

W poprzednim odcinku próbowałem wszystkich przekonać, że światło laserowe jest bardzo niezwykłym zjawiskiem w przyrodzie. Jest to fala elektromagnetyczna, która jest jednocześnie monochromatyczna, ukierunkowana i co najważniejsze koherentna. Z ziarnistego punktu widzenia światło laserowe to strumień fotonów, które są pod każdym względem identyczne – absolutnie nierozróżnialne. Powiedzieliśmy też o tym, że istnieje właściwie tylko jeden sposób wytworzenia identycznych fotonów i tym samym wytworzenia światła laserowego. Jest on oparty na zjawisku emisji wymuszonej promieniowania.

O tym wszystkim już mówiliśmy. Wszystko wydaje się dość proste, ale... Właściwie jak w praktyce można to zrobić? Jak sprawić, aby po naciśnięciu przycisku na urządzeniu wielkości długopisu, kosztującym kilkanaście złotych, wydobył się promień lasera?

Jak zwykle wszystko okazuje się bardziej skomplikowane, niż jest w teorii.



Tomasz Sowiński jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. W 2005 roku skończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie fizyki teoretycznej, a trzy lata później uzyskał tam stopień naukowy doktora. Od lat zajmuje się popularyzacją nauk przyrodniczych. W roku 2008 otrzymał tytuł Mistrza Popularyzacji Nauki „Złoty Umysł” w konkursie Prezesa Polskiej Akademii Nauk.

Zbudowanie lasera było jedną z przełomowych chwil w dziejach naszej cywilizacji



jonów chromu jest bardzo specyficzny. Otóż przerwa energetyczna pomiędzy stanem podstawowym jonu chromu zanurzonego w rubinie a jego pierwszym stanem wzbudzonym odpowiada fali elektromagnetycznej o długości 694 nm. Jest to taka długość fali, jaką ma światło czerwone. Laser rubinowy wytwarzać zatem może czerwone światło laserowe.

Dzisiaj stosuje się bardzo różne materiały jako ośrodki czynne laserów i rubin nie jest wśród nich w żaden sposób wyróżniony. Istotne jest natomiast to, że rozkład poziomów energetycznych w każdym z materiałów używanych jako ośrodki czynne jest taki, że przejście kwantowe pomiędzy wyróżnionymi dwoma poziomami odpowiada fali światła widzialnego.

RÓWNOWAGA TERMODYNAMICZNA OŚRODKA

Aby zrozumieć, dlaczego zbudowanie prawdziwego lasera jest rzeczą dość skomplikowaną, przyjrzyjmy się, jak wygląda sytuacja fizyczna w ośrodku czynnym w warunkach naturalnych.

Rozważmy do czego może w tej sytuacji doprowadzić emisja wymuszona, która, jak pamiętamy, jest fundamentem pozwalającym wytworzyć identyczne fotony, a w rezultacie światło laserowe.

W ustalonej temperaturze ośrodek czynny pozostawiony sam sobie bez żadnych zewnętrznej ingerencji znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej. Z jednej strony termiczne drgania sieci krystalicznej powodują wzbudzenie atomów do wyższych poziomów energetycznych. Z drugiej strony emisja spontaniczna powoduje powrót do poziomu podstawowego. Równowaga pomiędzy tymi dwoma procesami prowadzi do pewnego rozkładu obsadze-

Tajemnice lasera cz. 2

Tomasz Sowiński

OŚRODEK CZYNNY

Centralną częścią lasera jest tzw. ośrodek czynny, czyli materiał złożony z takich atomów lub cząsteczek, w których jedno z przejść kwantowych (czyli różnica pomiędzy dwoma poziomami energetycznymi) odpowiada takiej długości fali światła, w jakiej pracować ma laser. Pierwszym takim ośrodkiem wykorzystanym do zbudowania lasera był rubin, czyli trójtlenek glinu domieszkowany jonami chromu. Oczywiście nie był to przypadkowy wybór. W tym dość rzadkim mineralu, na marginesie mówiąc cenionym w wyrobach jubilerskich, rozkład poziomów energetycznych



Trójtlenek glinu domieszkowany jonami chromu

nia poszczególnych stanów kwantowych. Najbardziej obsadzony jest oczywiście stan podstawowy – do niego ze wszystkich innych stanów prowadzą bezpośrednio, lub pośrednio przez inne stany, wszystkie procesy spontanicznej emisji. Oczywiście wraz ze wzrostem energii poszczególnych poziomów kwantowych spada ich obsadzenie. Drganiom termicznym sieci jest bowiem tym trudniej dokonać jakiegoś wzbudzenia, im więcej energii jest na to potrzebne.

