

## Ćwiczenie 87

# Laser z podwojeniem częstotliwości

### Cel ćwiczenia

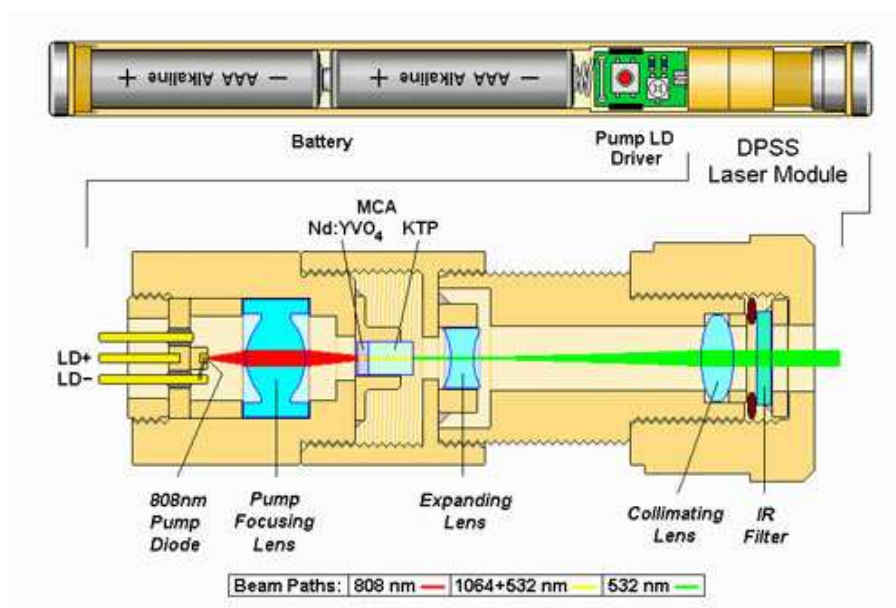
Badanie własności zielonego lasera wykorzystującego metodę pompowania optycznego i podwojenie częstotliwości przy użyciu kryształu nieliniowego. Pomiary wykonuje się dla wiązki zielonej  $\lambda = 532 \text{ nm}$  oraz niewidzialnej wiązki podczerwonej  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ , rozdzielonych przy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

### Wprowadzenie

Badany w ćwiczeniu 86 czerwony laser 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 dla zakresu światła zielonego wygodniejszym rozwiązaniem 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.

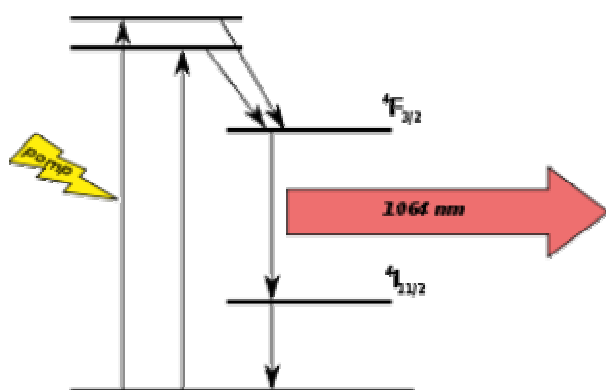
Realizację techniczną obydwu zjawisk przedstawimy na przykładzie używanego w ćwiczeniu lasera używanego jako zielony wskaźnik (rys. 1).



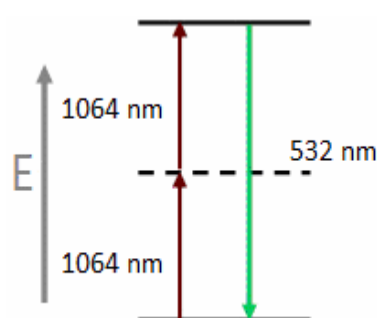
Rys. 1. Schemat budowy lasera zielonego typu „wskaźnik” (wg. Wikipedii).

Wysokowydajna dioda GaAs wytwarza promieniowanie podczerwone 808 nm. Promieniowanie to jest przy użyciu soczewki skupione na kryształ YVO<sub>4</sub> domieszkowanym przez *circa* 1% atomów neodymu. Akcja laserowa zachodzi na jonach Nd<sup>3+</sup>, reszta kryształu stanowi „rusztowanie” utrzymujące jony neodymu w miejscu.

Zachodzące procesy kwantowe przedstawia rys. 2. W wyniku absorpcji kwantów z diody GaAs, elektrony z poziomu podstawowego przeskakują do najwyższej grupy poziomów. Spadają następnie na poziom oznaczony jako <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>. Poziom ten jest poziomem metatrwałym o względnie długim czasie życia – znacznie dłuższym od czasu życia poziomu <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>. 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 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> na poziom podstawowy.



