



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

Warszawa, 4.09.2024 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej

pt. „Techniques of generation of the optical frequency comb in the mid-infrared region for laser spectroscopy”

autorka rozprawy: mgr inż. Dorota Tomaszewska-Rolla

Podstawa formalna przygotowania niniejszej recenzji to pismo z zawiadomieniem o wyznaczeniu na recenzenta od Rektora Politechniki Wrocławskiej, Pana prof. dr. hab. inż. Arkadiusza Wójcisa, z dnia 17 lipca 2024 r.

1. Zasadność podjęcia tematu i ocena rozprawy

Rozprawa doktorska, którą przygotowała Pani mgr. inż. Dorota Tomaszewska-Rolla, dotyczy generacji optycznych grzebieni częstotliwości w układach światłowodowych oraz zastosowania takich układów w spektroskopii laserowej.

Optyczne grzebienie częstotliwości to specjalne źródła światła laserowego, które pracują generując tysiące linii spektralnych, a każda z nich związana jest z jednym modem podłużnym wnęki lasera – wszystkie zaś mody podłużne oscylują z fazą przesuniętą o stałą wartość względem kolejnego modu. Przyrządy te zrewolucjonizowały spektroskopię, bowiem możliwe stały się pomiary w bardzo szerokim paśmie, wykonywane niemalże natychmiastowo. Za osiągnięcia w tej dziedzinie Theodor Hänsch i John Hall otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki w 2005 r.

Ich osiągnięcia otworzyły nowy nurt badań w którym do dzisiaj można wyróżnić dwa kierunki. Jeden koncentrowany jest na powiększaniu stabilności źródeł, a drugi na poszerzaniu spektralnego zakresu ich pracy.

W szczególności drugi kierunek wydaje się wprost atrakcyjny, bowiem na ogół grzebienie częstotliwości pokrywają zakres pracy wokół centralnych długości fali wydajnych laserów femtosekundowych, tj. tytan-szafir lub światłowodowe lasery iterbowe albo erbowe – są to zatem długości fali 800 nm, 1030 nm i 1560 nm w zakresie bliskiej podczerwieni. Spektroskopia absorpcyjna na tych długościach fali jest możliwa w badaniach bardzo wielu substancji dzięki wykorzystaniu nadtonów przejść wibracyjnych związków, z których badane substancje się składają. Cechy spektralne związane z nadtonami mają jednak znacznie słabsze natężenie niż linie podstawowe przejść wibracyjnych tych związków, a które z kolei odpowiadają długościom fali w średniej podczerwieni. Dlatego tak istotne w spektroskopii laserowej wykorzystującej optyczne grzebienie częstotliwości jest poszukiwanie stabilnych źródeł światła na zakres średniej podczerwieni.

Doktorantka przeprowadziła badania w dwóch częściach. W pierwszej skupiła się zaprojektowaniu, budowie oraz charakteryzacji wzmacniaczy femtosekundowych na zakres średniej podczerwieni, tzn. na zakres długości fali od 3 μm do 5 μm . Druga część badań dotyczyła wykorzystania optycznych grzebieni częstotliwości w spektroskopii gazów w zakresie średniej podczerwieni. Doktorantka sprecyzowała cele prowadzonych badań, skoncentrowane wokół budowy wzmacniacza grzebieni częstotliwości, wykorzystującego nieliniowy reżim zarządzania wzmocnieniem, na realizacji detekcji wybranych próbek gazowych z wykorzystaniem spektroskopii fourierowskiej i optycznego grzebienia częstotliwości na zakres średniej podczerwieni oraz na porównaniu parametrów pracy układów detekcji gazu wykorzystujących znane, wieloprześciowe komórki absorpcyjne z nowymi układami z komórką absorpcyjną w postaci światłowodu antyrezonansowego z rdzeniem powietrznym. W pracy postawiono dwie tezy. Pierwsza dotyczyła możliwości generacji ultrakrótkich impulsów laserowych o dużej mocy i zakresie widmowym wykraczającym poza zakres pasma wzmocnienia ośrodka aktywnego. Druga teza zakładała osiągnięcie porównywalnych parametrów detekcji w układzie do spektroskopii gazu z komórką absorpcyjną w postaci wspomnianego typu światłowodu z rdzeniem powietrznym.

