

Toruń, 03.07.2024

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. Grzegorza Gomółki zatytułowanej:
„Laserowa spektroskopia gazów z użyciem antyrezonansowych światłowodów
z pustym rdzeniem oraz detekcji heterodynowej”.

Recenzja została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne dr hab. inż. Michała Nikodema prof. uczelni, na podstawie dostarczonego manuskryptu pracy.

Przedstawiona przez mgr. inż. Grzegorza Gomółkę rozprawa wpisuje się w badania dążące do wytworzenia uniwersalnych, precyzyjnych i dokładnych sensorów śladowych ilości gazów. Idealne sensory tego typu powinny być stosunkowo tanie i jednocześnie o relatywnie małych rozmiarach, zapewniając jednak wysoką czułość na absorpcję, a co za tym idzie, niskie limity detekcji wybranych cząsteczek. Takie układy mają szeroką gamę zastosowań, od monitorowania zanieczyszczeń powietrza czy produktów spalania, poprzez kontrolę procesów przemysłowych, aż po diagnostykę medyczną czy wykrywanie substancji niebezpiecznych, np. na lotniskach czy obiektach związanych z obronnością. Z uwagi na możliwość ich zastosowania do badań *in-situ*, układy te muszą być niezawodne, o budowie pozwalającej na ich użycie poza laboratorium. Z tego powodu niebagatelny zagadnieniem jest kwestia zmniejszenia ich rozmiarów oraz zaprojektowanie ich w taki sposób, aby nie było potrzeby ich częstej adjustacji przy utrzymaniu wymaganej czułości. W przedstawionej pracy mgr. inż. Grzegorz Gomółka proponuje wykorzystanie do budowy takich układów światłowodów antyrezonansowych z pustym rdzeniem oraz wykorzystanie optycznej detekcji heterodynowej dla uzyskania wymaganej czułości.

Badania opisane w pracy były przeprowadzone pod opieką dr hab. inż. Michała Nikodema, prof. uczelni, a realizowane zarówno w jednostce macierzystej – Politechnice Wrocławskiej, między innymi we współpracy z prof. Ryszardem Buczyńskim z Uniwersytetu Warszawskiego, jak i podczas pobytu w grupie prof. Gerarda Wysockiego na Uniwersytecie w Princeton. Przedstawiona dysertacja została napisana w języku polskim w formie tradycyjnej rozprawy, liczy 103 strony i składa się z krótkiego Wprowadzenia, czterech obszernych rozdziałów i Konkluzji, będących podsumowaniem uzyskanych wyników. Dodatkowo zawiera ona bibliografię zawierającą 197 pozycji, w znakomitej



większości anglojęzycznych. Ich dobór jest bardzo dobry, moim zdaniem dający czytelnikowi możliwość głębszego zaznajomienia się z poruszonymi tematami. Na wspomniane 4 rozdziały składają się: dwa rozdziały przeglądowe, opisujące krótko oddziaływania światła z materią oraz w dłuższej formie założenia laserowej spektroskopii absorpcyjnej; oraz 2 rozdziały prezentujące zbudowane układy pomiarowe i przeprowadzone pomiary z zakresu spektroskopii molekularnej w bliskiej i średniej podczerwieni. Zaproponowany układ pracy jest w moim odczuciu odpowiedni: proporcje pomiędzy częścią teoretyczną i przeglądem literatury a częścią doświadczalną są zbalansowane i dobrane odpowiednio do charakteru pracy.

Po krótkim wprowadzeniu, Rozdział 2 przedstawionej pracy przedstawia w sposób dość skrótowy podstawy fizyczne właściwości absorpcyjnych gazów, wprowadzając podstawowe terminy i definicje. Słusznie autor poświęca tutaj także więcej miejsca na zagadnienie kształtu linii widmowych i efektów na nie wpływających, ponieważ na podstawie ich pomiaru wyznaczana jest koncentracja wykrywanego gazu. Do tej części pracy mam kilka uwag: W części opisującej czynniki wpływające na kształt linii widmowej nie ma wprowadzonego zjawiska przesunięcia zderzeniowego linii. Czy jest jakiś szczególny powód dla którego ten efekt nie ma znaczenia w kontekście opisywanych pomiarów?

