



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

Warszawa, 18.05.2025 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej

**pt. „Wykorzystanie światłowodowych włókien antyrezonansowych w układach
laserowej spektroskopii gazów”**

autor rozprawy: mgr inż. Piotr Bojęs

Podstawa formalna przygotowania niniejszej recenzji to pismo z zawiadomieniem o wyznaczeniu na recenzenta od Prorektora ds. badań i innowacji Politechniki Wrocławskiej, Pana prof. dr. hab. inż. Dariusza Łydźby, z dnia 5 marca 2025 r.

1. Zasadność podjęcia tematu i ocena rozprawy

Rozprawa doktorska, którą przygotował Pan mgr inż. Piotr Bojęs, wpisuje się w poddziedzinę „gazowej fotoniki”, która koncentruje się na oddziaływaniu światła z gazami w strukturach światłowodowych, zwłaszcza w światłowodach z rdzeniem powietrznym (ang. *hollow core fibers*, w niniejszej pracy nazywanych, również słusznie, światłowodami pustymi).

Rozwój badań w tym obszarze został w dużej mierze sprowokowany przez opracowanie nowych światłowodów z pustym rdzeniem, w których wykorzystywany jest mechanizm antyrezonansowego prowadzenia fal elektromagnetycznych. Takie światłowody mają szereg zalet w porównaniu ze światłowodami z pustym rdzeniem prowadzącymi światło z udziałem zjawiska przerwy fotonicznej (ang. *photonic bandgap fibers*, PBG). Należy tu wskazać zwłaszcza silne odseparowanie modu prowadzonego od mikrostruktury szkła, silniejsze w światłowodach antyrezonansowych niż we włóknach PBG. Tej właściwości światłowody antyrezonansowe zawdzięczają szersze niż w PBG pasma transmisji, z czym jest

dr hab. Mariusz Klimczak, prof. UW
tel. +48 22 55 32 008 | Wydział Fizyki
Mariusz.Klimczak@fuw.edu.pl | Uniwersytet Warszawski

1

PK

związanych wiele korzystnych cech, tj. możliwość praktycznie bezdyspersyjnej i liniowej propagacji ultrakrótkich impulsów laserowych o dużej energii i mocy szczytowej, małostratna propagacja fal w zakresie ultrafioletu oraz średniej podczerwieni pomimo braku transmisji samego szkła krzemionkowego w tych zakresach a także bardzo szerokie pasma transmisji światłowodów antyrezonansowych w porównaniu do światłowodów PBG i znacznie mniejsze tłumienie w zakresie pasma transmisji. Te ostatnie cechy światłowodów antyrezonansowych konkretnie predestynują je do zastosowania w ultra-czułej spektroskopii gazów, gdzie z rosnącym powodzeniem konkurują z dojrzałą technologią wieloodbiciowych komórek absorpcyjnych. Przewagą światłowodu w takim zastosowaniu jest naturalna możliwość zapewnienia długiej drogi interakcji pomiędzy gazem wypełniającym rdzeń światłowodu, która pozwala skalować czułość układu detekcyjnego do poziomu pojedynczych cząstek na miliard. Pomimo takich spektakularnych wyników, problematyka badawcza tematu rozprawy w dalszym ciągu pozostaje niewyczerpana. Tutaj autor rozprawy celnie wskazał obszary badawcze i cele pracy, które dotyczą badania dynamiki napełniania światłowodu gazem pogłębione o badania nowych geometrii dostarczania gazu do rdzenia optycznego światłowodu, wykorzystujące mikroobróbkę zewnętrznego płaszcza włókna, a także badania wybranych realizacji czujników światłowodowych wykorzystujących kluczowe metody pomiarowe znane m.in. z układów czujnikowych opartych na klasycznych, tzn. objętościowych komórkach absorpcyjnych.

Zaproponowana tematyka stanowi problem naukowy, nie tylko ze względu na samą złożoność – prace badawcze objęły bowiem zaawansowane symulacje komputerowe, budowę układów eksperymentalnych włączając mikroobróbkę eksperymentalnie wymagających struktur światłowodowych, skończywszy na demonstracji trzech różnych układów czujnikowych, każdy o odrębnej specyfice metody pomiarowej. Badania nie były jednak ograniczone do umiejętnej kompilacji istniejącego stanu wiedzy, autor bowiem szczegółowo omówił m.in. zjawiska relaksacji molekuł gazów, które stały się podstawą do wyboru i zastosowania konkretnych technik pomiarowych. W kontekście technik LITES i CLaDS autor odniósł się do zjawisk nieliniowych związanych z propagacją światła i fal sprężystych. Doktorant poruszył także zagadnienia doboru długości fali i selektywności detekcji

gazów, opierając się na fundamentalnych zależnościach między widmem absorpcyjnym a parametrami źródeł laserowych.

