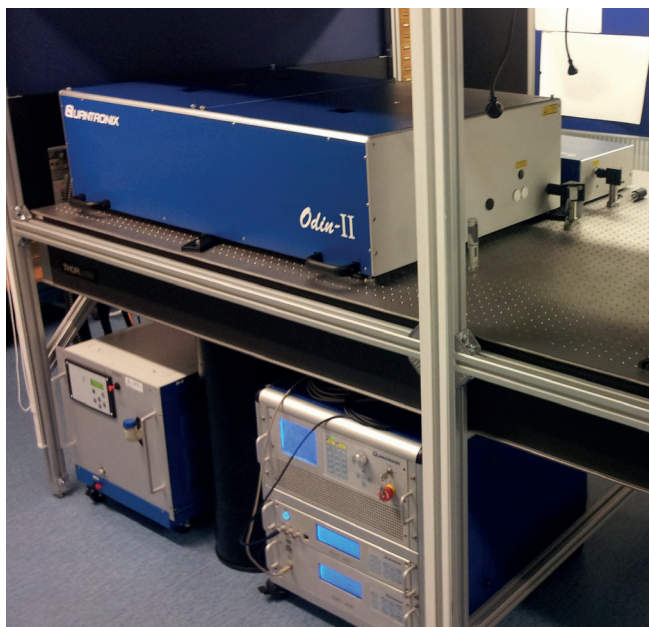


Laser femtosekundowy cz. 2

W *Neutrino* 37 (Lato 2017) przedstawiono zasadę działania lasera generującego wiązkę światła w postaci ultrakrótkich impulsów o czasie trwania rzędu femtosekund (przedrostek *femto* oznacza 10^{-15}). Teraz poznamy metodę wzmacniania impulsów światła. Przedstawiony na poniższej fotografii zestaw znajdujący się na wyposażeniu laboratorium Zakładu Fotoniki Instytutu Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego (Uniwersytet Jagielloński) składa się z tak zwanego oscylatora i ze wzmacniacza.



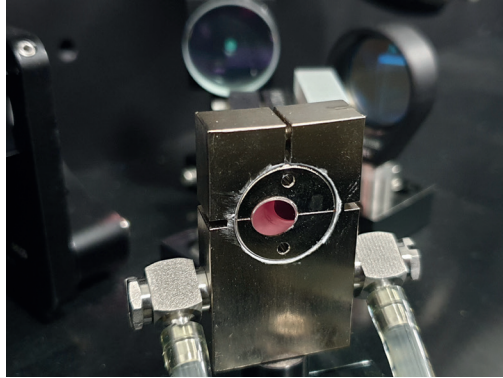
Rys. 1. Laser femtosekundowy ze wzmacniaczem oraz układami sterowania i chłodzenia

Przypomnijmy: rolą oscylatora jest wytworzenie ultrakrótkich impulsów światła, a zasada jego działania opiera się na wytwarzaniu i synchronizowaniu tzw. modów drgań – fal światła o odpowiednio dobranych częstotliwościach. Ważną różnicą pomiędzy laserem o pracy ciągłej a laserem femtosekundowym jest **szerokość spektralna**, czyli zakres częstotliwości (lub długości fali) widma wytwarzanego promieniowania – światło z lasera femtosekundowego ma szerokie widmo, tzn. nie jest monochromatyczne.

Wzmacniacz, ale inny niż do muzyki

Pewną wadą oscylatora jest mała moc generowanego światła, a ściślej mówiąc – mała energia impulsów, najczęściej rzędu nanodżuli (nJ, przedrostek *nano* oznacza 10^{-9}). Niektóre eksperymenty wymagają impulsów światła o znacznie większej energii. Właśnie z tego powodu światło z oscylatora poddaje się wzmacnianiu. Ogólna zasada działania wzmacniacza światła jest analogiczna do zasady działania wzmacniania sygnału elektrycznego np. we wzmacniaczu

akustycznym stosowanym do nagłośnienia w salach koncertowych. Nie wdając się w szczegóły techniczne, idea jest taka – do pewnego elementu elektronicznego (np. tranzystora) doprowadza się sygnał, który chcemy wzmacnić (w postaci sygnału elektrycznego) oraz zasilanie – również w postaci elektrycznej. W wyniku wzmacniania na wyjściu otrzymuje się sygnał – również elektryczny – o większej amplitudzie. W przypadku wzmacniacza światła idea jest taka sama, z tą różnicą, że zarówno sygnał wejściowy, zasilanie (tzw. pompowanie), jak i sygnał wyjściowy – mają postać światła, czyli fali elektromagnetycznej. Wzmacnianie odbywa się w kryształach tytanowo-szafirowym przedstawionym na fotografii.



