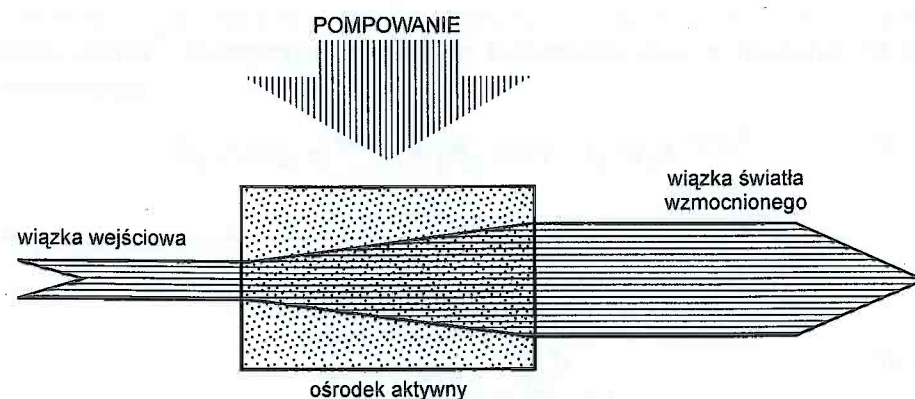


Laser

Podstawowym narzędziem współczesnej spektroskopii jest laser. Nie oznacza to, że nie używa się klasycznych źródeł światła, jak lampy, które są często mniej kłopotliwymi, stabilniejszymi i tańszymi źródłami światła. Jak wiadomo, w lampach wytwarzanie światła odbywa się dzięki emisji spontanicznej. Działanie laserów opiera się na emisji wymuszonej. Pozwala ona w znacznym stopniu kontrolować parametry emitowanego promieniowania. Z tego powodu lasery emitują światło o własnościach niespotykanych w źródłach konwencjonalnych. Dzięki zastosowaniu laserów nastąpił olbrzymi postęp w wielu dziedzinach nauki i techniki, a przede wszystkim w spektroskopii.

LASER [skrót ang. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – wzmacnianie światła przez wymuszoną emisję promieniowania] jest wzmacniaczem optycznym, czyli przyrządem służącym do wzmacniania światła. Wzmacnianie światła (tzw. **akcja laserowa**) zachodzi w ośrodku aktywnym, do którego w odpowiedni sposób – w **procesie pompowania** – jest dostarczana energia. Jak to pokazano na rys. III.1, słaba wiązka światła wejściowego, przechodząc przez napompowany ośrodek optyczny, zwiększa swoje natężenie, czyli ulega wzmocnieniu.



Rys. III.1. Podstawowy schemat wzmacniacza optycznego

Jak już wielokrotnie wspomnieliśmy, zjawiskiem odpowiedzialnym za wzmacnianie promieniowania jest emisja wymuszona. Jednak w ośrodku aktywnym zachodzą jednocześnie wszystkie trzy procesy oddziaływania promieniowania z materią: poza emisją wymuszoną także emisja spontaniczna i ab-

sorpcja. Zgodnie z równaniami Einsteina (II.10) liczba fotonów generowana w ośrodku na jednostkę objętości i jednostkę czasu wynosi

$$\frac{dN_f}{dt} = A_{21}N_2 + B_{21}N_2\rho(\omega) - B_{12}N_1\rho(\omega). \quad (\text{III.1})$$

Jak widać, absorpcja jest procesem przeciwnym, konkurencyjnym, wobec emisji wymuszonej i prowadzi do osłabienia akcji laserowej. Dodatkowym zjawiskiem, powodującym osłabienie wzmocnienia ośrodka czynnego przez depopulację liczby atomów wzbudzonych, jest emisja spontaniczna. W wyniku tej emisji fotony wypromieniowywane są izotropowo i średnio nie powodują zwiększenia natężenia wiązki laserowej (rys. III.1).

