

Maria Mączyńska Tomasz M. Brzozowski

Krótki kurs efektywnego justowania układu optycznego



Wersja 1.25 (lipiec 2003)

Efektywnego justowania można nauczyć się jedynie justując, ale kilka dobrych rad może okazać się przydatnych. Poniższy zbiór wskazówek ma za zadanie ułatwić czytelnikowi opanowanie podstawowych technik justowania. Mogą się one co prawda wydać oczywiste, ale jak pokazuje praktyka – są bardzo pomocne. Stosowanie się do nich z pewnością ułatwi pracę przy stole optycznym i sprawi, że jej efekty będą bardziej przewidywalne i powtarzalne.

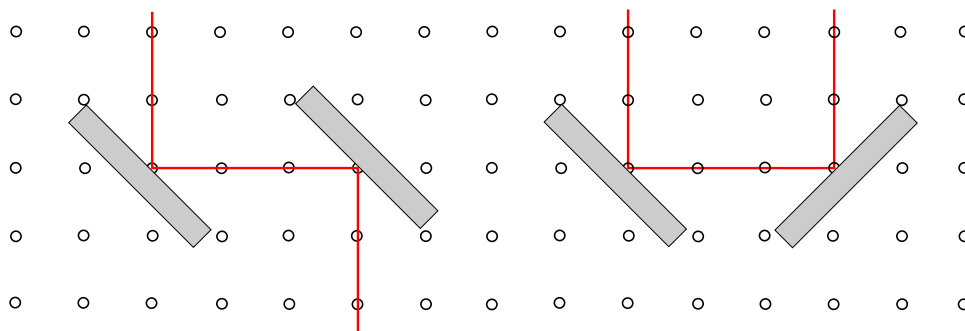
1 Prowadzenie wiązki

Po pierwsze, należy dbać aby tam, gdzie jest to możliwe, wiązka laserowa była kierowana wzdłuż odcinków wyznaczonych przez otwory w stole (tak zwane justowanie „po dziurach”). Mając w ten sposób ustawioną wiązkę łatwiej jest wstawiać w tor optyczny kolejne elementy. Takie justowanie zapewnia też powtarzalność ustawień elementów optycznych. Należy również dbać o zachowanie stałej wysokości wiązki nad stołem (w naszych eksperymentach 8.5 oraz 10 cm).

1.1 Dwa lusterka (zygzak)

Do odpowiedniego ustawienia wiązki na zadanym odcinku używa się najczęściej dwóch lusterek ustawionych tak, jak pokazuje rysunek 1.1. Należy najpierw dobrać wstępnie położenia obu lusterek (tak, aby wiązka padała mniej więcej na środek każdego z nich) i ich kąty względem kierunku rozchodzenia się wiązki (45°). Jest to łatwiejsze jeśli wiązka kierowana jest nad otworami w stole, jak zalecono uprzednio.

W przypadku skomplikowanego układu optycznego wygodnie jest zapewnić możliwość niezależnego justowania poszczególnych jego części. Pozwala to na wprowadzenie modyfikacji w jednej części tak, że nie pociąga to za sobą justowania całego układu. Konieczny jest zatem układ dostosowujący między częściami, który pozwoli na dowolne ustawienie kierunku i położenia wiązki laserowej. Zadanie to spełnia właśnie opisany wyżej prosty układ dwóch lusterek (zygzak).



Rysunek 1: Zygzyki

1.2 Przesłony

W ustawiany odcinek toru wygodnie jest wstawić dwie przesłony tak, aby ich otwory znajdowały się w miejscach, przez które chcemy przeprowadzić wiązkę. Pierwsza przesłona powinna znajdować się jak najbliżej drugiego lusterka zygzyka, a druga jak najdalej od niego (dokładność wyjustowania rośnie z odległością). Za drugą przesłoną wygodnie jest ustawić karteczkę

