

Czesanie czasu grzebieniem optycznym

Zegar optyczny



Mgr Piotr Fita jest doktorantem na Wydziale Fizyki UW. Zajmuje się zastosowaniami ultrakrótkich impulsów światła w badaniach dynamiki procesów chemicznych

PIOTR FITA

Instytut Fizyki Doświadczalnej UW
piotr.fita@fuw.edu.pl

CZESŁAW RADZEWICZ

Instytut Fizyki Doświadczalnej UW
Instytut Chemii Fizycznej, Warszawa
Polska Akademia Nauk
czeslaw.radzewicz@fuw.edu.pl

W miarę rozwoju cywilizacji spieszymy się coraz bardziej i coraz usilniej próbujemy dokładnie mierzyć upływający czas



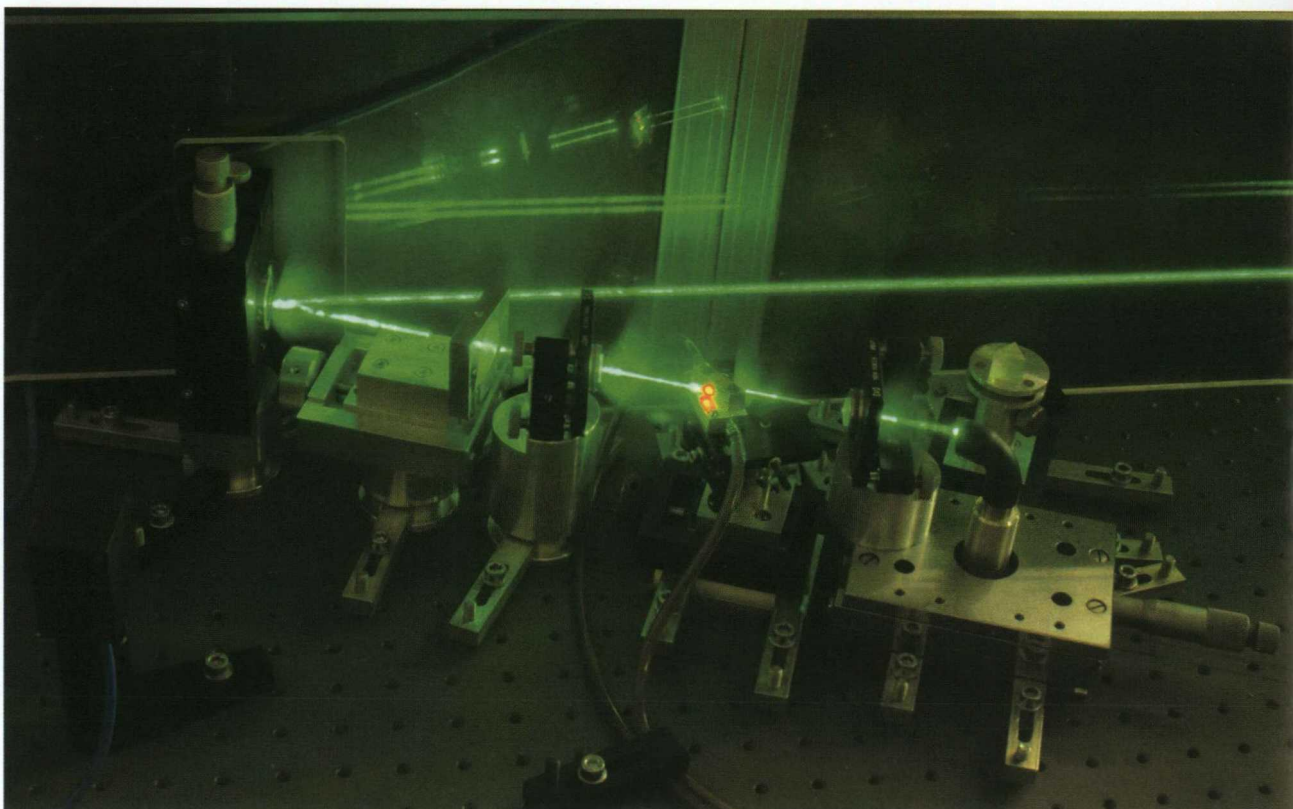
Prof. dr hab. Czesław Radzewicz zajmuje się optyką i spektroskopią, w szczególności ultrakrótkimi impulsami światła

