

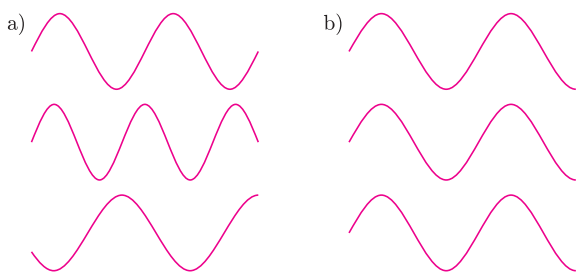
# Światło twardsze niż diament

Stanisław BEDNAREK\*

Na pierwszy rzut oka stwierdzenie zawarte w tym tytule wydaje się niezgodne z prawdą. W tablicach dotyczących właściwości materiałów bez trudu można znaleźć informację, że najtwardszym materiałem jest właśnie diament. Na diamencie nie można bowiem wykonać rysy żadnym innym materiałem. Fizycy umieją jednak precyzyjnie wycinać otwory w diamentowych płytkach, używając do tego celu wiązki światła. Nie jest to bynajmniej światło wysyłane przez zwykłą żarówkę, lecz ultrakrótkie impulsy światła wytwarzane przez lasery o bardzo dużej mocy. Warto więc poświęcić nieco czasu, żeby zrozumieć zasadę działania tej najnowszej generacji laserów, pozwalających uzyskać światło o tak niezwykłych właściwościach.

Ze słowem laser spotykamy się obecnie na co dzień. Wielu z nas używa choćby drukarek czy wskaźników laserowych. Słowo laser jest akronimem, czyli słowem utworzonym z pierwszych liter angielskiego wyrażenia „light amplification by stimulated emission of radiation” – po polsku oznacza to wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania. Pierwszy laser został zbudowany w Stanach Zjednoczonych przez T. Maimana. Było to w czerwcu 1960 r. W swojej konstrukcji Maiman wykorzystał opublikowane dwa lata wcześniej teoretyczne rozważania Ch. Townesa i A. Schawlowa.

Zobaczmy, jaka jest różnica między światłem laserowym a światłem pochodzącym ze zwykłych źródeł, np. świecy czy żarówki. W tym celu porównajmy rys. 1 a) i b).

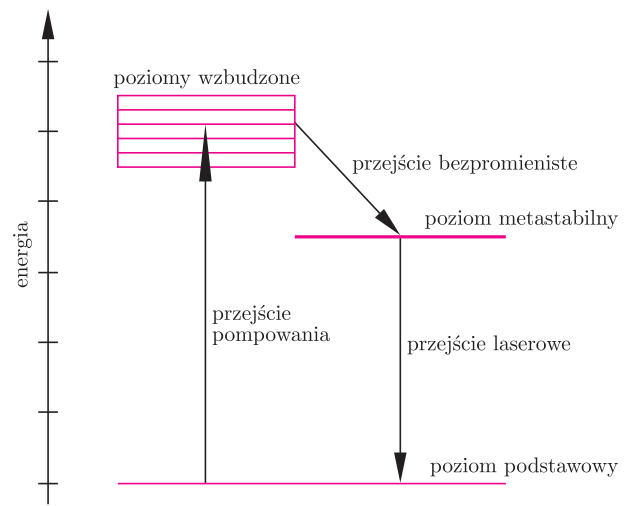


Rys. 1. Wykresy fal elektromagnetycznych a) o przypadkowych długościach i fazach wysyłanych, np. przez żarówkę; b) o jednakowych długościach i fazach wysyłanych przez laser.

