

Ćwiczenie 87

Laser z podwojeniem częstotliwości

Cel ćwiczenia

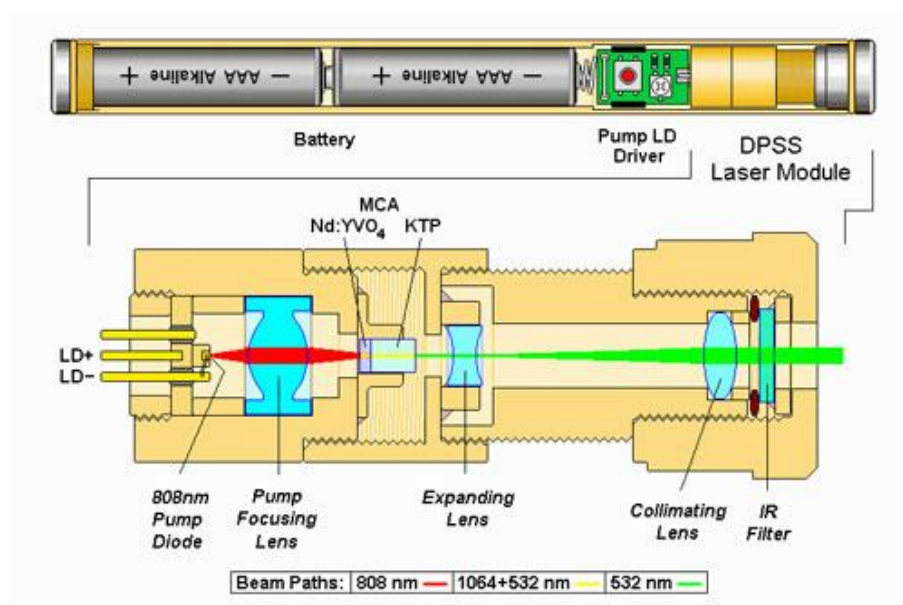
Badanie właściwości zielonego lasera wykorzystującego metodę pompowania optycznego i podwojenie częstotliwości przy użyciu kryształu optycznie nieliniowego. Pomiary wykonuje się dla wiązki zielonej $\lambda = 532 \text{ nm}$ oraz niewidzialnej wiązki podczerwonej $\lambda = 1064 \text{ nm}$, rozdzielonych przy pomocy pryzmatu.

Wprowadzenie

Laser badany w ćwiczeniu 86 nazywany jest *półprzewodnikowym*, bo ośrodkiem czynnym jest struktura półprzewodnikowa, a inwersję obsadzeń uzyskuje się przez przepływ prądu. Laser czerwony, opracowany jeszcze w latach 70-tych, pozostaje najpowszechniej stosowanym rodzajem lasera. Natomiast wyprodukowanie taniego lasera półprzewodnikowego o krótszej długości fali napotyka na trudności. Lasery niebieskie i fioletowe wykorzystujące technologię azotku galu GaN pozostają względnie drogie.

W tej sytuacji wygodniejszym rozwiązaniem dla zakresu światła zielonego okazał się laser wykorzystujący dwa niebanalne zjawiska optyczne. Pierwszym jest emisja wymuszona w kryształach, w którym inwersję obsadzeń uzyskuje się metodą pompowania optycznego, czyli przez naświetlanie ośrodka czynnego. Uzyskane światło laserowe jest następnie, w kryształach optycznie nieliniowych, przekształcane w światło o podwojonej częstotliwości.

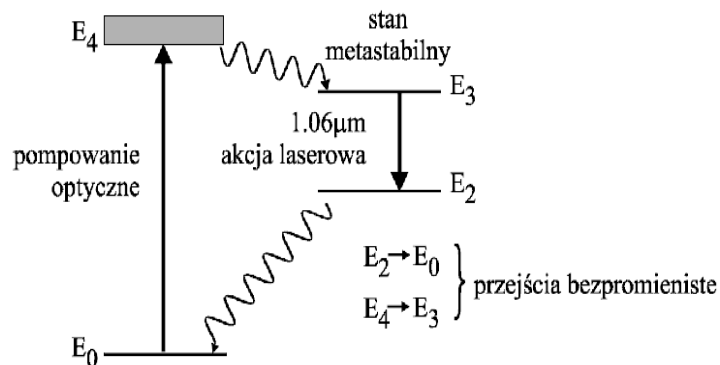
Realizację techniczną obydwu zjawisk przedstawimy na przykładzie używanego w ćwiczeniu 87 lasera zielonego używanego jako zielony wskaźnik (rys. 1).



Rys. 1. Schemat budowy lasera zielonego typu „wskaźnik” (wg. Wikipedii).

