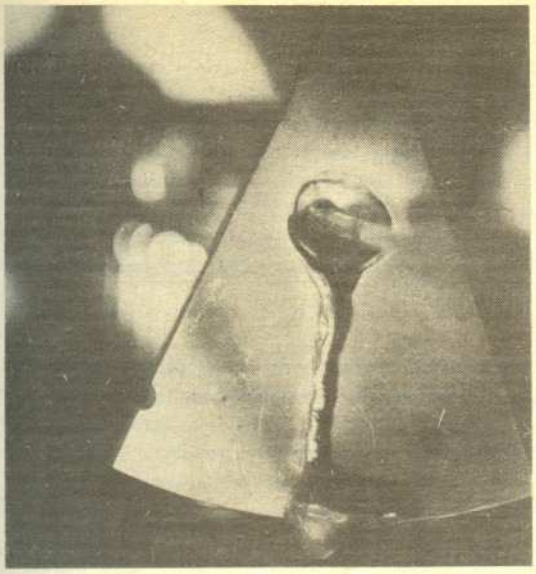
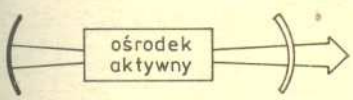


Ćwierćwiecze lasera

Prof. dr Adam KUJAWSKI

Laser stał się jednym z największych sukcesów nauki i techniki XX wieku. Chociaż zazwyczaj nie działa on na naszą wyobraźnię tak mocno jak inne osiągnięcia, na przykład opanowanie energii jądrowej lub wykorzystanie komputerów, jego znaczenie zarówno w badaniach naukowych, jak i zastosowaniach technicznych oraz medycznych jest ogromne. Dwadzieścia pięć lat, jakie upłynęło od zbudowania pierwszego lasera przez Theodora H. Maimana w 1960 r., jest okazją do krótkiego przeglądu oraz przypomnienia, że stale odkrywa się nowe zjawiska fizyczne zarówno w samych laserach, jak i przy ich wykorzystaniu. Spotykane określenia lasera, takie na przykład jak „cudo świetlne dwudziestego wieku" lub „światło wieku dwudziestego pierwszego", są wyrazem podziwu dla odkrytych właściwości promieniowania laserowego.



Schemat lasera, w którym dwa zwierciadła sferyczne tworzą rezonator.