Trudno wyobrazić sobie, że dziś, tak jak kilkaset lat temu, moglibyśmy zadowalać się wyznaczaniem czasu z dokładnością godzin. Obecnie nawet budziki mogą być synchronizowane nadawanym radiowo sygnałem czasu,

który zapewnia, że nie obudzą nas ani o sekundę później niż tego chcemy. W technice mierzenia czasu wymagany jest postęp w dwóch kierunkach. Po pierwsze zegary muszą być coraz mniejsze, tańsze i prostsze w obsłudze, by zaspokoić wymagania urządzeń powszechnego użytku (których najlepszym przykładem jest system GPS). Po drugie muszą się stawać coraz dokładniejsze, by spełnić rosnące potrzeby nowoczesnej nauki w tak różnorodnych dziedzinach jak, na przykład, precyzyjna spektroskopia pojedynczych atomów z jednej strony, a radioastronomia z drugiej.

Postęp w tej dziedzinie jest tak duży, że obecnie umiemy mierzyć czas lepiej niż jakąkolwiek inną wielkość fizyczną – względny błąd pomiaru to tylko 10^{-15} , co odpowiada jednej sekundzie na 30 milionów lat. Równie dobrze potrafimy mierzyć częstotliwość sygnału okresowego (np. fal elektromagnetycznych), gdyż pomiary czasu i częstotliwości wyko-

Charakterystyczne serce lasera femtosekundowego: kryształ szafiru umieszczony pomiędzy zwierciadłami wklęsłymi



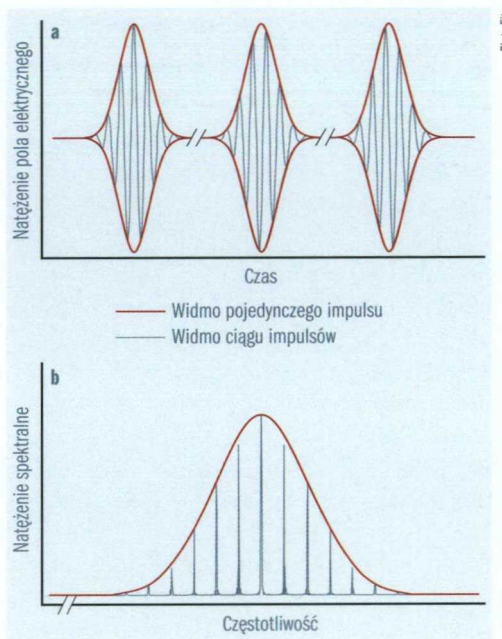
Piotr Fita

rzystują ten sam wzorec – źródło sygnałów oscylujących w czasie o dobrze znanym okresie oscylacji. By odmierzyć określony czas, odlicza się wymaganą liczbę cykli, natomiast by wyznaczyć częstotliwość sygnału, należy policzyć, ile jego okresów „zmieści się” w jednej sekundzie. Umiejętność pomiaru częstotliwości jest, jak widać, kluczowa dla pomiarów czasu, a istniejąca elektronika wprowadza tu poważne ograniczenia – największe częstotliwości, jakie można mierzyć bezpośrednio za pomocą układów elektronicznych, nie przekraczają 10^{11} Hz, czyli 100 GHz. Zatem ani obecnie, ani w najbliższej przyszłości nie można liczyć na pojawienie się układów elektronicznych dostatecznie szybkich, by zliczać cykle fal elektromagnetycznych z zakresu widzialnego, których częstotliwości są rzędu setek teraherców ($1 \text{ THz} = 1000 \text{ GHz}$). Niezmiernie utrudnia to korzystanie z dokładniejszych znanych obecnie wzorców częstotliwości, czyli przejść optycznych pomiędzy różnymi stanami energetycznymi w atomach. Wprawdzie w obecnych zegarach atomowych również wykorzystywane są przejścia pomiędzy stanami energetycznymi w atomach, ale – ze względu na konieczność współpracy z elektroniką – ich częstotliwości leżą w zakresie mikrofal (pojedynczych gigaherców). Nie dorównują one przez to potencjalnym możliwościom wzorców optycznych, jednak zastosowanie tych drugich jeszcze do niedawna wymagało niezwykle złożonych układów przemiany częstotliwości, na które mogły sobie pozwolić jedynie największe światowe laboratoria metrologiczne.