Cele i tezy rozprawy zostały sformułowane dość ogólnie, ale należy podkreślić, że treść i zakres pracy odnoszą się do nich w całej rozciągłości. Zaznaczam ponadto, że cele rozprawy mają wyraźny charakter problemowy, tzn. dotyczą bardzo ważnych aspektów zagadnienia jakim tutaj jest detekcja gazów w układach światłowodów z pustym rdzeniem. Warto również zaznaczyć, że cel związany z opisem dynamiki przepływu gazu oraz napełniania nim rdzenia światłowodowego jest istotny także ze względu na swoją uniwersalność, tzn. jego ogólność wykracza zastosowaniami poza ścisłą tematykę rozprawy, co w mojej ocenie stanowi cenną wartość dodaną, do czego odnoszę się w dalszej części recenzji.

Praca nie ma ściśle charakteru teoretycznego (np. symulacji komputerowych) albo eksperymentalnego, bowiem, zgodnie z wcześniejszą uwagą, doktorant przeprowadził zarówno złożone symulacje komputerowe, jak i zaprojektował i zbudował układy eksperymentalne a następnie przeprowadził badania związane z detekcją gazów w światłowodowych komórkach absorpcyjnych różnymi metodami pomiarowymi. Zademonstrowana wszechstronność badawcza doktoranta zasługuje tutaj na szczególne uznanie, tym bardziej że do symulacji wykorzystał istniejący pakiet oprogramowania *open source*, demonstrując jego skuteczność popartą uzyskaną zgodnością z danymi z fizycznego eksperymentu. Uważam, że ten aspekt pracy, mimo że nie ma bezpośredniego waloru naukowego, znacząco i korzystnie wpływa na oddziaływanie uzyskanych przez doktoranta wyników na środowisko badawcze w dziedzinie „gazowej fotoniki”.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Manuskrypt pracy zawiera 167 stron, włączając w to stronę tytułową, streszczenia oraz spis literatury i osiągnięć doktoranta. Treść podzielona jest na sześć rozdziałów, licząc ze wstępem i podsumowaniem. W pracy znajduje się 101 numerowanych kolejno rysunków. Wyniki badań własnych często prezentowane są w tabelach, zwłaszcza gdy doktorant odnosi się do wyników grup obcych, co wpływa bardzo korzystnie na przejrzystość treści. Struktura pracy jest prosta, co zachęca do lektury. To nieskomplikowany zabieg literacki ze strony autora, a jednak niezwykle skuteczny.

W rozdziale 1 autor wprowadza czytelnika do tematyki laserowej spektroskopii gazów. Rozdział rozpoczyna się przeglądem alternatywnych do przedmiotu rozprawy technik detekcji i pomiarów stężenia gazów. Jest to klasyczne podejście, ale w prezentowanej, zwartej formie wspartej źródłową literaturą nadaje pracy kontekstu i przedstawia autora jako badacza świadomego różnych aspektów problematyki, którą się zajmuje. Ponadto zwarta forma nie odciąga uwagi czytelnika od głównego nurtu pracy. Doceniam, że w rozdziale zawarte jest omówienie powiązania właściwości atomowych i spektroskopowych np. w podrozdziale 1.3.2, gdy mowa jest o podczerwonej długości fali przejść oscylacyjnych, w odróżnieniu od przejść elektronowych (1.3.1) o wyższej energii odpowiadającej liniom widzialnym i UV. To prosty i elegancki zarazem sposób na uniknięcie hermetyczności pracy.

Wartością dodaną tego rozdziału jest spis literatury źródłowej. Autor bowiem zwięźle opisuje rozległe obszary wiedzy z zakresu spektroskopii, niekiedy hasłowo, podając jedynie bezpośrednio związane z rozprawą informacje, np. o stosowalności modeli anharmonicznych i harmonicznym oscylatora, ale jednoczesna informacja o źródle, i to polskojęzycznym, stanowi o wartości tej części rozprawy dla czytelników na początku drogi badawczej w przedmiotowym obszarze wiedzy.