Jeśli w takiej sytuacji poświecimy na ośrodek czynny światłem rezonansowym, tzn. takim, które pasuje do przejścia kwantowego, jakie rozważamy, to mogą się zdarzyć dwie sytuacje. Jeśli foton trafi akurat na atom znajdujący się w stanie podstawowym, to istnieje pewne prawdopodobieństwo, że zostanie on pochłonięty, a atom przejdzie do stanu wzbudzonego. Zjawisko absorpcji wymuszonej. Prawdopodobieństwo takiego procesu nie zależy od temperatury, w jakiej znajduje się ośrodek i jest zatem pewną fizyczną własnością samego ośrodka.

Jeśli foton trafi natomiast na atom, który jest w stanie wzbudzone, to absorpcja nie jest możliwa, ale może dojść do emisji wymuszonej promieniowania. Atom wyemituje foton, który jest identyczny z fotonem wymuszającym, a sam przejdzie do stanu podstawowego. Proces taki zachodzi również z pewnym prawdopodobieństwem, które również nie zależy zupełnie od temperatury ośrodka. Z fundamentalnych praw termodynamiki wynika jednak, że prawdopodobieństwo emisji wymuszonej w przypadku padania fotonu na atom wzbudzony jest dokładnie równe prawdopodobieństwu absorpcji wymuszonej w przypadku padania fotonu na atom w stanie podstawowym. Jest to jedna z tzw. relacji Einsteina, który jako pierwszy wykazał ją teoretycznie. Można zatem powiedzieć (tak jak zrobiliśmy to poprzednim razem), że procesy emisji i absorpcji wymuszonej są swoimi dokładnymi odwrotnościami.

Pamiętamy, że w równowadze termodynamicznej atomów znajdujących się w stanie podstawowym jest więcej niż atomów w stanie wzbudzone. Skoro zatem prawdopodobieństwo wzbudzenia i emisji wymuszonej są takie same, to nie powinno być dla nikogo żadnym zaskoczeniem, że w takiej sytuacji fotony będą częściej pochłaniane przez atomy (a następnie emitowane w zupełnie przypadkowy sposób za sprawą emisji spontanicznej), niż będą wymuszały po-

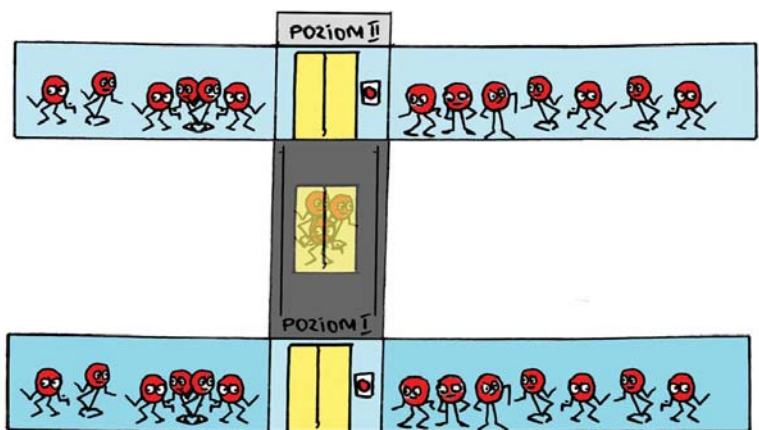
Zbudowanie lasera było według mnie jedną z przełomowych chwil w dziejach naszej cywilizacji.

wstawanie fotonów do nich identycznych. Padające promieniowanie będzie zatem w większym stopniu pochłaniane i rozpraszane we wszystkich kierunkach niż wzmacniane. W takiej sytuacji nie możemy zatem liczyć na powstanie światła laserowego.