Światło, jak wiadomo, jest wiązką fal elektromagnetycznych, którym odpowiadają określone długości i fazy drgań. Charakterystycznymi cechami światła laserowego są: monochromatyczność, spójność – nazywana też koherencją – i równoległość wiązki. Pierwsza z tych cech oznacza taką samą długość wszystkich fal, a druga taką samą fazę, czyli jednakowy argument funkcji sinus lub cosinus przedstawiającej wykres tej fali. Zwykle źródła światła wysyłają natomiast fale o różnych długościach i przypadkowych fazach. Równoległość wiązki, czyli jej kolimacja, umożliwia uzyskanie niewielkiej plamki światła w odległości kilkudziesięciu metrów od wskaźnika laserowego.

Aby ciało, np. włókno żarówki, mogło świecić, konieczne jest wzbudzenie jego atomów lub cząsteczek. Wzbudzenie to polega na dostarczeniu ciału energii, w tym przypadku przez ogrzanie przepływającym prądem elektrycznym. Energia ta jest pochłaniana przez elektrony, które przechodzą ze stanu o najniższej energii – poziomu podstawowego, do stanów o wyższej energii – poziomów wzbudzonych. Poziomy wzbudzone są stanami nietrwałymi i elektrony szybko wracają do poziomu podstawowego, oddając różnicę energii przez wypromieniowanie fal elektromagnetycznych, co przejawia się jako świecenie.

W celu wytworzenia światła laserowego konieczne jest zaistnienie szczególnego układu poziomów energetycznych (rys. 2).

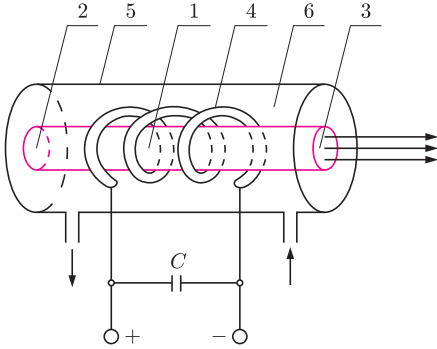


Rys. 2. Najprostszy schemat poziomów energetycznych w ośrodku wysyłającym światło laserowe.

Charakterystyczną cechą takiego układu jest występowanie tzw. poziomu metastabilnego, na którym elektrony mogą znajdować się przez znacznie dłuższy czas niż na innych poziomach wzbudzonych. Początkowo zachodzi przechodzenie elektronów z poziomu podstawowego na poziomy wzbudzone. Proces ten nazywa się pompowaniem i może być realizowany np. przez silny błysk światła lub wyładowanie elektryczne. Elektrony z poziomów wzbudzonych przechodzą następnie na poziom metastabilny. W pewnym momencie na tym poziomie znajduje się więcej elektronów niż na poziomie podstawowym. Stan taki nazywa się inwersją, czyli odwróceniem obsadzeń. Wówczas rozpoczyna się akcja laserowa, polegająca na wymuszonych przejściach elektronów ze stanu metastabilnego do stanu podstawowego. Towarzyszy jej wysyłanie monochromatycznego, spójnego i skolimowanego promieniowania. Opisany układ trzech poziomów energetycznych z jednym poziomem metastabilnym jest najprostszym układem, w którym może zachodzić akcja laserowa. Obecnie budowane lasery wykorzystują bardziej złożone układy wielu poziomów energetycznych.

\*Instytut Fizyki Uniwersytetu Łódzkiego

Akcja laserowa może zachodzić w ośrodku stałym, ciekłym lub gazowym. Pierwszym laserem był laser rubinowy, dający światło czerwone o długości fali  $0,6943 \mu\text{m}$  (rys. 3).

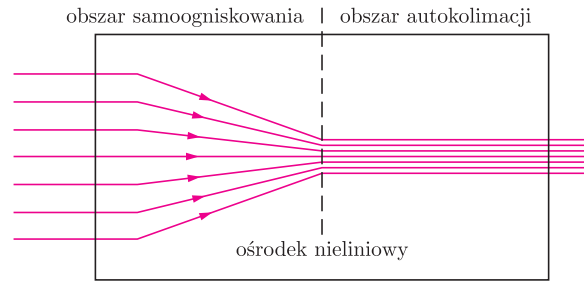


Rys. 3. Budowa lasera rubinowego; 1 – pręt rubinu domieszkowany chromem, 2 – zwierciadło całkowicie odbijające, 3 – zwierciadło częściowo przepuszczające, 4 – lampa błyskowa, 5 – obudowa, 6 – ciecz chłodząca, C – bateria kondensatorów.