Rys. 2. Kryształ tytanowo szafirowy wzmacniacza w metalowej oprawce

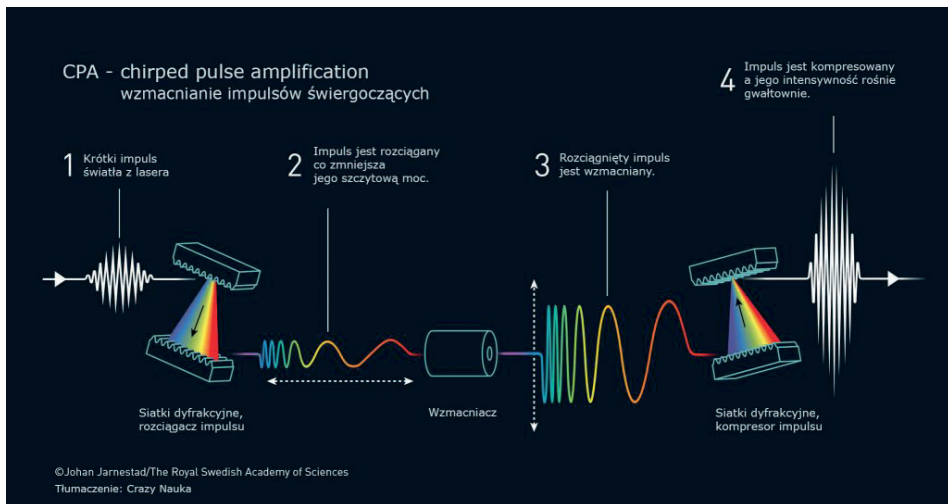
Kryształ tytanowo-szafirowy, tak samo jak w oscylatorze, jest oświetlany bardzo silnym światłem z innego lasera (również impulsowego, ale nanosekundowego), w wyniku czego rośnie energia atomów tytanu znajdujących się w kryształach. Gdy w taki wzbudzony atom „trafi” foton pochodzący np. z oscylatora, to zostanie on „podwojony” w wyniku **zjawiska emisji wymuszonej**. Zarówno foton wymuszający, jak i wymuszony, mogą wymusić emisję kolejnych fotonów, jeśli natrafiają na wzbudzone atomy. Takie powielenie liczby fotonów odpowiada zwiększeniu amplitudy fali elektromagnetycznej. W omawianym modelu wzmacniacza liczba fotonów wychodzących z kryształu jest około 5 razy większa od liczby fotonów wchodzących do kryształu, po czym wiązka światła jest kierowana z powrotem do kryształu, gdzie znowu jest wzmacniana 5 razy i ten proces powtarza się jeszcze sześciokrotnie. W wyniku ośmiu przejść przez kryształ energia impulsów światła jest zatem zwiększana 5^8 czyli kilkaset tysięcy razy!

Emisja wymuszona (*stymulowana, indukowana*) to proces optyczny polegający na emisji fotonu przez atom lub jon w wyniku oddziaływania z fotonem inicjującym. Warunkiem zajścia emisji wymuszonej jest równość energii fotonu i energii wzbudzenia atomu. Atom lub jon wzbudzony nie pochłania fotonu inicjującego, tylko powraca do niższego stanu energetycznego, emitując jednocześnie drugi taki sam foton. Emitowany foton ma kierunek, częstotliwość, energię, fazę i polaryzację taką samą, jak foton wymuszający emisję.

Zjawisko emisji wymuszonej teoretycznie przewidział Albert Einstein – zauważył on, że bez występowania tego zjawiska nie mogłoby dojść do równowagi między procesami pochłaniania i emisji promieniowania.

