



Toruń, 17.09.2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej pani Doroty Tomaszewskiej-Rolla
pt. „Techniques of generation of the optical frequency comb
in the mid-infrared region for laser spectroscopy”**

W dniu 18 lipca 2024 r. przedłożono mi do recenzji rozprawę doktorską pani Doroty Tomaszewskiej-Rolla pt. „Techniques of generation of the optical frequency comb in the mid-infrared region for laser spectroscopy” napisaną w Politechnice Wrocławskiej pod kierunkiem dr. hab. inż. Grzegorza Sobonia, prof. PWr, oraz dr. hab. inż. Karola Krzempka, prof. PWr. Praca z jednej strony poświęcona jest problemowi skonstruowania niskoszumnego źródła bardzo krótkich (< 100 fs) impulsów laserowych w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Z drugiej strony, praca poświęcona jest zastosowaniu laserów femtosekundowych w spektroskopii molekularnej węglowodorów.

Opis wyników uzyskanych w trakcie doktoratu poprzedzony jest obszernym wstępem. W rozdziale 2 przedstawiono przekrojową dyskusję technologii laserów femtosekundowych pracujących w konfiguracji grzebieni częstotliwości optycznych oraz metody rozszerzania ich zakresu spektralnego do średniej podczerwieni. W rozdziale 3 zaprezentowano przegląd technik szerokopasmowej spektroskopii molekularnej bazującej na grzebieniach częstotliwości optycznych. Oba wstępy (rozdział 2 i 3) napisane są w sposób jasny i zrozumiały dla czytelnika oraz pokazujący, że doktorantka rozumie podstawy merytoryczne dziedziny, którą się zajmuje. Pozytywnie oceniam bardzo bogate (a przy tym celne) odnośnienie się do bieżącej literatury naukowej i specjalistycznej; pokazuje to, że doktorantka poprawnie lokuje prowadzone przez nią badania w szerszym kontekście rozwoju współczesnej nauki na granicy fizyki molekularnej i technologii laserowych i optycznych.

Rozdział 4 rozpoczyna właściwą część rozprawy opisującą oryginalne wyniki naukowe uzyskane przez doktorantkę. W pierwszej części rozdziału 4 przedstawiono eksperymentalną implementację techniki *gain-managed nonlinear (GMN) amplification* do wytwarzania/wzmacniania impulsów femtosekundowych w zakresie bliskiej podczerwieni (okolice 1030 – 1100 nm). Sercem układu (ośrodkiem aktywnym) jest światłowód domieszkowany iterbem (Yb). Na rysunku 4.4 przedstawiono charakterystykę absorpcji i emisji tego światłowodu, z którego wynika, że ośrodek ten ma dwa wyraźne maksima absorpcji (w okolicy 920 i 975 nm). Doktorantka wykorzystała ten fakt i przeprowadziła dwie serie pomiarów z dwoma różnymi laserami (diodami laserowymi) pompującymi ośrodek aktywny pracującymi odpowiednio na długości 918 i 976 nm. Ponadto doktorantka przebadła dwa różne reżimy częstości repetycji lasera zasiewającego (odpowiednio 30 i 125 MHz). Niestandardowym elementem tego rozwiązania (w porównaniu do typowych układów wzmacniających bardzo krótkie impulsy laserowe, takich jak ten przedstawiony na rysunku 2.7) jest to, że impulsy femtosekundowe lasera zasiewającego (o czasie trwania na poziomie 200 fs) są wprost kierowane na ośrodek aktywny z pominięciem układu dyspersyjnego rozciągającego impuls w czasie (pulse stretcher). W rozwiązaniu doktorantki sam ośrodek aktywny jednocześnie wzmacnia i rozciąga w czasie impuls (patrz rysunki 4.10 i 4.15). Doktorantka szczegółowo zmierzyła i scharakteryzowała pracę tego układu w różnych warunkach, co doprowadziło do konkluzji, że najkrótsze impulsy (33 fs) można uzyskać pompując ośrodek aktywny na wąskim maksimum na 975 nm przy użyciu lasera zasiewającego o niskiej częstości repetycji. Doktorantka pokazała, że pewną słabością tej metody jest



relatywnie duży poziom szumu który dodawany jest wzmocnienia GMN co stanowi wyzwanie w kolejnych przyszłych badaniach w tym zakresie.

W drugiej części rozdziału 4, doktorantka wykorzystuje wyżej opisane źródło impulsów femtosekundowych do generowania światła w zakresie średniej podczerwieni. Układ ten bazuje na dwóch krytycznych komponentach: nieliniowym światłowodzie w którym zachodzi proces przesuwania spektrum światła (*soliton self-frequency shift, SSFS*) oraz nieliniowego kryształu (PPLN) w którym zachodzi proces odejmowania częstotliwości optycznych. Ważnym wynikiem tego doktoratu jest zademonstrowanie działającego źródła impulsowego przestrajanego w szerokim zakresie od niemal 3 do 5 μm (rysunki 4.25 i 4.26).