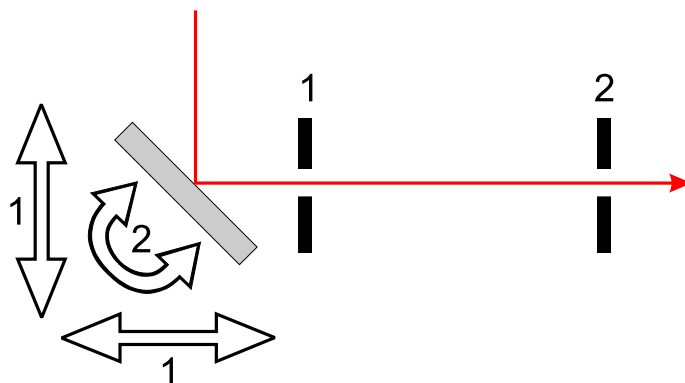
czułą na podczerwień. Zmieniając kąty ustawienia pierwszego lusterka dążymy do tego, aby wiązka przeszła przez pierwszą przesłonę. Następnie drugim lustrem próbujemy przeprowadzić wiązkę przez drugą przesłonę aż do momentu, kiedy zacznie ona przycinać się na pierwszej przesłonie. Wtedy należy ponownie zmienić ustawienie pierwszego lusterka tak, aby skierować wiązkę przez pierwszą przesłonę i powtarzać iteracyjnie procedurę opisaną w dwóch ostatnich zdaniach aż do momentu, gdy wiązka będzie przechodzić przez obie przesłony jednocześnie. To oznacza koniec justowania zadanego odcinka. Skrótowno: pierwsze lustro – pierwsza przesłona, drugie lustro – druga przesłona.

1.3 Karteczki

Przesłony można zastąpić papierowymi karteczkami. Pierwsza z nich musi mieć na zadanej wysokości zrobiony niewielki otwór (porównywalny ze średnicą wiązki) i być wstawiona w tor wiązki analogicznie, jak pierwsza przesłona (wygodnie jest, gdy otwór w karteczce znajduje się nad otworem w stole wyznaczającym tor rozchodzenia się wiązki). Na drugiej należy zaznaczyć kropką punkt, w który powinna trafić prawidłowo wyjustowana wiązka. Warto zrobić na karteczkach kratkowaną podziałkę. Justując zygzak przeprowadza się wiązkę przez otwór w pierwszej karteczce (pierwsze lustro) naprowadzając jednocześnie wiązkę na zaznaczony punkt na drugiej karteczce (drugie lustro). Mając pewną wprawę można używać do justowania tylko jednej karteczki z zaznaczonym punktem, wstawiając ją w zadany tor wiązki na przemian blisko i daleko od zygzaka i korygując położenie wiązki na karteczce odpowiednio pierwszym i drugim lustrem.

1.4 Jedno lustro

Czasem w tor wiązki można wstawić tylko jedno lustro. Należy wtedy odpowiednio ustawić przesłonę lub karteczkę a następnie korygować tor wiązki blisko lusterka poprzez jego przesuwanie prostopadłe lub równoległe do kierunku wiązki padającej na lustro. Korektę toru wiązki w obszarze daleko od lusterka przeprowadza się przez jego delikatny obrót, tak jak pokazuje rysunek 1.4. Tę procedurę powtarza się iteracyjnie aż wiązka zostanie wyjustowana.



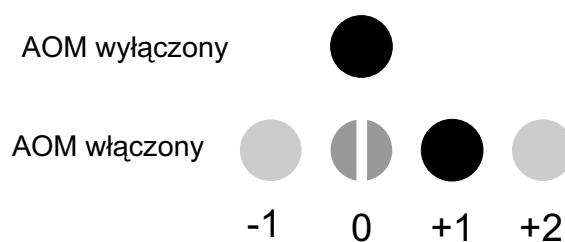
Rysunek 2: Prowadzenie wiązki przy pomocy jednego lusterka.

2 Wstawianie w tor wiązki soczewki

W wiązkę równoległą soczewkę wstawia się stroną wypukłą (lub wklęsłą) do wiązki, w wiązkę zbieżną rozbieżną – stroną płaską do wiązki. Takie ustawienie minimalizuje wady soczewek. Soczewka nie może być skrzywiona względem kierunku rozchodzenia się wiązki, chyba że chcemy korygować astygmatyzm (sekcja 5). Wstawienie soczewki w tor wiązki nie powinno zmienić kierunku jej rozchodzenia się. Najłatwiej to sprawdzić ustawiając karteczkę możliwie daleko za miejscem, w którym będzie umieszczona soczewka. Na karteczce zaznaczamy położenie wiązki bez soczewki, a następnie tak wstawiamy soczewkę, aby położenie centrum wiązki pokryło się z zaznaczeniem.

