

Laser femtosekundowy

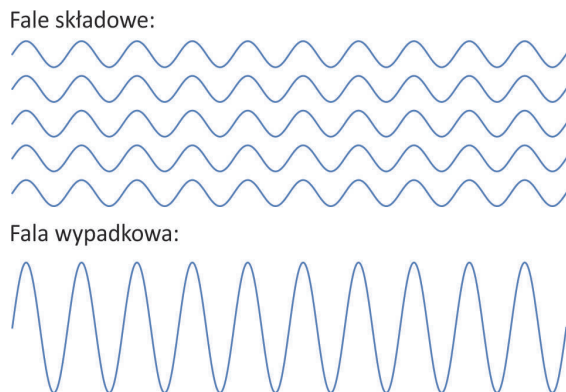
Podstawowym narzędziem służącym do obserwacji otaczającego nas świata jest zmysł wzroku. Jest bardzo wyrafinowany, ale niestety nie idealny. Dlatego już wieki temu naukowcy zaczęli wspomagać nasze oczy przyrządami optycznymi – konstruowali lunety i teleskopy, aby móc dostrzec dalekie lub słabo świecące obiekty astronomiczne, oraz mikroskopy, aby oglądać mikroorganizmy i inne bardzo małe struktury. W szczególności bez mikroskopów nie byłby możliwy tak szybki rozwój nanotechnologii, biofizyki, biologii i medycyny.

Gdy okazało się, że ludzki wzrok jest niewystarczająco czuły, aby dostrzec bardzo słabe sygnały świetlne, naukowcy i inżynierowie skonstruowali elektroniczne, półprzewodnikowe detektory światła, najpierw fotodiody, a następnie matryce CCD. Podobne urządzenia można dzisiaj spotkać w skanerach obrazów i w cyfrowych aparatach fotograficznych. Fotodetektory umożliwiły nie tylko „dostrzeganie” słabego światła, ale również rozszerzyły zakres czułości na podczerwień i ultrafiolet – promieniowanie, na które ludzkie oko jest nieczułe. Dodatkową zaletą fotodetektorów jest to, że sygnał zarejestrowany w fotodetektorze bardzo łatwo może zostać przetworzony na postać cyfrową i zapisany w pamięci komputera w celu dalszej analizy. Kolejną niewątpliwą zaletą fotodetektorów jest możliwość bramkowania, czyli szybkiego włączania rejestracji światła na określony, nawet bardzo krótki czas. Na tej zasadzie działa tzw. migawka aparatu fotograficznego. Czas otwarcia migawki podczas robienia zdjęcia musi być dobrany odpowiednio do fotografowanej sceny i warunków oświetlenia. Na przykład, aby zrobić dobre zdjęcie samochodem biorącym udział w wyścigach lub lecącej piłce, czas otwarcia migawki aparatu musi być bardzo krótki, w przeciwnym przypadku poruszający się obiekt będzie rozmyty.

Z drugiej strony wiadomo, że zdjęcie można zrobić tylko obiektowi, który się świeci lub jest oświetlony światłem pochodzącym z innego źródła. W pierwszych mikroskopach badane obiekty były oświetlane światłem słonecznym lub światłem płomienia świecy, później jako źródło światła używano różnego rodzaju lamp elektrycznych, a pod koniec XX wieku zaczęto korzystać z laserów. Laser to urządzenie emitujące promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu światła widzialnego, ultrafioletu lub podczerwieni, wykorzystujące zjawisko emisji wymuszonej. Wyraz LASER jest akronimem (skrótowcem) od angielskiej pełnej nazwy *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, czyli wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania. Promieniowanie lasera jest spójne (tzn. wszystkie fale składowe mają jednakową fazę), spolaryzowane (tzn. drgania wszystkich fal składowych odbywają się w tej samej płaszczyźnie) i ma postać wiązki o bardzo małej rozbieżności. Zazwyczaj jest też *monochromatyczne*, to znaczy ma jedną, stałą częstotliwość (a co za tym idzie, również długość fali w danym ośrodku). Światło wytwarzane przez laser można traktować jako złożenie wielu fal emitowanych przez atomy zawarte w tzw. ośrodku czynnym lasera. W przypadku lasera o pracy ciągłej, wszystkie fale składowe mają taką samą częstotliwość, a ich złożenie ma również taką samą częstotliwość (rys. 1).