INWERSJA OBSADZEŃ

Wzmocnienia padającego światła poprzez emisję wymuszoną nie możemy się spodziewać w sytuacji, gdy ośrodek znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej. Promieniowanie, nawet jeśli zostanie na chwilę wzmacnione, zaraz zostanie pochłonięte przez ośrodek i rozproszone za sprawą emisji spontanicznej we wszystkich kierunkach. Być może zatem wyprowadzenie ośrodka ze stanu równowagi mogłoby być jakoś pomocne? Zanim powiemy, jak można byłoby takiego wyprowadzenia z równowagi dokonać, sprawdźmy, czy rzeczywiście taki nierównowagowy stan ośrodka może być pomocny w otrzymaniu światła laserowego.

Wyobraźmy sobie, że jakimś cudownym zabiegiem udało nam się sprawić, że w pewnej chwili w ośrodku więcej jest atomów w stanie wzbudzone niż w stanie podstawowym. Fizycy nazywają taki stan ośrodka **INWERSJĄ OBSADZEŃ**. Jeśli w takiej sytuacji pada na ośrodek światło rezonansowe, to zostanie ono wzmacnione! Dzieje się tak dlatego, że fotony częściej będą trafiały na atomy wzbudzone niż na atomy w stanie podstawowym. A skoro prawdopodobieństwo emisji wymuszonej jest równe prawdopodobieństwu absorpcji wymuszonej, to w jednostce czasu więcej będzie zachodziło aktów „kopiowania” fotonów (na skutek emisji wymuszonej) niż aktów „niszczenia” fotonów (na skutek absorpcji i następującej po niej emisji spontanicznej). Wraz z upływem czasu będzie zatem przybywało identycznych fotonów. Tym samym mamy coś, co może być dla nas pierwszą jaskółką akcji laserowej. Oczywiście te rozważania są na razie jeszcze czysto teoretyczne, gdyż po pierwsze, nie wiemy, jak można dokonać inwersji obsadzeń. Po drugie, nawet jeśli udałoby nam się to zrobić, to nadal jest problem z ciągłością pracy lasera. Po zdeekscytowaniu (deekscytacja – przeskoczenie elektronu ze stanu wzbudzonego na stan podstawowy) nadmiarowej liczby atomów ośrodek powróci do sytuacji równowagowej, która jak pamiętamy nie jest dla nas korzystna.



Wraz z upływem czasu będzie przybywało identycznych fotonów

POMPOWANIE OŚRODKA

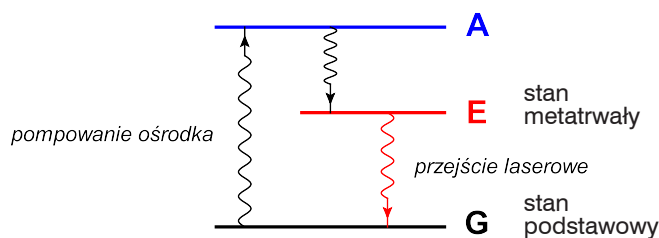
Przeprowadzenie ośrodka do sytuacji inwersji obsadzeń jest nazywane POMPOWANIEM. Nazwa, choć może troszkę śmieszna, rzeczywiście oddaje sens tego procesu. Pompowanie to jest bardzo wyrafinowane i nie wygląda tak prosto, jak może się wydawać. Na pierwszy rzut oka wydaje się bowiem naturalne, że pompowanie to nic innego jak poświecenie bardzo silnym, rezonansowym światłem na ośrodek. Wydaje się, że wtedy jest duża szansa, iż atomy zostaną wzbudzone i nastąpi inwersja obsadzeń. I oczywiście jest to w pewnym stopniu prawda, tylko że czysto teoretyczna i tym samym zupełnie bezużyteczna. W praktyce okazuje się, że musimy wziąć jeszcze pod uwagę niechcianą emisję spontaniczną. Prawdopodobieństwo zajścia emisji spontanicznej ze stanu wzbudzonego jest jednoznacznie związane z prawdopodobieństwem absorpcji wymuszonej promieniowania (jest to inna relacja Einsteina, podobna do tej wspomnianej wcześniej, jaka wiąże prawdopodobieństwa absorpcji i emisji wymuszonej). Wynika z niej, że im łatwiej jest wzbudzić atom na jakiś poziom, tym szybciej z tego stanu zachodzi emisja spontaniczna. Tym samym w rzeczywistej sytuacji takie proste wzbudzenie atomów silnym światłem nic nie da, bo natychmiast atomy będą przechodziły spontanicznie do stanu podstawowego i żadnej inwersji obsadzeń nie uda się stworzyć.