3 Wstawianie w tor wiązki modulatora akusto-optycznego

Modulator akusto-optyczny (AOM) wstawia się w ognisko soczewki o stosunkowo długiej ogniskowej (500 mm, 1000 mm), co sprawia, że wiązka w całości mieści się w aperturze modulatora, a w obszarze kryształu jest w przybliżeniu równoległa (soczewki o długich ogniskowych zapewniają dużą długość Rayleigha wiązki gaussowskiej). Położenie ogniska łatwo znaleźć zmniejszając moc wiązki lasera i szukając punktu, w którym wiązka jest najbardziej intensywna.¹ Modulator należy wstawić tak, aby wiązka nie była obcinana przez jego aperturę. Przed końcowym zamocowaniem modulatora w uchwycie należy, delikatnie go obracając, znaleźć najbardziej korzystne wstępne położenie, tzn. takie, w którym możliwie największą moc ma wiązka ugięta w odpowiednim rzędzie. Następnie mocujemy modulator i justujemy precyzyjnie jego ustawienie przy pomocy śrub uchwytu. Optymalne ustawienie osiągamy wtedy, gdy w środku plamki zerowego rzędu obserwowanej w dalekim polu pojawia się ciemny pas (rysunek 3). Za modulatorem ustawiamy w odległości ogniskowej soczewkę, która uzbieżnia wiązkę i koryguje jej tor. Soczewkę należy wstawić tak, aby położenie plamki zerowego rzędu nie uległo zmianie. Wiązki ugięte w niepotrzebnych rzędach wycina się przesłoną, choć często bywają one przydatne do monitorowania parametrów spektralnych lasera. Typowa wydajność osiągana przy prawidłowo wyjustowanym modulatorze wynosi około 85-90%. Jeżeli pomimo dobrego wyjustowania modulatora nie można osiągnąć takiej wydajności, należy popracować nad własnościami przesłonnymi wiązki. Przyczyną zbyt niskiej wydajności bywa często zbyt silne ogniskowanie lub zbyt duży rozmiar wiązki.

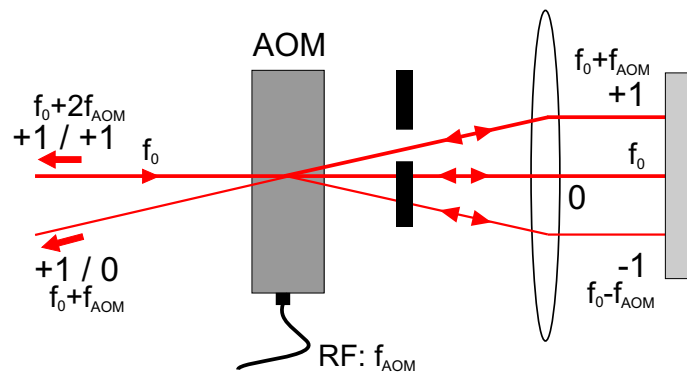


Rysunek 3: Plamki za AOMem wyjustowanym w +1 rzędzie

¹Nie zawsze przewężenie wiązki padającej na soczewkę wypada w odległości ogniskowej soczewki. Dzieje się tak dlatego, że po przejściu przez skomplikowane układy optyczne wiązki nie są zazwyczaj stuprocentowo skolimowane.