Badania doktorantki miały charakter w dominującej części eksperymentalny, ale były wsparte wynikami symulacji komputerowych. Na uznanie zasługuje bardzo szeroki

zakres prac doświadczalnych, których realizacji wymagały opisane w rozprawie badania, a które objęły m.in. budowę układów laserów i wzmacniaczy światłowodowych do generacji optycznych grzebieni częstotliwości, jak również budowę spektrometru fourierowskiego dedykowanego eksperymentom ze spektroskopią absorpcyjną gazów w drugiej części rozprawy. Doktorantka zebrała wyniki, które pozwoliły osiągnąć wszystkie cele rozprawy i udowodnić obydwie jej tezy. Wybrany jako najkorzystniejszy w kontekście generowania optycznych grzebieni częstotliwości wzmacniony, iterbowy laser femtosekundowy dysponował impulsami o czasie trwania 33 fs (przy obliczonym limicie transformacyjnym 29 fs) i mocy średniej blisko 2,5 W (przy repetycji około 30 MHz), co było najlepszym wynikiem osiągniętym dla przyrządu z zarządzaniem wzmacnieniem. W tej części badań na podkreślenie zasługuje fakt, że tematyka wzmacniania impulsów w laserach z synchronizacją modów, osiąganego w nieliniowym reżimie zarządzania wzmacnieniem była i jest nadal podejmowana przez wiodące grupy światowe, w tym zespół prof. Franka Wise'a z Cornell University w USA. Prace doktorantki nad układami detekcji gazów wykazały na przykładzie czterech eksperymentów (detekcja metanu, etanu, butanu i pentanu) wyższość układu wykorzystującego światłowód antyrezonansowy z rdzeniem powietrznym nad układem z „klasyczną” wieloprześciową komórką absorpcyjną. Była to jednocześnie pierwsza praca w której zastosowano jako źródło światła grzebień częstotliwości na zakres średniej podczerwieni, a zatem umożliwiając badanie molekuł z wykorzystaniem podstawowych częstości ich drgań wibracyjnych. Badania doktorantki mają zatem charakter naukowy i w czasie ich publikacji zawierały istotne elementy nowości. Część badań została przez doktorantkę zrealizowana we współpracy z wiodącymi zespołami szwedzkimi z Królewskiego Instytutu Technologicznego KTH w Sztokholmie oraz z Uniwersytetu w Umeå.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Manuskrypt pracy, napisany w języku angielskim, zawiera 114 stron, włączając w to stronę tytułową. Treść podzielona jest na sześć rozdziałów. W pracy znajdują się 73 rysunki numerowane kolejno w każdym rozdziale. Ponadto, najważniejsze wyniki zebrane zostały w tabelach, co wpływa bardzo korzystnie na przejrzystość i uporządkowanie treści rozprawy.

