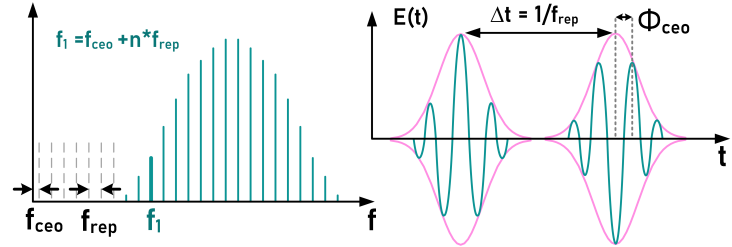


Impulsy światła to najkrótsze zdarzenia, które w kontrolowany sposób są wytwarzane przez człowieka. Manipulacja nad ich parametrami, szczególnie czasem trwania, przesuw granice poznania w badaniach budowy materii, czy diagnostyce chorób. Ciąg identycznych i równoodległych od siebie ultrakrótkich impulsów światła tworzy optyczny grzebień częstotliwości (OFC), który w dziedzinie częstotliwości opisują dwa parametry: częstotliwość repetycji (f_{rep}), czyli odległość spektralna między kolejnymi „zębami grzebienia” oraz częstotliwość przesunięcia nośnej względem obwiedni impulsu (f_{ceo}) - Rys.1. Optyczne grzebienie częstotliwości to potężne i wszechstronne narzędzie – docenione dwukrotnie Nagrodą Nobla (w 2005 i 2023 roku) – znajduje zastosowanie m.in. w generacji impulsów attosekundowych, spektroskopii, pomiarach czasu z wykorzystaniem zegarów optycznych czy nawet odkrywaniu egzoplanet.

Jednak jeśli te dwie częstotliwości ulegają wahaniom – np. wskutek zmian temperatury, wilgotności lub drgań – kształt i czas kolejnych impulsów przestają być stabilne. Te niestabilności mogą zakłócić działanie całego systemu opartego na laserze i uniemożliwić skuteczne wykorzystanie OFC. Badania nad nową metodą szybkiej i niezawodnej stabilizacji obu parametrów to główny cel niniejszego projektu.



Rys. 1: Charakterystyka częstotliwościowa (po lewej) i czasowa OFC (po prawej).

Konwencjonalne metody stabilizacji OFC, takie jak modulacja mocy pompy (dla f_{ceo}) czy mechaniczna regulacja długości rezonatora (dla f_{rep}), są ograniczone przez dynamikę wnęki i prędkość poruszania elementami mechanicznymi. W ramach wstępnych wyników do niniejszego projektu [1] zaproponowaliśmy nową metodę stabilizacji f_{ceo} , opartą na bezpośredniej modulacji fazy za pomocą wewnątrzwnękowego modulatora elektrooptycznego (EOM). Modulatory elektrooptyczne zmieniają drogę optyczną wiązki światła, gdy przyłożone zostanie do nich napięcie – co pozwala przesunąć grzebień częstotliwości i ustabilizować f_{ceo} do oczekiwanej wartości. Wykazaliśmy, że to nowatorskie podejście ma duży potencjał – może osiągać znacznie wyższą prędkość modulacji (pasmo modulacji), co skutkuje redukcją szumu fazowego lasera i zwiększoną stabilnością systemu. Niemniej jednak, ta nowa metoda również napotyka na ograniczenia. Jednym z zaobserwowanych problemów są rezonanse piezoelektryczne – niepożądane efekty vibracyjne, wynikające z właściwości materiału modulatora, ograniczające pasmo modulacji.

W tym projekcie skoncentrujemy się na pełnej charakteryzacji modulatorów elektrooptycznych i optymalizacji ich parametrów dla stabilizacji zarówno f_{ceo} , jak i f_{rep} . Na początku zbadamy alternatywne geometrie i materiały EOM. Zidentyfikowaliśmy materiał o niższej odpowiedzi piezoelektrycznej – fosforan tytanylorubidowy (RTP) – jako obiecującego kandydata. Materiał ten nie jest jednak dobrze zbadany w zakresie średniej podczerwieni (mid-IR). Wykorzystując szerokopasmowy, femtosekundowy laser chromowy (widmo 1–4 μm), określimy jego właściwości optyczne kluczowe dla modulacji elektrooptycznej – współczynnik załamania oraz współczynnik elektrooptyczny. Jeśli RTP okaże się odpowiedni, porównamy jego skuteczność stabilizacji (najpierw f_{ceo} , następnie f_{rep}) z powszechnie stosowanym niobianem litu o różnych geometriach. Po wybraniu najlepiej działających jednostek, zaaplikujemy dwa modulatory wewnątrz wnęki lasera chromowego – jeden do stabilizacji f_{ceo} , drugi do f_{rep} – w celu pełnej stabilizacji optycznego grzebienia częstotliwości. Oczekujemy, że taka konfiguracja pozwoli na znaczące obniżenie szumu fazowego, dorównując lub prześcigając obecne najstabilniejsze optyczne grzebienie częstotliwości.

Nasze badania mają potencjał, by znacząco poszerzyć zarówno fundamentalną wiedzę, jak i praktyczne możliwości w technice laserowej oraz fotonice średniej podczerwieni. Przewidywane rezultaty to: wprowadzenie nowej, uniwersalnej metody stabilizacji OFC, nowa wiedza o właściwościach optycznych i elektrooptycznych kryształu RTP; wprowadzenie RTP jako realnego materiału EOM w zakresie średniej podczerwieni; stworzenie OFC o wyjątkowo niskim poziomie szumu fazowego w układzie lasera ciała stałego; nowe możliwości zastosowań w spektroskopii molekularnej, monitoringu środowiska oraz diagnostyce medycznej. Rozwiązując problemy na poziomie materiałowym, optycznym i systemowym, projekt ten przyczyni się do rozwoju technologii następnej generacji optycznych grzebieni częstotliwości i podniesie możliwości precyzyjnych systemów optycznych w wielu dziedzinach nauki.

[1] K. Suliga, J. Sotor, and M. Kowalczyk, “Direct electro-optic phase control for carrier-envelope offset frequency stabilization in solid-state lasers,” *Optics Express* **33**, 21870–21879 (2025). Publisher: Optica Publishing Group.