4 Justowanie modulatora akusto-optycznego w podwójnym przejściu

Czasem zachodzi potrzeba zmiany częstości światła laserowego o podwojoną wartość częstości, na jaką pozwala modulator. Stosuje się wtedy konfigurację modulatora w podwójnym przejściu. Takie ustawienie gwarantuje też brak zmiany kierunku wiązki ze zmianą przyłożonej do modulatora radioczęstości (RF). Jest to szczególnie wygodne w układach przestrajania lasera wymuszonego światłem z innego lasera, którego częstość zmieniamy za pomocą modulatora (zobacz paragraf 6). Pierwsza część justowania przebiega tak jak opisano w poprzednim rozdziale. Niezwykle ważne jest takie ustawienie soczewki za modulatorem, które nie zmieni położenia wiązki w zerowym rzędzie ugięcia. Następnie należy obserwować ugięte wiązki w dalekim polu i tak regulować położenie soczewki (w niewielkim zakresie) w kierunku wzdłuż wiązki, aby wiązki rozchodziły się równoległe do siebie i aby były one skolimowane. Należy zwracać uwagę, aby nie przesunąć soczewki w kierunku poprzecznym do wiązki. Można to monitorować ustawiając za soczewką przesłonę przypuszczającą jeden z rzędów i tak przesuwając soczewkę, aby ten rząd się nie przycinał. Po wyjustowaniu soczewki wstawia się za nią lustro 0° zwracające wiązkę. Należy je tak ustawić, aby wiązka zerowego rzędu wracała dokładnie po tym samym torze (najłatwiej to sprawdzić wyłączając modulator.) Przy prawidłowo wyjustowanym modulatorze, ugięta dwa razy wiązka (o częstości przesuniętej dwukrotnie o częstość modulatora f_{AOM}) rozchodzi się dokładnie przeciwnie do wiązki padającej na modulator. Przy poprawnym ustawieniu soczewki i lusterka, tor wiązki ugiętej nie zmienia się ze zmianą częstości (zmienia się jedynie jej natężenie), co również można wykorzystać do ustawienia soczewki.



Rysunek 4: Układ modulatora w podwójnym przejściu. f_0 – częstotliwość wiązki laserowej padającej na modulator, f_{AOM} – częstotliwość doprowadzona do kryształu modulatora (zwykle 80 MHz lub 100 MHz)

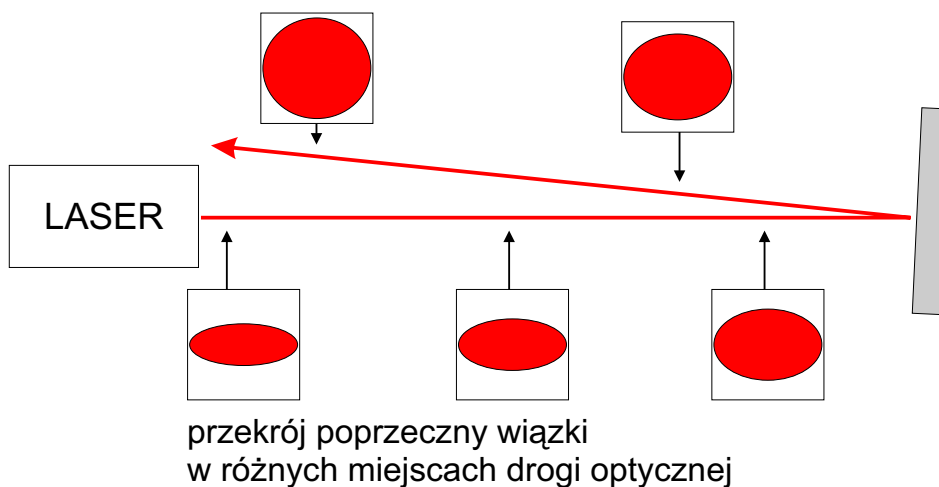
5 Kształtowanie wiązki laserowej - korekcja astygmatyzmu

Wiązka emitowana przez diodę laserową jest silnie rozbieżna. Ze względu na ograniczenia dyfrakcyjne związane z budową diody, wychodząca z niej wiązka ma kształt eliptyczny (także po kolimacji). Różna rozbieżność kątową w płaszczyznach równoległej i prostopadłej do struktury półprzewodnikowej diody, jak również astygmatyzm wynikający ze skończonej odległości po-

między hipotetycznymi, punktowymi źródłami światła dla tych obydwu kierunków², utrudniając kolimację i korektę własności przestrzennych wiązki.