Naukowcom udało się również skonstruować **lasery impulsowe**, czyli takie, które wysyłają światło w postaci krótkich błysków. W rzeczywistości, pierwszy laser (skonstruowany w 1960 roku przez Theodore'a Maimana) był właśnie laserem





Rys. 1. Składanie spójnych fal monochromatycznych

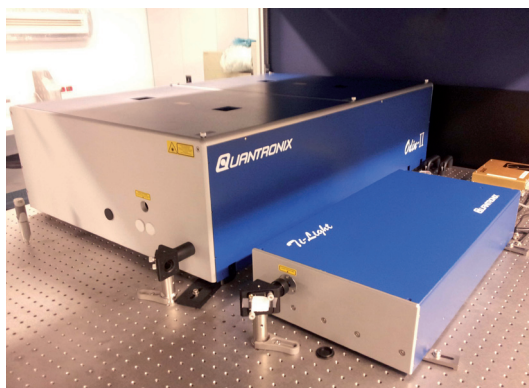
impulsowym. Źródłem światła był w nim pręt wykonany z syntetycznego kryształu rubinu, który wytwarzał impulsy światła czerwonego trwające tysięczne części sekundy. W następnych latach konstruowane coraz to nowe typy laserów, które wytwarzały coraz krótsze impulsy światła. W tabeli przedstawiono, jak długość (w przestrzeni) impulsu światła (równa drodze przebytej przez światło) zależy od czasu trwania impulsu.

Czas	Droga przebyta przez światło w próżni	Przykłady w przyrodzie (w przybliżeniu)
1 s	300 000 km	odległość Ziemia–Księżyc
1 ms	300 km	odległość Kraków–Warszawa
1 μ s	300 m	długość przekątnej krakowskiego Rynku
1 ns	30 cm	długość dłuższego boku kartki formatu A4
1 ps	0,3 mm	szerokość linii napisanej cienkopisem
1 fs	0,3 μ m	rozmiar małych bakterii
1 as	0,3 nm	odległość pomiędzy sąsiednimi atomami węgla w diamencie

Obecnie w nowoczesnych laboratoriach bardzo często używane są **lasery femtosekundowe**, czyli urządzenia wytwarzające impulsy promieniowania o czasie trwania od kilku do kilkudziesięciu femtosekund. 1 femtosekunda (fs) to 10^{-15} sekundy, czyli milionowa z miliardowej części sekundy. Aby uzmysłowić sobie, jak krótki to jest czas, zauważmy, że w ciągu 1 fs światło przebywa drogę porównywalną z rozmiarami małych bakterii. Lub jeszcze inaczej: jeśli „wydłużymy” 1 fs do 1 s (którą każdy już łatwo odczuwa), to wtedy zachowując proporcję 1 s wydłuży się do... ponad 30 milionów lat!

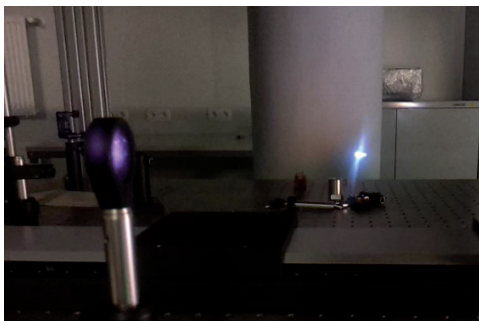
Nasuwa się jeszcze zasadnicze pytanie: w jakim celu konstruuje się lasery impulsowe? Odpowiedź jest dosyć prosta: dzięki temu, że energia emitowanego promieniowania skupiona jest w krótkim impulsie, można osiągnąć bardzo dużą moc chwilową (choć średnia moc promieniowania może być niewielka). Dla przykładu: w Zakładzie Fotoniki Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego naukowcy mają do dyspozycji laser Nd:YAG (czytaj „neodymowo-jagowy”), który może generować impulsy światła o maksymalnej energii 120 mJ

i czasie trwania 6 ns, powtarzane z częstotliwością 10 Hz. Łatwo obliczyć, że moc światła w impulsie (tzw. moc szczytowa) wynosi około 20 MW (megawatów)! Moc średnia wynosi natomiast tylko 1,2 W. Inny laser, znajdujący się w tym samym laboratorium, to laser femtosekundowy ze wzmacniaczem (fot. 1), który wytwarza impulsy światła o energii 6 mJ, trwające 30 fs, powtarzane z częstotliwością 1 kHz. Moc średnia jest równa 6 W, a moc szczytowa wynosi... aż 200 GW (!!!), czyli znacznie więcej niż łączna moc wytwarzana przez dwie największe polskie elektrownie w Bełchatowie i Turowie (7 GW)! Jak to możliwe? Odpowiedź jest prosta: elektrownie wytwarzają energię w sposób ciągły, a podana moc szczytowa impulsu światła z lasera to moc chwilowa, osiągana przez bardzo krótki czas trwania impulsu, zaś pomiędzy impulsami moc wynosi zero.



