z lustrami sferycznymi, podobnie jak dla interferometru Fabry-Pérot, maksima transmisji pojawiają się dla tych częstości, dla których faza po pełnym obiegu zmienia się o wielokrotność 2π. Wyraża się to następująco

$$2Lk - (m + n + 1)\alpha = 2p\pi \tag{10}$$

Gdzie:
α - faza Guoy'a nabyta przez mod (0,0) wiązki gaussowskiej po pełnym obiegu we wnęce
L - długość wnęki
$k = \frac{\omega}{c}$ - liczba falowa

(m,n) - numer modu Gaussa-Hermite'a
p - numer modu podłużnego

kożystając z modelu interferometru Fabry-Pérot i wzoru (10) stworzyć wykres przedstawiający spodziewanę natężenie wiązki, która przeszła przez interferometr w funkcji częstości.



Rysunek 8: Wykres natężenia wiązki, która przeszła przez wnękę w funkcji częstotliwości. Wysokości maksimów zależą od tego, jaka część natężenia wiązki znajdowała się w konkretnym modzie przestrzennym. Liczby nad słupkami odpowiadają sumie m+n.

Wnęka, która jest nie wrażliwa na położenie i kąt padania wiązki powinna działać dla dowolnego obrazu znajdującego się na wejściu. Dowolną wiązkę można rozłożyć w bazie modów Gauss'a-Hermite'a. Stąd wniosek, że wszystkie mody wiązki gaussowskiej powinny posiadać maksimum transmisji dla tej samej częstości. Wynika stąd, że faza Gouy'a modu (0,0) po pełnym obiegu $\alpha = 0 \bmod 2\pi$. W rzeczywistości nie jest możliwe takie doskonałe ustawienie. Ważna jest więc liczba modów znajdująca się w szerokości jednego maksimum transmisji $\frac{FSR}{\mathcal{F}}$. Jest to stosunek tejże szerokości do odległości między dwoma sąsiednimi modami $\frac{FSR}{\mathcal{F}}/f$. Wiemy, że $\frac{FSR}{f} = \frac{2\pi}{\alpha}$, czyli Liczba modów w szerokości jednego maksimum wyraża się wzorem

$$n = \frac{2\pi}{\mathcal{F}} \frac{1}{\alpha} \tag{11}$$

1.4 Powiązanie macierzy ABCD z fazą nabywaną przez wiązkę

Korzystając z formuły Huygens'a-Fresnel'a na propagację w układzie opisywanym macierzą ABCD [1] można uzyskać wzór wiążący fazę Gouy'a nabytą przez mod (0,0) wiązki gaussowskiej po jednym obiegu wewnątrz wnęki ze śladem macierzy ABCD ją opisującą.

$$\alpha \; mod(2\pi) = \arccos(\frac{A+D}{2}) \tag{12}$$

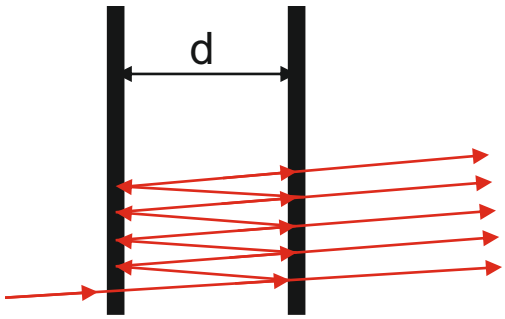
a stąd

$$\alpha \; mod(2\pi) = 0 \Longrightarrow A + D = 2 \tag{13}$$

Ponieważ chcemy, aby $\alpha \; mod(2\pi) = 0$ ślad macierzy ABCD powinien przyjmować wartość 2.

1.4.1 Przykłady wnęk rezonansowych

Jedną z wnęk spełniających warunek odpowiedniego śladu jest interferometr Fabry-Pérot.



Rysunek 9: Interferometr Fabry-Pérot

Macierz ABCD takiej wnęki wygląda następująco.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{14}$$

Wnęka ta nie spełnia jednak warunku niewrażliwości na położenie i kąt wiązki, ponieważ o ile jej działanie nie zależy od położenia wiązki, to w zależności od kąta będzie ona transmitować różne częstości.

Drugim przykładem wnęki jest wnęka sferyczna, której lustra są umieszczone na sferze. Macierz ABCD tej wnęki ma postać

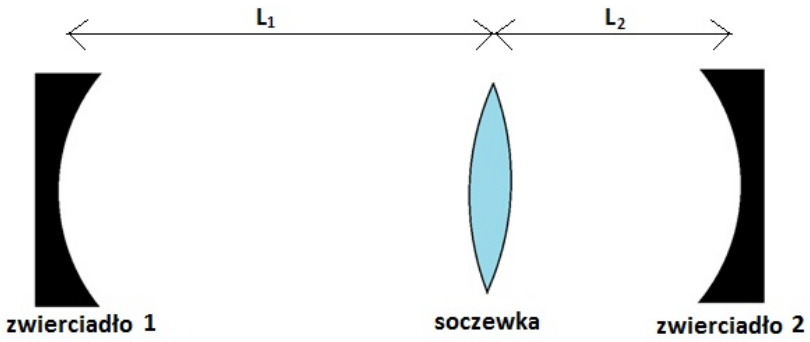
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{4}{R} & 1 \end{pmatrix} \tag{15}$$

gdzie R to promień sfery.
Wnęka ta działa jednak tylko, gdy wiązka przechodzi dokładnie przez środek sfery.

