

Wyznaczanie długości fali światła laserowego za pomocą interferometru Michelsona

Wymagania do ćwiczenia

1. Fale świetlne, foton.
2. Zjawisko interferencji, spójność fal świetlnych.
3. Zasada działania lasera.
4. Budowa interferometru Michelsona

Literatura

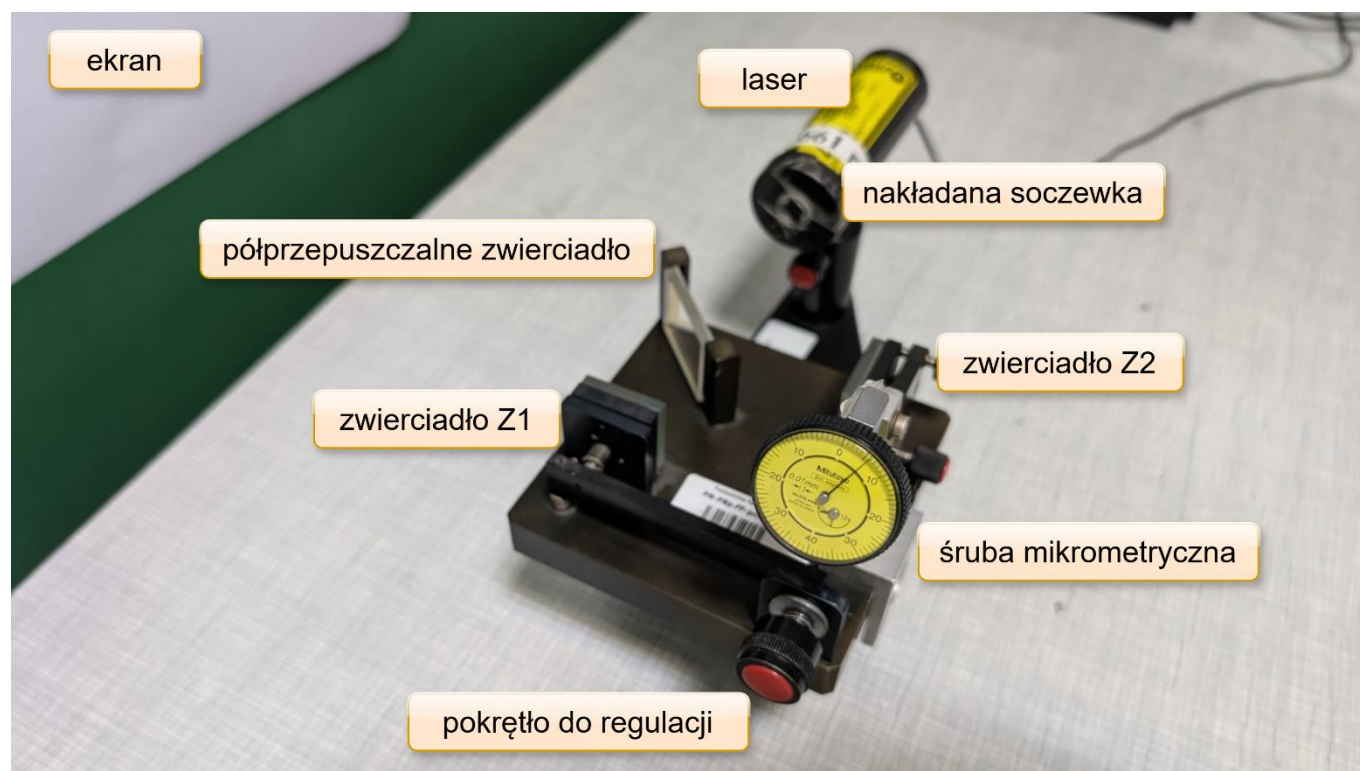
1. S. Szczeniowski, *Fizyka doświadczalna*, t. IV, PWN, Warszawa 1983, str. 274 – 279.
2. OpenStax, *Fizyka dla szkół wyższych*, Tom 3, Rozdział: 8.6 Lasery

Przykładowe pytania

1. Wyjaśnij czym jest światło?
2. Jakie światło nazywamy światłem niespójnym?
3. Na czym polega zjawisko interferencji fal świetlnych?
4. Jakie światło nazywamy światłem spójnym?
5. Co to znaczy, że światło jest koherentne?
6. Co się zmienia w wyniku absorpcji fotonu padającego na atom?
7. Co to jest emisja spontaniczna ?
8. Co to jest emisja wymuszona?
9. Omów zasadę działania lasera?
10. Omów zasadę działania interferometru Michelsona.
11. Co mówi nam prawo rozkładu Boltzmana? Zapisz to prawo.

