



Toruń, 09.10.2023

dr hab. Piotr Masłowski, prof. UMK
Instytut Fizyki,
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej,
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
ul. Grudziądzka 5,
87-100 Toruń
Email: pima@fizyka.umk.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandra Głuszka zatytułowanej
„Światłowodowe optyczne grzebienie częstotliwości z nasycalnymi absorberami na bazie
nanomateriałów dla spektroskopii laserowej”.

Recenzja została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne pana prof. dr hab. inż. Andrzeja
Dziedzica na podstawie dostarczonego manuskryptu pracy.

Praca doktorska mgr inż. Aleksandra Głuszka poświęcona jest zagadnieniu konstrukcji laserów
femtosekundowych, pozwalających na pełną stabilizację generowanego widma i wytworzenie
optycznych grzebieni częstotliwości (*optical frequency combs*). Grzebienie częstotliwości optycznych
były motorem napędowym gwałtownego rozwoju metrologii częstotliwości oraz technik pomiarowych
opartych na wykorzystaniu wiązki laserowej o szerokim widmie spektralnym i wysokiej stabilności
fazowej. Między innymi za ich skonstruowanie w roku 2005 przyznano Nagrodę Nobla dla T Hanscha,
J. Halla i XXX. Skonstruowane jako urządzenia łączące częstotliwości optyczne z zakresem
częstotliwości radiowych i pozwalające na wyznaczenie z dużą dokładnością i precyzją częstotliwości
optycznych, szybko wskazano na ich olbrzymi potencjał dla spektroskopii molekularnej,
monitorowaniu atmosfery i procesów technologicznych, charakterystyki materiałów czy diagnostyki
medycznej. Jednocześnie w ciągu ostatnich prawie 20 lat prowadzone były prace nad uproszczeniem,
zmniejszeniem i optymalizacją zapotrzebowania na energię takich źródeł tak, aby mogły być używane
nie tylko w laboratoriach i dobrze kontrolowanych warunkach, ale także w badaniach i zastosowaniach
terenowych, halach produkcyjnych czy gabinetach lekarskich. Przedstawiona praca mgr inż. Aleksandra
Głuszka dobrze wpisuje się w ten trend, demonstrując praktyczne konstrukcje oraz ich praktyczne
zastosowanie do detekcji śladowych ilości gazów w zakresie bliskiej i dalszej podczerwieni.

Przedstawiona do oceny praca została zrealizowana pod kierunkiem dr hab. inż. Jarosława
Sotora oraz promotora pomocniczego dr hab. inż. Grzegorza Sobonia w Katedrze Teorii Pola, Układów
Elektronicznych i Optoelektroniki Wydziału Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki
Wrocławskiej w Grupie Elektroniki Laserowej i Światłowodowej. Grupa ta cieszy się uznaną renomą w
środowisku naukowym. Także dzięki tej renomie badania przedstawione w pracy zostały



przeprowadzone we współpracy międzynarodowej z grupą z Uniwersytetu Umea w Szwecji, a jej autor miał okazję w swojej dotychczasowej karierze odbyć także staże w Stanach Zjednoczonych na Rice University i Uniwersytecie w Princeton.

Przedstawiona dysertacja została napisana w języku polskim w formie tradycyjnej rozprawy, liczy 132 strony i składa się z krótkiego Wprowadzenia, czterech obszernych rozdziałów i Zakończenia, będącego podsumowaniem uzyskanych wyników. Dodatkowo zawiera ona streszczenia w językach polskim i angielskim, oraz bibliografię zawierającą 263 pozycje, w znakomitej większości anglojęzyczne. Dobór pozycji jest bardzo dobry, moim zdaniem dający czytelnikowi możliwość głębszego zaznajomienia się z poruszonymi tematami. Na wspomniane 4 rozdziały składają się 1 rozdział przeglądowy, oraz 3 rozdziały prezentujące autorskie rozwiązania i zbudowane układy laserowe oraz przeprowadzone pomiary z zakresu spektroskopii molekularnej i metrologii przy wykorzystaniu zbudowanych układów laserowych. Zaproponowany układ pracy jest odpowiedni: proporcje pomiędzy częścią teoretyczną i przeglądem literatury a częścią doświadczalną są zbalansowane i dobrane odpowiednio do charakteru pracy.