Do kolimacji wiązki używamy obiektywu o krótkiej ogniskowej. Astygmatyzm uniemożliwia jednak kolimację wiązki za pomocą obiektywu z soczewkami sferycznymi tak, by nie rozbiegała się ani wzdłuż wielkiej, ani wzdłuż małej osi elipsy. W dodatku zazwyczaj potrzebujemy wiązki o przekroju kołowym, a nie eliptycznym. Zachodzi więc potrzeba takiego ukształtowania wiązki, aby była maksymalnie zbieżna i charakteryzowała się przekrojem kołowym. Naszym zadaniem jest osiągnięcie tego celu przy wykorzystaniu mało skomplikowanego układu optycznego z optyką sferyczną.

W tym celu należy najpierw zadbać o dokładne wyjustowanie obiektywu diody laserowej. Jak pokazuje praktyka, najlepsze rezultaty przynosi takie ustawienie obiektywu, aby wiązka była skolimowana jak najdokładniej wzdłuż wielkiej osi elipsy, przy lekkiej rozbieżności wzdłuż małej osi. Aby to osiągnąć, wydłużamy drogę wiązki na tyle, na ile pozwalają warunki laboratoryjne (jednak nie mniej niż 6-7 metrów), dla wygody zawracając ją tak, żeby znajdowała się w bliskim sąsiedztwie diody laserowej (należy przy tym uważać, aby nie odbić wiązki do lasera - grozi to jego uszkodzeniem!). Zmieniając położenie obiektywu względem diody obserwujemy jak zmienia się rozbieżność wiązki w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Poszukujemy takiego położenia, dla którego wielka oś elipsy ma stały rozmiar we wszystkich punktach toru wiązki, podczas gdy krótka oś elipsy łagodnie się powiększa, co schematycznie przedstawia rysunek 5. Oczywiście, im mniej wiązka rozbiega się wzdłuż małej osi elipsy, tym lepiej. Po zakończeniu justowania należy sprawdzić, czy wzdłuż drogi od lasera do „dalekiego pola” wiązka nie skupia się w którymś z kierunków.

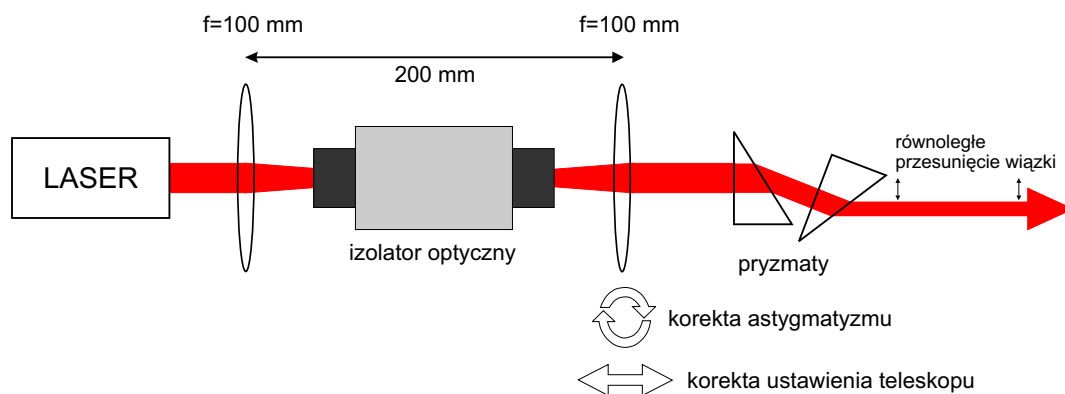


Rysunek 5: Optymalne ustawienie zbieżności wiązki laserowej.

Dysponując tak przygotowaną wiązką laserową, możemy przystąpić do jej kształtowania. Aby otrzymać profil kołowy z profilu eliptycznego, należy posłużyć się parą pryzmatów. Mamy dwa wyjścia: możemy rozciągnąć krótszą oś bądź skrócić dłuższą oś eliptycznego profilu wiązki. Z rozmaitych względów praktycznych wygodniej jest przyjąć drugie rozwiązanie, choć rozciąganie krótszej osi też może być przydatne. W tym momencie zakładamy jednak, że wielka oś eliptycznego przekroju wiązki jest równoległa do stołu i profil kołowy uzyskamy przez jej skrócenie. Do korekcji astygmatyzmu użyjemy dwóch soczewek o ogniskowej 100 mm, z których