Rozdział 1 zawiera wstęp i motywację podjęcia tematu. Tutaj również doktorantka zawarła cele i tezy pracy. Rozdział 2 jest zwięzłym omówieniem mechanizmów i zjawisk związanych z synchronizacją modów podłużnych w laserach, wzmacnianiem ich impulsów wyjściowych – ze szczególnym uwzględnieniem nieliniowego reżimu zarządzania wzmacnieniem, zjawisk optyki nieliniowej, które są wykorzystywane do konwersji długości fali impulsów laserowych z zakresu bliskiej podczerwieni do średniej podczerwieni oraz generacji optycznych grzebieni częstotliwości. Na uznanie zasługuje bardzo uważny i kompletny przegląd literatury dla każdego z wymienionych obszarów a także zwięzłość i jasność prezentowanego omówienia. Autorka sprawnie buduje narrację ukazującą przewagi oraz zalety wykorzystywanej w rozdziale 4 generacji częstotliwości różnicowej do uzyskiwania optycznych grzebieni częstotliwości w zakresie średniej podczerwieni. W rozdziale 3 zawarty jest wstęp do spektroskopii absorpcyjnej, w szczególności z wykorzystaniem optycznych grzebieni częstotliwości jako źródeł światła. Autorka uważnie przytacza podstawy spektroskopii wychodząc od spektroskopii ciała stałego, przez spektroskopię fazy gazowej, do omówienia mechanizmów poszerzenia linii widmowej. Budzi to przekonanie o swobodzie, z jaką porusza się w tym obszarze wiedzy. W rozdziale 3 autorka zawarła również szczegółowy opis spektrometru fourierowskiego, który był wykorzystywany w badaniach w rozdziale 5. Takie umiejscowienie tego opisu jest nieco niefortunne, ponieważ spektrometr – nawet jeśli zbudowany w oparciu na istniejącym stanie wiedzy – został zbudowany przez autorkę specjalnie do przeprowadzenia eksperymentów opisanych w badaniach własnych i stanowi istotny wkład autorki. Informacja o wkładzie autorki w tym zakresie jest ujęta w rozprawie, choć dopiero w rozdziale 5.

Rozdział 4 jest pierwszym z dwóch rozdziałów, które zawierają wyniki badań własnych doktorantki. W tym rozdziale przedstawione są wyniki związane z zaprojektowaniem, uruchomieniem i charakteryzacją światłowodowego wzmacniacza iterbowego, pracującego w nieliniowym reżimie zarządzania wzmacnieniem. Zawarty opis wzmacniacza obejmuje szczegółowe dane katalogowe wykorzystanych komponentów, co jest ważne dla zapewnienia odtwarzalności wyników. Autorka zbadała wpływ repetycji źródła impulsów zasiewających wzmacniacz na jego charakterystyki wyjściowe. W badaniach wykorzystane zostały dwa lasery zasiewające o różnych repetycjach, 125 MHz oraz ok. 30 MHz oraz dwie różne

pompy optyczne dla wzmacniacza, jedna na długość fali 918 nm, druga na 975 nm. Zbadane zostały zatem cztery różne konfiguracje wzmacniacza. Spośród tych czterech konfiguracji, układ pompowany na długości fali 975 nm oraz zasiewany źródłem o mniejszej repetycji, ok. 30 MHz, umożliwił wygenerowanie najkrótszych impulsów o czasie trwania nieco ponad 30 fs. Stanowiło to wartość w pobliżu obliczonego przez doktorantkę limitu transformacyjnego (+10%). Przy energii na poziomie 80 nJ jest to wynik budzący uznanie dla systemu iterbowego, całkowicie światłowodowego. Był to wynik także z najkrótszym czasem trwania impulsu uzyskanego w układzie z zarządzaniem wzmocnieniem. Tym bardziej – jakkolwiek na marginesie oceny merytorycznej rozprawy – zastanawia, że wyniki te zgłoszono do czasopisma Scientific Reports, które nie ocenia aspektu nowości naukowej i nie należy do najszybciej procedujących zgłaszane manuskrypty. Niemniej jednak należy podkreślić, że praca została bardzo dobrze przyjęta w środowisku, o czym świadczy blisko 20 obcych cytowań w ciągu dwóch lat. Po charakteryzacji wzmacniacza autorka zbudowała na jego bazie źródło dla grzebienia częstotliwości na zakres średniej podczerwieni wykorzystując technikę generacji częstotliwości różnicowej w objętościowym kryształach nieliniowych. Zbudowany nieliniowy konwerter częstotliwości dysponował mocą średnią na poziomie 100 mW na długości fali 3,75 μm co jest bardzo dobrym wynikiem dla źródła w większości światłowodowego, o MHz repetycji, nieustępującym wyników grup zachodnich i azjatyckich.