Grzebień optyczny

Przełom przyniosło skonstruowanie tzw. grzebienia optycznego. Wkroczył on triumfalnie do dziedziny pomiaru czasu dzięki temu, że w stosunkowo prosty sposób pozwala przenieść sygnał pomiędzy zakresem częstotliwości optycznych i radiowych (setki megaherców), zachowując przy tym dokładność optycznego wzorca częstotliwości. Osiągnięcie to zostało uhonorowane nagrodą Nobla w 2005 roku dla Johna Halla i Theodora Hänscha.

Grzebień optyczny jest wynikiem połączenia dwóch, wcześniej niezależnych, kierunków rozwoju technik laserowych. W laserach pracy ciągłej dążono do jak największej stabilności ich pracy, czyli niezmienności w czasie natężenia światła i jego widma. Przy tym sta-



Piotr Fija

a: Oscylujące pole elektryczne w ultrakrótkich impulsach światła (zielona krzywa) jest ograniczone obwiednią (czerwona krzywa)
b: Widmo pojedynczego impulsu ma kształt obwiedni widma stabilnego ciągu impulsów

rano się uzyskać jak najwęższe widmo – w rekordowych rozwiązaniach jego szerokość nie przekraczała 1 Hz, co oznacza, że była 15 rzędów wielkości mniejsza niż częstotliwość emitowanej fali. Dokładnie przeciwne były natomiast dążenia fizyków zajmujących się laserami wytwarzającymi ultrakrótkie impulsy światła. Impulsy o czasie trwania rzędu pojedynczych femtosekund ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), pożądane w badaniach dynamiki bardzo szybkich procesów, mają widmo o szerokości przekraczającej 100 THz, przy typowej częstotliwości około 400 THz (długość fali ok. 800 nm, czyli pogranicze obszaru widzialnego i bliskiej podczerwieni). Wynika to bezpośrednio z transformaty Fouriera, która narzuca dolne ograniczenie na wartość iloczynu czasu trwania impulsu i szerokości jego widma. W typowych zastosowaniach skierowanych na śledzenie ultraszybkiej dynamiki procesów każdy impuls traktowany był osobno, co nie stawiało dużych oczekiwań przed stabilnością laserów. Natomiast pomysł wykorzystania ich do przemiany częstotliwości wymaga patrzenia na cały ciąg impulsów jak na jeden przebieg pola elektrycznego.

Porównajmy oba podejścia. Przebieg pola elektrycznego w impulsie (zielona krzywa na wykresie „a”, str. 17) można opisać funkcją oscylującą (cosinus) pomnożoną przez obwiednię (np. funkcję Gaussa – czerwona krzywa). Widmo takiego impulsu również ma kształt funkcji Gaussa (czerwona krzywa na