Obie z powyższych wnęk spełniają tylko jeden z dwóch warunków. Fabry-Pérot jest niewrażliwy tylko na położenie, a wnęka sferyczna tylko na kąt padania wiązki. Można stąd wyciągnąć wniosek, że wnęka która będzie spełniać oba te warunki powinna być opisywana macierzą z zerowymi wyrazami pozadiagonalnymi, czyli macierzą identyczności. Inaczej można nazwać tę wnękę samoobrazującą, ponieważ dowolny obraz znajdujący się w jej wnętrzu będzie odtwarzał się po każdym obiegu.

1.4.2 Opis wnęki

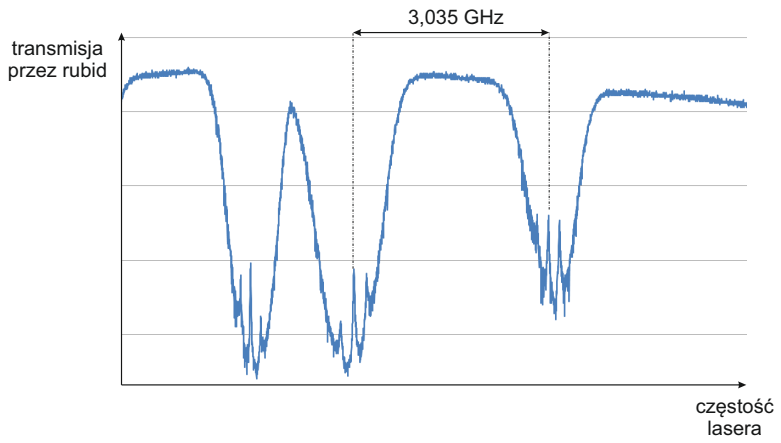
Wnęki opisywanej macierzą identyczności nie da się zbudować stosując jedynie 2 zwierciadła i potrzebna jest jeszcze soczewka. Poniżej znajduje się schemat badanej wnęki.



Rysunek 10: Schemat budowy badanej wnęki rezonansowej

Badana wnęka składała się z dwóch zwierciadeł o promieniach krzywizny 30 mm oraz szklanej (współczynik załamania 1,46) soczewki o grubości 2,6 mm i promieniach krzywizn równych 10 mm. Soczewkę oraz zwierciadło 2 można swobodnie przesuwać wzdłoż osi optycznej. Dla L1 i L2, przedstawionych na rysunku 10, wynoszących odpowiednio 35,29 mm oraz 15,64 mm

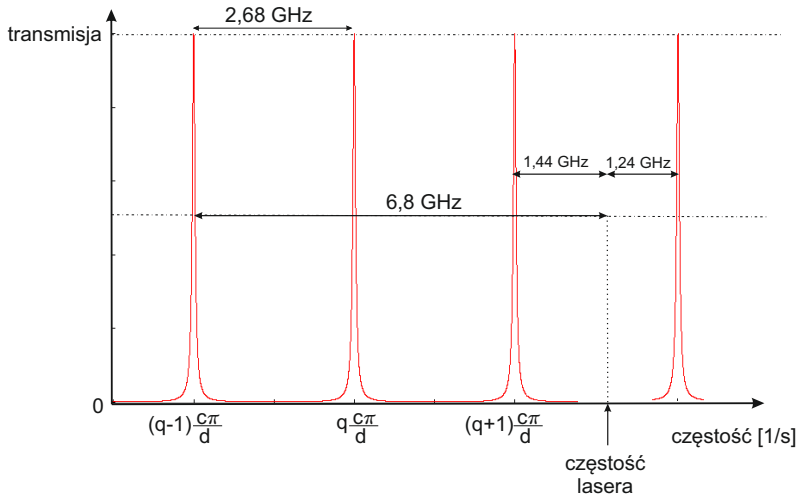
macierz ABCD jest z dobrym przybliżeniem macierzą identyczności.
Przy tych ustawieniach teoria przewiduje FSR równy 2,74 GHz. Zmierzony FSR wyniósł około 2,68 GHz. Aby zmierzyć FSR należało ustalić związek pomiędzy częstością lasera, a napięciem nim sterującym. W tym celu obserwowana była transmisja przez rubid, który był oświetlony silną przeciwbieżną wiązką, w funkcji częstości.



Rysunek 11: Transmisja rubidu, oświetlanego silną przeciwbieżną wiązką, w funkcji częstości

Skądinąd wiadomo, że odległość zaznaczona na powyższym rysunku wynosi dokładnie 3,035 GHz. Dzięki temu znaleziono związek między częstością lasera, a napięciem nim sterującym.

Fotony, które mają zostać odfiltrowane przez wnękę mają cząstość różną od częstości lasera o 6,8 GHz. Częstość lasera pojawi się więc obszarze, gdzie transmisja wnęki jest minimalna.