**Rys. 2.** Poziomy energetyczne i procesy kwantowe w jonie Nd<sup>3+</sup>.



**Rys. 3.** Generowanie drugiej harmonicznej (obraz kwantowy)

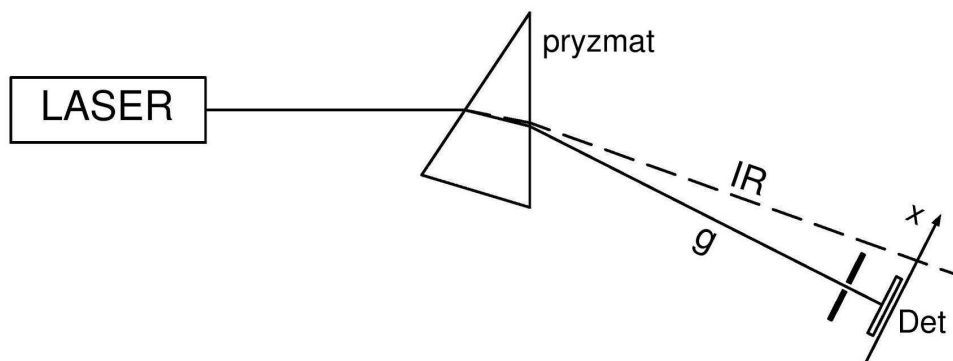
Wiązka światła lasera 1064 nm pada następnie na kryształ nieliniowy KTP (skrót od KTiPO<sub>4</sub>, czyli fosforanu tytanowo-potasowego). Oddziaływanie światła o dużym natężeniu z kryształem KTP prowadzi do wytworzenia światła o podwojonej częstotliwości, a zatem o dwukrotnie krótszej długości fali:  $\lambda = \frac{1}{2} \times 1064 \text{ nm} = 532 \text{ nm}$ , 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 (rys. 3) w wyniku pochłonięcia dwóch fotonów (tzw. absorpcja dwufotonowa) powstaje jeden, o dwukrotnie wyższej energii. W obydwu przypadkach prawdopodobieństwo konwersji jest proporcjonalne do kwadratu natężenia promieniowania padającego. W obrazie kwantowym zależy ono od prawdopodobieństwa znalezienia dwu fotonów w pewnej objętości dV. 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 i profil wiązki.

#### Aparatura

Obok aparatury takiej samej jak w ćw. 86, wykonanie ćwiczenia wymaga użycia pryzmatu (ustawionego na ławie optycznej), który rozdziela światło lasera na wiązkę zieloną (g) oraz podczerwoną (IR). Detektor i szczelina kolimacyjna znajdują się na dodatkowej podstawie z mechanizmem przesuwu. Dla aktualnego mechanizmu przesuwu jeden pełny obrót pokrętki odpowiada długości przesuwu 1 mm.



Rys. 4. Schemat aparatury optycznej.

#### Wykonanie ćwiczenia

##### A. Pomiar długości fali światła zielonego.

Z ławy optycznej zdejmujemy pryzmat i ustawiamy siatkę dyfrakcyjną oraz ekran. Pomiar wykonujemy, jak w ćw. 86.

##### B. Rozdzielenie wiązek

- a) Na ławie optycznej ustawiamy z powrotem pryzmat. Winien być ustawiony w położeniu takim, by kąt odchylenia był najmniejszy (symetryczne przejście światła przez pryzmat, jak na rys. 4. Przy ustawianiu pryzmatu warto wykorzystać fakt, że wiązka laserowa wewnątrz pryzmatu jest dobrze widoczna (obserwować przez podstawę pryzmatu).
- b) Ustawiamy fotodiodę tak, by wiązka zielona padała na środek ekranika (zakręconego na oprawę fotodiody) i by mechanizm przesuwu był w położeniu umożliwiającym przesuw ok. 2 cm w kierunku wiązki podczerwonej.
- c) Po usunięciu ekranika zmierzyć prąd fotodiody – w celu sprawdzenia układu detekcyjnego. Wykorzystując przesuw poziomy wykryć istnienie wiązki podczerwonej (drugie maksimum prądu  $I_f$ ).

C. Pomiar profilu obydwu wiązek.

Na detektor założyć szczelinę kolimacyjną (przez jej nakręcenie). Zmierzyć zależność prądu fotodiody od położenia  $x$  (punkty zagęścić w okolicy obydwu maksimumów).

D. Pomiar właściwości wiązki zielonej.

Obejmuje: pomiar natężenia wiązki i pomiar zależności prądu fotodiody od prądu zasilania lasera  $I_f(I)$  – jak opisano dla Ćw. 86.

E. Pomiar właściwości wiązki podczerwonej - analogicznie jak dla wiązki zielonej.

### *Opracowanie danych i interpretacja*

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

ad C. Wykonać wykres zależności prądu fotodiody od położenia  $x$ . Z wykresu tego odczytać szerokości połówkowe dla obydwu wiązek.

ad D. Jak opisano dla Ćw. 86.

ad E. Jak opisano w Ćw. 86 z tym, że sprawność obliczamy dla wiązki zielonej.

Porównanie własności wiązki zielonej i podczerwonej:

- (i) Która z nich ma większą moc?
- (ii) Porównaj szerokości połówkowe wiązek. Która z nich jest większa, zaproponuj możliwą przyczynę.
- (iii) Wykonaj wspólny wykres natężenia wiązki zielonej (której miarą jest prąd  $I_{f,g}$ ) oraz wiązki podczerwonej ( $I_{f,IR}$ ) w funkcji prądu zasilania  $I$ . Jak taki wykres można jakościowo zinterpretować?