Pompowanie ośrodka jest bardzo wyrafinowane i nie wygląda tak prosto

Aby zapewnić możliwość dłuższego przebywania atomów w stanach wzbudzonych, jako ośrodków czynnych używa się takich materiałów, w których interesujący nas stan jest stanem metatrwałym. W stanie metatrwałym atom może przebywać bardzo długo w porównaniu z czasami, w jakich zachodzi akcja laserowa. To rzeczywiście wydaje się dobrym rozwiązaniem, bo jeśli stan wzbudzony jest metatrwały, to doprowadzenie do inwersji obsadzeń wydaje się łatwym zadaniem. Niestety akurat ten przypadek to przykład, kiedy przyroda jest złośliwa. Okazuje się, że im bardziej trwały jest dany stan wzbudzony, tym trudniej jest przeprowadzić do niego atom wprost ze stanu podstawowego. Musimy wybrać: albo chcemy mieć stabilny stan wzbudzony, albo stan, do którego atomy bardzo chętnie przechodzą, gdy je oświetlamy. Sprawa wydaje się zatem beznadziejna.

Fizycy to jednak ludzie, którzy łatwo się nie poddają. Wiemy przecież, że w atomie oprócz wyróżnionych przez nas stanów (podstawowego i wzbudzonego) istnieje całe zoo innych stanów kwantowych. Może je jakoś można wykorzystać, aby obejść opisany powyżej problem. Ależ oczywiście! Dla uproszczenia rozważmy atom, w którym oprócz naszych dwóch stanów, pomiędzy którymi będzie zachodziła akcja laserowa, jest jeszcze jeden stan kwantowy, który ma wyższą energię niż metatrwały stan wzbudzony. Dla ustalenia uwagi oznaczmy stan podstawowy przez G, a interesujący nas metatrwały stan wzbudzony przez E., tzn. chcemy uzyskać inwersję obsadzeń na stanie E względem stanu G. Do tego celu używamy trzeciego stanu A, którego energia jest większa niż energia stanu E. Stan A nie jest stanem metatrwałym i czas życia atomu w tym stanie jest bardzo krótki. Jeśli atom znajduje się w tym stanie, to na skutek bardzo prawdopodobnej emisji spontanicznej szybko przechodzi do stanu podstawowego G lub stanu wzbudzonego E. I oczywiście jeśli przejdzie do stanu E, to pozostanie w nim już bardzo długo, bo ten jest metatrwały. W ten właśnie sposób, wzbudzając kolejne atomy do stanu A i czekając, aż przejdą spontanicznie do stanu E, można uzyskać tak bardzo przez nas upragnioną inwersję obsadzeń. Jest to możliwe właśnie dzięki temu, że stan E jest metatrwały, a jednocześnie stan A wręcz przeciwnie – szybko deekscytuje. Cała ta procedura wytwarzania inwersji obsadzeń rzeczywiście wygląda jak pompowanie. I stąd pochodzi nazwa.



Warto dodać, że wspomniany przez nas na początku rubin jest właśnie do takiego algorytmu idealny. Stan wzbudzony E jest metatrwały i istnieje nie jeden, ale całe pasmo stanów A, które spontanicznie bardzo chętnie przechodzą do stanu E. Dlatego uzyskanie inwersji obsadzeń jonów chromu w rubinie jest takie proste.