Rozdział 2, poświęcony omówieniu metod spektroskopii laserowej został skoncentrowany na czterech z nich. Metody te zostały ukazane w szerszym kontekście technik spektroskopii laserowej, co świadczy o dbałości autora o obiektywizm narracji. Metody: analizy drugiej harmonicznej w spektroskopii z modulacją długości fali lasera (angielski akronim 2f-WMS), spektroskopii termoelastycznej indukowanej światłem (ang. LITES) oraz laserowej spektroskopii dyspersyjnej z wykorzystaniem chirpu (świergotu), (ang. CLaDS), zostały opisane nieco obszerniej. Ta zwiększona objętość została wykorzystana do przedstawienia podstaw i aparatu matematycznego, jak i przewag nad pozostałymi opisanymi podejściami, co uzasadnia ich wykorzystanie w pracy i składa się na spójny i jasny przekaz. Treść rozdziału 2 dopełnia cenna z punktu widzenia utrwalenia kluczowych informacji tabela, co dodatkowo wzmacnia korzystny odbiór tej części pracy.

Spektroskopia gazów we włóknach światłowodowych z pustym rdzeniem to obecnie bardzo szeroki i dynamiczny nurt badań. Przegląd, usystematyzowanie oraz wybór z uzasadnieniem metod badawczych – pomimo braku elementu ewidentnej,

standardowo rozumianej nowości – uważam za ważny i w tej konkretnej tematyce niezbędny etap badań własnych doktoranta.

W rozdziale 3 doktorant przechodzi do szczegółowego opisu metod napełniania światłowodu gazem. Odwołuje się początkowo do istniejącego stanu wiedzy, który zaimplementował w swoich badaniach. Przedstawione opisy są bardzo praktyczne, zawarte zostały także zdjęcia elementów układu oraz praktyczne informacje tj. czasy napełniania dla różnych wariantów eksperymentu. Przyjęty układ rozdziału uważam za uzasadniony pomimo braku jasnego uszczegółowienia od początku co było oryginalnym wkładem doktoranta (ta informacja pojawia się na końcu rozdziału). Ponownie, należy podkreślić, że i ta część pracy jest niezbędna ze względu na specyfikę badań oraz eksperymentu. Ponadto informacje tego typu i detalu trudno znaleźć w piśmiennictwie światowym a samo opracowanie ilustruje, jak doktorant budował swój własny warsztat badawczy.

Część dotycząca omówienia zjawisk kształtujących warunki przepływu gazu tj. ciągłości, ściśliwości oraz turbulencji, prowadzi do wskazania przez doktoranta jakościowych warunków eksperymentu, w którym założony został przepływ ściśliwy. Ponadto, uproszczenie geometrii włókna polegające na pominięciu mikrostruktury kapilar wewnętrznych, często zakładane w dostępnej literaturze, może nie być uprawnione. To bardzo ciekawy i ważny wniosek, dlatego zabrakło mi w tym miejscu pracy choćby przykładowego przywołania wyników własnych, na które autor się tutaj powołał (strona 69 i 70). W tym miejscu nasuwa się również pytanie o wzajemny wpływ ciągłości, ściśliwości i turbulencji przepływu. Czy doktorant założył z góry brak przepływu turbulentnego ze względu na warunki eksperymentu i geometrię światłowodów, a dynamikę przepływu w jednoczesnej obecności ściśliwości i ciągłości ujął stosując w symulacjach dwa przywołane w sekcji 3.3.6 warianty równania Naviera-Stokesa odpowiednio?

Przepływy gazu wymuszone ciśnieniowo w światłowodach z pustym rdzeniem o długości kilkunastu metrów były modelowane metodami numerycznymi za pomocą dostępnego zewnętrznie, otwartego oprogramowania (*openFOAM*). Ten wybór oceniam jako uzasadniony po przeglądzie dokumentacji tego pakietu oraz uwzględniając opis jego kluczowych funkcji i parametrów. Symulacje komputerowe przeprowadzone przez doktoranta w ramach badań własnych są uzupełnione i skonfrontowane z danymi eksperymentalnymi. Doktorant zawarł tu zwięzły opis,

schemat oraz fotografię komórki (przepustu) gazowo-optycznej zastosowanej na każdym końcu światłowodu. Jest to kluczowy element układu eksperymentalnego w dziedzinie „gazowej fotoniki” a opanowanie jego przygotowywania w sposób powtarzalny przez doktoranta budzi uznanie.