Rysunek 12: Położenie częstości lasera względem maksimów transmisji

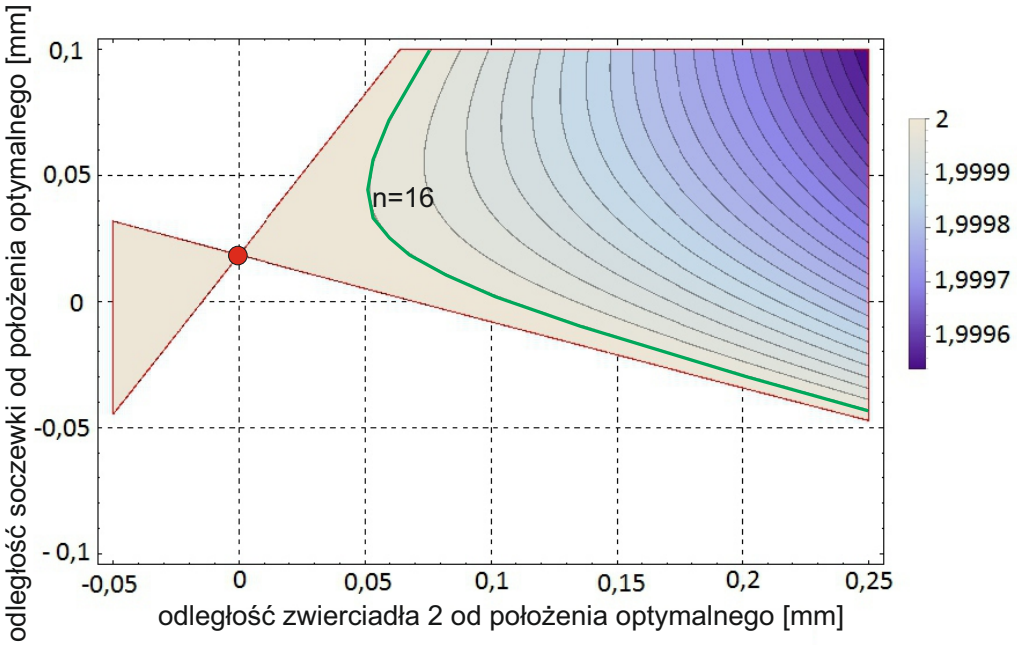
Zmierzone maksimum transmisji w zbudowanej wnęce wynosiło około 55%

W rozdziale 1.3 wyprowadzony został związek (11) pomiędzy finezją $\mathcal{F}$ i fazą Gouy'a modu (0,0) po jednym obiegu α, a liczbą modów n znajdujących się w szerokości jednego maksimum transmisji. Stosując wzór (12), który wiąże α ze śladem macierzy ABCD wnęki powstaje zależność:

$$n = \frac{2\pi}{\mathcal{F}\arccos(\frac{A+D}{2})} \tag{16}$$

wiążąca tenże ślad z liczbą modów w szerokości jednego maksimum transmisji. Pomiar stosunku FSR do szerokości maksimum transmisji w połowie wysokości wykazała, że finezja wyniosi około 88.

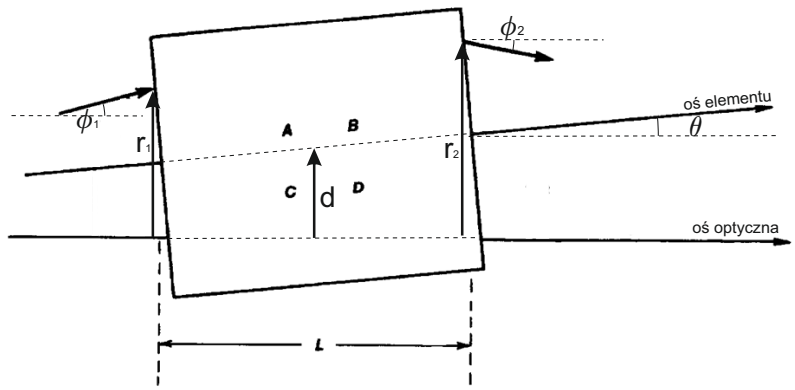
Odczytując ślad z poniższego wykresu można znaleźć liczbę modów n w zależności od ustawienia elementów wnęki.



Rysunek 13: Ślad macierzy ABCD opisującej wnękę w zależności od ustawienia soczewki i zwierciadła 2. Czerwoną kropką oznaczono miejsce, w którym wnęka jest opisywana macierzą identyczności. Na zielonej poziomicy w szerokości jednego maksimum mieści się 16 modów

1.5 Rozszerzenie formalizmu macierzy ABCD

Dzięki formalizmowi macierzy ABCD można łatwiej ustalić jak skonstruować odpowiednią dla nas wnękę. Jest on jednak dla nas niewystarczający. Formalizm macierzy ABCD zakłada, że elementy optyczne są ustawione dokładnie wzdłuż jednej osi. W rzeczywistości jednak zawsze istnieją pewne niedokładności w ich ustawieniu.



Rysunek 14: Opis propagacji promienia przez element, którego oś nie pokrywa się z osią optyczną układu [2]

Maciarz wnęki rezonansowej, którą konstruujemy, posiada ślad równy 2. Jest więc ona na granicy stabilności. Wobec tego niedokładność ustawienia elementów może mieć kluczowe znaczenie w jej działaniu.

Jako przykład weźmy element opisywany macierzą ABCD, którego oś jest równoległa od osi optycznej ($\theta = 0$) i odległa od niej o d. Wtedy można zapisać wektor kąta i połorzenia w układzie tego elementu.

$$\begin{bmatrix} r' \\ \phi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r - d \\ \phi \end{bmatrix} \tag{17}$$

Następnie podziałać na niego macierzą.