Do jego pompowania wykorzystano ksenonową lampę błyskową zasilaną z baterii kondensatorów. Laser ten pracował w sposób impulsowy. Przejście laserowe zachodziło między poziomami energetycznymi atomów chromu, którymi domieszkowany był pręt rubinu. Zwierciadło półprzepuszczalne pozwalało na wyjście wiązki światła laserowego z pręta. Energia jednego impulsu typowego lasera rubinowego nie jest imponująca i wynosi kilkadziesiąt dżuli. Energia ta wypromieniowywana jest jednak w czasie kilkunastu miliardowych części sekundy. Dlatego moc lasera rubinowego w impulsie jest ogromna i osiąga miliardy watów – tyle co moc dużej elektrowni. Takie impulsy laser rubinowy może wytwarzać kilkakrotnie w czasie minuty.

Ogromnym mocom światła laserowego odpowiadają bardzo duże natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Przy tak dużych natężeniach ośrodek, w którym rozchodzi się impuls, staje się nieliniowy. Oznacza to, że współczynnik załamania światła jest funkcją, np. kwadratową, natężenia pola elektrycznego. W takim ośrodku równoległa wiązka światła przekształca się w wiązkę zbieżną, a ta z kolei w wiązkę równoległą, ale o znacznie mniejszej średnicy (rys. 4). Zachodzące tu zjawiska nazywa się samoogniskowaniem i autokolimacją. Samoogniskowanie i autokolimacja prowadzą do dalszego zwiększenia gęstości mocy światła laserowego. Znane są również

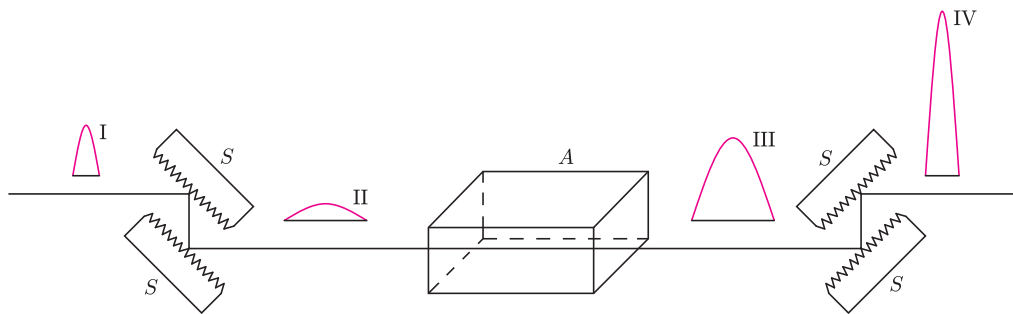
ośrodki nieliniowe, w których może zachodzić przekształcenie równoległej wiązki światła w wiązkę rozbieżną o zwiększonej średnicy. Zależy to od tego, jaką funkcją natężenia pola elektrycznego – rosnącą czy malejącą – jest współczynnik załamania światła ośrodka.



Rys. 4. Samoogniskowanie i autokolimacja wiązki światła w ośrodku nieliniowym.