Przyjmijmy obecnie, że emisję spontaniczną można zaniedbać. By emisja wymuszona dominowała nad absorpcją, musi zachodzić relacja: $B_{21}N_2\rho(\omega) > B_{12}N_1\rho(\omega)$. Korzystamy ze związku $B_{12} = \frac{g_2}{g_1}B_{21}$ i po podstawieniu otrzymujemy

$$N_2 > N_1 \frac{g_2}{g_1}. \quad (\text{III.2})$$

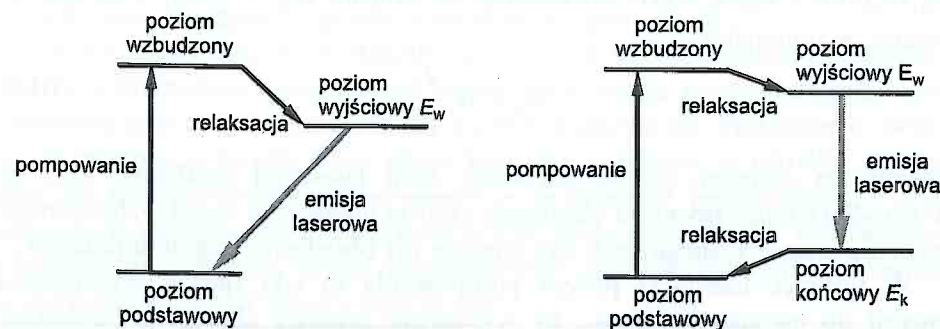
Wynik ten oznacza, że do uzyskania akcji laserowej niezbędne jest, by w ośrodku istniała **inwersja obsadzeń**, czyli że obsadzenie wyżej wzbudzonego poziomu energetycznego musi być większe niż obsadzenie poziomu dolnego¹.

W technice laserowej proces pompowania to taki sposób dostarczania energii do ośrodka czynnego, by wytworzyć inwersję obsadzeń. **Uzyskanie inwersji obsadzeń w warunkach równowagi termodynamicznej jest niemożliwe, gdyż byłoby to sprzeczne z rozkładem Boltzmanna (II.9).** Łatwo można pokazać, że odpowiada jej ujemna temperatura bezwzględna. Równe obsadzenia poziomów dolnego i wyższego uzyskuje się w temperaturze $T \rightarrow \infty$. Inwersję obsadzeń, a w konsekwencji akcję laserową, można więc uzyskać tylko przy specyficznym (nietermicznym) sposobie dostarczania energii do ośrodka aktywnego.

Po raz pierwszy akcję laserową zaobserwowano w roku 1960 w kryształach rubinu pompowanym silnym impulsem świetlnym z lampy błyskowej oraz w mieszaninie helu i neonu pobudzanej wyładowaniem elektrycznym. Obecnie znanych jest kilka tysięcy różnych ośrodków czynnych i wiele sposobów pompowania. Najczęściej spotykane metody to: pompowanie optyczne (lampami błyskowymi, innymi laserami), zderzenia z elektronami (lasery gazowe – wyładowanie w gazie), intensywne wstrzykiwanie elektronów i dziur przez złącze *p-n* (co prowadzi do ich inwersji i do ich rekombinacji wymuszonej) i wiele innych.

¹ Obsadzeniem poziomu energetycznego nazywamy wielkość N_i/g_i .