Wysokowydajna dioda GaAs wytwarza promieniowanie podczerwone 808 nm. Promieniowanie to jest przy użyciu soczewki skupione na kryształ YVO₄ domieszkowanym przez *circa* 1% atomów neodymu. Akcja laserowa zachodzi na jonach Nd³⁺, reszta kryształu stanowi „rusztowanie” utrzymujące jony neodymu w miejscu.

Zachodzące procesy kwantowe przedstawia rys. 2. W wyniku absorpcji kwantów wytwarzanych przez diodę GaAs, elektrony z poziomu podstawowego przeskakują do najwyższej grupy poziomów E₄. Spadają następnie na poziom oznaczony jako E₃. Poziom ten jest poziomem metatrwałym o względnie długim czasie życia – znacznie dłuższym od czasu życia poziomu E₂. Dzięki temu można łatwo uzyskać inwersję obsadzeń obydwu poziomów i w konsekwencji emisję światła laserowego 1064 nm (zakres bliskiej podczerwieni). Ostatecznie elektrony spadają z powrotem z poziomu E₂ na poziom podstawowy E₀.



Rys. 2. Poziomy energetyczne i procesy kwantowe w jonie Nd³⁺.

Wiązka światła lasera 1064 nm pada następnie na kryształ nieliniowy KTP (skrót od KTiOPO₄, czyli fosforanu tytanowo-potasowego). Oddziaływanie światła o dużym natężeniu z kryształem KTP prowadzi do wytworzenia światła o podwojonej częstotliwości, a zatem o dwukrotnie krótszej długości fali: $\lambda = \frac{1}{2} \times 1064 \text{ nm} = 532 \text{ nm}$, które widzimy jako światło zielone.

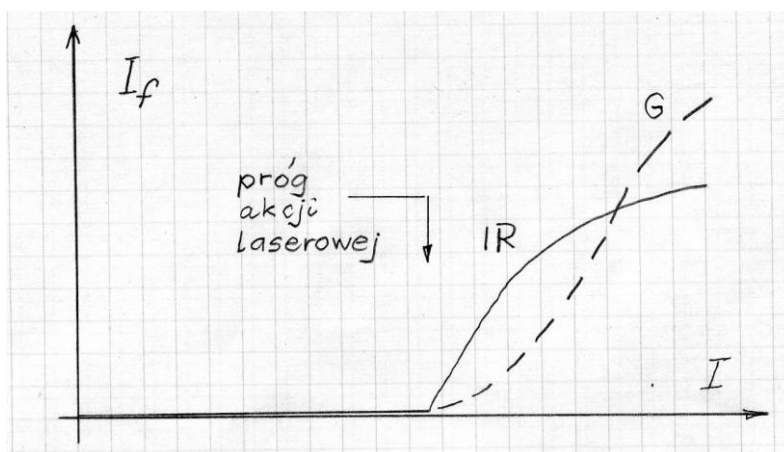
Samo zjawisko podwojenia częstotliwości jest jednym z wielu zjawisk *optyki nieliniowej* – względnie nowego działu optyki, której rozwój stał się w możliwy po odkryciu laserów, umożliwiających wytworzenie wiązek światła o dużym natężeniu. W związku z dualizmem falowo-korpuskularnym zjawisko podwojenia częstotliwości rozumiane może być na dwa sposoby. W obrazie falowym zjawisko można opisać jako oddziaływanie pola elektrycznego **E** fali elektromagnetycznej z ośrodkiem, którego polaryzacja **P** jest nieliniową funkcją pola. W obrazie kwantowym: w kryształach KTP dwa fotony o energiach $h\nu_{IR}$, gdzie $\nu_{IR} = c/(1064 \text{ nm})$, zamieniają się jeden, o dwukrotnie wyższej energii $h\nu_G$. (Oznaczenia wiązki podczerwonej IR i zielonej G pochodzą od ang. *infrared* oraz *green*).

Dla obydwu interpretacji prawdopodobieństwo konwersji jest proporcjonalne do kwadratu natężenia promieniowania padającego. W obrazie kwantowym zależy ono od prawdopodobieństwa znalezienia dwu fotonów w pewnej objętości dV kryształu KTP. Zgodnie z interpretacją Borna dla jednego fotonu prawdopodobieństwo to jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy fali, czyli do jej natężenia, zaś łączne prawdopodobieństwo znalezienia dwóch fotonów – do kwadratu natężenia.