W latach pięćdziesiątych zjawisko emisji wymuszonej wykorzystano do wzmacniania i generacji promieniowania mikrofalowego. Tak powstały masery. Następnie zjawisko to wykorzystano do generacji promieniowania widzialnego; świadczy o tym geneza słowa laser: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Twórcy maserów i laserów: Nikołaj G. Basow, Aleksander M. Prochorow i Charles Hard Townes otrzymali w 1964 r. nagrodę Nobla. Nagrodę tę otrzymali także N. Bloembergen i A. L. Schawlow w 1981 r. za osiągnięcia w optyce nieliniowej i spektroskopii laserowej. W typowym, najczęściej spotykanym laserze, ośrodek aktywny znajduje się między dwoma sferycznymi zwierciadłami, które tworzą rezonator optyczny, jak pokazano na rysunku. Zwierciadła (lub jedno z nich) są częściowo przepuszczalne. Rozważmy dwa stany o energiach E_2 i E_1 każdego z atomów lub cząsteczek tworzących ośrodek aktywny. W warunkach równowagi termodynamicznej liczby N_2 i N_1 (w jednostce objętości) atomów o energiach E_2 i E_1 spełniają nierówność $N_2 < N_1$. Odpowiednie wzbudzenie (pompowanie) może doprowadzić do odwrócenia (inwersji) obsadzeń w ośrodku aktywnym, to znaczy do sytuacji, w której $N_2 > N_1$. Gdy w takim ośrodku pojawi się promieniowanie o częstości $\nu = (E_2 - E_1)/h$, h — stała Plancka, ulega ono wzmocnieniu w wyniku aktów emisji wymuszonej. Układ taki jest wzmacniaczem optycznym. Pojawienie się promieniowania może być rezultatem emisji spontanicznej, to znaczy samorzutnego przejścia atomu ze stanu o energii E_2 do stanu o energii E_1 wraz z emisją fotonu. Tak więc emisja spontaniczna inicjuje świecenie materiału aktywnego w kierunku, w którym porusza się foton powstały w wyniku emisji spontanicznej. Takie promieniowanie układu atomów nosi nazwę wzmocnionej emisji spontanicznej. W tym przypadku rozkład przestrzenny natężenia promieniowania jest określony kształtem materiału aktywnego. Gdy układ atomów jest wewnątrz rezonatora, fotonom poruszającym się w kierunku osi rezonatora zapewnia on dodatnie sprzężenie zwrotne, bowiem część promieniowania odbija się od zwierciadeł i ponownie przechodzi przez materiał aktywny. Jednocześnie rezonator pełni inną ważną rolę, ponieważ mogą w nim wzbudzać się pewne charakterystyczne rozkłady pola, zwane rodzajami lub modami, mające określone częstotliwości drgań. Ośrodek aktywny wzmacnia promieniowanie tych modów, których częstotliwości mieszczą się w szerokości linii widmowej świecącego układu atomów. Przy pewnej wartości mocy pompowania, dla jednego lub wielu modów, wzmocnienie równoważy straty promieniowania w rezonatorze. Warunek ten określa próg akcji laserowej. Przy pompowaniu powyżej progu układ rezonator-ośrodek aktywny jest generatorem promieniowania optycznego. W takim generatorze, stosując odpowiednie metody, można wzbudzać akcję laserową tylko na jednym modzie rezonatora. Oznacza to oczywiście wyższy stopień monochromatyczności promieniowania niż w przypadku wzbudzenia wielu modów. W czasie akcji laserowej istotne jest to, że fotony promieniowane aktami emisji wymuszonej przez atomy ośrodka aktywnego są takie same. W rezultacie wiązka światła opuszczająca rezonator przez częściowo przepuszczające zwierciadło — może to być pojedynczy impuls lub ciąg impulsów, albo świecenie w sposób ciągły — ma bardzo dobrą spójność przestrzenną i czasową. Oznacza to małą rozbieżność kątową i wysoki stopień monochromatyczności. Liczba różnych rozwiązań technicznych, w których wykorzystano zjawisko emisji wymuszonej, tak jak wyżej naszkicowano, jest ogromna. Inwersję obsadzeń można otrzymać różnymi metodami; mówiąc ogólnie za pomocą wzbudzenia optycznego, wyładowania elektrycznego lub reakcji chemicznych, a akcję laserową uzyskuje się zarówno w materiałach fazy skondensowanej, jak i gazowej. Podkreślmy jeszcze, że ogólna teoria działania lasera ma głębokie związki z teorią układów nie będących w stanie równowagi termodynamicznej.

W pierwszym laserze, w którym materiałem aktywnym był kryształ rubinu, uzyskano impuls o czasie trwania rzędu 10^{-3}s, a moc wynosiła około 1 kW. W układzie laserowym dużej mocy „Antares" w Los Alamos, przeznaczonym do otrzymania kontrolowanej syntezy termojądrowej (por. *Delta* 3/1975, art. S. Kaliskiego) i wykorzystującym największy dotychczas zbudowany laser na dwutlenku węgla (długość fali 10,6 μm), otrzymano impuls o czasie trwania 1 ns i mocy 25 TW. Energia impulsu wynosi 25 kJ; docelowo układ ma dostarczać impulsy o energii 40 kJ. W innym układzie laserowym „Nova" w Livermore, wykorzystującym lasery neodymowe, osiągnięto moc 57 TW w impulsie o czasie trwania 1 ns (długość fali 1,05 μm).

Układ ten w przyszłości ma osiągnąć moc ponad 100 TW.