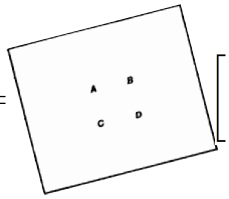
$$\begin{bmatrix} r_2' \\ \phi_2' \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{bmatrix} r_1' \\ \phi_1' \end{bmatrix} \tag{18}$$

Na koniec z układu primowanego przejść z powrotem do układu osi optycznej. Otrzymujemy wtedy

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(r_1 - d) + B\phi_1 + d \\ C(r_1 - d) + D\phi_1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1 - A)d \\ -Cd \end{bmatrix} \tag{19}$$

Niedokładne ustawienie elementu powoduje, że do wektora opisującego połorzenie i kąt dodawany jest pewien stały wektor. Ogólnie działanie źle ustawionego elementu można zapisać w poniższy sposób.

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix} =$$



$$\begin{bmatrix} r_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix}$$

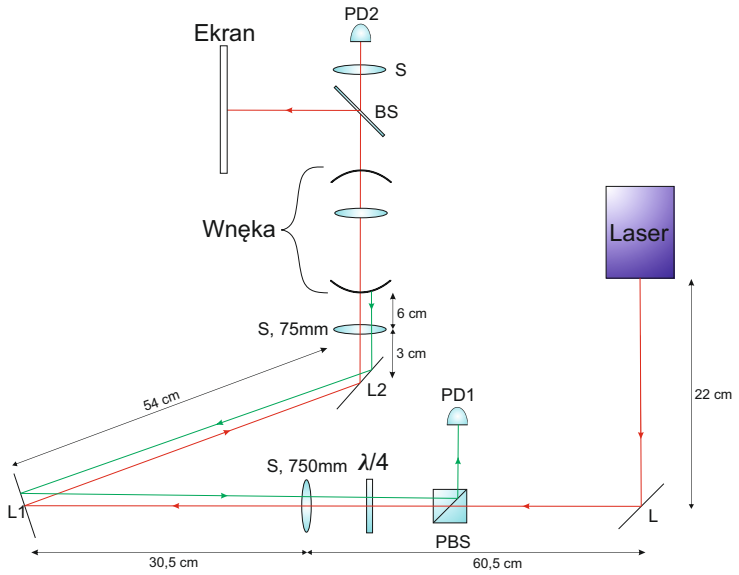
Można to zapisać tworząc macierz 3x3.

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \phi_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & E \\ C & D & F \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \phi_1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{20}$$

Stosując analogiczne rozumowanie można wyznaczyć elementy E i F przy dowolnym ustawieniu elementów wnęki. Pełne wyprowadzenie znajduje się w pozycji [2]. W oparciu o formalizm macierzy ABCDEF został napisany skrypt w programie mathematica, który opisywał działanie badanej wnęki w zależności od ustawienia jej elementów.

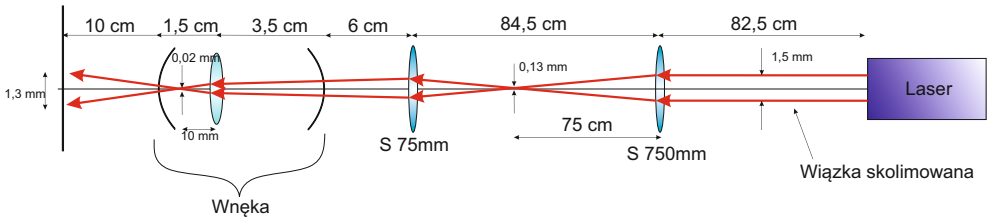
2 Doświadczalna weryfikacja

Poniższy rysunek przedstawia schemat układu doświadczalnego służącego do ustawiania wnęki



Rysunek 15: Schemat układu służącego do badania wnęki. PD - fotodioda, PBS - polaryzująca płytka światłodzieląca, BS - płytka światłodzieląca, $\lambda/4$ - płytka ćwierćfalowa L - lustro, S - soczewka

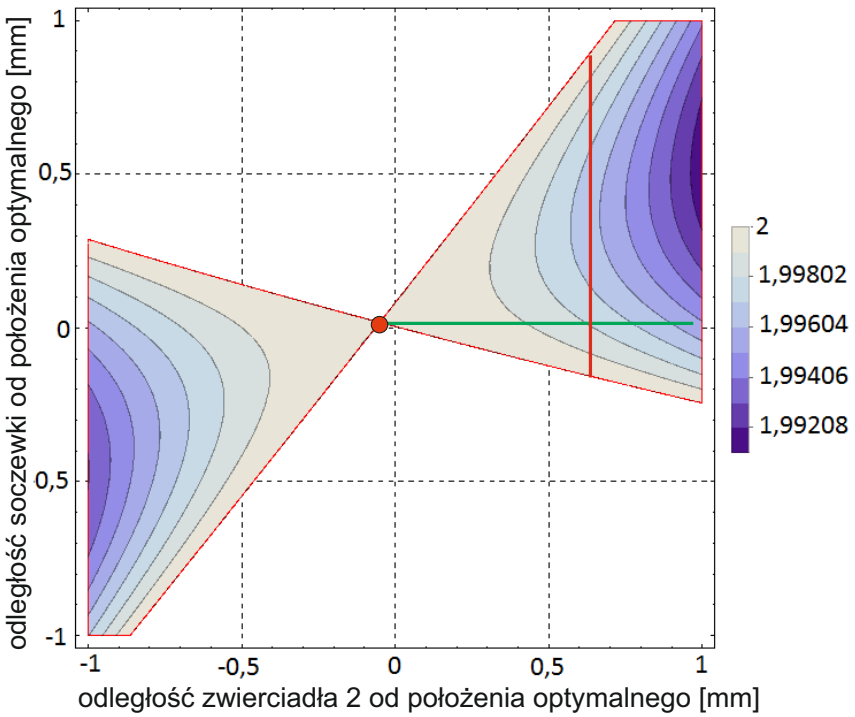
Wiązka lasera przemieszcza się przez układ luster i soczewek docierając do wnęki. Część światła wiązki odbije się od wnęki i dzięki płytce ćwierćfalowej odbije się od PBS w stronę fotodiody PD1. Część wiązki, która przedostała się na drugą stronę wnęki zostaje rozdzielona za pomocą płytki światłodzielącej na ekran oraz na fotodiodę PD2. Obracając lustrami L1 i L2 można kontrolować położenie i kąt padania wiązki lasera na wnękę. Jeżeli chcemy zmieniać sam kąt padania wiązki, to po obróceniu listra L1 o kąt ϕ należy obrócić lustro L2 o kąt około 3ϕ w odpowiednią stronę, natomiast Jeżeli chcemy manipulować samym położeniem wiązki, należy obrócić lustro L2 o kąt około 10ϕ w drugą stronę.