Jak pokazuje rys. 1, w układzie optycznym lasera mamy ponadto układ soczewek formujących równoległą wiązkę światła oraz filtr IR pochłaniający tę część promieniowania podczerwonego 1064 nm, która nie została przetworzona na światło zielone. W przypadku używanego lasera zielonego filtra tego albo nie ma, albo jest mało efektywny, bo z lasera wychodzą jednocześnie dwie wiązki, zielona 532 nm oraz podczerwona 1064 nm. Można je rozdzielić przy pomocy pryzmatu i badać z osobna ich własności: długość fali, moc wiązki, polaryzację czy profil poprzeczny wiązki.

Obydwa opisane procesy optyki kwantowej – generacja wiązki laserowej w procesie wymuszonej emisji promieniowania oraz podwojenie częstotliwości światła – znajdują swoje odzwierciedlenie w dostępnej eksperymentalnie zależności natężenia wiązki podczerwonej, oraz zielonej w funkcji wartości prądu wzbudzającego I . Natężenie wiązki jest proporcjonalne do prądu fotodiody I_f pracującej jako detektor światła. Zależność $I_f(I)$ dla wiązki podczerwonej IR jest podobna jak w przypadku lasera półprzewodnikowego (por. z analogicznym pomiarem w ćw. 76).

Natężenie wiązki zielonej G zachowuje się inaczej. Na początku narasta wolniej gdyż, jak omawiano poprzednio, zjawisko podwojenia częstotliwości zachodzi bardziej efektywnie przy dużym natężeniu wiązki pierwotnej IR. Dla większych wartości prądu lasera I natężenie wiązki IR zaczyna wzrastać wolniej, gdyż jej duża część została przetworzona na światło zielone.

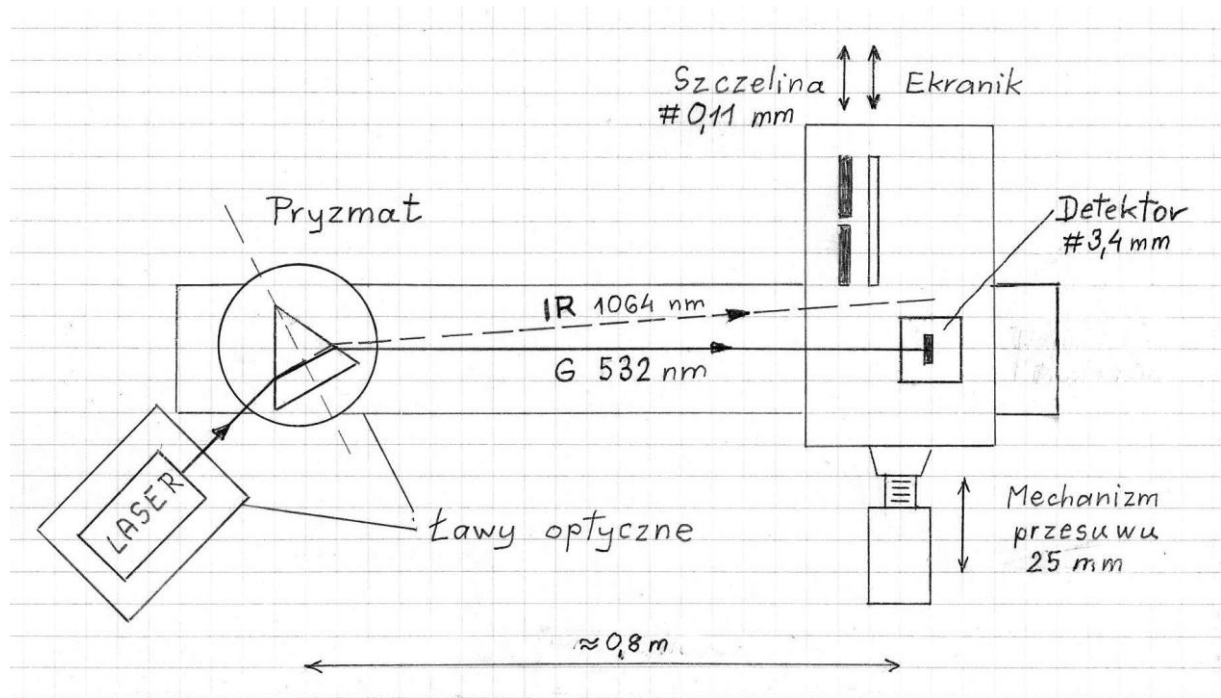


Rys. 3. Natężenie wiązek: podczerwonej i zielonej w funkcji prądu zasilania lasera

Aparatura

Układ elektryczny lasera jest taki sam jak w ćw. 86. Rysunek 4 przedstawia schemat układu optycznego w konfiguracji wykorzystywanej do pomiaru mocy wiązki, profilu wiązki i charakterystyki lasera. Szklany pryzmat ustawiony na ławie optycznej rozdziela światło lasera na wiązkę zieloną G oraz niewidzialną wiązkę podczerwoną IR.

