



dr hab. inż. Jacek Wojtas, prof. WAT

Warszawa, 20.05.2025

**Recenzja rozprawy doktorskiej
dla Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika,
Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Wrocławskiej**

**Tytuł rozprawy: *Wykorzystanie światłowodowych włókien antyrezonansowych
w układach laserowej spektroskopii gazów***

Autor rozprawy: mgr inż. Piotr Bojęś

1. Podstawa wykonania recenzji

Podstawą do wykonania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej, nr 143/6/RDND02/2024-2028 z dnia 24.02.2025, w sprawie wyznaczenia recenzentów w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Panu mgr. inż. Piotrowi Bojęsiowi.

2. Struktura i treść rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Bojęsia jest napisana w języku polskim, liczy 167 stron, w tym 141 stron tekstu zasadniczego, poprzedzonego spisem treści i podziękowaniami, 21 stron spisu literatury składającego się z 368 pozycji, 4 strony zawierające wykaz publikacji i konferencji z podziałem na związane i niezwiązane

z tematyką doktoratu, zestawienie projektów i szkół letnich oraz nagród Doktoranta, a także 4 strony streszczeń w języku polskim i angielskim. Struktura rozprawy jest uporządkowana, a treść starannie przygotowana, zwłaszcza pod względem graficznym. Zasadnicza część rozprawy zawiera wstęp oraz 5 numerowanych rozdziałów, z których 4 rozpoczyna się wprowadzeniem i kończy podsumowaniem rozdziału, a ostatni – piąty rozdział jest podsumowaniem rozprawy.

W krótkim **wstępie**, obejmującym 3 strony, nakreślony został obszar tematyczny pracy związany z laserową spektroskopią gazów oraz czujnikami światłowodowymi. Doktorant w 3 punktach zdefiniował także główne cele o następującej treści:

- 1) „*opracowanie nowatorskich laserowych czujników gazów o wysokiej czułości z wykorzystaniem ARHCF w roli komórek absorpcyjnych*”,
- 2) „*charakteryzacja sposobów napełniania ARHCF, analiza dynamiki przepływającego gazu w czasie ich napełniania*”,
- 3) „*zbadanie możliwości wykorzystania ARHCF w laserowej spektroskopii gazów w zakresie bliskiej oraz średniej podczerwieni*”.

Ponadto sformułowane zostały 4 tezy rozprawy doktorskiej:

- 1) „*komórki absorpcyjne bazujące na światłowodach antyrezonansowych z pustym rdzeniem pozwalają na jednoczesną detekcję gazów w bliskiej i średniej podczerwieni*”,
- 2) „*metody numeryczne pozwalają na precyzyjne modelowanie dynamiki przepływu gazów we włóknach typu ARHCF*”,
- 3) „*komórki absorpcyjne bazujące na światłowodach antyrezonansowych z pustym rdzeniem mogą stanowić alternatywę do objętościowych komórek wieloodbiciowych w układach spektroskopowych pracujących w zakresie średniej podczerwieni*”,
- 4) „*włókna ARHCF mogą być wykorzystane w układach laserowej spektroskopii gazów korzystających z różnych technik pomiarowych*”.

W **rozdziale pierwszym**, liczącym 28 stron, zaprezentowany został opis fundamentalnych dla pracy zagadnień związanych z laserową spektroskopią absorpcyjną gazów, a w tym laserowych źródeł promieniowania w aspekcie zastosowania w spektroskopii

absorpcyjnej, podstawowych rodzajów drgań molekuł gazów wskutek pobudzania ich falami elektromagnetycznymi z zakresu promieniowania optycznego, zjawisk absorpcji i dyspersji, wybranych parametrów oraz technik poprawy czułości w wyniku wydłużania drogi interakcji promieniowania optycznego z badaną materią, a także rozwiązań w obszarze trzech typów światłowodów z pustym rdzeniem (HCF): z fotoniczną przerwą wzbronioną, typu Kagome oraz antyrezonansowe (ARHCF), którym poświęcono szczególną uwagę.