Nie do końca zgadzam się także z definicją pasm molekularnych przedstawioną na końcu podrozdziału 2.2. To prawda że przy pomiarach w wysokich ciśnieniach kilka linii może nachodzić na siebie, jednak terminu pasmo (molekularne) zarezerwowałbym dla serii linii w ramach jednego przejścia oscylacyjnego dla całego zbioru liczb kwantowych J . Nie zawsze nachodzące na siebie linie pochodzą z jednego, tak zdefiniowanego pasma. W podanych przykładach widma cząsteczek CO₂ i N₂O są raczej dobrze rozdzielone, w przypadku metanu zgadzam się że ich położenie na osi częstotliwości jest tak bliskie, że linie z jednego pasma zachodzą na siebie.

Rozdział trzeci przedstawia wprowadzenie do laserowej spektroskopii molekularnej, wprowadzając czytelnika w wykorzystane przez doktoranta w trakcie swoich badań techniki bezpośredniej spektroskopii absorpcyjnej czy spektroskopii modulacji długości fali, jak również, zagadnieniu wykorzystania światłowodów z pustym rdzeniem w spektroskopii laserowej jako sposobu wydłużenia drogi optycznej. Opisywana część jest wartościowym materiałem wprowadzającym uzupełnionym pozycjami literaturowymi, pozwalającymi czytelnikowi na łatwe odnalezienie i pogłębienie wiedzy na wybrane tematy.

Najważniejszą częścią rozprawy są dwa rozdziały doświadczalne. Pozwolę sobie pominąć szczegółowy opis przedstawionych tam badań, a jedynie wymienię najważniejsze osiągnięcia oraz nasuwające się mi uwagi i spostrzeżenia. W rozdziale trzecim doktorant opisał zbudowany układ do detekcji metanu do wykrywania tego gazu w obecności wody. Układ ten, wykorzystujący pomiar w zakresie średniej podczerwieni i światłowód z pustym rdzeniem jest nowatorski i unikalny i może służyć jako wzór rozwiązań dla detekcji w zakresie średniej podczerwieni. W tym miejscu chciałbym dopytać o stwierdzenie autora, że „absorpcja nie powinna być wyższa niż ok. 10%”. Ciekawy jestem powodów dlaczego akurat 10% przyjęto jako wartością krytyczną i jaką niedokładność niesie przyjęcie takiego założenia? Zbudowany spektrometr działający w zakresie średniej podczerwieni osiąga minimum wariancji Allana po czasie ok. 15 sekund. Czy zostało stwierdzone, co ogranicza czułość spektrometru?

Autor wspomina także o światłowodach z optymalizacją dla propagacji modów wyższych rzędów. Jaka byłaby zaleta (lub wada) takiego rozwiązania z punktu widzenia pomiarów absorpcyjnych?

Wracając do samej pracy, w omawianym rozdziale autor nie tylko zaprezentował działający układ pozwalający monitorować stężenie metanu w długim okresie czasu, ale wykorzystał także doświadczenia z przygotowania tego układu do rozwiązania podstawowych problemów związanych z wykorzystaniem światłowodów z pustym rdzeniem w spektroskopii. Po pierwsze zaprojektował złączkę światłowodową z dodatkowym przyłączem pozwalającym na napełnienie światłowodu próbką gazową co znacznie upraszcza i pozwala zminiaturyzować układ pomiarowy. Po drugie opracował metodę napełniania światłowodów w sposób wielosegmentowy, co pozwoliło skrócić o ponad 13 razy czas napełniania światłowodu dla odcinka o długości 5,4 m. Trzecim ważnym osiągnięciem w tym rozdziale jest zbadanie wpływu gradientu ciśnienia na rejestrowany kształt linii widmowych, przeprowadzone na przykładzie linii metanu w zakresie bliskiej podczerwieni. Badania te są kluczowe, jeśli proponowane układy mają znaleźć zastosowanie w pomiarach o dużej dokładności. W tym miejscu mam dwa pytania: Przedstawione na rys.40 oraz rys. 41 linie metanu i dopasowanie modelu linii wykazuje odstępstwa od dopasowania na poziomie ok. 10% . W przedstawionym tekście brakuje mi oszacowania na ile to wpływa na niepewność wyznaczonej koncentracji metanu (jeśli w ogóle)? Jakiego typu będzie to niepewność pomiarowa? Kolejne pytanie to czy autor sprawdzał, jak wyglądałyby odstępstwa przy użyciu bardziej złożonych profili widmowych, o których autor wspomina w rozdziale drugim? Jeśli nie, czy takie podejście było rozważane przez inne grupy? W przypadku generacji dopasowywanych profili , przedstawionych na przykład rysunku 41, czy było brane pod uwagę także wspomniane przeze mnie wcześniej przesunięcie zderzeniowe? Czy ma ono w tych konkretnych warunkach pomiarowych tutaj znaczenie?