Czesanie czasu grzebieniem optycznym

wykresie „b”). Jednak dla odpowiednio długiego i regularnego ciągu impulsów widmo nie jest gładkie, lecz składa się z szeregu równo-odległych, bardzo wąskich linii (zielona krzywa na wykresie „b”, str. 17), których obwiednia ma kształt widma pojedynczego impulsu. To jest właśnie grzebień optyczny (w rzeczywistości zarówno zęby, jak i odstępy pomiędzy nimi są bardzo wąskie – dla typowego oscylatora femtosekundowego pod obwiednią mieści się ich kilkaset tysięcy, a nie tak jak na rysunku – kilka). Odległość pomiędzy zębami grzebienia (f_r) to częstotliwość powtarzania impulsów – odwrotność czasu pomiędzy dwoma kolejnymi impulsami lasera. By móc doświadczalnie zaobserwować grzebień optyczny, laser impulsowy musi spełnić bardzo wysokie wymagania dotyczące stabilności, gdyż fluktuacje odstępu pomiędzy impulsami oraz fazy pola elektrycznego spowodują chaotyczne ruchy poszczególnych zębów i rozmycie jego struktury. Jednak w zamian za wysiłek włożony w ustabilizowanie lasera uzyskujemy widmo składające się z szeregu linii odpowiadających częstotliwościom optycznym, których odległość może wynosić, w zależności od konstrukcji lasera, od kilkudziesięciu megaherców do kilku gigaherców. Ten właśnie fakt umożliwia powiązanie oscylacji w zakresie radiowym lub mikrofalowym z oscylacjami optycznymi.

Gdzie leży grzebień?

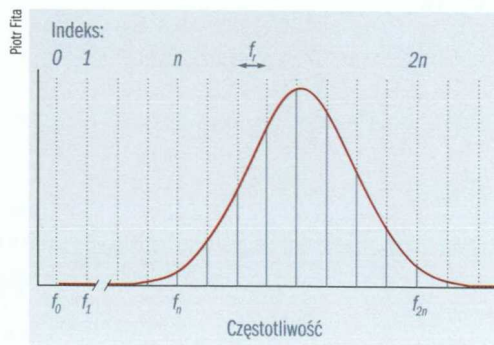
Do rozwiązania pozostaje jednak jeszcze jeden problem. Jeśli „przedłużymy” grzebień w kierunku zerowej częstości, okaże się, że żaden z jego zębów „nie trafi” dokładnie w zero – cała struktura jest przesunięta względem zera o pewną nieznaną *a priori* częstość f_0 (wykres na str. 18). W rezultacie, częstość zęba o indeksie n dana jest wyrażeniem $f_n = f_0 + n \times f_r$. Fizyczna przyczyna tego przesunięcia leży w różnicy prędkości, z jaką w laserze poruszają się maksimum oscylacji fali świetlnej i prędkości, z jaką porusza się maksimum obwiedni. Dostrzec to można, przyglądając się uważnie wykresowi „a” na str. 17 – w każdym impulsie oscylacje są inaczej przesunięte względem obwiedni. Zastosowanie grzebienia w metrologii wymaga dokładnego wyznaczenia wartości obu częstotliwości charakterystycznych f_r i f_0 , gdyż bez ich znajomości nie można określić częstotliwości poszczególnych zębów grzebienia.

Żeby zmierzyć f_r wystarczy szybka fotodioda i elektroniczny licznik częstotliwości. Pomiar f_0 jest nietrywialny i wykorzystuje niezwykle zjawiska, które zachodzą podczas oddziaływania ultrakrótkich impulsów światła z materią.