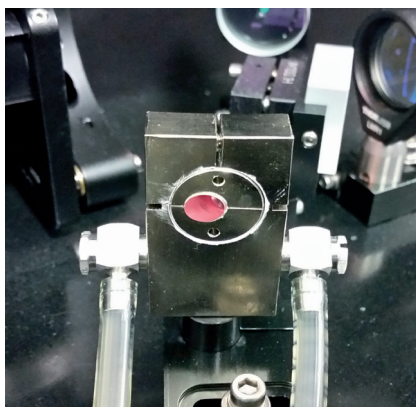
Fot. 1. Laser femtosekundowy (po prawej) ze wzmacniaczem (po lewej)

O tym, jak duża jest moc szczytowa promieniowania pochodzącego z lasera femtosekundowego, może świadczyć film [1] dostępny w serwisie YouTube oraz fot. 2. Przedstawia ona obłoczek plazmy wytworzonej w powietrzu za pomocą impulsów światła z lasera femtosekundowego, skupionych soczewką widoczną po lewej stronie zdjęcia. Plazma powstaje w ognisku soczewki. Temperatura centrum obłoczka to kilkadziesiąt tysięcy stopni Celsjusza. Powstawanie tej plazmy można wyjaśnić wystąpieniem przebiecia elektrycznego (iskry) zachodzącego pod wpływem silnego pola elektrycznego (światło to przecież pole elektromagnetyczne) i podgrzewania powietrza światłem. Pisk słyszalny na filmie to „grzmoty” towarzyszące powstawaniu plazmy, powtarzające się przy każdym impulsie lasera, czyli 1000 razy na sekundę.

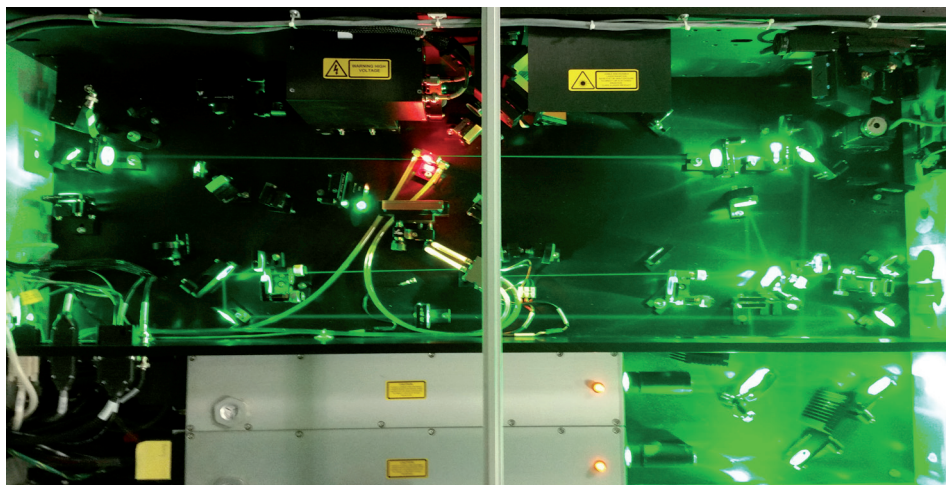


Fot. 2. Obłoczek plazmowy (po prawej stronie) wytworzony w powietrzu skupioną wiązką światła z lasera femtosekundowego. Sama wiązka lasera jest niewidoczna ze względu na wysoką czystość powietrza w laboratorium i to, że jest to promieniowanie z zakresu bliskiej podczerwieni

Jak powstają tak krótkie impulsy światła? Na pewno nie poprzez szybkie mechaniczne czy elektryczne odsłanianie i zasłanianie wiązki lasera pracy ciągłej! W laserze femtosekundowym ośrodkiem czynnym jest często kryształ syntetycznego szafiru domieszkowanego tytanem (wzór chemiczny $Ti:Al_2O_3$) (fot. 3) albo światłowód domieszkowany iterbem lub innymi pierwiastkami ziem rzadkich. Atomy tych pierwiastków mogą wytwarzać i wzmacniać światło w szerokim zakresie długości fal. Kryształ szafiru w laserze tytanowo-szafirowym jest, jak mówią fizycy, „pompowany” światłem z innego lasera (fot. 4), tzn. znajdujące się w kryształce atomy tytanu uzyskują energię, którą potem mogą oddać w postaci światła wiązki laserowej w wyniku emisji wymuszonej.