W krótkim wprowadzeniu, gdzie przedstawiono kontekst historyczny przeprowadzonych badań, omówiono także zawartość kolejnych rozdziałów pracy a także w sposób klarowny sformułowano cele pracy oraz sformułowano jej tezę: „Światłowodowe lasery impulsowe z pasywną stabilizacją częstotliwości repetycji umożliwiają realizację spektroskopii Verniera z parametrami typowo uzyskiwanymi w układach z laserami aktywnie stabilizowanymi i optycznymi grzebieniami częstotliwości.”

W rozdziale pierwszym przedstawiono wstęp teoretyczny oraz przegląd literaturowy przedstawiające podstawowe pojęcia i zjawiska fizyczne wykorzystywane w dalszych częściach pracy. Przedstawione zagadnienia obejmują m. in. opis mechanizmów synchronizacji modów w laserach impulsowych, przedstawiono sposoby działania różnych typów absorberów nasycalnych, metod kontroli częstotliwości repetycji i przesunięcia obwiednia-nośna czy opis teoretyczny różnych źródeł szumu częstotliwości i fazy w laserach femtosekundowych. Rozdział ten jest napisany przystępnie z bogatym odniesieniem do istniejącej literatury. Chciałbym także docenić dużą ilość przemyślanych rysunków oraz tabel, które odpowiednio ułatwiają zrozumienie przedstawianych konceptów i porównanie różnych rozwiązań praktycznych. Należy także docenić część rozdziału wprowadzającą model taśmy elastycznej (ang. *elastic tape model*) i opis teoretyczny szumów grzebienia częstotliwości, ponieważ są to zagadnienia ważne aczkolwiek często pomijane w opracowaniach, a opis wyżej wspomnianego modelu jest wg mojej wiedzy pierwszym opisem przedstawionym w języku polskim.

W rozdziale trzecim przedstawiono kilka praktycznych rozwiązań światłowodowych oscylatorów femtosekundowych. Rozdział ten jest bardzo szczegółowy, opisujący zarówno wykorzystane sposoby na stabilizację częstotliwości repetycji jak i sterowniki oraz elementy aktywne i pasywne pozwalające na zbudowanie laserów o dużej stabilności bez użycia szybkich pętli sprzężenia zwrotnego. Przedstawiono trzy autorskie rozwiązania laserów oparte na nanomateriałach jako nasycalnych absorberach, które, w połączeniu z oryginalnymi rozwiązaniami kontroli nad parametrami grzebieni częstotliwości optycznych, pozwoliło uzyskać urządzenia kompaktowe, energooszczędne układy generacji optycznych grzebieni częstotliwości. Szczególnie ważnym osiągnięciem jest

zaprojektowanie i praktyczna realizacja stabilizacji temperatury przy pomocy kompozytowej płyty grzewczej i nowoczesnych materiałów termoprzewodzących, pozwalające na osiągnięcie stabilizacji częstotliwości repetycji na poziomie <200 Hz, niezależnie od fluktuacji warunków zewnętrznych, bez wykorzystania szybkich pętli dowiązania częstotliwości repetycji do wzorców radiowych.

Możliwość zastosowania opracowanych rozwiązań do spektroskopii molekularnej została wykazana w rozdziale 4. Rozdział ten zaczyna się od wprowadzenia do zagadnienia spektroskopii z wykorzystaniem grzebieni częstotliwości optycznych i spektroskopii Verniera. Ta ostatnia spektroskopowa technika pomiarowa, ze względu na uproszczoną konstrukcję i mniejszą kosztowność układów, a jednocześnie umożliwiającą pomiary w szerokim zakresie spektralnym z wykorzystaniem wnęki optycznej o wysokim współczynniku finezji ma szczególne znaczenie w badaniach terenowych, zwłaszcza w kontekście wykrywania zanieczyszczeń czy badań atmosfery i zmian klimatu. W rozdziale tym omówiono szczegółowo trzy układy pomiarowe wykorzystujące źródła laserowe opracowane i zbudowane przez autora, dwa bazujące na spektroskopii Verniera pracujące w zakresie $1,5-1,6$ μm oraz wykorzystujący zjawisko generacji częstotliwości różnicowej (działający w zakresie $7-9$ μm). Wykorzystując zbudowane spektrometry przeprowadzono pomiary stężeń cząsteczek CO_2 (w zakresie $1,6$ μm), CH_4 (w zakresie $1,6$ μm) i N_2O (w zakresie $7,8$ μm), osiągając w każdym przypadku dobrą zgodność z modelem wzorcowym opartym na danych spektroskopowych z bazy HITRAN. W przypadku spektrometrów opartych na spektroskopii Verniera, uzyskane parametry – tj. limity detekcji ze względu na absorpcje i „miara jakości” są na podobnym poziomie jak uzyskane w układach wykorzystujących w pełni ustabilizowane grzebienie częstotliwości optycznych oraz opartych na rozwiązaniach komercyjnych, co jasno wynika z tabeli na stronie 106. **Pozwala to stwierdzić bez wątpliwości, że teza, postawiona w pierwszym rozdziale rozprawy została udowodniona.** Należy też podkreślić, że najniższe wartości przedstawionych w ww. Tabeli parametrów zostały uzyskane przy wykorzystaniu laserów Ti:szafir, które zajmują z reguły większą objętość i są bardziej wrażliwe na warunki zewnętrzne od zaprezentowanych przez Kandydata rozwiązań.