Z punktu widzenia struktury energetycznej poziomów ośrodki czynne dzielimy na trójpoziomowe i czteropoziomowe (rys. III.2). Jak to zostanie wykazane w jednym z następnych rozdziałów, za pomocą wzbudzenia niekoherentnego (niespójnego)² w układzie dwupoziomowym niemożliwe jest wytworzenie inwersji obsadzeń. W układzie trójpoziomowym pompowanie powoduje wzbudzenie do stanu, z którego następuje relaksacja do wyjściowego poziomu dla akcji laserowej. Aby ułatwić uzyskanie inwersji obsadzeń, często wybiera się poziom wyjściowy charakteryzujący się długim czasem życia. Jeżeli pompowanie jest wystarczająco silne, powoduje na tyle skuteczną depopulację poziomu podstawowego, że poziom wyjściowy dla akcji laserowej może być bardziej obsadzony niż poziom podstawowy. Łatwiejsze jest wytworzenie inwersji obsadzeń w układzie czteropoziomowym, wówczas poziom, do którego następuje przejście laserowe, jest zwykle skutecznie depopulowany do poziomu podstawowego przez wydajny mechanizm relaksacyjny.



Rys. III.2. Laser trójpoziomowy i czteropoziomowy

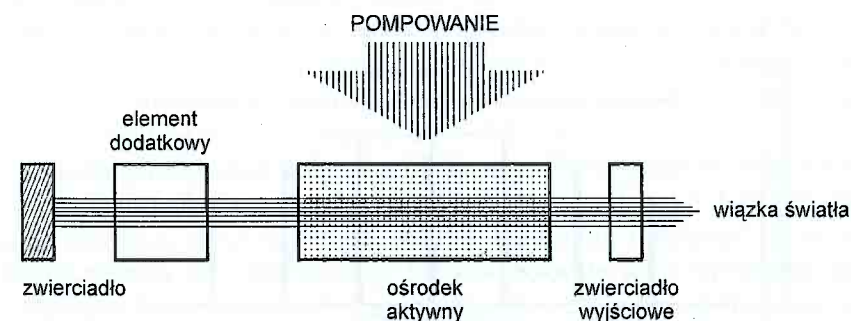
W praktyce lasery najczęściej pracują jako wzmacniacze z dodatnim sprzężeniem zwrotnym – są wtedy generatorami promieniowania. Podstawowy schemat lasera, w którym zachodzi generacja promieniowania (zwana akcją laserową), składa się z ośrodka wzmacniającego (tzw. czynnego) oraz układu zwierciadeł zapewniających optyczne sprzężenie zwrotne, czyli rezonatora.

Najprostszy rezonator, tzw. rezonator Fabry'ego-Perota, złożony jest z dwu zwierciadeł ustawionych prostopadle do osi układu (rys. III.3). Światło wydostające się z ośrodka czynnego jest przez każde zwierciadło kierowane z powrotem do niego, dzięki czemu ulega powtórnemu wzmocnieniu. Jeżeli efektywne wzmocnienie układu ze sprzężeniem zwrotnym równoważy jego straty³, w układzie następuje generacja promieniowania na skutek emisji wymuszonej.

² Patrz podrozdz. IV.6.

³ W rezonatorze optycznym stratami nazywamy ubytek liczby fotonów poruszających się między zwierciadłami. Straty mogą być spowodowane przez absorpcję, ucieczkę światła przez zwierciadła charakteryzujące się pewnym współczynnikiem transmisji, dyfrakcję itp.

Światło wydostaje się z lasera zwykle przez jedno ze zwierciadeł charakteryzujące się określonym współczynnikiem transmisji. Niekiedy, w celu osiągnięcia specjalnych własności, w rezonatorze umieszcza się dodatkowe elementy.



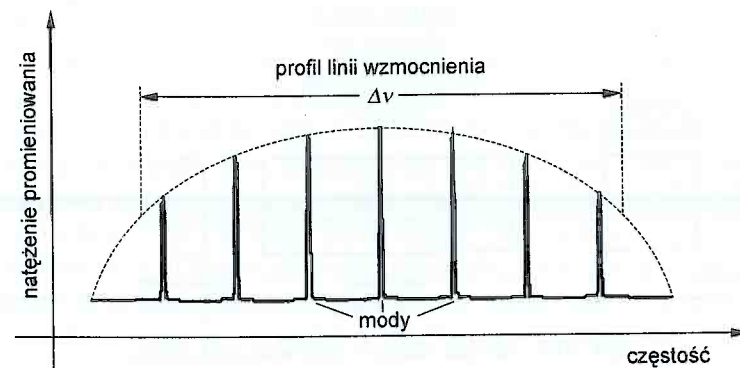
Rys. III.3. Schemat lasera – generatora optycznego