Przyrządy pomiarowe / Stanowisko pomiarowe

Śruba mikrometryczna, gotowy zestaw pomiarowy.



WPROWADZENIE DO TEMATYKI ĆWICZENIA

Światło jest falą elektromagnetyczną, a więc podlega takim zjawiskom jak interferencja, dyfrakcja, polaryzacja, itp. Źródłem światła są wzbudzone atomy, które przechodząc ze stanu energetycznie wyższego do stanu podstawowego emitują energię elektromagnetyczną w postaci dyskretnych porcji zwanych fotonami. Kwant światła posiada energię:

$$E_f = h \cdot f$$

gdzie: h jest stałą Plancka i wynosi $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s, zaś f jest częstotliwością światła.

Źródła światła, takie jak gwiazdy, żarówki, świece emitują promieniowanie spontaniczne, tzn. każdy atom wysyła promieniowanie niezależnie od drugiego. Powoduje to, że fazy, częstotliwości, kierunki rozchodzenia się i kierunki polaryzacji poszczególnych ciągów falowych są przypadkowe. Światło takie nazywa się światłem niespójnym. Innym rodzajem światła jest światło emitowane przez lasery oraz promieniowanie synchrotronowe. Te dwa rodzaje źródeł są tzw. źródłami spójnymi (koherentnymi).

Aby zrozumieć zasadę działania lasera trzeba poznać podstawowe zjawiska dotyczące emisji i absorpcji światła przez atomy.

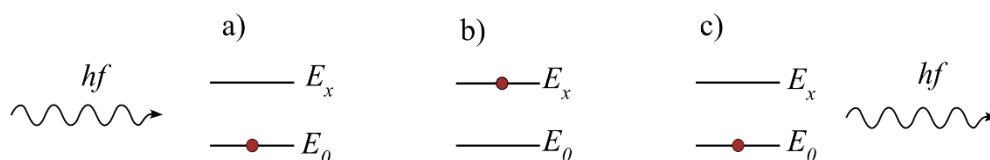


Absorpcja fotonu padającego na atom

Na atom znajdujący się w stanie podstawowym pada foton o energii

$$hf = E_x - E_0$$

(Rys. 1a). W wyniku pochłonięcia energii niesionej przez foton jeden z elektronów w atomie przeskakuje na wyższy poziom E_x (Rys. 1b). Atom przechodzi ze stanu podstawowego E_0 do stanu wzbudzonego E_x .



Rys. 1. Absorpcja i emisja fotonu przez atom



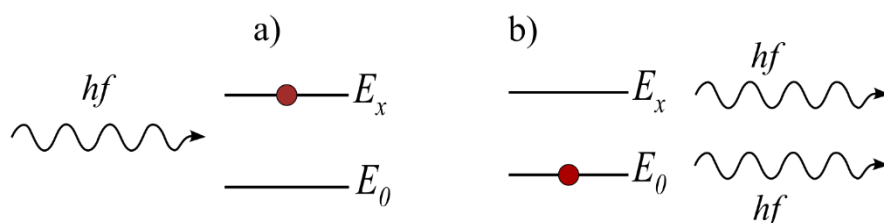
Emisja spontaniczna

Czas życia atomu w stanie wzbudzonym jest rzędu 10^{-8} s - 10^{-9} s. Niektóre stany wzbudzone mają znacznie dłuższy czas życia, nawet do 10^{-3} s. Stany takie nazywamy stanami metatrwałymi. Po tym czasie elektron ze stanu wzbudzonego przechodzi do stanu podstawowego emitując foton o energii hf (Rys. 1c). Kierunek rozchodzenia się, faza i polaryzacja tego fotonu są zupełnie przypadkowe. W przypadku zbioru atomów tworzących ciało stałe lub gaz proces emisji światła przez wzbudzone atomy zachodzi w dowolnej chwili, niezależnej od żadnego czynnika zewnętrznego i nazywany jest emisją spontaniczną.