²Odległość ta dla typowych diod półprzewodnikowych wynosi 6-10 μm .

zbudujemy teleskop 1:1. Wnętrze teleskopu można wykorzystać do wstawienia izolatora optycznego. Skupianie wiązki przez soczewki teleskopu, co powoduje jej zawężenie, jest korzystne ze względu na małą aperturę izolatora. Dodatkowo, izolator działa lepiej, gdy wiązka jest skupiona przy jego osi.³ Teleskop ustawiamy tak, aby otrzymać po nim wiązkę tak samo rozbieżną jak bez niego. Przy ustawianiu soczewek stosujemy się do zaleceń z paragrafu 2. Za teleskopem ustawiamy pryzmaty. Pierwszy pryzmat ustawiamy tak, by odbicie od niego wracało dokładnie po drodze wiązki. Drugi pryzmat ustawiamy pod takim kątem, aby plamka lasera miała za nim przekrój jak najbardziej zbliżony do kołowego, a jednocześnie tak, aby obydwa pryzmaty nie skręcały wiązki, a jedynie przesuwały ją równolegle. Następnie w dalekim polu (na dość dużej odległości od pryzmatów) oglądamy efekt naszych starań. Jeżeli wiązka jest nadal eliptyczna, próbujemy delikatnie obrócić soczewkę teleskopu. Zauważymy wtedy, że możemy wpływać na rozmiar przekroju wiązki wzdłuż jednego z kierunków. Jeżeli mimo to nie jesteśmy w stanie osiągnąć profilu kołowego, spróbujmy delikatnie poruszać soczewką teleskopu wzdłuż jego osi - w położeniu odpowiadającym dokładnemu ustawieniu teleskopu zobaczymy kołowy profil wiązki w dalekim i bliskim polu. Powyższy opis stanie się jasny po spojrzeniu na rysunek 5.



Rysunek 6: Układ do kształtowania profilu kołowego i korekcji astygmatyzmu wiązki laserowej.

6 Wymuszanie lasera (injection locking)

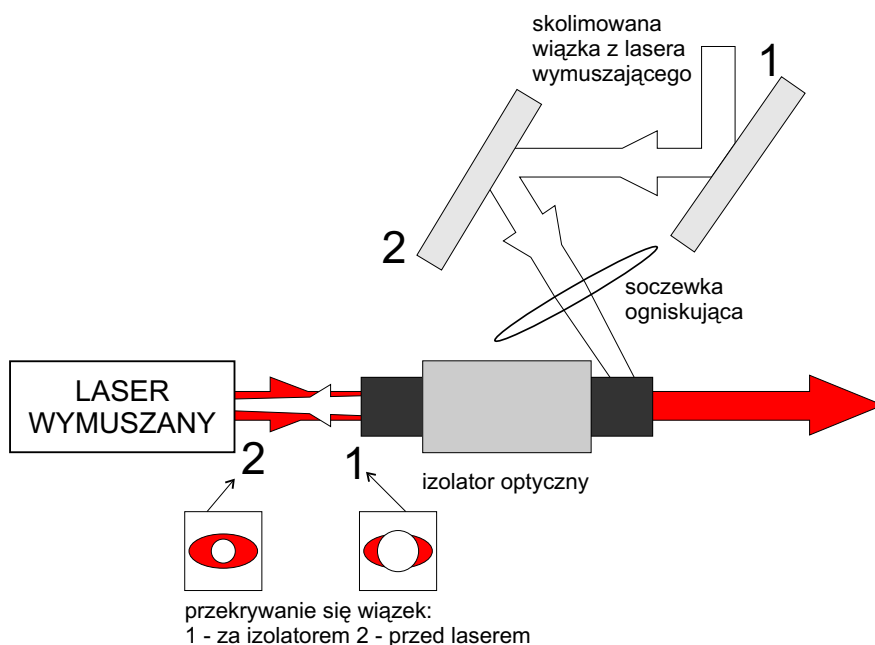
Wymuszanie lasera światłem z innego lasera jest szeroko stosowaną techniką. Polega ona na wprowadzeniu słabej wiązki lasera wymuszającego do lasera wymuszanego. W wyniku tego laser wymuszany zaczyna odtwarzać parametry spektralne wiązki wymuszającej (częstotliwość i fazę) z mocą zadaną przez prąd i temperaturę. Technika „injection locking” ma dwa podstawowe zastosowania. Po pierwsze, umożliwia ona wzmocnienie światła w modzie lasera wymuszającego. Po drugie, pozwala na stosowanie lasera wymuszanego jako lasera próbkującego o niezależnej od częstotliwości, stałej mocy. W tym drugim przypadku do wymuszania stosujemy układ opisany w paragrafie 4. Wiązka lasera wymuszającego przechodzi dwa razy przez modulator akustooptyczny doznając dwukrotnego przesunięcia częstości, po czym jest kierowana do lasera, który ma odtworzyć jej parametry spektralne. Ponieważ wydajność modulatora zmienia się z częstością, wiązka ta będzie miała moc zależną od częstości. Jest to zjawisko niekorzystne w spektroskopii, gdyż sygnał pochodzący od przestrajanej w ten sposób wiązki byłby zakłócony