Kulminacją podrozdziału 3.4 o przepływach wymuszonych ciśnieniowo jest opis badań i wyników porównania przepływu gazu w światłowodowych komórkach absorpcyjnych, skupiony na szybkości napełniania obliczonej modelem komputerowym oraz zmierzonej w warunkach rzeczywistych, na fizycznym układzie zbudowanym przez autora. Rezultatem tych badań jest praktyczna informacja, poparta demonstracją, o znaczeniu geometrii poprzecznej światłowodu w kształtowaniu dynamiki napełniania gazem jego wnętrza. W analizie został wykorzystany wspomniany pakiet *open source*, co zwiększa oddziaływanie na środowisko badawcze spektroskopii gazów i ogólnie „gazowej fotoniki”. Wyniki te zostały opublikowane niespełna 3 lata temu w *Optics and Laser Technology*. Mimo, że jest to periodyk subskrypcyjny, praca ma 10 obcych cytowań, a w tym 8 zagranicznych, co potwierdza, że wyniki zostały zauważone. Informacja o wkładzie doktoranta w powyższe badania pojawia się we wnioskach na koniec podrozdziału 3.4, na stronie 82 (podobnie w kolejnych rozdziałach: doktorant wskazuje wkład własny na zakończenie danego cyklu badawczego).

Rozdział 3 jest domknięty przez badania i analizę wyników napełniania światłowodów w sposób niewymuszony ciśnieniem a jedynie poprzez zjawisko dyfuzji. Czujniki gazu wykorzystujące ten tryb pracy są znane, ale autor trafnie wskazał na ich ograniczenia, przede wszystkim długi czas napełniania, co ogranicza praktyczną długość światłowodu, która określa z kolei czułość układu. Znany sposób na obejście tego ograniczenia polega na zwiększeniu ilości portów dostępu gazu do wnętrza światłowodu, w którym zachodzi oddziaływanie gazu z wiązką lasera o dopasowanej długości fali. To technicznie wymagające rozwiązanie było dotychczas stosowane w światłowodach z rdzeniem powietrznym, wykorzystujących zjawisko przerwy fotonicznej jako mechanizm prowadzenia światła. Elementem nowości w badaniach doktoranta było zademonstrowanie tej techniki mikroobróbki gotowych włókien światłowodowych w pracy ze światłowodami antyrezonansowymi o bezwęzłowej (czyli typowej) strukturze. Oczekiwaną przewagą jest tutaj fakt, że prosta struktura wewnętrzna (bezwęzłowa) takich światłowodów umożliwia

wykonanie mikro-otworów bocznych bez istotnego zwiększania strat propagacyjnych światłowodu, w przeciwieństwie do włókien PBG. Rozdział zawiera bardzo szczegółowy opis eksperymentu oraz konfrontację wyników eksperymentalnych czasów napełniania z danymi uzyskanymi w modelowaniu pakietem *openFOAM*, z bardzo wysoką, około 97% zgodnością. Uzyskany zaś czas napełniania rzędu pojedynczych minut istotnie wskazuje na możliwość zastosowania praktycznego badanych układów do monitorowania stanu powietrza w warunkach pozalaboratoryjnych. Wyniki badań zostały opublikowane w czasopiśmie *Photonic Sensors* w tegorocznej publikacji, w której doktorant jest drugim autorem.

Rozdział 4 dotyczy badań doktoranta rzeczywistych układów spektroskopowych zrealizowanych za pomocą komórek absorpcyjnych w postaci światłowodów antyrezonansowych oraz z wykorzystaniem różnych metod pomiarowych.