Rozdział drugi, zawierający 23 strony, poświęcono zdefiniowaniu parametrów często stosowanych do opisu układów eksperymentalnych, scharakteryzowaniu wybranych metod laserowej spektroskopii absorpcyjnej, stosowanych do badania gazów z uwzględnieniem opisów matematycznych, budowy i zasady działania oraz różnic w rejestracji i analizie sygnałów optycznych po interakcji z badanymi cząsteczkami. Na końcu rozdziału zamieszczono tabelę podsumowującą zalety i wady opisanych metod.

W 32-stronicowym **rozdziale trzecim**, przedstawione zostały aspekty dotyczące napętniania gazami komórek absorpcyjnych zbudowanych ze światłowodów HCF, w sposób dyfuzyjny oraz z wymuszonym przepływem. Opis obu tych sposobów podparto modelami fizycznymi. Następnie zaprezentowane zostało oprogramowanie do analizy numerycznej przepływów, które stosowano do symulacji przepływów gazów w światłowodach ARHCF. W rozdziale opisano także eksperymenty przeprowadzone z wykorzystaniem ww. sposobów, w tym także badania wpływu liczby otworów w światłowodzie ARHCF na czas jego napętniania dyfuzyjnego. W podsumowaniu Doktorant stwierdza, że *„zrealizowane badania jasno wskazują na możliwość dynamicznego napętniania światłowodów ARHCF gazem i modelowania dynamiki ich napętniania za pomocą metod obliczeniowych CFD, potwierdzając tym samym 3 tezę pracy”*.

Kolejny i najdłuższy, bo obejmujący 46 stron **rozdział czwarty**, poświęcony został omówieniu 5 laboratoryjnych układów pomiarowych, w których zastosowano światłowodów ARHCF do zapewnienia wymaganego oddziaływania promieniowania laserowego z badanymi gazami. Układy te pracowały w 3 różnych konfiguracjach: z modulacją długości

fali i detekcją drugiej harmonicznej (2f-WMS), z wykorzystaniem efektu termoelastycznego w rezonatorze kwarcowym (LITES) oraz spektroskopii dyspersyjnej (CLaDS). Do badania tych układów zastosowano cztery gazy: metan (CH_4), etan (C_2H_6), dwutlenek węgla (CO_2) oraz tlenek diazotu (N_2O).

Pierwszy opisany eksperyment w układzie 2f-WMS ze światłowodem ARHCF o długości 1 m, który zastosowano do jednoczesnego wykrywania mieszaniny 10% CO_2 w zakresie tzw. krótkofalowej podczerwieni (SWIR) oraz 100 ppmv CH_4 w średniofalowej podczerwieni (MWIR), wykorzystując w obu wypadkach znane z literatury pasma absorpcji tych gazów, odpowiednio 1574,0 nm oraz 3334,4 nm. W pierwszym wypadku rolę źródła pobudzającego pełniła dioda laserowa, a w drugim tzw. generator częstotliwości różnicowej (DFG) zbudowany z dwóch typów laserów: diody laserowej oraz lasera na ciele stałym Nd:YVO_4 . Zademonstrowano możliwość napełnienia zastosowanego odcinka światłowodu w czasie 9 s, mierzonym jako czas narastania sygnału napięciowego na wyjściu układu WMS. Na podstawie przeprowadzonych badań wpływu czasu uśredniania sygnałów wyjściowych na napięcie szumów oraz dewiacji Allana określone zostały granice wykrywalności („*zdolności detekcyjne*”) 24 ppbv dla metanu (osiągnięty po 40 s) oraz 144 ppmv dla dwutlenku węgla (osiągnięty po 1 s).

Drugi z eksperymentów dotyczył zastosowania układu 2f-WMS i pełniącego rolę komórki absorpcyjnej 30-metrowego światłowodu do wykrywania etanu o stężeniu 1 ppmv za pomocą pasma absorcyjnego o środkowej długości fali wynoszącej 3336,8 nm. W tym celu zmodyfikowano układ DFG, tak aby uzyskać pobudzenie molekuł w wybranym zakresie fal. Drogą eksperymentalną wyznaczono częstotliwość oraz głębokość modulacji długości fali lasera, dla których uzyskano największy stosunek mocy sygnału do mocy szumu (SNR), który obliczono na podstawie pomiarów amplitudy drugiej harmonicznej wyjściowego sygnału z układu WMS dla 1 ppmv etanu oraz napięcia szumu. Uzyskane rezultaty pozwoliły na wyznaczenie granicy wykrywalności układu („*MDL*”), która według Doktoranta wyniosła 2,3 ppbv, a po 14 sekundowym uśrednianiu 670 pptv. Natomiast czas napełniania, zdefiniowany jak wyżej, wyniósł 204 s. Dla układu wyznaczono także charakterystykę zależności napięcia wyjściowego z układu od różnych stężeń metanu