Rysunek 16: Prostoliniowy schemat układu - średnica wiązki

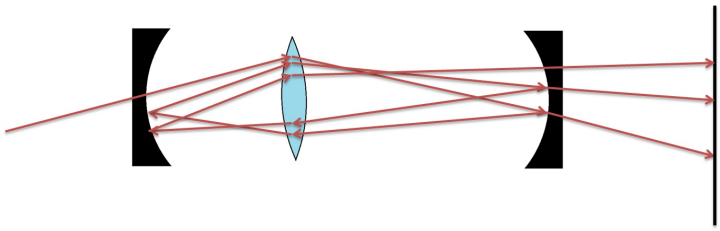
2.1 Ustawianie wnęki

Poniżej został umieszczony wykres przedstawiający ślad macierzy ABCD opisującej wnękę w zależności od położenia soczewki i zwierciadła 2.



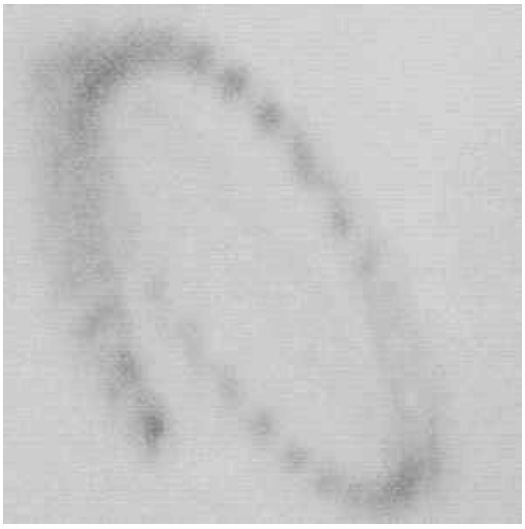
Rysunek 17: Ślad macierzy ABCD opisującej wnękę w zależności od ustawienia soczewki i zwierciadła 2. Czerwoną linią oznaczono kierunek przemieszczania się po wykresie przy poruszaniu soczewką wzdłuż osi optycznej. Czerwona kropka oznacza miejsce, gdzie wnęka jest ustawiona optymalnie, czyli jest opisywana macierzą identyczności.

Wnęka w pobliżu optymalnego ustawienia jest na granicy stabilności, przez co jest ona niezwykle wrażliwa na niedokładność umiejscowienia jej elementów względem osi optycznej. Czyni to ją wręcz nie możliwą do poprawnego ustawienia. Z tego powodu ustawianie należy zacząć od rozsunięcia zwierciadeł na większą odległość.



Rysunek 18: Schemat pokazujący w jaki sposób powstaje obraz na ekranie

Formalizm macierzy ABCDEF informuje nas, że w przybliżeniu przyosiowym na ekranie powinniśmy obserwować elipsy. Na początku należy więc, za pomocą luster L1 i L2 z rusunku 15, tak ustawić położenie i kąt wiązki padającej, aby na ekranie otrzymać elipsę taką jak na poniższym zdjęciu.



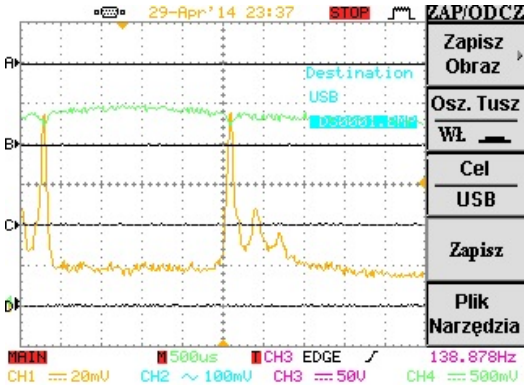
Rysunek 19: Obraz otrzymywany na ekranie za wnęką, gdy jest ona stabilna

Następną rzeczą jaką należy zrobić to oszacowanie jakie jest optymalne ustawienie elementów wnęki. Przy pewnym ustawieniu zwierciadła trzeba przesuwać soczewkę wzdłuż osi optycznej. Odpowiada to poruszaniu się wzdłuż czerwonej lini na rysunku 17. Gdy wnęka stanie się niestabilna oznacza to, że ślad macierzy ABCD jest większy od 2. Znając zakres poruszania soczewką, w którym wnęka była stabilna można dowiedzieć się jakie są odległości L1 i L2 między elementami wnęki. Postępując tak dla kilku różnych pozycji zwierciadła 2 można oszacować jakie powinno być końcowe ustawienie poruszanej soczewki i zwierciadła. Gdy zostanie to już wykonane należy ustawić soczewkę w miejscu, które wyszło nam z tego oszacowania (zielona

linia na rysunku 17). Zwierciadło 2 można natomiast z powrotem ustawić tak, by wnęka była za długa.