W połowie lat osiemdziesiątych G. Mourou przedstawił nową koncepcję lasera, pozwalającą na wytwarzanie impulsów światła o jeszcze większej mocy. Pomysł polegał na zastosowaniu odbiciowych siatek dyfrakcyjnych do zmiany czasu trwania impulsu. Schemat budowy takiego lasera przedstawia rys. 5. Impuls wejściowy wytwarzany przez laser zasilający pada na pierwszą parę siatek dyfrakcyjnych, która powoduje wydłużenie czasu jego trwania  $10^3$ – $10^5$  razy. Zgodnie z zasadą zachowania energii zachodzi przy tym zmniejszenie mocy impulsu. Moc rozciągniętego impulsu jest na tyle mała, że może być on bez zniekształcenia wzmocniony przez ośrodek wzmacniający. Po wzmocnieniu impuls przechodzi przez drugą parę odbiciowych siatek dyfrakcyjnych, która tym razem działa odwrotnie, powodując skrócenie czasu trwania impulsu i zwiększenie jego mocy.

Typowy laser działający według opisanej zasady daje impuls o mocy  $10^{13}$  W, trwający  $10^{-13}$  s. Dla porównania, moc ta równa jest sumie mocy wszystkich elektrowni pracujących obecnie na kuli ziemskiej. Skolimowana wiązka światła z takiego lasera o średnicy  $36 \mu\text{m}$  ma gęstość mocy  $10^{22}$  W/m<sup>2</sup>. Daje się ona jeszcze zogniskować w obszarze o średnicy około  $1 \mu\text{m}$  i wówczas jej gęstość mocy przekracza  $10^{25}$  W/m<sup>2</sup>. Przy tej gęstości mocy natężenie pola elektrycznego osiąga  $10^{14}$  V/m, a indukcja pola magnetycznego  $10^5$  T. Są to rekordowe parametry pola wytworzonego przez człowieka. Pola takie w szczególny sposób oddziałują z materią, powodując efekt nazywany fotodestrukcją.



Rys. 5. Zasada działania lasera wzmacniającego rozciągnięty impuls; A – ośrodek wzmacniający, S – odbiciowa siatka dyfrakcyjna, I – impuls wejściowy, II – rozciągnięty impuls wejściowy, III – impuls wzmocniony, IV – ściśnięty impuls wzmocniony.

Fotodestrukcja polega na lokalnej jonizacji atomów ośrodka przez niezwykle silne pole elektryczne.

Powstające przy tym swobodne elektrony i jony tworzą mikroobszar wypełniony plazmą o temperaturze rzędu  $10^4$  K. Plazma ta bardzo szybko rozszerza się – prędkość rozszerzania dochodzi do kilku km/s. Skutkiem tego w ośrodku zaczyna rozchodzić się fala uderzeniowa niszcząca jego strukturę. Działające przy tym siły powodują odrzucenie materii zwane ablacją. W konsekwencji tego, przy użyciu odpowiednio silnego impulsu światła laserowego, możliwe jest wspomniane na wstępie wydrążenie otworu o średnicy kilku tysięcznych milimetra w tak twardych materiałach jak diament czy węgiel tytanu. Warty uwagi jest fakt, że powstały otwór ma gładkie ścianki, a struktura materiału w jego otoczeniu pozostaje nieuszkodzona.

Obróbka najtwardszych materiałów nie jest jedyną dziedziną zastosowań ultrakrótkich impulsów światła laserowego. Bardzo silne pole elektryczne działając na cząstki naładowane, nadaje im ogromne przyspieszenia. W przypadku protonów przyspieszenia te są  $10^{22}$  razy większe od przyspieszenia ziemskiego, a dla elektronów stosunek ten wynosi aż  $10^{25}$ . Dzięki temu oddziaływanie impulsów światła laserowego

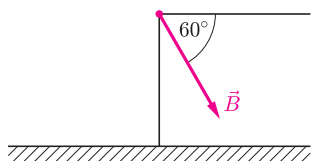
wykorzystuje się jako bardzo efektywny sposób rozpędzania cząstek naładowanych. W niedalekiej przyszłości może to doprowadzić do powstania nowej generacji akceleratorów. Ich rozmiary będą nieporównywalnie mniejsze od rozmiarów obecnie działających akceleratorów. Lasery działające na zasadzie wzmacniania rozciągniętego impulsu są bowiem na tyle małe, że z powodzeniem można zmieścić je na biurku.