Jako pierwsze, doktorant opisał dwa układy z szybką modulacją długości fali lasera i detekcją drugiej harmonicznej, *2f-WMS*. Zrealizowane zostały dwa układy. Jeden dedykowany był jednoczesnej detekcji dwupasmowej detekcji gazów cieplarnianych CH_4 (w średniej podczerwieni, 3334 nm) oraz CO_2 (w bliskiej podczerwieni 1574 nm). W drugim układzie doktorant zademonstrował detekcję etanu C_2H_6 w średniej podczerwieni, w światłowodzie o imponującej długości 30 m. W obydwu przypadkach uzyskane wyniki były co najmniej na poziomie światowym, a w przypadku detekcji etanu wykrywały ponad poziom ustalony dla dojrzałej technologii komórek wieloprześciowych, co stanowi jasny dowód dla jednej z tez pracy. W każdym z dwóch eksperymentów tego podrozdziału doktorant przeprowadził i udokumentował szczegółowo wstępną charakteryzację układu, określił czasy napełniania, w tym bardzo krótki czas 14 s napełniania wariantu 30-metrowego (!), zoptymalizował częstotliwość modulacji długości fali lasera z kryterium maksymalizacji mierzonego sygnału *2f-WMS*. Dla obydwu przypadków wyniki zostały skonfrontowane z literaturą światową (tabela na stronie 108). Wyniki zostały opublikowane w piśmiennictwie recenzowanym, a praca dotycząca spektroskopii etanu w 30-m światłowodzie, która ukazała się w marcu 2022, ma obecnie kilkanaście obcych cytowań zagranicznych, co świadczy o pozytywnym i znaczącym odbiorze w środowisku, biorąc pod uwagę ilość grup badawczych oraz dynamizm tego zakresu badań.

Następny układ, zrealizowany w dwóch wariantach, wykorzystywał metodę indukowanego światłem efektu termoelastycznego. W układzie tym rolę czujnika pełni stosunkowo tani i standardowy rezonator kwarcowy; jego bardzo istotną zaletą jest szeroki zakres spektralny pracy. Element ten typowo, również w ramach tej pracy, oświetlany jest, w celu jego ogrzania, światłem laserowym poddanym modulacji z częstotliwością odpowiadającą połowie częstotliwości rezonansowej. Realizowany jest w ten sposób pomiar drugiej harmonicznej sygnału, który wzbudza silne drgania rezonatora na zasadzie efektu piezoelektrycznego. W jednym wariantcie eksperymentu realizowana była detekcja metanu CH_4 , a w drugim jednoczesna detekcja N_2O oraz CO_2 . W obydwu zastosowany był około 1 m odcinek światłowodu. Opis układów eksperymentalnych w tym podrozdziale jest bardzo rozbudowany. Autor każdorazowo wykonał wstępną charakteryzację szumową układu, zoptymalizował częstotliwość i głębokość modulacji długości fali lasera oraz ustawienie rezonatora kwarcowego, upewniał się co do liniowości odpowiedzi układu pomiarowego i określił limity detekcji. Zbudowany układ do synchronizacji pomiarów dwupasmowych (N_2O i CO_2), pomimo, że składał się ze standardowych elementów, uważam za zaawansowany. Na uznanie zasługuje szybki czas reakcji układu detekcyjnego, który co prawda wynika z dość krótkiego odcinka włókna, ale na poziomie 10 s jest rzeczywiście stosowny w układach do bieżącego monitorowania składu powietrza. Podobnie jak w poprzednich częściach rozprawy, najważniejsze wyniki zostały skonfrontowane z istniejącym stanem wiedzy w tabeli (strona 127). Z opisu oraz ilości zgromadzonych danych eksperymentalnych jasno wynika, że była to najintensywniejsza część pracy doktoranta.

W ostatniej części rozdziału 4 doktorant zawarł opis i dyskusję wyników uzyskanych w eksperymentach ze spektroskopią dyspersyjną z wykorzystaniem *chirpu*. Laser wprzęgany do światłowodu był modulowany a detekcja, tak jak w poprzednich eksperymentach dotyczyła sygnału drugiej harmonicznej 2f. Przygotowanie eksperymentu obejmowało wszystkie kluczowe kroki poprzednich realizacji układów, tzn. optymalizację częstotliwości i głębokości modulacji, weryfikację liniowości odpowiedzi układu oraz określenie limitów detekcji. Podobnie jak we wcześniejszym eksperymencie, w którym doktorant wykorzystał metodę 2f-WMS, tak i tu zastosowany został światłowód o imponującej długości 30 m. Łączyło się to z nieco dłuższymi, kilkuminutowymi czasami napełniania, co rzeczywiście

może budzić obawy o praktyczność stosowania takiego układu w niektórych sytuacjach. Niemniej jednak, zastosowanie detekcji 2f-CLaDS pozwoliło autorowi na uzyskanie o rząd wielkości lepszego limitu detekcji w porównaniu do eksperymentu 2f-WMS (obydwa układy pracowały na linii absorpcyjnej etanu w średniej podczerwieni). Na końcu rozdziału 4 bardzo przydatne jest zestawienie tych obszernie opisanych prac w tabeli zawierającej najważniejsze wyniki oraz odwołania do publikacji naukowych doktoranta (tabela na stronie 135).