w zakresie od 50 ppbv do 2 ppmv, której liniowy przebieg potwierdzono współczynnikiem determinacji R^2 wynoszącym 0,999.

W kolejnym układzie eksperymentalnym, skonfigurowanym do badań z wykorzystaniem techniki LITES, zastosowano światłowód ARHCF o długości 0,95 m. Jako źródło promieniowania zastosowano diodę laserową o długości fali dopasowanej do linii absorpcyjnej metanu – 1651 nm. W tym wypadku promieniowanie po interakcji z cząsteczkami CH_4 w światłowodzie rejestrowane było za pomocą rezonatora kwarcowego (QTF) o częstotliwości rezonansowej 32,744 kHz, pozbawionego fabrycznej obudowy. Sygnał elektryczny na wyjściu QTF był rezultatem tzw. efektu termoelastycznego, czyli wywołanych absorpcją promieniowania drgań mechanicznych, przekształcanych w sygnał elektryczny w wyniku efektu piezoelektrycznego w QTF. Do poprawy SNR zastosowano układ filtrów i niskoszumowy wzmacniacz. Po eksperymentalnym dobraniu głębokości modulacji, przy której znormalizowany sygnał wyjściowy był maksymalny, przeprowadzono badania miejsca padania wiązki laserowej na QTF w celu dalszej maksymalizacji SNR. Z tak przygotowanym układem przystąpiono do eksperymentów z różnymi stężeniami metanu w zakresie od 30 ppmv do 8000 ppmv. Podczas badania liniowości odpowiedzi układu uzyskano R^2 równy 0,998, natomiast granica wykrywalności układu wyniosła 1,44 ppmv dla czasu uśredniania 1 s oraz 220 ppbv dla 100 s.

Następny opisany w rozprawie eksperyment dotyczył badań układu przeznaczonego do wykrywania CO_2 oraz N_2O wykorzystując ich znane pasma absorpcyjne, których środkowe długości fali wynosiły odpowiednio ~2006 nm oraz ~4570 nm. Podobnie jak w poprzednim doświadczeniu, układ skonfigurowany był do pracy w technice LITES, przy czym zapewniał efektywne wprowadzenie dwóch wiązek laserowych do światłowodu ARHCF o długości 1 m. Do rejestracji promieniowania na jego wyjściu zastosowano rezonator QTF, pozwalający na uzyskanie satysfakcjonujących odpowiedzi napięciowych na przemian z obu torów laserowych, czyli w danym okresie rejestracja sygnałów drugiej harmonicznej odbywała się dla jednego z gazów. Następnie przeprowadzono eksperymentalny wybór częstotliwości i głębokości modulacji dla obu torów pomiarowych w celu uzyskania możliwie największego sygnału wyjściowego, zmierzono napięcie szumów oraz

wyznaczono SNR, który wyniósł odpowiednio 26,5 (CO_2) oraz 100 (oraz N_2O). W kolejnym kroku przeprowadzono badania układu dla kilku różnych stężeń obu gazów, w zakresie od 0,25% do 1,5% dla dwutlenku węgla oraz od 2 ppmv do 50 ppmv dla tlenu diazotu. Uzyskano nieco niższe niż poprzednio wartości współczynników determinacji R^2 , wynoszące odpowiednio 0,982 oraz 0,988, wskazujące na zadawalającą liniowość układu. W końcowym etapie badań przeprowadzono pomiary umożliwiające wyznaczenie granic wykrywalności układu, które osiągnęły 20 ppmv CO_2 po 100 s uśredniania sygnału wyjściowego oraz 40 ppbv N_2O po uśrednianiu przez 50 s, przy czym uzyskany czas napełniania światłowodu badaną mieszaniną wyniósł 10 s.