Dopełnieniem rozprawy jest Rozdział 5, w którym zaprezentowano pełną stabilizację parametrów częstotliwości repetycji i przesunięcia dla jednego z opracowanych przez doktoranta laserów. W celu umożliwienia takiej stabilizacji zbudowano układ do poszerzenia widma grzebienia i pomiaru sygnału z interferometru f-2f oraz opracowano, zbudowano i zademonstrowano poprawne działanie szybkiego cyfrowego detektora fazy, charakteryzującego się szerokim zakresem chwytania. Zademonstrowana stabilizacja częstotliwości repetycji do wzorca radiowego na poziomie poniżej 1 mHz odpowiada stabilizacji rozwiązań komercyjnych. Częstotliwość przesunięcia została ustabilizowana jedynie częstotliwościowo na poziomie 28 kHz, jednak w dyskusji podano powody i przekonywująco uzasadniono możliwość pełnej stabilizacji fazowej przy wykorzystaniu oscylatora ze zbalansowaną dyspersją. Rozwiązania opisane przez doktoranta pozwalają jednak stabilizację częstotliwości przesunięcia na poziomie 30 kHz, co jest wystarczające do większości zastosowań spektroskopowych.

W polskim systemie prawnym nie jest możliwe wprowadzenie poprawek do złożonej pracy doktorskiej, tym niemniej, z poczucia obowiązku jako recenzenta, chciałbym zwrócić uwagę na następujące kwestie:

- praca generalnie napisana jest sposob jasny, językiem poprawnym natomiast zdarzają się dość często pewne skróty myślowe, stosowanie żargonu i niezbyt precyzyjne wyrażenia oraz niezbyt fortunne przekłady pewnych terminów z języka angielskiego. Przykładami są na przykład : zdanie na stronie 85: „wykorzystując miejsca zerowe funkcji aparaturowej (ang. Sub-nominal resolution) (...)” błędnie sugeruje że wyrażenie angielskie jest tłumaczeniem terminu „miejsca zerowe funkcji aparaturowej”; angielski termin *free spectra range* jest przetłumaczony jako „odstęp międzymodowy” wnęki, podczas gdy w literaturze polskojęzycznej przyjęto się określenie „przedział dyspersji”; na stronie 10 jest mowa o synchronizowaniu „do satelitarnych systemów naprowadzania”, gdzie, jak zakładam, chodzi o sygnałów uzyskanych z satelitarnych systemów nawigacji (znanymi jako GPS czy GNSS). Innym problemem jest mówienie o niższej lub wyższej rozdzielczości spektralnej przy porównaniu z wartością parametru przedziału dyspersji (patrz dyskusja w paragrafie 4.2.1). Ponieważ parametr rozdzielczości ma wartość niższą przy lepszej rozdzielczości, może to wprowadzić niejasność dla czytelnika. Z tego powodu sugerowałbym w takich przypadkach mówienie o użyciu spektrometrach z rozdzielczością spektralną lepszą lub gorszą niż jakaś wartość.
- we wprowadzeniu równania (2.4) jest napisane, że „Dla rzeczywistych zwierciadeł o współczynniku odbicia $<100\%$ (...) koniecznym jest zastosowanie funkcji ciągłej zależnej od dobroci wnęki (...).” Jednak w zaprezentowanej postaci równania (2.4) nie widzę wspomnianej zależności od dobroci, byłbym wdzięczny za wyjaśnienie tej nieścisłości.
- w opisie metody CRDS na stronie 85 autor stwierdza, że „pozwała to na uniezależnienie wpływu fluktuacji amplitudy lasera pobudzającego molekuły od wyniku pomiaru”. Domyślam się, że chodzi o uniezależnienie wyników pomiaru od fluktuacji amplitudy lasera.
- w rozdziale 5 opisane są źródła częstotliwości referencyjnej. Oprócz tekstu, przydatne dla czytelnika byłoby zestawienie w tabeli najważniejszych parametrów tych źródeł częstotliwości wzorcowych. W opisie tym brakuje mi również radiowych wzorców atomowych (np. opartych na przejściu atomowym Rb). Chętnie także bym usłyszał opinię kandydata, czy wykorzystanie sygnału referencyjnego z optycznego zegara atomowego byłoby możliwe i czy miałyby to jakieś zalety (lub wady);
- na stronie 103 przedstawionej pracy przy omawianiu wyniku stabilizacji częstotliwości repetycji pada stwierdzenie że głównym czynnikiem ograniczającym stabilność był fakt wykorzystania częstotliwości referencyjnej z użytego generatora, „bez dodatkowego wzorca”. Jest to sformułowanie niejasne, jeśli ten sam sygnał był wykorzystany jako częstotliwość referencyjna w użytym analizatorze widma elektrycznego, nie spodziewałbym się wpływu dryfu częstotliwości generatora na wynik stabilizacji. Proszę o wyjaśnienie przez doktoranta tego stwierdzenia podczas obrony.
- w pracy brak jest definicji parametru miary jakości (*figure of merit*). Jest mi on znany z literatury, jednak powinien on być jasno zdefiniowany i jego znaczenie (np. różnica z przywołanym wcześniej parametrem NEAS) wyjaśnione w rozprawie. Również w tym przypadku chciałbym usłyszeć takie wyjaśnienie w czasie obrony.