Rozdział 5, będący drugim rozdziałem z wynikami badań własnych doktorantki, dotyczy eksperymentów z zastosowaniem optycznego grzebienia częstotliwości w zakresie średniej podczerwieni, do detekcji szerokopasmowej gazów w komórkach absorpcyjnych. Badania zostały ukierunkowane na zademonstrowanie możliwości jednoczesnej detekcji różnych próbek gazowych poprzez zastosowanie szerokopasmowego źródła w postaci grzebienia częstotliwości, a także na zademonstrowanie zalet jednoczesnego wykorzystania w układzie grzebienia częstotliwości jako źródła światła i światłowodu antyrezonansowego z rdzeniem powietrznym jako komórki absorpcyjnej. Wykorzystanie erbowego źródła sygnału do generacji grzebienia użytego w tych eksperymentach było nieco nieoczekiwane po lekturze rozdziału 4. Niemniej jednak nie sposób nie docenić wszechstronności eksperymentatorskiej, jaką praca z subtelnie różnymi źródłami pomogła wyuczyć autorkę – wskazuję ten zabieg jako zaletę zrealizowanego planu badań, szczególnie

w kontekście portfolio umiejętności badawczych doktorantki. W pierwszej omówionej serii pomiarów autorka wskazała kilka rzędów wielkości większą absorpcję równoważną szumom w porównaniu do danych literaturowych i w ten sposób umotywowwała potrzebę poszukiwania sposobów na polepszenie czułości pomiarowej swojego układu. Cel ten został przez doktorantkę osiągnięty dzięki wykorzystaniu światłowodu antyrezonansowego jako komórki absorpcyjnej, a także „klasycznej” komórki wieloprześciowej, co w każdym przypadku znacznie wydłużyło drogę absorpcji sygnału grzebienia przez próbkę gazu. Światłowod użyty w roli komórki absorpcyjnej, jak i układ dostarczania gazu i kontroli jego ciśnienia wewnątrz włókna jest w rozdziale 5 dość szczegółowo opisany, co uważam za cenne dla czytelnika rozprawy. Cenne poznawczo są również najważniejsze osiągnięcia naukowe opisane w rozdziale 5 w tym pierwsza implementacja grzebienia w zakresie średniej podczerwieni i światłowodu antyrezonansowego jako komórki absorpcyjnej w spektroskopii gazów, oraz bezpośrednie porównanie takiego układu do wariantu z klasyczną komórką wieloprześciową. W wyniku tego porównania, doktorantka jako pierwsza pokazała możliwość polepszenia (zmniejszenia) absorpcji równoważnej szumom poprzez wymianę komórki wieloprześciowej na światłowod antyrezonansowy z rdzeniem powietrznym. Stanowi to również dowód drugiej tezy rozprawy.

W rozdziale 6 autorka zawarła zestawienie głównych osiągnięć opisanych w rozprawie ze skupieniem na udowodnieniu tez pracy. Opis ten jest zwięzły i przekonujący.

3. Uwagi do doktorantki

Rozprawa została przygotowana bardzo starannie a nieliczne błędy typograficzne nie utrudniają lektury i zrozumienia tekstu, dlatego nie będę przytaczał przykładów. Pozwolę sobie jedynie zwrócić uwagę na drobny błąd, który wkraść się na stronie 39 w rozdziale 3, gdy mowa jest o światłowodach antyrezonansowych z transmisją w dłuższych falach średniej podczerwieni niż około 5 μm . Chodzi oczywiście o szkła tellurowe, które zaliczane są do kategorii szkieł tlenkowych (o których traktuje cytowana praca 160) i które określane są w języku angielskim terminem *tellurite glasses*. Omyłkowo użyty na stronie 39 termin *telluride glass* odnosi się do szkieł tellurkowych, które podobnie jak szkła selenkowe (ang. *selenide glasses*) nie są

szkłami tlenkowymi i zaliczane są do grupy szkieł chalkogenkowych (z których również wyciągano światłowody antyrezonansowe na zakres nieco dłuższych fal w średniej podczerwieni).

Zainteresowany wynikami rozprawy, chciałbym prosić autorkę o przedyskutowanie następujących kwestii.