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie badań przedstawionych w rozprawie z wyszczególnieniem głównych, oryginalnych osiągnięć autora. Opis ten został przygotowany prawidłowo, tzn. doktorant wskazuje rzeczywiste osiągnięcia naukowe (w przeciwieństwie do wskazywania np. publikacji naukowych jako osiągnięcia), w tym w szczególności przedstawienie analizy dynamiki napełniania światłowodów z pustym rdzeniem w dwóch wariantach (z nadciśnieniem oraz przepływem dyfuzyjnym), a także bardzo rozbudowaną część z prezentacją trzech układów spektroskopowych wykorzystujących światłowody *hollow core* jako komórki absorpcyjne; na każdym układzie doktorant zrealizował kilka wariantów eksperymentów.

3. Uwagi do doktoranta

- W pracy tak obfitej w opisy różnych eksperymentów z wykorzystaniem skomplikowanych układów laboratoryjnych, zdecydowanie zabrakło spisu wszystkich zastosowanych akronimów, zlokalizowanego np. przed lub po spisie treści.
- Nieco zaskakujące jest natężenie błędów gramatycznych i stylistycznych na stronach 36-37, co kontrastuje z resztą bardzo starannie przygotowanego manuskryptu.
- W podrozdziale 2.2 omawiane parametry charakteryzujące zdolność detekcyjną można było zebrać do tabeli, co ułatwiłoby czytelnikowi skupienie na ich znaczeniu i zastosowaniu w rozprawie.
- Na stronie 41 pojawiło się powtórzenie, gdy mowa o dewiacji Allana, tzn. w drugiej części zdania autorowi podejrzewam chodziło o dewiację Werle.
- Do czego wykorzystywany był zasymulowany szum w przykładzie opisującym dewiację Allana? Czy był on wykorzystywany w pracy jako punkt odniesienia dla oceny danych eksperymentalnych? (podrozdział 2.2.1)
- Opis osi rzędnych po prawej stronie wykresu na Rys. 56c jest ucięty.

- Co motywowało wybór gazów oraz źródła do pomiaru etanu w sekcji 4.1?
Chciałbym jednocześnie zaznaczyć, że niektóre z powyższych uwag o charakterze krytyki, nie umniejszają naukowej wartości dodanej rozprawy ani przystępności zaprezentowanej w niej wiedzy.

Podsumowanie

Siła argumentu tej rozprawy wynika z faktu przeprowadzenia przez doktoranta trzech grup eksperymentów, w których wykorzystał z powodzeniem zaawansowane metody spektroskopowe w pomiarach prowadzonych ze światłowodami z pustym rdzeniem. Każdy z tych eksperymentów został zrealizowany na ogół w dwóch różnych wariantach sprowadzających się do rozróżnia pracy w jednym paśmie od jednoczesnej pracy w dwóch różnych zakresach spektralnych, odpowiadających dwóm różnym gazom. Takie kompleksowe podejście w sposób kompletny i bezdyskusyjny dowodzi zasadniczej tezy pracy o możliwości wykorzystania światłowodów z rdzeniem pustym jako alternatywy dla komórek wieloprześciowych w ultraczulej spektroskopii ważnych technicznie i społecznie gazów. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że doktorant osiągnął postawione w pracy cele badawcze i skonfrontował (pozytywnie) wszystkie tezy. Nieco ogólne ich określenie jest z nawiązką rekompensowane zakresem i złożonością zrealizowanego planu badawczego, którego zapis stanowi przede wszystkim rozdział 4.