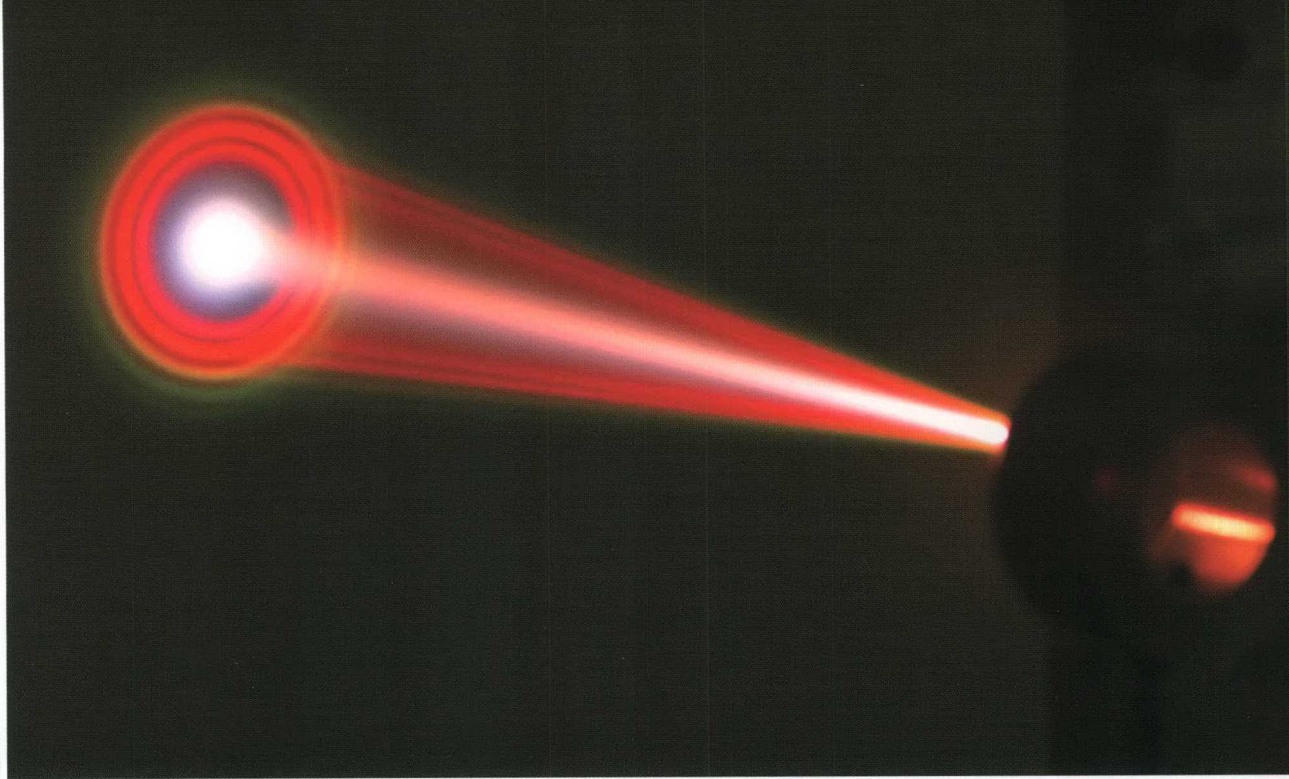
Droga do zegara optycznego

By zrozumieć genezę takich zjawisk, trzeba uświadomić sobie, jak bardzo krótkie są ultrakrótkie impulsy: gdyby sekunda równa była wiekowi wszechświata, to impulsy w grzebieniu trwałyby kilkadziesiąt minut, podczas gdy odstęp pomiędzy nimi byłby dłuższy niż 100 lat. Oznacza to, że niezbyt duża moc wiązki laserowej jest w rzeczywistości skupiona w bardzo krótkich i bardzo odległych od siebie porcjach energii. W impulsach femtosekundowych chwilowe natężenie światła, a tym samym natężenie pola elektrycznego, staje się dostatecznie duże, by zmusić elektrony w ośrodku, przez który przechodzi impuls, do wykonywania bardziej złożonych ruchów niż wówczas, gdy „widzą” one „zwyčajne” światło, o mniejszym natężeniu. W ruchu tych elektronów pojawiają się oscylacje o częstotliwościach będących wielokrotnością, a także sumą i różnicą częstotliwości oscylacji fali świetlnej. Drgające elektrony emitują z kolei fale elektromagnetyczne i w rezultacie po przejściu przez ośrodek przezroczysty w widmie światła pojawiają się nowe częstotliwości. Może to prowadzić do poszerzenia widma albo do pojawienia się fali o podwojonej częstotliwości (np. niebieskiej, jeśli fala padająca na ośrodek miała barwę czerwoną) tzw. drugiej harmonicznej.