- 1) Czy ocenia Pani generację częstotliwości różnicowych do wspomnianego w rozprawie zakresu 17 μm oraz spełnienie warunków grzebienia częstotliwości w ww. zakresie za możliwe z wykorzystaniem badanych przez Panią układów wzmacniaczy? Jakie materiały optyczne lub komponenty byłyby niezbędne?
- 2) Jakie były przesłanki techniczne do wyboru światłowodów nieliniowych do samoprzesunięcia częstotliwości solitonu omawianego w rozdziale 4.5.1 i czy można wskazać przewagi zasiewania któregoś z tych światłowodów wzmacniaczem z zarządzaniem wzmocnieniem w stosunku do standardowego wzmacniacza CPA?
- 3) Czy mogłaby Pani krótko omówić modele, o którym mowa w rozdziale 5, na stronie 80, pomiędzy rysunkami 5.11 i 5.12?

Podsumowanie

Pani mgr inż. Dorota Tomaszewska-Rolla zrealizowała wieloetapowy i ambitny plan badań i osiągnęła cele swojej rozprawy. Otrzymane i opisane w rozprawie wyniki pozwoliły również na udowodnienie tezy pracy. Na podkreślenie zasługuje fakt, że każda teza dotyczyła dość odmiennych zagadnień: budowy zaawansowanych źródeł laserowych w jednym przypadku oraz wykonania precyzyjnych pomiarów spektroskopowych na próbkach gazowych o mikrolitowych objętościach; do tego dodać trzeba budowę dedykowanego przyrządu do zbierania i analizy sygnałów optycznych (spektrometru fourierowskiego). Dowodząc obydwu tezy, doktorantka zademonstrowała zatem wszechstronny zestaw umiejętności doświadczalnych w atrakcyjnej dziedzinie i pożądanym zakresie spektralnym średniej podczerwieni. To predysponuje doktorantkę do przyszłych ról badawczych z szerokiego zakresu specjalności.

W mojej ocenie rozprawa doktorska pt. „*Techniques of generation of the optical frequency comb in the mid-infrared region for laser spectroscopy*”, której autorką jest Pani mgr inż. Dorota Tomaszewska-Rolla, **spełnia z wyraźną nawiązką** zwyczajowe oraz ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stanowi podstawę do nadania stopnia naukowego doktora. **Wnioskuje zatem o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Najistotniejsze wyniki każdego z dwóch rozdziałów przedstawiających badania własne doktorantki zostały opublikowane w postaci artykułów naukowych w czasopismach *Optics Express* oraz *Scientific Reports* (są to publikacje pierwszoautorskie doktorantki). Każde z nich ma przypisaną punktację 140 pkt. na „liście ministerialnej”. Artykuł w *Scientific Reports*, z 2022 roku, opisujący budowę i charakterystyki wyjściowe wzmacniacza z zarządzaniem wzmocnieniem (opisanego w rozdziale 4 rozprawy) był na dzień przygotowania rozprawy cytowany 19 razy przez grupy niezwiązane bezpośrednio z zespołem, w którym pracuje doktorantka. Pomimo zatem krótkiego okresu dostępu do publikacji, wyniki zostały odnotowane przez środowisko. Wyniki zawarte w publikacji *Optics Express* wskazują z kolei na nową możliwość zwiększania czułości – przy jednoczesnym zmniejszaniu objętości próbki gazu – układów do spektroskopii absorpcyjnej wykorzystującej grzebienie optyczne i światłowody antyrezonansowe w miejsce komórki wieloprześciowej. Jest to ważne osiągnięcie badawcze doktorantki. Praca ukazała się pod koniec marca b.r., więc nie budzi zdziwienia brak cytowań (na dzień ukończenia recenzji), ale od dnia publikacji została pobrana ponad 2000 razy, co stawia ją w czołówce wśród innych prac w tym wydaniu periodyku. Można się zatem spodziewać, że i ta praca nie pozostanie bez wpływu na środowisko. Po uwzględnieniu powyższych uwag, **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.**


Mariusz Klimczak