Część eksperymentalną rozprawy kończy opis układu spektroskopii dyspersyjnej CLaDS, z 30-metrowym światłowodem ARHCF, zastosowanym do wykrywania etanu za pomocą linii 3336,9 nm, do której dostrojony był laser DFG w konfiguracji podobnej do stosowanej we wcześniejszym eksperymencie w zakresie MWIR dotyczący układu 2f-WMS. Do wyznaczenia stężenia badanego gazu wykorzystano efekt zdudnienia dwóch wiązek laserowych oraz modulację długości fali i analizę drugiej harmonicznej. W układzie zastosowano dwa wzmacniacze fazoczułe, do demodulacji sygnału CLaDS oraz detekcji drugiej harmonicznej. Dzięki zastosowaniu sygnału pitokształtnego, do wolnozmiennego przestrajania długości fali lasera, uzyskano możliwość rejestracji całego profilu linii absorpcyjnej, podobnie jak w technice 2f-WMS. Następnie, eksperymentalnie wybrano częstotliwość oraz głębokość modulacji, dla których osiągnięto maksymalne napięcie na wyjściu układu, podobnie jak to było realizowane w poprzednich eksperymentach. Po przeprowadzeniu badań wstępnych z mieszaniną etanu o stężeniu 1 ppm, przeprowadzono badanie liniowości odpowiedzi układu dla kilku wybranych stężeń w zakresie od 50 ppbv do 2 ppmv. Uzyskano współczynnik determinacji wynoszący 0,998. W kolejnym kroku przeprowadzono badanie stabilności długoczasowej oraz granicy wykrywalności układu. Na podstawie 40-minutowych pomiarów oraz analizy dewiacji Allana zademonstrowano granicę wykrywalności wynoszącą 15,5 pptv uzyskaną po 25 s uśrednienia sygnału.

Rozdział piąty to 3-stronicowe podsumowanie rozprawy, w którym Doktorant przypomina istotę podjętych badań, zawartość poszczególnych rozdziałów oraz wskazuje trzy

oryginalne osiągnięcia swojej pracy, zacytowane poniżej, a także precyzuje swój udział w zaprezentowanych w rozprawie pracach badawczych.

- 1) „*Przedstawienie pierwszej na świecie analizy dynamiki napętniania ARHCF typu bezwęzłowego dla nadciśnieniowej metody napętniania światłowodu*”.
- 2) „*Przedstawienie analizy wpływu mikrofabrykacji włókien ARHCF na dynamikę ich napętniania gazem pomiarowym metodą dyfuzyjną*”.
- 3) „*Zaprezentowanie serii układów pomiarowych opartych na ARHCF jako komórek absorpcyjnych w spektroskopii gazów*”.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

W rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Piotr Bojęsia można wyróżnić trzy obszary zrealizowanych prac:

- 1) teoretyczny, związany z badaniem stanu wiedzy, ujęty we wstępie oraz dwóch pierwszych rozdziałach, który stanowi 36% zasadniczej jej treści;
- 2) obliczeniowy, zaprezentowany w rozdziale 3 i stanowiący 23% zasadniczej treści rozprawy, dotyczący analizy numerycznej procesów napętniania gazami odcinków światłowodów z pustym rdzeniem,
- 3) doświadczalny, dotyczący pięciu układów eksperymentalnych, którym został poświęcony rozdział 4 stanowiący 33% wszystkich rozdziałów.