Dzięki obu tym zjawiskom możliwy jest pomiar wartości f_0 w następujący sposób: najpierw poszerza się widmo grzebienia tak, by obejmowało ponad oktawę, to znaczy, by najwyższe częstotliwości były przynajmniej dwukrotnie wyższe od najniższych. W tym



Grzebień optyczny o odstępie zębów f_r jest przesunięty względem zera o nieznaną częstość f_0 . By wyznaczyć f_0 , muszą w nim występować zęby o indeksie n i $2n$



celu kieruje się wiązkę impulsów do kolejnego wielkiego osiągnięcia optyki ostatnich lat – światłowodu fotonicznego, czyli bardzo cienkiego ($1\text{--}2\ \mu\text{m}$) włókna kwarcowego otoczonego siecią cienkościennych rurek kwarcowych. Światłowod taki, w przeciwieństwie do światłowodu standardowego, w którym rdzeń otoczony jest jednorodnym płaszczem nieco innego materiału, nie wydłuża transmitowanych impulsów, co skutkowałoby spadkiem natężenia światła. Dzięki temu impuls może przez kilka-kilkanaście centymetrów światłowodu zachować bardzo wysokie natężenie światła, jednocześnie poszerzając swoje widmo. W przypadku grzebienia prowadzi to do pojawienia się dodatkowych zębów po obu jego stronach. Dobierając długość światłowodu i natężenie wprowadzanego doń światła można osiągnąć widmo wyjściowe o szerokości przekraczającej oktawę. Następnie za pomocą filtrów wybiera się z grzebienia dwa zęby, z których jeden ma indeks n , a drugi $2n$. Ich częstotliwości nie różnią się jednak o czynnik 2, ze względu na obecność przesunięcia f_0 . Pozwala to wyznaczyć f_0 poprzez podwojenie częstotliwości zęba o indeksie n (w procesie generacji drugiej harmonicznej) i zmieszanie go z zębem o indeksie $2n$. W wyniku mieszania dwóch różnych częstotliwości powstaje, między innymi, składowa o częstotliwości będącej różnicą częstotliwości mieszanych, która w opisanym przypadku jest równa właśnie f_0 . Ze względów technicznych łatwiej może byłoby wybrać zamiast pojedynczych zębów ich grupy, co nie zmienia jednak ostatecznego wyniku.

Częstotliwość f_0 może być co najwyżej równa f_r , czyli leży w zakresie radiowym lub

mikrofalowym. Zatem łatwo można porównać ją z częstotliwością mikrofalowego wzorca atomowego i ustabilizować laser tak, by przenieść stabilność wzorca na stabilność częstotliwości zębów grzebienia. Ta metoda pozwala mierzyć częstotliwości optyczne, odnosząc je do istniejących wzorców, dzięki czemu osiągnięta jest bardzo wysoka dokładność pomiarów spektroskopowych. Jeszcze bardziej obiecujące jest podejście „od drugiej strony”: wybrany ząb grzebienia można wystabilizować do częstotliwości wzorca atomowego pracującego w zakresie optycznym (a więc bardziej stabilnego niż mikrofalowy), przenosząc jego stabilność na przebieg o niskiej częstotliwości. Okresy tego ostatniego można już zliczać za pomocą urządzeń elektronicznych. W rezultacie powstanie zegar, którego potencjalna dokładność może być większa niż 10^{-18} . Odpowiada to błędowi rzędu pojedynczych sekund na wiek Wszechświata!

Dzięki grzebieniowi optycznemu możliwe stało się połączenie technik chłodzenia i pułapkowania jonów i atomów, ultraprecyzyjnej spektroskopii, optyki nieliniowej i stabilizacji laserów, które doprowadzi do zbudowania prostego, łatwego w obsłudze zegara atomowego z optycznym wzorcem częstotliwości. Będzie to wspólny sukces niezależnych do niedawna dziedzin optyki, spektroskopii i fizyki atomowej. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

- Udem Th., Holzwarth R., Hänsch T.W. (2002). Optical frequency metrology, *Nature*, 416, 233–237.
 Takamoto M., Hong F.-L., Higashi R., Katori H. (2005). An optical lattice clock, *Nature*, 435, 321–324.

Oddziaływanie ultrakrótkich impulsów światła z ośrodkiem prowadzi do powstawania nowych częstotliwości