Wprowadzając odpowiednią wiązkę promieniowania na wejście wzmacniacza optycznego, możemy – dzięki własnościom emisji wymuszonej – kontrolować parametry światła wyjściowego, takie jak polaryzacja, kierunek rozchodzenia się, długość fali czy moment emisji promieniowania. W generatorach optycznych odbywa się to za pomocą układu sprzężenia zwrotnego, choć o wielu własnościach światła emitowanego przez laser (jak np. zakres długości fali) decydują własności ośrodka czynnego oraz sposób jego pompowania (laser impulsowy lub o pracy ciągłej). Rezonator określa własności geometryczne wiązki, jak kształt, poprzeczny rozkład natężenia i rozbieżność oraz własności spektralne promieniowania, jak długość fali i struktura widma. Światło laserów wytwarzane jest zwykle w postaci wiązki o małej rozbieżności i w porównaniu ze światłem lamp charakteryzuje się dużym stopniem spójności oraz znaczną monochromatycznością. Poza tym może być emitowane w postaci impulsów o dużym natężeniu i krótkim czasie trwania lub mieć charakter ciągły.

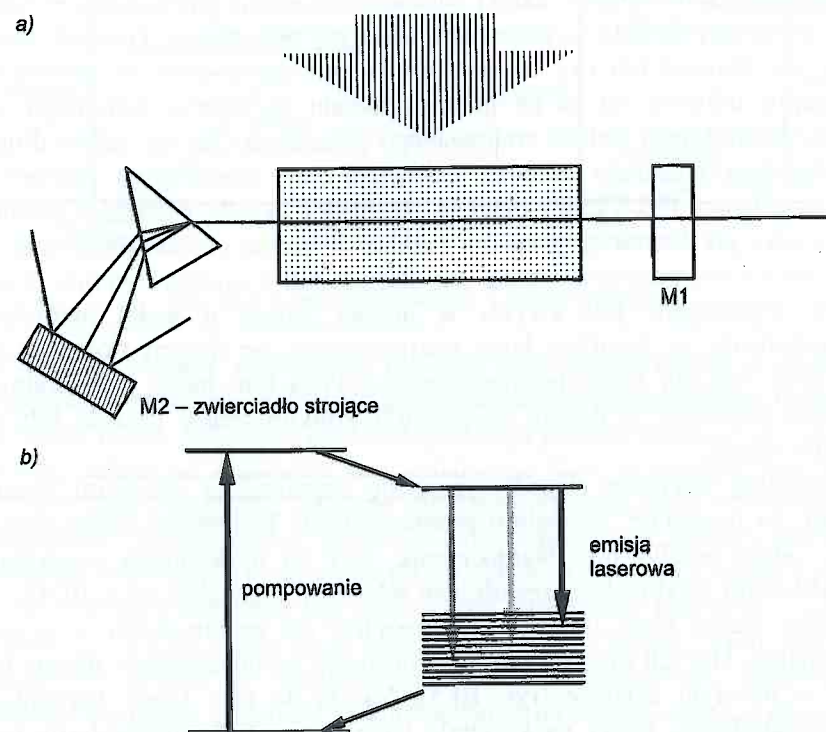
Rezonatory optyczne charakteryzują się częstotliwościami własnymi zwanymi modami, co powoduje, że widmo promieniowania laserowego emitowane jest nie w całym profilu linii wzmocnienia, lecz na dyskretnych częstotliwościach, w przybliżeniu zgodnych z częstotliwościami własnymi rezonatora (rys. III.4).