Inny, niekoniecznie widoczny na pierwszym planie ze względu na ograniczony charakter naukowy, ale niesamowicie ważny aspekt badań własnych doktoranta, dotyczy moim zdaniem udanej prezentacji wykorzystania pakietu oprogramowania otwartego (*open source*) *openFOAM* w analizie dynamiki napełniania światłowodów z pustym rdzeniem. Warto tutaj zwrócić uwagę nie tylko na stronę naukową (np. ocena wpływu uproszczeń mikrostruktury włókna na obliczone czasy napełniania) i roszczenie autora odnoszące się do pierwszeństwa doniesienia o ich wyniku, ale na oddziaływanie na środowisko badawcze. Wykorzystany pakiet jest otwartym oprogramowaniem, tzn. każdy kto podejmie się wysiłku zapoznania się z dokumentacją, może go wykorzystać i określić – jak zaprezentował doktorant – czasy napełniania oraz ogólnie dynamikę przepływu gazu w światłowodzie *hollow core*. Szczególną wagę tego osiągnięcia widzę w tym, że wykracza ono poza ściśle pojmowany temat rozprawy, tj. spektroskopię laserową gazów. W równym stopniu bowiem metodologia badawcza zademonstrowana przez doktoranta i opisana

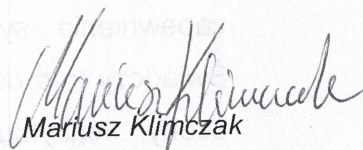
w rozprawie może być wykorzystana do projektowania, budowy i badań gazowo-światłowodowych źródeł światła laserowego. Jest to równoległa poddziedzina „gazowej fotoniki” która dzięki postępowi w technologii światłowodów antyrezonansowych, również stała się obszarem dynamicznie rozwijanym. Ponadto, oczekiwałbym, że przeprowadzona demonstracja zastosowania omawianego pakietu będzie miała również znaczenie dla poddziedziny światłowodowej optofluidyki.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi dowód opanowania przez doktoranta bardzo szerokiego wachlarza metod badawczych, które obejmują symulacje numeryczne, eksperyment z dziedzin optyki, fizyki laserów i spektroskopii, a także projektowanie i budowę złożonych układów optycznych, włączając w to projektowanie i uruchamianie często zaawansowanych układów elektronicznych dla zapewnienia synchronizacji i automatyzacji pracy wykorzystywanej aparatury. Świadczy to o osiągnięciu wyraźnej dojrzałości badawczej, która jest oczekiwana od osoby legitymującej się pierwszym stopniem naukowym na drodze do samodzielności naukowej.

Rozprawa doktorska pt. *„Wykorzystanie światłowodowych włókien antyrezonansowych w układach laserowej spektroskopii gazów”*, którą przygotował mgr inż. Piotr Bojęś, **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.**

Zwracam ponadto uwagę na fakt regularnego komunikowania wyników badań opisanych w rozprawie w piśmiennictwie recenzowanym. Lista publikacji bezpośrednio związanych z rozprawą obejmuje 7 prac, które ukazały się w latach 2020-2025. Uzupełnia ją 6 publikacji zadeklarowanych jako prace spoza tematu doktoratu, jakkolwiek są to prace z dziedziny fotoniki światłowodowej. Dorobek 13 publikacji w ciągu 5 lat potwierdza bardzo dużą aktywność publikacyjną doktoranta, tym bardziej że jest on pierwszym autorem łącznie w 7 pracach. Największą grupę publikacji stanowią prace opublikowane w *Optics & Laser Technology* wydawnictwa Elsevier, które znane jest w środowisku z utrzymywania od lat stosunkowo wysokiego standardu. Publikacje związane bezpośrednio z tematyką rozprawy, z wyjątkiem tej, która ukazała się w tym roku, są cytowane przynajmniej po 10 razy (każda, po wyłączeniu autocytowań), a jedna wśród nich została zacytowana ponad 60 razy. Potwierdza to moje wcześniejsze uwagi o dużym oddziaływaniu wyników

badań doktoranta na środowisko naukowe, szczególnie gdy uwzględni się stale rosnącą ilość grup badawczych podejmujących i prowadzących badania w obszarze „gazowej fotoniki”, w tym spektroskopii laserowej w światłowodach z pustym rdzeniem. Dalej, po równoczesnym uwzględnieniu wymienionych wyżej osiągnięć doktoranta polegających na wyczerpującym i złożonym zaprezentowaniu kluczowych metod spektroskopowych w zastosowaniu z eksperymentalnie wymagającymi strukturami światłowodowymi, a także uwzględniając wkład demonstracji zastosowania pakietu *open source* do przewidywania dynamiki przepływu gazu w tych światłowodach, **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.**


Mariusz Klimczak