Emisja wymuszona

Jeśli na atom wzbudzony padnie foton, którego energia $hf = E_x - E_0$ (Rys. 2a), to może zainicjować emisję fotonu przez atom. Takie przejście do stanu podstawowego E_0 nazywamy emisją wymuszoną (Rys. 2b). W procesie tym emitowany jest dodatkowy foton o takiej samej energii, fazie, kierunku propagacji i polaryzacji jak foton inicjujący proces. Obserwujemy więc dwukrotne wzmocnienie natężenia promieniowania.

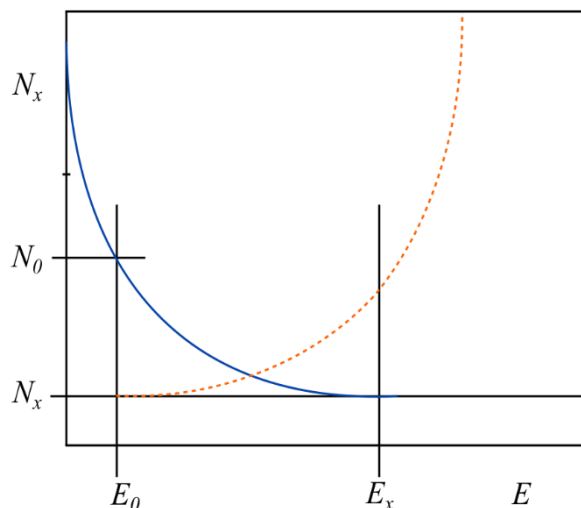


Rys. 2. Emisja wymuszona

Proces emisji wymuszonej jest podstawą działania lasera. Dla wieloatomowego układu znajdującego się w równowadze termodynamicznej, w stanie podstawowym znajduje się znacznie więcej atomów aniżeli w stanie wzbudzonym. Jeżeli w stanie podstawowym znajdują się N_0 atomów zaś w stanie wzbudzonym N_x , to zgodnie z prawem rozkładu Boltzmannna:

$$N_x = N_0 e^{\frac{E_x - E_0}{kT}},$$

gdzie k jest stałą Boltzmannna a T temperaturą w skali bezwzględnej. W stałej temperaturze stosunek N_x / N_0 jest stały.



Rys. 3. Rozkład boltzmanowski (krzywa ciągła) i antyboltzmanowski (krzywa przerywana)

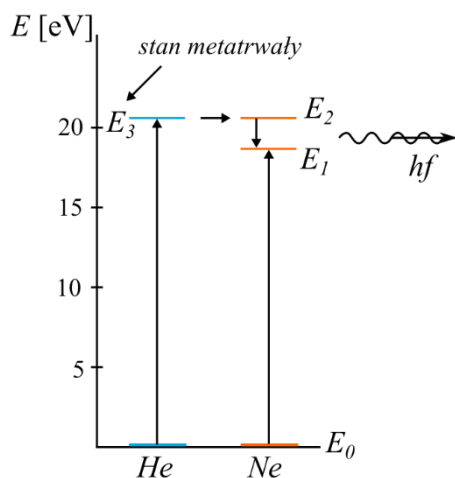
Wraz ze wzrostem temperatury rośnie liczba atomów w stanie E_x . Dla wyższych stanów energetycznych, tzn. dla większych wartości E_x liczba atomów w tych stanach maleje (Rys. 3). Aby otrzymać wzmocnienie przy emisji wymuszonej musimy spowodować inwersję (odwrócenie) obsadzeń – tzn. doprowadzić do stanu, w którym liczba atomów w stanie wzbudzonym będzie większa od liczby w stanie podstawowym. Taki rozkład nazywamy antyboltzmanowskim. Uzyskanie inwersji obsadzeń nie jest możliwe w stanie równowagi termodynamicznej. Poniżej przedstawiamy jak proces inwersji obsadzeń realizowany jest w laserze helowo-neonowym.