Ostrożnie ze światłem, czyli jak nie zniszczyć lusterek

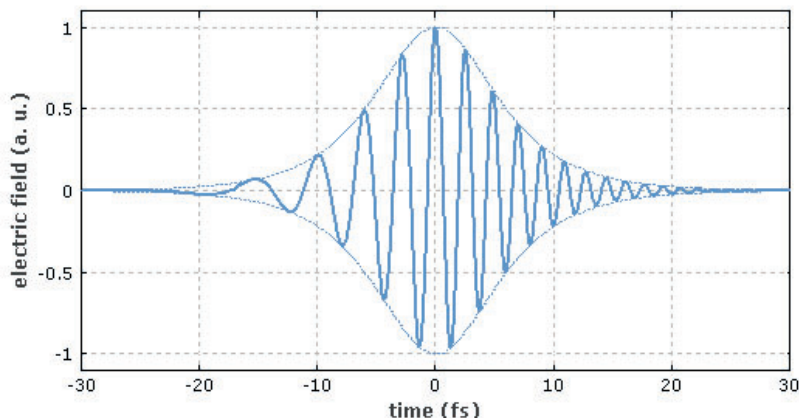
Oczywistym staje się, że światło w postaci bardzo krótkich impulsów o dużej energii ma bardzo dużą moc chwilową. Ponadto wzmacnianie światła w kryształach wymaga silnego skupienia wiązki światła np. za pomocą soczewki, na bardzo małym obszarze kryształu, zatem światło padające na kryształ ma bardzo duże natężenie (moc podzielona przez pole powierzchni). Może to doprowadzić do uszkodzenia kryształu szafirowego lub innych elementów optycznych wzmacniacza, takich jak soczewki czy lustra. Rozwiązanie problemu jest dosyć proste, przynajmniej w teorii: *Weź krótki impuls laserowy, rozciągnij go w czasie, wzmocnij i ściśnij ponownie*. Co to oznacza? Najpierw należy krótkie impulsy laserowe wydłużyć, czyli zwiększyć czas ich trwania do takiej wartości, aby moc światła była odpowiednio mała i bezpieczna, następnie wzmocnić te impulsy, a na koniec skrócić je (skompresować) z powrotem do femtosekund. Często to, co w teorii wydaje się proste, nie jest wcale takie łatwe w praktyce. Jednak udało się! Francuz Gérard Mourou i kanadyjka Donna Strickland opracowali tak zwaną metodę impulsów świergotujących (ang. *chirped pulse amplification* – w skrócie CPA).



Rys. 3. Idea metody CPA. Rys. Johan Jarnestad/Royal Swedish Academy of Sciences

Impulsy świergotujące

Świergot za pewne słyszał nie raz każdy z Czytelników. Niektóre ptaki świergotują, czyli wydają krótkie, piskliwe dźwięki, z charakterystyczną zmianą częstotliwości. W przypadku impulsów laserowych świergot również polega na tym, że częstotliwość fali zwiększa się w czasie trwania impulsu. Oscylacje pola elektrycznego impulsu świergotującego przedstawia rys. 4. Widać, że w miarę upływu czasu (idąc od lewej do prawej strony wykresu) oscylacje są coraz bardziej „zagęszczane”, czyli zmniejsza się okres drgań, a co za tym idzie – zwiększa częstotliwość. Ponadto amplituda oscylacji początkowo rośnie, w chwili $t = 0$ osiąga największą wartość, a potem maleje, co odpowiada impulsowemu charakterowi fali.



Rys. 4. Oscylacje pola elektrycznego impulsu świergoczącego w czasie. Widoczny jest wzrost częstotliwości drgań. Rysunek pochodzi ze strony <https://www.rp-photonics.com/chirp.html>

Impulsy takie można stosunkowo łatwo otrzymać z impulsów pochodzących z oscylatora lasera femtosekundowego przy pomocy **siatki dyfrakcyjnej**, a właściwie to dwóch takich siatek. Siatka dyfrakcyjna, choć działa na zupełnie innej zasadzie, rozszczepia światło podobnie, jak pryzmat, czyli kieruje w różne strony fale o różnej długości fali. Tak zwany rozciągacz (ang. *stretcher*), czyli odpowiednio ustawione dwie siatki dyfrakcyjne, umożliwia opóźnienie fal o większej częstotliwości względem fal o mniejszej częstotliwości, lub odwrotnie. „Czerwona” (a ściślej rzecz ujmując wolnozmienna) część impulsu mając do przebycia krótszą drogę, wyprzedza składową „niebieską” (szybkozmienną). Odpowiada to zwiększeniu czasu trwania impulsu laserowego. Taki świergoczący, wydłużony impuls jest kierowany do kryształu wzmacniającego, a następnie do układu kompresora, który działa odwrotnie niż rozciągacz. W wyniku tego otrzymujemy ultrakrótkie impulsy światła o dużej energii (rzędu mJ). Aby to światło nie uszkodziło dalszej części układu optycznego, z reguły przed kompresorem wiązka światła jest poszerzana, przez co natężenie światła zmniejsza się do wartości bezpiecznej.

W.Z.