Ostatnim, ważnym osiągnięciem przedstawionym w pracy jest rozwiązanie problemu prążków interferencyjnych poprzez kontrolowane zginanie światłowodu. Problem ten jest jednym z podstawowych ograniczeń czułości spektrometrów laserowych, nie tylko opartych na światłowodach typu *hollow-core*. Autorowi udało się z sukcesem zredukować ich natężenie co jasno zaprezentowano na rysunkach 45 i 46 oraz widocznym zwiększeniem stosunku sygnału do szumu.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki pomiarów wykorzystujące techniki optycznej detekcji heterodynowej (ODH). Co ważne, techniki te pozwalają znacząco poprawić uzyskiwany stosunek sygnału do szumu, jak również uzyskać informację zarówno o absorpcji jak i dyspersji badanego ośrodka, co ma znaczenie zarówno ze względów podstawowych, jak i praktycznych – dane dyspersyjne pozwalają zwiększyć zakres dynamiczny budowanych sensorów. Autor zaprezentował w praktyce pierwszy układ ODH wykorzystujący światłowody z pustym rdzeniem, w którym uniknięto ograniczeń związanych z odbiciem fal w torze optycznym. Dzięki sprytnemu wykorzystaniu technik heterodynowych udało się rozdzielić odbicia w dziedzinie częstotliwości radiowych, zmniejszając ich wpływ na uzyskane widmo. Autor zaprezentował także układy oparte na ODH dla różnicowej detekcji tlenu (zarówno zorientowanej na absorpcję jak i dyspersję) oraz układ do spektroskopii fotothermalnej. Ważnym osiągnięciem jest zwłaszcza szerokopasmowy układ do detekcji fotothermalnej opartej na grzebieniach częstotliwości optycznych, co zostało zaprezentowane po raz pierwszy. W tym przypadku, biorąc pod uwagę widma zaprezentowane na Rysunku 67, narzucającym się pytaniem jest kwestia

stabilizacji i stabilności używanego grzebienia częstotliwości opartego na kwantowym laserze kaskadowym. W jaki sposób skonstruowana została oś częstotliwości dla tego pomiaru?

Podsumowując powyższe dwa rozdziały, chciałbym mocno podkreślić, że przedstawione w nich układy i techniki pomiarowe są nowatorskie a także stosunkowo trudne i skomplikowane i ich opanowanie przez doktoranta świadczy o jego dużej biegłości jako eksperymentatora.

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:

- w rozdziale 2 autor wprowadza profil linii widmowych nazwany w języku angielskim jako *speed-dependent Voigt profile*. Jednak w języku polskim jest on określany jako profil voigta zależny od prędkości, a nie od czasu, jak podał autor. Także angielskojęzyczny termin *collisional broadening* tłumaczone jest raczej jako rozszerzenie zderzeniowe niż kolizyjne;

- wyrażenie „Czas życia emisji spontanicznej” jest trochę niefortunne, mówimy o czasie życia cząsteczki w stanie wzbudzonym który jest ograniczony przez zjawisko emisji spontanicznej;