Na zakończenie warto dodać, że ultrakrótkie impulsy światła laserowego znalazły również zastosowanie w chemii do badania bardzo szybko zachodzących reakcji chemicznych, których czas trwania jest rzędu  $10^{-15}$  s. W tym czasie następują przeskoiki elektronów tworzących niektóre wiązania chemiczne. Obrazowo przedstawiając sprawę, można powiedzieć, że takie ultrakrótkie impulsy światła laserowego są w stanie spełniać rolę swoistej lampy błyskowej, pozwalającej uwidocznić i zarejestrować ten proces. Metodę tę opracował i rozwijał w latach dziewięćdziesiątych XX wieku Egipcjanin A. Zewail. Znaczenie poznawcze tej metody zostało w krótkim czasie docenione przez społeczność naukową i Zewail w 1999 r. otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii.



## Zadania

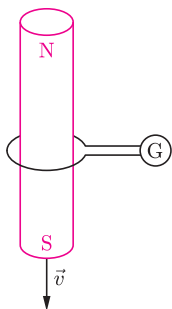
Redaguje Mikołaj KORZYŃSKI



Rys. 1

**F 659.** Samochód jedzie z prędkością  $v = 100$  km/h w kierunku zachodnim. Do samochodu dołączona jest pionowa antena o długości  $d = 40$  cm. Obliczyć różnicę potencjałów na końcach anteny spowodowaną przez ziemskie pole magnetyczne. Inklinacja tego pola, czyli kąt między wektorem pola magnetycznego a poziomem, wynosi w tym miejscu  $\alpha = 60^\circ$  (rys. 1), a jego pozioma składowa skierowana jest dokładnie na północ (deklinacja wynosi zero). Indukcja ziemskiego pola magnetycznego w tym miejscu wynosi  $B = 4 \cdot 10^{-5}$  T. Czy różnica potencjałów powoduje jakieś dodatkowe opory ruchu?

Rozwiązanie na str. 10



Rys. 2

**F 660.** Przez pętelkę z drutu, podłączoną do galwanometru, przelatuje (ze stałą prędkością) magnes sztabkowy w kształcie wydłużonego cylindra (rys. 2). W jakim momencie ruchu magnesu wskazania galwanometru będą największe? Wskazówka: narysować w przybliżeniu linie pola magnetycznego magnesu.

Rozwiązanie na str. 14

Redaguje Waldemar POMPE

**M 1120.** Dane są liczby rzeczywiste dodatnie  $a, b, c$  o sumie równej 1. Dowieść, że

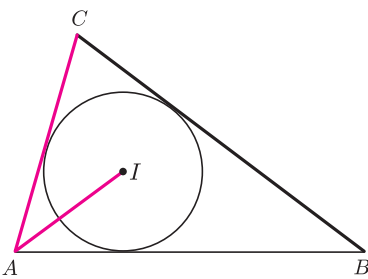
$$a \cdot \sqrt[3]{1+b-c} + b \cdot \sqrt[3]{1+c-a} + c \cdot \sqrt[3]{1+a-b} \leq 1.$$

Rozwiązanie na str. 10

**M 1121.** Punkt  $I$  jest środkiem okręgu wpisanego w trójkąt  $ABC$ , przy czym  $AC + AI = BC$  (rys. 3). Wyznaczyć stosunek miary kąta  $BAC$  do miary kąta  $ABC$ .  
Rozwiązanie na str. 14

**M 1122.** Każde pole szachownicy  $n \times n$  pomalowano na czarno lub biało. Okazało się, że żadne cztery pola, których środki są wierzchołkami prostokąta o bokach równoległych do krawędzi szachownicy, nie zostały pomalowane tym samym kolorem. Dla jakiej największej wartości  $n$  jest to możliwe?

Rozwiązanie na str. 10



Rys. 3