Na rysunku nie pokazano elementów do pomiaru długości fali (siatka dyfrakcyjna i ekran) oraz polaryzacji (polaryzator).



Rys. 4. Schemat układu optycznego.

Wykonanie ćwiczenia

A. Pomiar długości fali

Na ławie optycznej umieszczamy siatkę dyfrakcyjną oraz ekran z zamocowaną kartką papieru. Elementy te umieszczamy w przestrzeni między pryzmatem i układem detekcyjnym, których położenia nie należy zmieniać. Pomiar – jak w ćw. 86.

B. Pomiar natężenia wiązki zielonej i podczerwonej

- sprawdzamy układ elektryczny. Pomiary B, D i E wykonujemy dla rezystancji $R = 0$ (nastawić wszystkie dekady opornicy na zero).
- sprawdzamy układ optyczny. W tym celu przesuwamy (do oporu) ekranik tak, by zasłonił diodę detekcyjną. Zielona plamka winna być w przybliżeniu na przecięciu prostopadłych linii wyznaczających położenie detektora. Gdy tak nie jest, należy wyregulować położenie lasera i/lub pryzmatu. Pryzmat winien być ustawiony położeniu takim, by kąt odchylenia był najmniejszy – jest to tzw. symetryczne przejście światła przez pryzmat. (Przy ustawianiu pryzmatu warto wykorzystać fakt, że zielona wiązka laserowa wewnątrz pryzmatu jest dobrze widoczna). Usunąć ekranik i sprawdzić działanie detektora światła (prąd fotodiody co najmniej kilka mA).
- przy pomocy pokręteł przesuwu poziomego i pionowego uzyskać i zmierzyć maksimum natężenia wiązki G.. Zapisać również prąd i napięcie zasilania, potrzebne do obliczenia sprawności lasera
- położenie mechanizmu przesuwu poziomego winno umożliwić przesuw ok. 20 mm, by można było zaobserwować również wiązkę podczerwoną. Przy użyciu mechanizmu przesuwu poziomego najpierw sprawdzić obecność drugiego maksimum natężenia, odpowiadającego wiązce podczerwonej (IR). Następnie wykonać pomiar

zależności I_f od położenia, obejmujący obydwie maksima (co jeden obrót śruby mikrometrycznej, czyli co 0,5 mm).

C. Badanie progu akcji laserowej

Badanie progu akcji laserowej polega na pomiarze prądu fotodiody I_f w funkcji prądu zasilania lasera I , osobno dla obydwu wiązek. Do regulowania prądu lasera wykorzystujemy opornicę dekadową.

- a) pomiar wykonujemy najpierw dla wiązki podczerwonej, od punktu poniżej progu do wartości I_f około 1/3 wartości maksymalnej (znanej z punktu B). Rezystancję opornika dekadowego zmieniamy co 1Ω , potem można zagęścić punkty bliskie progu akcji laserowej. Obok wartości I oraz I_f celowe jest zapisywanie rezystancji R , by te same nastawy opornicy wykorzystać do pomiaru dla wiązki zielonej.
- b) pomiar dla wiązki zielonej wykonujemy tak samo jak dla podczerwonej.

D. Pomiar profilu wiązki zielonej

Jak w ćwiczeniu 86, z wykorzystaniem szczeliny kolimacyjnej.

E. Badanie polaryzacji wiązki zielonej

Wykonujemy w miarę wolnego czasu i/lub decyzji prowadzącego (jak w ćwiczeniu 86, skąd należy pożyczyć polaryzator).

Opracowanie danych

ad A. Wyznaczyć długość fali i niepewność pomiaru $u(\lambda)$. Sprawdzić, czy jest zgodna z wartością teoretyczną.

ad B. (i) przy wykorzystaniu krzywej cechowania fotodiody wyznaczyć moc obydwu wiązek.

Która z nich jest silniejsza?

(ii) obliczyć sprawność lasera.

(iii) wykonać wykres zależności $I_f(x)$ obejmujący obydwie maksima

ad C. Wykonać wspólny wykres zależności prądu fotodiody dla wiązek G oraz IR w funkcji prądu zasilania lasera. Jak taki wykres można jakościowo zinterpretować?

ad D oraz E. Jak w ćwiczeniu 86.

Jak zrozumieć różnicę szerokości wiązki zielonej zmierzonej bez kolimatora (pomiar B) i z kolimatorem?