Kolejnym krokiem jest obserwowanie jak zachowuje się obraz na ekranie podczas przemieszczania zwierciadła wzdłuż osi optycznej. Z formalizmu macierzy ABCDEF wynika, że gdy wszystkie elementy wnęki są ustawione wzdłoż jednej osi, obraz na ekranie nie powinien znacznie zmieniać swoich kształtów. Gdy przesuwane zwierciadło jest ustawione krzywo, to podczas przesuwania go w stronę ustawienia optymalnego (w stronę czerwonej kropki wzdłuż zielonej lini na rysunku 17) elipsa rozciąga się w tę stronę, w którą lustro jest przekrzywione. W ten sposób można ustawić elementy wnęki tak, by były w przybliżeniu wzdłuż jednej osi.

Do dalszego ustawiania wnęki częstość lasera emitującego wiązkę powinna być modulowana sygnałem trójkątnym. Należy tak manipulować położeniem wiązki wejściowej oraz w niewielkim stopniu obracając zwierciadłem, aby na ekranie otrzymać punkt. Na oscyloskopie powinny wtedy pojawić się piki odpowiadające kolejnym modom poprzecznym wiązki gaussowskiej, takie jak na rysunku poniżej. Wszelkie zdjęcia z oscyloskopu zostały wykonane przy malejącym napięciu sterującym laserem.



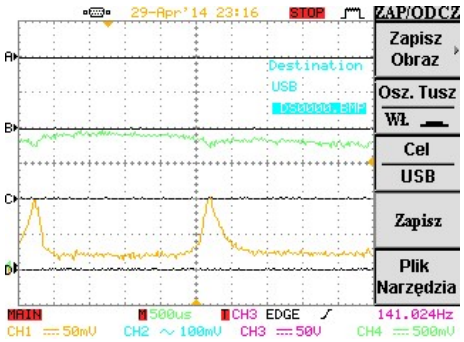
Rysunek 20: Wykres otrymywany na oscyloskopie podczas skanowania częstości lasera, gdy zwierciadła są od siebie zbyt oddalone

Stosunek f i FSR wynosi $\frac{\alpha}{2\pi}$. Korzystając ze wzoru 12 można obliczyć ślad macierzy ABCD.

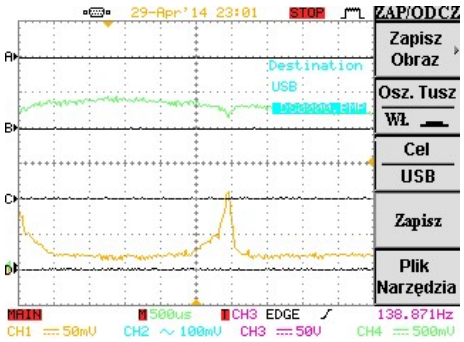
$$A + D = 2cos(2\pi\frac{f}{FSR}) \tag{21}$$

Znajc ten ślad można określić na której poziomicy z rysunku 17 się znajdujemy. Teraz należy po trochu przesuwać zwierciadło w stronę położenia optymalnego. Po każdej takiej operacji należy skorygować ustawienie zwierciadła, ponieważ kierunek w którym jest ono przesuwane nie musi dokładnie

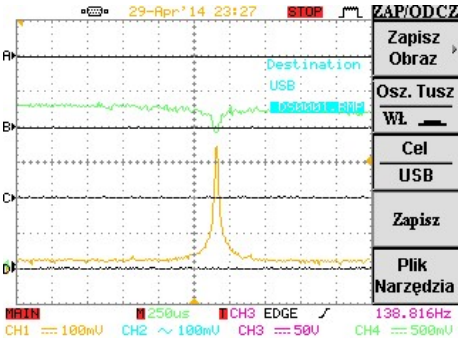
pokrywać się z kierunkiem osi optycznej. W miarę zbliżenia się do położenia końcowego maksima transmisji na oscyloskopie powinny coraz bardziej się do siebie zbliżać. Gdy jest się już blisko dobrego ustawienia zaczynają się one zlewać w jeden. Rzeczą na którą należy teraz zwracać uwagę jest jego kształt. Spodziewamy się, że w idealnym ustawieniu powinno ono być symetryczny. Poniżej znajduje się kilka zdjęć z oscyloskopu pokazujących jak wygląda takie maksimum tansmisji w zależności od ustawienia zwierciadła.