AKCJA LASEROWA

Gdy ośrodek jest napompowany, tzn. istnieje inwersja obsadzeń pomiędzy stanem podstawowym G a stanem wzbudzonym E, można wykonać akcję laserową. W tym celu wystarczy do układu wpuścić jeden rezonansowy foton albo poczekać, aż jeden z atomów znajdujących się w stanie metatrwałym E przejdzie spontanicznie do stanu G i wyśle foton. Taki foton, przelatując w pobliżu wzbudzonych atomów, będzie inicjował emisję wymuszoną i tym samym będzie powielany jak na szybkiej kserokopiarce. Powstanie spójny, monochromatyczny impuls światła laserowego poruszający się w konkretnym kierunku. W kierunku, w którym porusza się foton inicjujący. Teraz musimy znów napompować ośrodek i całą operację powtórzyć. Zostanie wysłany kolejny impuls laserowy, który tym razem zapewne będzie się poruszał

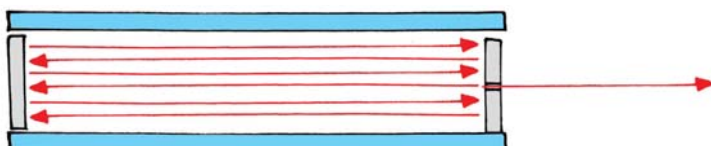
Przerwa energetyczna pomiędzy stanem podstawowym jonu chromu zanurzonego w rubinie a jego pierwszym stanem wzbudzonym odpowiada fali elektromagnetycznej o długości 694 nm. Jest to taka długość fali, jaką ma światło czerwone. Laser rubinowy wytwarzać zatem może czerwone światło laserowe.

w innym kierunku. Na razie zbudowaliśmy zatem urządzenie, które wysyła krótkie impulsy laserowe w różnych kierunkach.

Oczywiste jest, że musimy rozwiązać dwa problemy. Po pierwsze, jak sprawić, aby światło było generowane w sposób ciągły, a nie impulsowo. Po drugie, co zrobić, aby to coś świeciło ciągle w tym samym kierunku. Od biedy możemy się nawet pogodzić z impulsową pracą naszej maszyny, ale świecenia w konkretnym kierunku nie możemy sobie darować!

REZONATOR OPTYCZNY

Zacznijmy zatem od rozwiązania drugiego problemu. Do tego celu wykorzystamy efekt sprężenia zwrotnego – czyli zastosujemy wytworzone w akcji laserowej fotony do inicjowania kolejnych akcji laserowych. Jak tego dokonać? To proste! Zamykamy nasz ośrodek czynny z dwóch końców lustrami, które odbijają światło, gdy próbuje się ono z ośrodka wydostać. Odbite impulsy wracają do ośrodka, który w tym czasie zostaje ponownie napompowany i inicjują powstawanie kolejnych fotonów, które są idealnymi kopiami fotonów wpadających. W ośrodku zaczynają krążyć w tę i z powrotem fotony. Ich ilość narasta w postępie geometrycznym, co fizycy nazywają lawiną fotonową. Takie rozwiązanie ma dodatkowy plus. Jeśli jakiś z atomów spontanicznie przejdzie w stan podstawowy i wyemituje foton w kierunku innym niż ustawione są lustro, to wyleci on (wraz z fotonami, które wymusi) poza ośrodek czynny i nigdy już do niego nie wróci. Jest to oczywiście pewna strata, ale warta swojej ceny. Dzięki temu w ośrodku będą tylko fotony o ściśle określonym kierunku propagacji.



Odbite impulsy wracają do ośrodka, który w tym czasie zostaje ponownie napompowany

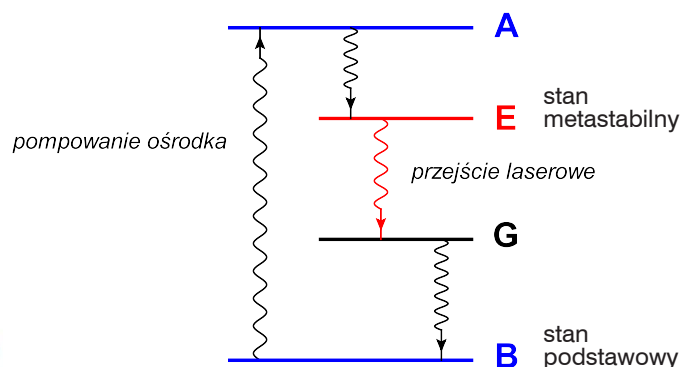
Jeśli teraz jedno z lusterek nie będzie idealnie odbijające, ale będzie pewną część fotonów przepuszczało, to w tym konkretnym kierunku będzie wychodziło prawdziwe światło laserowe – monochromatyczna, ukierunkowana i koherentna fala elektromagnetyczna. I nie będą to nawet impulsy, ale ciągła fala. Impulsowe będzie jedynie wytwarzanie fotonów w ośrodku.