Odnosząc się do pierwszego obszaru, Pan mgr inż. Piotr Bojęś w sposób wyważony poruszył zagadnienia istotne dla osiągnięcia przyjętych celów pracy. Dotyczyły one stanu wiedzy w wąskich obszarach wybranych pod kątem badań pewnych modyfikacji kilku znanych konfiguracji układów laserowej spektroskopii absorpcyjnej gazów, których celem była poprawa ich parametrów, a mianowicie zmniejszenie objętości gazu wymaganej do przeprowadzenia pomiaru, zwiększenie szybkości odpowiedzi oraz zapewnienie mniejszej granicy wykrywalności przez wydłużenie drogi interakcji promieniowania optycznego z badaną materią za pomocą odcinków światłowodów typu ARHCF. Uwzględniono między innymi opis drgań molekuł gazu wywołanych absorpcją promieniowania optycznego, metod poprawy czułości w układach spektroskopii absorpcyjnej, charakterystykę światłowodów z pustym rdzeniem, definicję parametrów zastosowanych do opisu badanych układów oraz charakterystykę wybranych metod laserowej spektroskopii absorpcyjnej. Analiza literatury została zrealizowana z dużym rozmachem, o czym

świadczy duża liczba przytoczonych w rozprawie publikacji (368), w przeważającej większości anglojęzycznych. Blisko 30% zacytowanych pozycji literaturowych opublikowano w ostatnich 5 latach, a ponad 40% w ostatnich 10 latach. Należy zatem stwierdzić, że Doktorant przeprowadził ten proces poprawnie i adekwatnie do przyjętych celów pracy, z pewnymi zastrzeżeniami przedstawionymi w 4 sekcji recenzji, **dowodząc swojej wiedzy ogólnej w zakresie podjętego wyzwania naukowego, którą oceniam pozytywnie.**

Kolejny obszar pracy badawczej Doktoranta, poświęcony analizom numerycznym, które zostały opisane w rozdziale trzecim, wymagały pogłębionej wiedzy zarówno w zakresie tzw. komórek absorpcyjnych będących istotnymi elementami diskutowanych układów spektroskopowych, zastosowanych do tego celu światłowodów z pustym rdzeniem oraz modelowania przepływów do badań symulacyjnych procesów napętniania gazami odcinków z tychże światłowodów. W efekcie przeprowadzonych symulacji oraz badań eksperymentalnych, potwierdzających założenia ujęte w trzeciej tezie rozprawy doktorskiej, a stanowiące podstawę do dalszych prac zmierzających do osiągnięcia postawionych celów, Doktorant przechodzi do trzeciego obszaru pracy – badań eksperymentalnych, które zaprezentował w rozdziale czwartym. Jest to bogaty zbiór wyników kolejnych eksperymentów, prowadzonych w sposób ustandaryzowany i umożliwiający ich ewaluację. W sumie opisanych jest pięć systemów pomiarowych, złożonych zasadniczo z elementów optycznych, optoelektronicznych, elektronicznych, pneumatycznych oraz wielu różnych urządzeń kontrolno-pomiarowych, których właściwe użycie i zastosowanie w celu uruchomienia i przeprowadzenia badań z wykorzystaniem spektroskopii z modulacją długości fali i detekcją drugiej harmonicznej (2f-WMS), z wykorzystaniem efektu termoelastycznego w rezonatorze kwarcowym (LITES) oraz spektroskopii dyspersyjnej (CLaDS) przy wykorzystaniu czterech różnych gazów wymagało specjalistycznej wiedzy oraz umiejętności posługiwania się naukowymi metodami badawczymi. Biorąc pod uwagę także osiągnięte rezultaty tych prac i udział zadeklarowany przez Doktoranta, **pozytywnie oceniam zaprezentowaną przez Doktoranta umiejętność prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.**

Na początku rozprawy doktorskiej Pan mgr inż. Piotr Bojęs sformułował cztery tezy, z których dwie, tj. drugą i trzecią, należałoby uznać za mało precyzyjne, ale także pośrednio wpisujące się jako wkład do dyscypliny naukowej, której dotyczy niniejsze postępowanie. Natomiast uwzględniając rolę Doktoranta w poszczególnych pracach badawczych chciałbym podkreślić znaczenie dwóch pozostałych tez, czyli pierwszej i czwartej, zacytowanych poniżej:

- „komórki absorpcyjne bazujące na światłowodach antyrezonansowych z pustym rdzeniem pozwalają na jednoczesną detekcję gazów w bliskiej i średniej podczerwieni”,
- „włókna ARHCF mogą być wykorzystane w układach laserowej spektroskopii gazów korzystających z różnych technik pomiarowych”.