Bardzo ważną klasą laserów – szczególnie dla spektroskopii – są lasery przestrajalne, których długość fali generowanego promieniowania można regulować w pewnym zakresie (rys. III.5). Należą do nich lasery barwnikowe, półprzewodnikowe, lasery na kryształach tytanianu szafiru, aleksandrytu, lasery na centrach barwnych itd. Uzyskanie przestrajalnej akcji laserowej jest możliwe w ośrodkach o dostatecznie szerokim poziomie energetycznym, do którego następuje emisja wymuszona. Jak to pokazano na rys. III.5b, przejście laserowe może wtedy odbywać się z emisją fotonów o różnej energii, a więc o różnej długości fali. W laserach przestrajalnych selekcji długości fali emisji doko-

nuje się za pomocą umieszczonego w rezonatorze elementu dodatkowego, jak pryzmat, siatka dyfrakcyjna, etalon Fabry'ego-Perota, filtr Lyota itp. optyczne elementy dyspersyjne. Lasery przestrajalne dokonały rewolucji we współczes-



Rys. III.4. Widmo promieniowania generowanego przez laser



Rys. III.5. Schemat lasera przestrajanego za pomocą pryzmatu (a). W układzie tym generacja następuje na długości fali, dla której promieniowanie odbija się prostopadle od zwierciadła M2. Fale o innych długościach wyjdą poza rezonator. Zmiana długości fali generowanego promieniowania odbywa się przez obrót zwierciadła M2. Poniżej schemat poziomów energetycznych ośrodka, w którym może nastąpić przestrajalna akcja laserowa (b)

nej spektroskopii. Szczególne znaczenie odgrywają w niej lasery jednomodowe o częstotliwości stabilizowanej z dokładnością przekraczającą 1 MHz (rekord wynosi około 1 Hz).

Inną klasą laserów mającą wielkie znaczenie dla współczesnej nauki i techniki są lasery generujące krótkie impulsy promieniowania. Stosowana jest tu technika przełączania dobroci rezonatora (tzw. *Q-switching*)⁴, dzięki której lasery, takie jak neodymowy czy rubinowy, generują promieniowanie w postaci impulsów o czasie trwania 10^{-8} – 10^{-11} s.

Cykliczne przełączanie dobroci z okresem równym czasowi obiegu rezonatora przez światło, zwane synchronizacją modów (ang. *mode-locking*), powoduje, że oscylacje poszczególnych modów rezonatora odbywają się ze ściśle określoną różnicą faz. Interferencja modów pozwala na wytworzenie impulsów promieniowania o czasach trwania określonych przez odwrotności szerokości linii wzmacnienia. W szczególności w laserach o szerokim widmie generacji, jak lasery barwnikowe, lasery na kryształach tytanianu szafiru, uzyskuje się tą metodą ciągi impulsów powtarzane z częstotliwością około 100 MHz o czasie trwania rzędu kilkudziesięciu femtosekund ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$). Rekordowo krótkie impulsy – o czasie trwania 6 fs – uzyskano w laserach tytanowo-szafirowych. Lasery tego typu stosuje się do badania procesów ultraszybkich.

Obecne tendencje rozwoju laserów koncentrują się na poszukiwaniu coraz doskonalszych ośrodków czynnych, w których w prostszy i wydajniejszy sposób będzie można uzyskiwać akcję laserową w różnych częściach widma, w tym laserów pracujących w zakresie rentgenowskim i laserów promieniowania gamma, a w zakresie widzialnym prostych w użyciu przestrajalnych laserów na ciele stałym i powszechnie dostępnych laserów półprzewodnikowych pracujących w zakresie niebieskim i fioletowym.

⁴ Przełączanie dobroci rezonatora odpowiada włączaniu i wyłączaniu optycznego sprzężenia zwrotnego w laserze. Szersze omówienie technik *Q-switching* i *mode-locking* czytelnik znajdzie w literaturze cytowanej na końcu książki.