1 TW = 10^{12} W

W pierwszym laserze pracującym w sposób ciągły ośrodkiem aktywnym była mieszanina He-Ne; moc tego lasera była mniejsza niż 1 mW. Obecnie w laserach pracujących w sposób ciągły (materiał aktywny CO_2 lub HF) moce dochodzą do 100 kW. Skala wymiarów obecnie budowanych laserów rozciąga się od ułamków milimetra do kilku metrów. Układy laserowe dużej mocy mają znacznie większe wymiary.

Chociaż postęp w osiąganiu coraz większych mocy jest imponujący, a duże moce światła laserowego znalazły liczne zastosowania, spójność promieniowania laserowego jest cechą, która w fundamentalny sposób odróżnia to promieniowanie od promieniowania ze źródeł konwencjonalnych (por. *Delta* 6/1981, art. A. Kujawskiego i J. Mostowskiego). Jeśli chodzi o spójność czasową, to oznacza to, że światło lasera może być monochromatyczne w bardzo wysokim stopniu; dla długości spójności światła osiągnięto wartość setek kilometrów, podczas gdy dla źródeł konwencjonalnych dochodzi ona najwyżej do kilku milimetrów. Jeśli chodzi o spójność przestrzenną, to wiązka światła laserowego może mieć bardzo małą rozbieżność kątową porównywalną z naturalną rozbieżnością dyfrakcyjną. Wysoki stopień spójności czasowej i przestrzennej pozwala charakteryzować promieniowanie laserowe w inny sposób. Gęstość mocy na jednostkę kąta bryłowego i gęstość spektralna mocy (moc na jednostkę częstości) są znacznie większe dla promieniowania z laserów niż dla promieniowania ze źródeł konwencjonalnych.

Optyka jest tą dziedziną fizyki i techniki, która w okresie po zbudowaniu lasera uległa głębokim i istotnym przemianom (por. *Delta* 4/1985, art. K. Ernsta). W istocie w optyce nastała era laserów. Odkryto wiele nowych zjawisk w atomach, takich jak na przykład wzbudzenie wielofotonowe, dynamiczny efekt Starka, pułapki jonowe (por. *Delta* 5/1985, art. A. Kopystyńskiej). Skonstruowanie laserów o przestrajalnej długości fali umożliwiło wprowadzenie nowych metod separacji izotopów (por. *Delta* 9/1977, art. F. Kaczmarka). W wyniku powstania spektroskopii laserowej nastąpił gwałtowny rozwój fizyki atomowej i fizyki ciała stałego. Powstały nowe dziedziny, takie jak optyka nieliniowa i optyka światła spójnego. Do tej ostatniej należą holografia (por. *Delta* 2/1974, art. B. Karczewskiego) i optyka fourierowska, a ogólniej mówiąc, optyczne metody przetwarzania danych. W większości odkrytych nowych zjawisk optycznych spójność oraz duża gęstość mocy grają istotną rolę, a opis klasyczny jest wystarczający. Na uwagę jednak zasługują te zjawiska, które ukazują kwantową naturę promieniowania. Przykładem są eksperymentalne i teoretyczne badania statystyki zliczeń fotonów światła lasera jednomodowego. Wyniki badań pokazują, że takie światło ma właściwości statystyczne inne niż światło ze źródeł konwencjonalnych (por. *Delta* 8/1985, art. K. Rzążewskiego). Tych nowych właściwości statystycznych nie można stwierdzić w doświadczeniach interferencyjnych; są one obserwowane w zjawiskach nieliniowych. Wszystkie tego rodzaju zjawiska zalicza się do optyki kwantowej.

Rozwój elektroniki, zapoczątkowany wynalezieniem radia, przyniósł opanowanie i zastosowanie promieniowania elektromagnetycznego o długości fal aż do wartości rzędu centymetrów. Zbudowanie maserów oznaczało, że elektronika stała się kwantowa. Zbudowanie laserów — źródeł spójnego optycznego promieniowania o znacznie mniejszych długościach fal — spowodowało, że obecnie elektronika jest dziedziną, która zajmuje się również optyczną częścią widma elektromagnetycznego.