³Ze względu na większą jednorodność pola magnetycznego w obszarze skupionej wiązki.

przez nałożony na niego profil wydajności AOMa. Wystarczy jednak tak przestrajaną wiązkę wzmocnić w innym laserze używając techniki wymuszania, a otrzymamy wiązkę próbującą o mocy niezależnej od częstości.

Kluczem do efektywnego i satysfakcjonującego korzystania z dobrodziejstw techniki „injection locking” jest dobre sprzężenie laserów wymuszającego i wymuszanego. W tym celu należy doprowadzić do tak zwanego dopasowania modowego. W skrócie polega to na takim ukształtowaniu wiązek tych laserów aby idealnie przekrywały się w każdym punkcie wsólnego toru. Należy więc zadbać o taki sam rozmiar i taką samą zbieżność obydwu wiązek, oraz, prowadząc wiązkę wymuszającą do lasera wymuszanego, bardzo dokładnie nałożyć je na siebie.

W praktyce idealne dopasowanie modowe (rozmiar wiązki i jej zbieżność) jest trudne do osiągnięcia. Wiązka lasera wymuszającego zanim trafi do lasera wymuszanego, przechodzi zazwyczaj przez złożone układy optyczne, które mogą zmieniać jej rozmiar i zbieżność (np. układ z rysunku 4). Często zdarza się, że na stole optycznym brakuje miejsca, by odpowiednio ukształtować wiązkę wymuszającą. Wtedy, jak pokazuje praktyka, sprawdza się doskonale inne rozwiązanie. Wystarczy lekko zogniskować wiązkę wymuszającą przed wejściem do lasera wymuszanego, a otrzymamy doskonale sprzężenie laserów. Do wymuszenia stosujemy układ pokazany na rysunku 6.



Rysunek 7: Układ do wymuszania lasera diodowego.

Lusterkami 1 i 2 tak kierujemy wiązkę wymuszającą przez izolator optyczny tak, by kierunek jej propagacji był dokładnie przeciwbieżny do wiązki emitowanej z lasera wymuszanego. Zgodnie z poradami zawartymi w paragrafie 1.2 lusterko 1 służy do korekt w pobliżu wejścia do izolatora optycznego, a lusterko 2 do korekt przy laserze wymuszonym. Gdy kierunki wiązek się już dobrze pokrywają, wstawiamy w drogę wiązki wymuszającej soczewkę o ogniskowej f , którą dobieramy eksperymentalnie w zależności od rozmiarów i zbieżności wiązki wymuszającej. Należy zaczynać od soczewki o ogniskowej równej odległości od miejsca umieszczenia tej soczewki od lasera. Jeśli nie jesteśmy wielkimi pechowcami, taki wybór soczewki powinien od razu zapewnić dobre wymuszenie. Optymalne przekrycie wiązek pokazuje dolna część rysunku 6.