Zbyt długa wnęka



Zbyt krótka wnęka

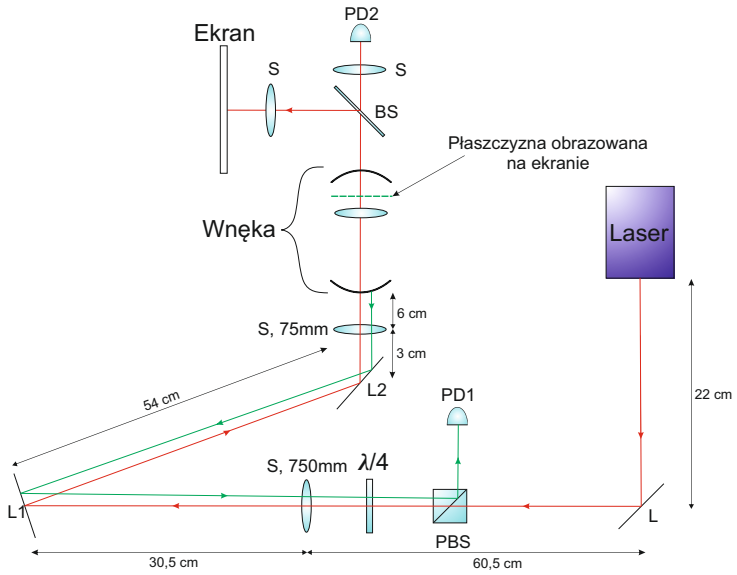


Wnęka o odpowiedniej długości

Rysunek 21: Wygląd piku widzianego na oscyloskopie w zależności od odległości między zwierciadłami

Dzięki tym obserwacjom można precyzyjnie ustawić położenie zwierciadła.

Teraz, gdy zwierciadło jest już ustawione, należy dokładnie ustawić soczewkę.



Rysunek 22: Schemat układu służącego do badania położenia soczewki wewnątrz wnęki

Między ekranem, a wnęką należy umieścić soczewkę, która odwzoruje na nim płaszczyznę znajdującą się wewnątrz wnęki, między soczewką i zwierciadłem 2. Efekt ten jast najlepiej widoczny, gdy płaszczyzna ta znajduje się w odległości między 5, a 10 mm od soczewki. Następnie poruszając szoczewką w poprzek osi optycznej należy obserwować jaki powstanie obraz na ekranie. Formalizm ABCDEF przewiduje, że w zależności od ustawienia soczewki na ekranie otrzymamy poniższe wzory.

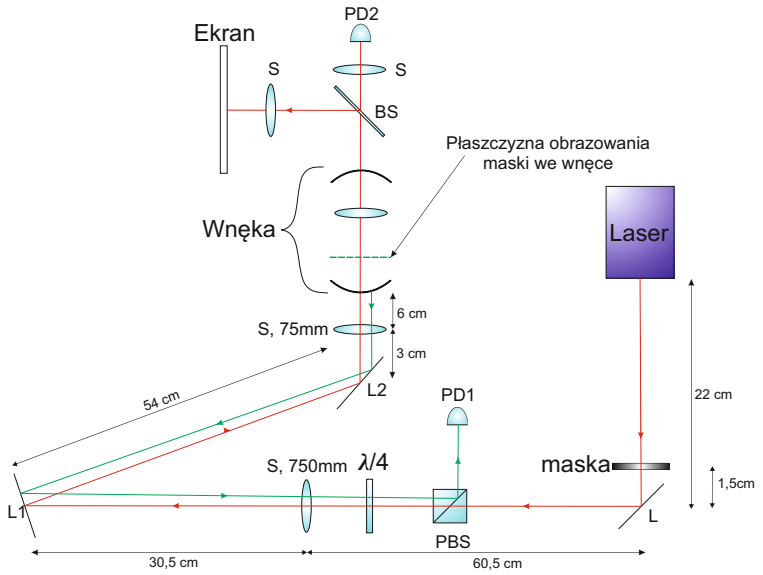
Soczewka zbyt oddalona od zwierciadła 2 *Soczewka zbyt blisko zwierciadła 1*

Rysunek 23: Wzory widziane na ekranie podszas przesuwania soczewki w poprzek osi optycznej. Kolorem czerwonym zaznaczono połżenie wiązki na ekranie po zerowej ilości obiegów wewnątrz wnęki

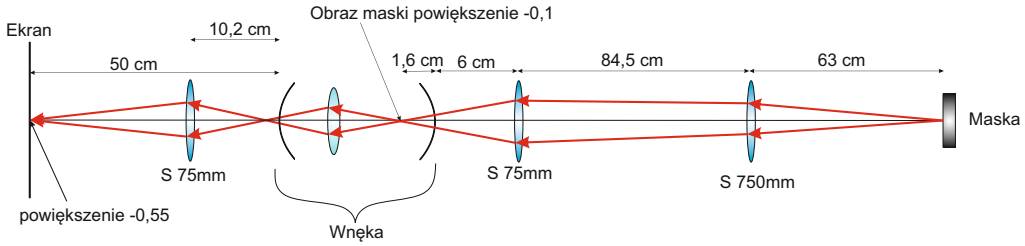
Rysunek z lewej strony przedstawia położenie wiązki w płaszczyźnie ekranu po kolejnych obiegach we wnęce, gdy soczewka jest przesunięta w kierunku zwierciadła 2. Kolejne punkty kierują się w jedną stronę. Rysunek z prawej strony przedstawia to samo, gdy soczewka jest przesunięta w kierunku zwierciadła 1. Początkowo punkty podążają w jedną stronę, a następnie zawracają. W ten sposób można znaleźć właściwe położenie soczewki. Gdy już soczewka zostanie ustawiona trzeba minimalnie skorygować położenie zwierciadła, ponieważ maksimum transmisji może być lekko niesymetryczne.