- w rozdziale 3 autor tłumaczy z j, ang. wyrażenie *free spectra range* jako „swobodny zakres widmowy”. Sugeruje w tym przypadku użycie przyjętego w języku polskim wyrażenia „przedział dyspersji”;

- w rozdziale 4 autor stwierdza, że „Prążki objawiają się również w wariancji Allana jako dryft, skutkujące wzrostem wartości wariancji”. Zakładam, że chodzi tutaj o dryf mierzonej wartości, a słowo ‘dryft’ jest kalką z języka angielskiego;

- na rys. 50 b) oś pionowa opisana jest jako częstotliwość w jednostkach umownych. Z kolei w tekście podane jest wyjaśnienie: „częstotliwość na osi pionowej liczona jest względem częstotliwości nośnej ω (częstości pracy modulatora AOM)”. Moim zdaniem należałoby jednak mieć prawidłowe jednostki na wykresie jeśli są one znane. Podążając za podanym wyjaśnieniem, czy to oznacza, że maksimum sygnału dyspersji osiąga wartość $20 \times$ częstotliwość modulatora akustooptycznego, na przykład 80 MHz?

Przedstawione powyżej uwagi i niedociągnięcia wynikają przede wszystkim z mojej roli jako recenzenta. Nie umniejszają one jednak ogólnej wysokiej jakości pracy i przedstawionych w niej osiągnięć. Potwierdzone jest to także pośrednio publikacją omówionych w pracy doktorskiej badań w 7 publikacjach w bardzo dobrych czasopismach naukowych o wysokich współczynnikach oddziaływania, tj. w czasopismach takich jak *Optics Express*, *Journal of Lightwave Technology* czy *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. Dwie z przedstawionych prac były cytowane ponad 10 razy, co świadczy o zainteresowaniu środowiska wynikami przedstawionych badań, natomiast pozostałe ukazały się w przeciągu ostatniego roku i moim zdaniem z pewnością zostaną docenione przez środowisko. Należy także odnotować uzyskanie patentu na opracowany projekt złączki światłowodowej z przyłączem do napełniania światłowodów z pustym rdzeniem.

Podsumowując, uważam, że oryginalne, ciekawe, a jednocześnie praktyczne rozwiązania techniczne oraz wyniki badań zawarte w przedstawionej przez pana mgr inż. Grzegorza Gomółkę pracy doktorskiej pt. „Laserowa spektroskopia gazów z użyciem antyrezonansowych światłowodów z pustym rdzeniem oraz detekcji heterodynowej” stanowią istotny wkład do dyscypliny Nauki Fizyczne. Jednocześnie stwierdzam, że zaprezentowane przez kandydata wiedza i praktyczne umiejętności,

obejmujące swym zakresem szerokie spektrum zagadnień ze stosunkowo odległych tematów badawczych (znajdujących odzwierciedlenie w budowie wielu różnych układów pomiarowych, opartych na różnych metodach detekcji), a także umiejętność współpracy międzynarodowej 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 Nauki Fizyczne o dopuszczenie pana mgr inż. Grzegorza Gomółki do dalszych etapów postępowania w sprawie o nadanie stopnia doktora.

Jednocześnie, korzystając z możliwości opisanych w uchwale nr 532/38/RDND11/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne w sprawie określenia kryteriów wyróżniania rozpraw doktorskich w dyscyplinie nauki fizyczne, **chciałbym złożyć wniosek o wyróżnienie przedstawionej przez magistra inżyniera Grzegorza Gomółkę pracy doktorskiej**. Wyróżniającymi cechami pracy są: opracowanie nowatorskich układów pomiarowych opartych na światłowodach z pustym rdzeniem w zakresie średniej podczerwieni oraz wykorzystujących spektroskopię dyspersyjną oraz uważna i zaawansowana analiza uzyskanych wyników biorąca pod uwagę często pomijane efekty fizyczne takie jak wpływ zmieniających się warunków w światłowodzie z pustym rdzeniem na obserwowany kształt linii widmowych a co za tym idzie na dokładność wyznaczenia koncentracji badanego gazu.