Mechanizm działania lasera

Zasadę działania lasera omówimy na przykładzie lasera helowo-neonowego. W szklanej rurze znajduje się mieszanina helu i neonu w stosunku 2 : 8 pod ciśnieniem rzędu 100 Pa. Atomy helu wzbudzone są do

poziomu E_3 poprzez przepływ prądu stałego przez mieszaninę gazów lub prądu zmiennego o częstotliwości 20 – 30 kHz. Poziom E_3 jest poziomem metatrwałym. Energia stanu E_3 helu jest porównywalna z energią stanu E_2 neonu. Podczas zderzenia atomu helu w stanie metatrwałym E_3 z atomem neonu w stanie podstawowym E_0 następuje przekazanie energii i atom neonu przechodzi w stan wzbudzony E_2 . W taki sposób można uzyskać stan, w którym obsadzenie poziomu E_2 będzie większe od obsadzenia poziomu E_1 . Osiągnięcie takiej inwersji obsadzeń jest stosunkowo proste, ponieważ początkowo praktycznie nie ma atomów neonu w stanie E_1 natomiast jest duża liczba atomów helu w stanie metatrwałym E_3 co



Rys. 4. Schemat przedstawiający poziomy energetyczne atomów He i Ne

pozwala na wzbudzenie dużej liczby atomów Ne do stanu E_2 drogą zderzeń z atomami He . Atomy neonu znajdujące się w stanie E_1

szybko przechodzą do stanu podstawowego E_0 . Układ taki, w krótkim czasie powróciłby do stanu równowagi termodynamicznej. Jednak atomy He w stanie E_3 żyją 10^5 razy dłużej od atomów Ne w stanie E_2 , a zatem mają wystarczająco dużo czasu aby utrzymywać atomy Ne w antyboltzmanowskim stanie obsadzeń ($N_2 \gg N_1$), czyli gotowych do akcji laserowej. Przejście atomu neonu ze stanu E_2 do E_1 daje światło laserowe odpowiadające długości fali 632,8 nm. Słowo laser jest skrótem angielskiej nazwy urządzenia wykorzystującego to zjawisko (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation). W wolnym tłumaczeniu na język polski nazwa ta brzmi: wzmacniacz światła wykorzystujący zjawisko wymuszonej emisji promieniowania.

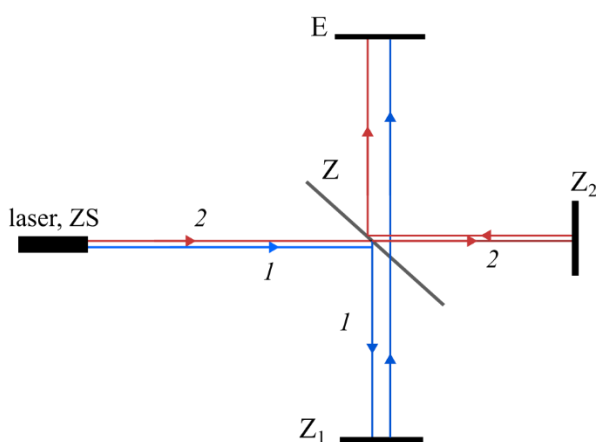
Jeżeli układ atomów umieścimy pomiędzy dwoma zwierciadłami, z których jedno będzie częściowo przepuszczalne i będziemy utrzymywali stan inwersji obsadzeń, to uzyskamy laser o działaniu ciągłym. Część wiązki laserowej odbijając się wielokrotnie od równoległych zwierciadeł (z których jedno jest półprzezroczyste) i przechodząc przez układ atomów będzie stanowiła czynnik inicjujący akcję laserową, zaś od strony zwierciadła półprzepuszczalnego będziemy odbierać użyteczną wiązkę światła laserowego.

Ponieważ jak wspomniano wyżej fotony wymuszający i wymuszony są identyczne, zatem światło lasera będzie charakteryzować się spójnością, monochromatycznością, a w przypadku stosowania zwierciadeł płaskich wiązka światła będzie wiązką równoległą.

Lasery są najlepszym źródłem światła do badania i wykorzystywania zjawiska interferencji. Przyrządy służące do badania tego zjawiska nazywają się interferometrami.