3 Badanie własności zbudowanej wnęki - weryfikacja samoobrazowania

Przez tak zbudowaną wnękę powinna być możliwość odwzorowania dowolnego obrazu. W tym celu na drodze wiązki lasera ustawiono folię aluminiową z dwoma dziurkami nazwany na poniższym rysunku maską.

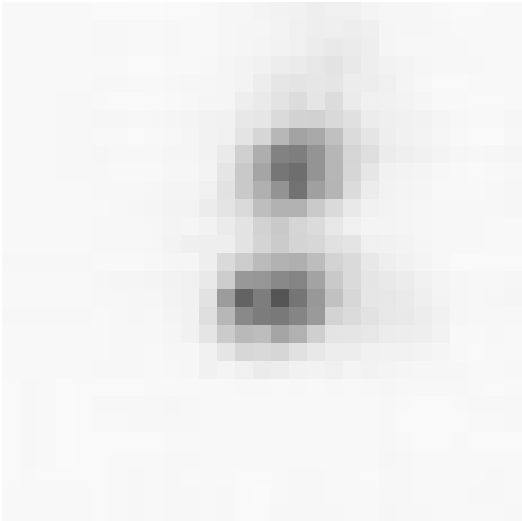


Rysunek 24: Schemat układu testowego służącego do weryfikacji samoobrazowania wnęki.



Rysunek 25: Prostoliniowy schemat układu

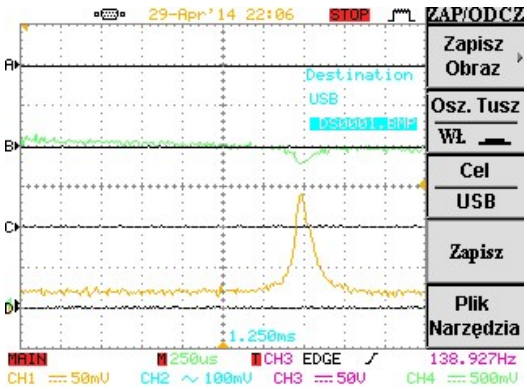
Jest ona tak ustawiona, aby jej obraz powstał wewnątrz wnęki. Jeżeli wnęka faktycznie jest samoobrazująca obraz ten powinien odtwarzać się na tej płaszczyźnie po każdym obiegu wewnąrz rezonatora. Przed ekranem umieszczona została soczewka, która odwzorowuje na nim tęże płaszczyznę, która znajduje się około 1,5 cm od zwierciadła 1. Poniżej znajduje się zdjęcie z ekranu.



Rysunek 26: Obraz folii aluminiowej z dwoma dziurkami na ekranie po przepuszczeniu przez wnękę.

Następnie zostało zbadane jak zależy działanie wnęki w zależności od położenia i kąta padania wiązki. Okazuje się, że transmisję obserwowano wtedy, gdy wiązka poadała w okolicach środka soczewki. Jest to spowodowane tym, że gdy zbyt bardzo oddalimy się od osi, to soczewka przestaje spełniać przybliżenie przyosiowe.

Zaobserwowano również bardziej subtelny efekt. W zależności od tego pod jakim kątem wiązka padała na soczewkę kształt piku nieco się zmieniał. Jest to naprawdę nieznaczna zmiana wyglądu. Miała ona jednak wpływ na wygląd obrazu. Poniżej znajduje się wygląd piku, gdy wiązka pada na soczewkę po kątem.



Rysunek 27: Wygląd maksikum transmisji, gdy wiązka lasera natrafia na soczewką pod kątem. Szerokość połowkowa wynosi około 300 MHz

Pik ten jest minimalnie niesymetryczny. Podczas powolnej zmiany częstości lasera obraz dziurek na ekranie pojawiał się nierónomiernie np. najpierw pojawił się obraz jednej dziurki, a potem drugiej. Gdy pik był możliwie najbardziej symetryczny obrazy obydwu dziurek zawsze pojawiały się i znikały jednocześnie. Występowało też mniej różnego rodzaju smug obok dziurek. Jest to prawdopodobnie sopwodowane tym, wiązka pada na soczewkę pod kątem zaczynają pojawiajać się aberracje.

Podsumowanie

Na podstawie podstawie skryptu napisanego w programie mathematica opartego o formalizm macierzy ABCDEF udało się opracować algorytm dokładnego ustawiania elementów wnęki rezonansowej z samoobrazowaniem. Zbudowany został prototypowy interferometr, u którego zweryfikowano cechę, jaką jest samoobrazowanie, poprzez odwzorowanie przez niego pewnego obrazu znajdującego się na masce. Wykorzystując wyniki tej pracy w przyszłości zostanie zbudowana zwarta wnęka rezonansowa, która posłuży jako filtr odsiewający pojedyncze fotony w eksperymencie dotyczącym pamięci kwantowej, opisanym we wstępie.

Bibliografia

[1] S. Gigan, L. Lopez, N. Treps, A. Maître, C. Fabre: ,,Image transmission through a stable paraxial cavity",arXiv:physics/0503010v1 [physics.optics] 1 Mar 2005

[2] A. E. Siegman ,,Lasers", str. 607-611

[3] R. Chrapkiewicz, W. Wasilewski, ,,Generation and delayed retrieval of spatially multimode Raman scattering in warm rubidium vapors", Optical Express 29540, Vol. 20, No. 28, (2012)

[4] B. Halopin, A. Chiummo, C. Fabre, A. Maître, N. Treps: ,,Frequency doubling of low power images using a self-imaging cavity", Optical Express 8033, Vol. 18, No. 8, (2010)