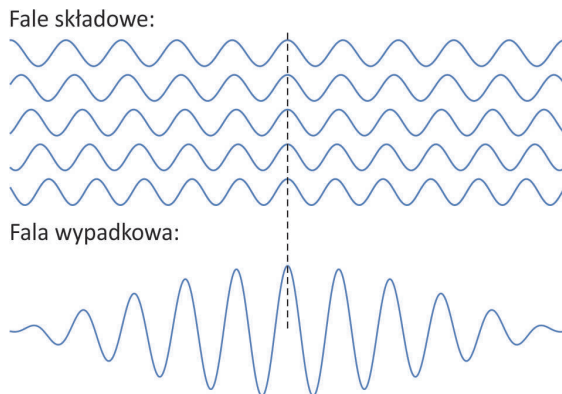
Fot. 3. Kryształ tytanowo-szafirowy wzmacniacza femtosekundowego. Metalowa oprawka chłodzona wodą zapewnia stabilizację temperatury kryształu



Fot. 4. Wnętrze działającego wzmacniacza lasera femtosekundowego. U góry widoczny świecący na czerwono kryształ szafiru oświetlony skupionymi, zielonymi wiązkami światła z laserów pompujących (u dołu). Wiązka światła wzmacnianego nie jest widoczna, ponieważ jest w zakresie bliskiej podczerwieni

Dzięki odpowiedniej konstrukcji tak zwanego rezonatora lasera, ośrodek czynny generuje i wzmacnia fale o różnych (ale zbliżonych do siebie) częstotliwościach. Te różne fale to tzw. *mody drgań*. Jeżeli mody zostaną odpowiednio z sobą zsynchronizowane, to fala wypadkowa będzie miała kształt ciągu

krótkich impulsów. Przedstawiona na rys. 2 fala jest złożeniem pięciu modów drgań, widoczny jest impuls o dużej amplitudzie. W rzeczywistości w laserach złożeniu ulega kilkanaście tysięcy modów, dzięki czemu otrzymuje się bardzo wyraźne, ultrakrótkie impulsy.



Rys. 2. Składanie zsynchronizowanych modów drgań. Linia przerywana oznacza chwilę czasu, w której wszystkie fale są zsynchronizowane w fazie (mają maksuma)

Czytelnik samodzielnie może sprawdzić, że w wyniku złożenia fal o odpowiednich częstotliwościach powstaje ciąg krótkich impulsów. Należy skorzystać z dowolnego programu do rysowania wykresów funkcji lub aplikacji na tablet, lub smartfon, lub strony internetowej [2]. W okienku wzoru funkcji wpisz wyrażenie (używaj kropek, a nie przecinków!!):

$$\sin(x) + \sin(1.05*x) + \sin(1.10*x) + \sin(1.15*x) + \sin(1.20*x)$$

Kolejne człony odpowiadają modom fali w rezonatorze lasera. Czynniki (liczby przy zmiennej x) w kolejnych członach różnią się o stałą wartość. Można wpisać dalsze wyrazy, im więcej składników będzie zawierała funkcja, tym impulsy będą coraz krótsze.

Inaczej niż w przypadku lasera pracy ciągłej, światło generowane przez laser impulsowy ma szerokie widmo, tym szersze, im krótsze są emitowane przez niego impulsy. Przykładowo, światło z lasera nanosekundowego ma szerokość spektralną poniżej 0,1 nm, a światło z lasera femtosekundowego aż kilkadziesiąt nanometrów, nie jest więc monochromatyczne.

Lasery femtosekundowe zawdzięcza rozwój tak zwana femtochemia (Nagroda Nobla z chemii dla Ahmeda Zewaila 1999 r.), a także nowe metody w precyzyjnej spektroskopii laserowej (Nagroda Nobla z fizyki dla Johna Halla i Theodora Hänscha w 2005 r.). Ale o tym następnym razem!



[1] <https://youtu.be/-adpzFBuMeY>

[2] <https://www.desmos.com/calculator>