Interferometr Michelsona



Rys. 5. Schemat budowy interferometru Michelsona

Jednym z bardziej znanych i mających duże znaczenie praktyczne interferometrów jest interferometr Michelsona. Schemat budowy tego interferometry przedstawia Rys. 5

Wiązka światła emitowana przez źródło światła ZS (wiązka laserowa) odbija się częściowo od półprzepuszczalnego zwierciadła Z (wiązka 1), pozostała jej część przechodzi przez Z (wiązka 2). Natężenia obu wiązek są porównywalne. Wiązka 1 pada na zwierciadło Z_1 pod kątem 0° i po odbiciu wraca do zwierciadła półprzepuszczalnego. Wiązka 2 pada na zwierciadło Z_2 pod kątem 0° i zostaje także zawrócona w stronę zwierciadła Z. Wiązka 1 przechodzi przez zwierciadło Z zaś

wiązka 2 odbija się od niego. W ten sposób obie wiązki spotykają się i jako koherentne interferują ze sobą. Wynik interferencji obserwujemy na ekranie E. Kolejny przekrój wiązki światła laserowego powoduje, że prążki interferencyjne na ekranie E mają kształt współśrodkowych okręgów z ciemną lub jasną plamką w środku. Zmiana położenia zwierciadeł Z_1 lub Z_2 powoduje zmianę różnicy dróg optycznych wiązek 1 i 2, która z kolei powoduje zmianę i zmianę układu prążków interferencyjnych.



Metodologia wykonania ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie długości fali lasera, na podstawie obserwacji prążków interferencyjnych na ekranie. Zmieniając położenie jednego ze zwierciadeł w interferometrze możemy zmieniać fazę jednej z wiązek światła biorących udział w interferencji. Zmiana centralnego prążka na ekranie z ciemnego poprzez jasny do ciemnego oznacza, że zwierciadło przesunęło się o połowę długości fali.

Dla zwiększenia dokładności pomiaru obserwujemy (liczymy) n rozjaśnień i zaciemnień prążka, które mają miejsce podczas przesunięcia zwierciadła o zadaną odległość (np. $x = 0,30$ mm). Wówczas $n \cdot \frac{\lambda}{2} = 0,05 \cdot x$. Wartość 0,05 bierze się stąd, że zwierciadło jest poruszane za pomocą układu dźwigniowego. Czujnik mierzy odległość x (z dokładnością 0,01 mm), ale układ dźwigniowy jest skonstruowany w taki sposób, że wskazanie miernika wynoszące „ x ” odpowiada przesunięciu p zwierciadła o odcinek 20 razy mniejszy: $p = 0,05 \cdot x$.

1. Wyjustować interferometr (w razie konieczności). W tym celu należy:
 - a. zdjąć oprawkę z soczewką z lasera,
 - b. wykorzystując jako ekran odległą ścianę doprowadzić do pokrycia się obu plamek świetlnych, oznacza to, że promienie biegnące w kierunku ekranu biegną równoległe – nakładają się na siebie.
 - c. Założyć oprawkę z soczewką na laser.
2. Ustawić ekran (np. kartka papieru) w odległości ok. 30 – 50 cm od interferometru.
3. Wyznaczyć ilość n kolejnych wygaszeń prążka centralnego odpowiadających przesunięciu końca dźwigni (wskazanie miernika), np. o $x = 0,30$ mm. Pomiar powtórzyć $k = 50$ razy dla tego samego „ x ”. Pomiary powinny być wykonywane przez obu ćwiczących na zmianę.



Tabela pomiarowa

x	n_i	\bar{n}	$\alpha_i = \bar{n} - n_i$	λ	$\Delta\lambda$
[mm]	[-]	[-]	[-]	[μm]	[μm]

n_i – ilość wygaszeń prążka ciemnego

\bar{n}, α_i – zaokrąglić do liczby całkowitej



Obliczenia

1. Długość fali obliczyć ze wzoru:

$$\frac{\lambda}{2} \bar{n} = 0,05 \cdot x \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{2 \cdot 0,05 \cdot x}{\bar{n}}$$

gdzie: x – przesunięcie końca dźwigni,

\bar{n} – średnia ilość wygaszeń prążka centralnego.

3. Wyznaczyć niepewność standardową wartości średniej $u(\bar{n})$ z zależności:

$$u(\bar{n}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \alpha_i^2}{k(k-1)}}$$

4. Obliczyć niepewność standardową $u(\lambda)$ wyznaczonej długości fali korzystając z metody przenoszenia niepewności.