Tak właśnie działał pierwszy laser rubinowy zbudowany przez Theodore'a Maimana w 1960 roku za co otrzymał prestiżową Nagrodę Wolfa w dziedzinie fizyki.

LASER CZTEROPOZIOMOWY

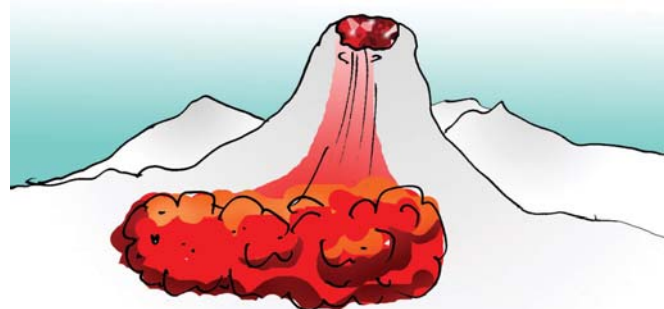
Choć opisana powyżej konstrukcja pozwala zbudować prawdziwy laser, czyli urządzenie wytwarzające kolosalne ilości takich samych fotonów, to jest w niej pewna słabość, którą łatwo można poprawić. Chodzi o impulsowe wytwarzanie inwersji obsadzeń. Ponieważ w tej realizacji zajmuje to trochę czasu, to jest on marnowany na bezużyteczne krążenie fotonów w ośrodku bez wytwarzania kolejnych kopii. Łatwo

jest wyobrazić sobie, dlaczego tak się dzieje. Stan podstawowy każdego atomu jest stanem wyróżnionym, bo jest jedynym stanem stabilnym i wszystkie procesy spontaniczne działają tak, aby atom ten stan osiągnął. To w gruncie rzeczy oznacza, że bardzo trudno jest osiągnąć inwersję obsadzeń względem tego stanu, bo ze swej natury jest on najbardziej obsadzony (w stanie równowagi termodynamicznej). Dlatego bardzo często inwersję obsadzeń wytwarza się pomiędzy stanami G i E, z których żaden nie jest stanem podstawowym. Jeśli stanem podstawowym jest stan B, którego energia jest niższa niż stanu G i jeśli przy tym stan G nie jest metatrwały w odróżnieniu od stanu E, to wytworzenie inwersji obsadzeń jest bardzo łatwe. Ze stanu B dokonuje się wzbudzenia do stanu A. Stan A bardzo szybko spontanicznie przechodzi do metastabilnego stanu E, z którego przejście do stanu G wymaga emisji wymuszonej. Po przejściu choćby jednego atomu do stanu E od razu mamy do czynienia z inwersją obsadzeń, gdyż stan G nie jest metatrwały i tym samym, jeśli jakiś atom w tym stanie był, to natychmiast spontanicznie przeszedł do stanu podstawowego B. Takie rozwiązanie sprawia, że inwersja obsadzeń pomiędzy G i E w praktyce występuje cały czas i tym samym praca lasera może być ciągła.



Sama akcja laserowa i zasada działania rezonatora optycznego jest oczywiście taka sama jak poprzednio. Jedyna różnica polega na sposobie wytwarzania inwersji obsadzeń.

Wielokrotnie podkreślałem, że zbudowanie lasera było według mnie jedną z przełomowych chwil w dziejach naszej cywilizacji. I choć zasada działania tego urządzenia jest bardzo skomplikowana, to tak naprawdę jest oparta na dwóch bardzo elementarnych spostrzeżeniach: fakcie, że wszystkie układy spontanicznie dążą do uzyskania najniższego stanu energetycznego, oraz tego, że podczas emisji wymuszonej powstający foton jest identyczną kopią fotonu wymuszającego. Cała reszta to wkład ludzkiego umysłu! ●



Wszystkie układy spontanicznie dążą do uzyskania najniższego stanu energetycznego