- Zdanie ze strony 104: „pokrycie modelu i danych doświadczalnych jest bardzo dobre(...), a koncentracja zgodna z modelem” jest niejasne, ponieważ jak rozumiem koncentracja jest wyznaczona z dopasowania widma modelowego. Domyślam się, że chodzi o zgodność wartości referencyjną koncentracji badanego gazu znaną z innego źródła z wartością koncentracji otrzymaną z dopasowania widma modelowego do danych doświadczalnych. W przypadku takiego stwierdzenia konieczne jest podanie tych wartości wraz z niepewnościami. Prosiłbym o wyjaśnienie tego aspektu podczas obrony.
- Kilka pomniejszych błędów edytorskich, tj.:
 - wzory (2.2) i (2.3) identyczne, w wyrażeniu (2.3) powinien być minus przed liczbą falową;
 - we wzorze (2.5) jedno dzielenie przez 2π jest niepotrzebne;
 - na stronie po wyrażeniu (2.25) brak jest definicji $S_r(\text{niu})$ użytej w wyrażeniu, natomiast zdefiniowana jest funkcja $S_{RIN}(\text{niu})$, która jest użyta jedynie na rys. 2.36.

Przedstawione powyżej uwagi i niedociągnięcia wynikają przede wszystkim z obowiązku oraz ciekawości naukowej recenzenta. Nie umniejszają one jednak ogólnej wysokiej jakości pracy i przedstawionych w niej osiągnięć. Potwierdzone jest to także pośrednio przez fakt publikacji opisanych w pracy badań w 6 publikacjach w bardzo dobrych czasopismach naukowych o wysokich współczynnikach oddziaływania, tj. w czasopismach *Optica*, *Optics Express*, *Applied Physics B* czy *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. Najstarsze z tych prac były cytowane ponad 15 razy, co świadczy o zainteresowaniu środowiska wynikami przedstawionych badań.

Podsumowując, uważam, że oryginalne rozwiązania techniczne oraz wyniki badań zawarte w przedstawionej przez pana mgr inż. Aleksandra Głuszka pracy doktorskiej pt. „Światłowodowe optyczne grzebienie częstotliwości z nasycalnymi absorberami na bazie nanomateriałów dla spektroskopii laserowej” stanowią istotny wkład do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Jednocześnie stwierdzam, że zaprezentowane przez kandydata wiedza i praktyczne umiejętności, a także umiejętność współpracy międzynarodowej i dostosowania swoich rozwiązań do wymogów środowiska fizyków molekularnych świadczą o jego dojrzałości naukowej i pełnym przygotowaniu do nowych, także interdyscyplinarnych wyzwań naukowych w przyszłości.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że recenzowana przeze mnie praca doktorska w pełni spełnia zwyczajowe i formalne warunki i wymagania stawiane pracom doktorskim, zgodnie z art. 187 ust. 1 i 2 *Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 roku z późniejszymi zmianami. Wobec czego wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne o dopuszczenie pana mgr inż. Aleksandra Głuszka do dalszych etapów postępowania w sprawie o nadanie stopnia doktora.



Dr hab. Piotr Maślowski, prof. UMK