Rozdział 5 poświęcony jest zastosowaniu laserów femtosekundowych (pracujących w trybie grzebieni częstotliwości optycznych) w dokładniejszej spektroskopii molekularnej. Dużym osiągnięciem tego doktoratu jest sprzężenie grzebienia częstotliwości optycznych pracującego w zakresie średniej podczerwieni ze światłowodem typu ARHCF do którego wprowadzone są badane molekuly. W rozprawie zreferowano pomiary funkcjonowania samego źródła światła; grzebień częstotliwości optycznych pracujący w zakresie średniej podczerwieni uzyskano w podobny sposób jak w poprzednim rozdziale odpowiednio przesuwając i odejmując częstotliwości światła w ośrodkach nieliniowych. Doktorantka pokazała efektywny sposób stabilizowania częstotliwości i mocy tego typu układu (wykresy 5.5 i 5.6). Światło z tego źródła zostało sprzężone ze światłowodem typu ARHCF do którego wpuszczano badane molekuly. Jako pomiar referencyjny dla tej metody równolegle prowadzono te same pomiary przy użyciu klasycznego podejścia wykorzystującego komórkę wieloodbiciową. Ważnym wynikiem tego doktoratu jest zademonstrowanie po raz pierwszy na świecie pracy sensora różnych gazów (tu kilku różnych węglowodorów) bazującego na światłowodzie do którego wpuszczane są badane molekuly w zakresie średniej podczerwieni.

W mojej ocenie forma i długość rozprawy są właściwe. Treści przedstawione są w sposób jasny i zrozumiały. Wykresy i rysunki są przygotowane starannie i są czytelne. Bardzo pozytywnie oceniam fakt, że rozprawa napisana jest w języku angielskim, co radykalnie zwiększa liczbę jej odbiorców i umiędzynarodawia badania prowadzone w kraju. Silną stroną doktorantki (w kontekście oceny dorobku doktorskiego) jest fakt, że większość tych wyników została opublikowana w prestiżowych międzynarodowych czasopismach. Na szczególną uwagę zasługują prace [71] i [164] w których doktorantka jest pierwszą autorką. Umiejętność przygotowania i przeprowadzenia publikacji przez proces recenzji i oceny edytorskiej jest ważnym elementem kompetencji naukowca na tym etapie kariery naukowej. Nie bez znaczenia jest też grupa w której realizowane były wyżej opisane prace. Opiekunowie pracy, profesorowie Soboń i Krzempek, są światowymi liderami w tej dziedzinie (w pracy wyraźnie widać, że cele naukowe są poprawnie stawiane, wpisują się one w bieżące trendy w skali międzynarodowej, bazują na najnowocześniejszych technologiach).

Proszę doktorantkę o odniesienie się na obronie do poniższych pytań/uwag:

1. Proszę o oszacowanie jak bardzo należy obniżyć ciśnienie badanego gazu w światłowodzie ARHCF aby poszerzenie wynikające ze zderzeń ze ściankami światłowodu było większe niż poszerzenie wynikające ze zderzeń między molekułami (chodzi mi o oszacowanie rzędu wielkości).
2. W tabeli 5.2 nie podano niepewności pomiarowej dla obu metod. W mojej ocenie wynik ten (porównanie z referencyjną metodą) byłby bardziej wartościowy gdyby opracować/oszacować budżet niepewności dla obu metod.
3. Dlaczego na rysunkach 4.2 i 4.3 czasy trwania impulsów są podobne ale ich spektralne szerokości radykalnie różne?

4. Pytanie do rysunku 4.4. Jaka jest stała czasowa dla procesu pompowania i emisji, tzn. po jakim czasie od włączenia pompy na jednym z dwóch maksimów układ zacznie poprawnie wzmacniać impulsy zasiewające?
5. Czy mogę prosić o słowo komentarza co do diod laserowych (na 918 i 976 nm) użytych do pompowania ośrodka aktywnego (rysunki 4.5 i 4.8). Czy dobrze rozumiem, że to są diody pracujące w trybie ciągłym? Jaka jest szerokość spektralna emisji? Czy diody są sprzężone z wewnętrznym lub zewnętrznym rezonatorem?
6. Bardzo proszę o krótkie wytłumaczenie na obronie jak doktorantka rozumie fizykę procesu SSFS.

Konkluzja

Niniejsza recenzja ponad wszelką rozsądną wątpliwość uzasadnia stwierdzenie, że przedłożona rozprawa doktorska pani Doroty Tomaszewskiej-Rolla pt. „Techniques of generation of the optical frequency comb in the mid-infrared region for laser spectroscopy” **prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną kandydatki w tej dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem przedłożonej rozprawy jest oryginalne rozwiązanie kilku wyżej wymienionych problemów naukowych.** Rozprawa ta spełnia wszelkie wymagania odnośnie oryginalności i jakości badań stawiane rozprawom doktorskim. **Oceniam ją jednoznacznie pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Co więcej, z uwagi na bardzo wysoki poziom naukowy i technologiczny niniejszej rozprawy **wnioskuję o jej wyróżnienie.** W mojej ocenie w szczególności uzasadnione jest to przez oryginalność wyżej opisanych metod badawczych, które doprowadziły do:

- pierwszej na świecie demonstracja sensora molekuł bazująca na światłowodzie typu ARHCF w zakresie średniej podczerwieni, oraz
- wygenerowania najkrótszych na świecie impulsów femtosekundowych z wykorzystaniem techniki GMNa.

Ważnym elementem tego uzasadnienia jest też fakt, że doktorantka legitymuje się szeregiem innych osiągnięć naukowych nieujętych w rozprawie.



dr hab. Piotr Wcisło, prof. UMK
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