W książce *Nowe oblicze optyki* Arkadiusz Piekara pisze, że optyka staje się „radiotechniczna" i porównuje lasery z optycznymi stacjami radiowymi, wysyłającymi fale spójne. Powstała więc nowa dziedzina nazwana optoelektroniką, do której między innymi należą telekomunikacja światłowodowa i optyka zintegrowana (w analogii do elektroniki zintegrowanej zajmującej się układami scalonymi). Przyjęto też — w analogii do elektroniki — dziedzinę, do której zalicza się badania właściwości światła i zjawisk optycznych oraz ich zastosowania, nazywać fotoniką. Ta nazwa przypomina także kwantowy charakter promieniowania optycznego.

Lasery nie tylko zmieniły i zbliżyły do siebie optykę i elektronikę. Także w biologii i medycynie, zarówno w badaniach poznawczych, jak i zastosowaniach praktycznych, ich wykorzystanie stale rośnie. Zupełnie ogólnie można zresztą powiedzieć, że nie ma obecnie dziedziny nauki i techniki, w której lasery nie byłyby wykorzystywane. Po upływie pierwszego ćwierćwiecza pewne typy laserów są produkowane na skalę przemysłową, a niektóre tylko do celów specjalnych. W wielu laboratoriach prowadzi się badania zarówno nad układami, w których można uzyskać akcję laserową, jak i nad zastosowaniami.

Na zakończenie warto jeszcze omówić niektóre aktualne, szczególnie ważne osiągnięcia. Zbudowany został laser, w którym źródłem promieniowania są swobodne elektrony. W takim laserze wiązka szybkich elektronów przechodząc przez odpowiednie periodyczne pole magnetyczne emituje promieniowanie o długości fali zależnej od okresu i natężenia pola magnetycznego i energii elektronów. Całość znajduje się w odpowiedniej wnęce rezonansowej. Oczekuje się, że tego typu lasery staną się źródłem promieniowania w dalekim ultrafiolecie. Innym ważnym rezultatem w badaniach nad laserami w obszarze fal krótkich jest otrzymanie wzmocnienia promieniowania o długościach fal w pobliżu 21 nm. W tym przypadku krótkie impulsy promieniowania (450 ps, długość fali 532 nm, gęstość mocy $5 \cdot 10^{13}$ W/cm^2) padające na cienkie warstwy selenu wytwarzają plazmę i inwersję obsadzeń odpowiednio niskich poziomów energetycznych. Istnieją także doniesienia o wzmocnieniu promieniowania o długości fali 1,4 nm przy pompowaniu wybuchem ładunku jądrowego. Chociaż używa się nazwy laser rentgenowski — emisja wymuszona gra zasadniczą rolę — w istocie w obydwu przypadkach mamy do czynienia ze wzmocnioną emisją spontaniczną (brak jest rezonatora). Niewątpliwie rozstrzygający krok na drodze do zbudowania lasera w obszarze promieniowania rentgenowskiego został zrobiony.

W badaniach nad ultrakrótkimi impulsami światła opanowano technikę wytwarzania i pomiarów impulsów światła o czasach trwania rzędu pikosekund. Impulsy takie znajdują liczne i różnorodne zastosowania przy badaniu szybkich procesów w układach molekularnych i w fizyce ciała stałego (np. pomiary czasów relaksacji rzędu pikosekund). W centrum zainteresowań znajdują się obecnie impulsy femtosekundowe. Czas trwania najkrótszego dotychczas otrzymanego impulsu wynosi 8 fs dla średniej długości fali 620 nm. Warto sobie uświadomić fakt, że w tak krótkim czasie mieszczą się cztery okresy drgań pola elektromagnetycznego.

1 fs = 10^{-15} s

Pierwsze ćwierćwiecze istnienia laserów przyniosło osiągnięcia naukowe i techniczne oraz rozwój nowych dziedzin nauki, które świadczą, że fizyka i technika laserowa osiągnęły wiek dojrzały.