Teraz należy znaleźć optymalne parametry pracy lasera wymuszanego. Zwiększamy moc w wiązce wymuszającej (należy przy tym uważać, aby nie przekroczyć wartości maksymalnie kilku miliwatów - większa moc wiązki wymuszającej grozi uszkodzeniem lasera wymuszanego) i obserwujemy na spektrografie i analizatorze widma, czy laser wymuszany, żargonowo mówiąc, „czuje” czy też „widzi” laser wymuszający. Objawia się to tym, że przy zasłanianiu i odsłanianiu wiązki wymuszającej zmienia się położenie linii lasera wymuszanego na oscyloskopie podłączonym do analizatora widma. Jeśli tak jest – to dobrze – jesteśmy blisko sprzężenia laserów. Jeśli tak nie jest, należy sprawdzić geometrię prowadzenia wiązki wymuszającej. Po doprowadzeniu do wyżej opisanego stanu „widzenia” jednego lasera przez drugi, optymalizujemy sprzężenie.

Procedura optymalizacji jest następująca. Przemiatamy laser wymuszający w okolicy linii spektralnej, do której ma być stabilizowany. Na analizatorze widma sprawdzamy, czy laser wymuszany za nim „podąża”. Widać to po płynnym ruchu oscylacyjnym, skorelowanym z częstością przemiatań, linii tego lasera na ekranie oscyloskopu podłączonego do analizatora widma. Jeśli linia lasera wymuszanego stoi w miejscu, bądź drga w punktach zwrotnych przemiatań, zwiększamy wzmocnienie na oscyloskopie i obserwujemy sygnał z analizatora na granicy szumu. Bardzo powoli zmieniamy prąd lasera wymuszającego. Dla jego pewnej wartości zaobserwujemy, że w szumie pojawia się jakiś skorelowany z częstością przemiatań ruch. Jest to mod lasera wymuszanego, który sprzął się z laserem wymuszającym. Teraz delikatnie możemy zmienić prąd lub podregulować geometrię wymuszania lusterkami 1 i 2 z rysunku 6 i doprowadzić do pełnego sprzężenia laserów. Następnie obniżamy moc wiązki wymuszającej aż do momentu, gdy jakość sprzężenia zacznie się pogarszać (skoki w płynnym jak dotąd ruchu linii lasera), po czym znów optymalizujemy ustawienia prądu i geometrii tak, aby znów doprowadzić do pełnego sprzężenia. Procedurę powtarzamy aż do osiągnięcia jak najniższej mocy w wiązce wymuszającej.

Jakość sprzężenia możemy ocenić nie tylko analizatorem widma, ale również przez spektroskopię nasyceniową w wiązce lasera wymuszonego i jej porównanie ze spektroskopią w wiązce lasera wymuszającego. Obydwa sygnały powinny być jednakowe, przesunięte o częstość modulatorów umieszczonych pomiędzy laserem wymuszającym a wymuszającym. Taki test sprawdza też to, czy do wymuszania lasera wykorzystujemy odpowiedni rząd ugięcia na wiązki w modulatorze.

Na koniec tego paragrafu kilka praktycznych rad. Sprzężenie jest łatwiej osiągnąć, gdy prąd i temperatura lasera wymuszanego zapewniają długość fali odpowiadającą wiązce wymuszającej. Jedną przy bardzo dobrym sprzężeniu laser wymuszany jest w stanie zacząć pracować na częstości lasera wymuszającego nawet wtedy, gdy w swobodnej generacji jest od niego bardzo oddległy (nawet o kilka nm). Jeżeli laser był w sprzężeniu, ale z niego wypadł, czasami w powrocie do niego pomaga zasłonięcie i szybkie odsłonięcie wiązki wymuszającej.

Autorom tego tekstu udało się doprowadzić do wymuszenia laserów wiązkami o mocy $200\ \mu\text{W}$, po czym zaniechali dalszej optymalizacji ze względu na brak takiej konieczności. Dzięki bardzo dobrze wyjustowanemu modulatorowi w podwójnym przejściu, wymuszony techniką „injection locking” laser próbkujący był przestrajany w zakresie ponad 80 MHz.

7 Na zakończenie

Zbiór naszych porad będzie sukcesywnie uzupełniany. Czekamy na wszelkie uwagi i komentarze pod adresami marysia2@ceti.pl oraz tmb@ceti.pl.