

**Techniques of generation of the optical frequency comb  
in the mid-infrared region for laser spectroscopy**

**mgr. inż. Dorota Tomaszewska-Rolla**

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Soboń, prof. uczelni

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Karol Krzempek, prof. uczelni

Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki (K35W12ND02)

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej

Dzięki swojemu szerokopasmowemu widmu, wysokiej rozdzielczości spektralnej i dokładnej częstotliwości, optyczne grzebienie częstotliwości (ang. optical frequency comb, OFC) otworzyły drogę do precyzyjnej spektroskopii całych pasm molekularnych w krótkim czasie akwizycji, a także jednoczesnego monitorowania wielu rodzajów gazów za pomocą jednego źródła światła. Stabilne źródła OFC w średniej podczerwieni, gdzie linie absorpcyjne cząsteczek są silne, można uzyskać poprzez nieliniową konwersję spektrum, taką jak generacja częstotliwości różnicowej (ang. difference frequency generation, DFG). W niniejszej rozprawie przedstawiono analizę generowania OFC w średniej podczerwieni oraz eksperymentalne przykłady wykorzystania ich do zastosowań w spektroskopii laserowej.

Pierwsza część rozprawy poświęcona jest teoretycznym badaniom OFC oraz podstawom laserowej spektroskopii absorpcyjnej. Obejmuje ona różne metody otrzymywania OFC, zwłaszcza w średniej podczerwieni, a także ich charakterystykę, stabilizację, wzmocnienie i konwersję. Szczególną uwagę zwrócono na nową metodę wzmacniania impulsów laserowych, nieliniowy reżim zarządzania wzmocnieniem (ang. gain-managed nonlinear, GMN). Może ona dostarczać impulsy o dużej mocy z szerokopasmowym widmem optycznym, wykraczającym poza konwencjonalny profil wzmocnienia ośrodka aktywnego i z możliwością ich kompresji do impulsów prawie ograniczonych fourierowsko. Następnie opisano spektroskopię OFC, wskazując na jej zalety. Omówiono różne techniki wzmacniania sygnału absorpcji, z naciskiem na antyrezonansowe światłowody z rdzeniem powietrznym (ang. antiresonant hollow-core fiber, ARHCF). Część teoretyczna rozprawy kończy się krótkim opisem metod detekcji oraz szczegółami dotyczącymi spektrometru Fourierowskiego (ang. Fourier transform spectrometer, FTS) wykorzystywanego do badań eksperymentalnych.

Dwa rozdziały rozprawy poświęcone są układom eksperymentalnym, które zostały zademonstrowane i omówione. Najpierw przedstawiono dogłębną analizę wzmacnienia GMN lasera światłowodowego domieszkowanego iterbem. Skonstruowano dwa różne wzmacniacze z innymi diodami laserowymi do pompowania (o długości fali 918 i 976 nm). Dodatkowo, dwa różne źródła laserowe o wysokiej (125 MHz) i niskiej częstotliwości repetycji (30 MHz) zostały użyte jako źródła do wzmacniacza. Uzyskane wyniki pokazały wpływ parametrów lasera źródłowego i diody pompującej na charakterystykę wzmacnianych impulsów. Porównanie opierało się na parametrach takich jak widma optyczne, funkcje autokorelacji, czas trwania impulsów, fazy widmowe i czasowe, właściwości szumowe i moc wyjściowa. Była to pierwsza prezentacja właściwości szumowych wzmacnienia w reżimie GMN. Symulacje numeryczne wzmacnienia GMN uzupełniły dane eksperymentalne. Co więcej, wzmocniony i skompresowany impuls o czasie trwania 33 fs i mocy szczytowej 2,29 W jest, jak dotąd, najkrótszym impulsem laserowym o najwyższej mocy szczytowej osiągniętej dla tego reżimu. Konfiguracja do wzmacnienia została również wykorzystana do skonstruowania OFC opartego na DFG, pracującego w zakresie spektralnym 3-5  $\mu\text{m}$ .

Kolejna część rozprawy koncentrowała się na eksperymentalnym wykorzystaniu OFC do spektroskopii laserowej w średniej podczerwieni. Pierwszy eksperyment wykazał zdolność do wykrywania wielu gazów jednocześnie dzięki szerokiemu spektrum OFC. Zaprezentowano wyniki jednoczesnego pomiaru metanu i etanu. Drugie badanie było pierwszą demonstracją zastosowania komórki absorpcyjnej na bazie światłowodu ARHCF w połączeniu z OFC w średniej podczerwieni. W tym eksperymencie zmierzono stężenia czterech różnych węglowodorów z szerokimi i wąskimi liniami absorpcyjnymi za pomocą spektrometru FTS. Przeprowadzono porównanie wyników dla ARHCF i komórki wieloprześciowej, wykazując lepszą charakterystykę dla ARHCF.

W niniejszej rozprawie zademonstrowano potencjał spektroskopii z wykorzystaniem OFC. Otrzymane wyniki zostały porównano z najlepszymi osiągnięciami w tej dziedzinie i zidentyfikowano dalsze perspektywy rozwoju badań. Wyniki pracy zostały opublikowane w trzech artykułach w czasopiśmie z listy JCR oraz zaprezentowane na czternastu krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych.

*Januszko Datta Datta*