Ich potwierdzenie w drodze analiz i licznych eksperymentów umożliwiło Doktorantowi uzyskanie rezultatów wyróżniających się na tle podobnych rozwiązań opisanych w literaturze, a mianowicie zademonstrowanie dwóch układów laboratoryjnych, w których zastosował efekt termoelastyczny w rezonatorze kwarcowym (LITES) do detekcji trzech różnych gazów, a w celu poprawy czułości zastosował detekcję drugiej harmonicznej oraz komórki absorpcyjne wykonane z odcinków antyrezonansowego światłowodu z pustym rdzeniem o długościach odpowiednio 0,95 m i 1 m, zapewniających minimalizację objętości gazów wymaganych do przeprowadzenia pomiarów stężenia:

- metanu w zakresie krótkofalowej podczerwieni ($1,65\ \mu\text{m}$), uzyskując możliwość pomiaru minimalnego współczynnika absorpcji wynoszącego $8,2 \times 10^{-8}\ \text{1/cm}$ w czasie uśredniania 100 s, przy jednoczesnym zapewnieniu liniowej odpowiedzi w zakresie 30-8000 ppmv i krótkiego czasu napełniania wynoszącego 10 s,
- dwutlenku węgla i tlenku diazotu w jednym układzie, w zakresie krótkofalowej podczerwieni ($2,01\ \mu\text{m}$) i średnioletowej podczerwieni ($4,57\ \mu\text{m}$), uzyskując możliwość pomiaru minimalnego współczynnika absorpcji wynoszącego odpowiednio $1,7 \times 10^{-6}\ \text{1/cm}$ (uśrednianie przez 100 s) dla pierwszego zakresu oraz $8,6 \times 10^{-7}\ \text{1/cm}$ (uśrednianie przez 50 s) dla drugiego, przy jednoczesnym zapewnieniu dużej liniowości odpowiedzi w przebadanych zakresach stężeń i krótkiego czasu napełniania wynoszącego 10 s.

W mojej ocenie są to istotne osiągnięcia o dużym potencjale badawczym oraz aplikacyjnym, którymi **Doktorant potwierdził realizację zasadniczych celów rozprawy**

doktorskiej, a także dowiódł znaczenia i oryginalności rozwiązania podjętego problemu badawczego.

4. Zagadnienia dyskusyjne i słabe strony rozprawy

Rozprawa doktorska została sporządzona z dużą pieczołowitością, przy czym przyjęta formuła zaprezentowania dużej liczby eksperymentów, powiązanych z licznymi aspektami z różnych obszarów wiedzy mających ubogacić pracę wpłynęła także na pewne niedociągnięcia. Do najważniejszych zaliczyłbym niżej wymienione i proponuję, aby zostały one uwzględnione w dyskusji podczas obrony.

1) Odnosząc się do analizy stanu wiedzy, w tak obszernym zestawieniu zabrakło uwzględnienia prac innych autorów z Politechniki Wrocławskiej, np. rozprawy doktorskiej dr. inż. G. Gomółki dotyczącej tej samej tematyki. Ponadto zgłaszam uwagi do niżej przytoczonych stwierdzeń:

- na str. 22 w ostatnim akapicie: „uzyskanie wyższej absorpcji dla wybranej już linii absorpcyjnej” - jest to wyrażenie nieprecyzyjne, gdyż absorpcja jest parametrem opisującym substancję o określonym przekroju czynnym na absorpcję dla danej długości fali, temperatury, ciśnienia oraz stężenia, proponowałbym w tym wypadku użycie pojęcia absorbancji;
- w pracy często stosowane jest pojęcie „intensywność” (np. „intensywność światła” lub „intensywność wiązki” na str. 22) zamiast natężenie promieniowania lub moc promieniowania;
- na str. 24 w ostatnim akapicie: „Dodatkowo układy oparte na wnękach rezonansowych obarczone są także wysoką podatnością na zmiany warunków pomiarowych (temperatury, ciśnienia, wilgotności) [145–148] co obniża stabilność opartych na nich układów” – jest to mało precyzyjny wniosek na podstawie zbyt pobieżnej analizy literatury w tym obszarze, np. układy CEAS z powodzeniem są stosowane w warunkach polowych;
- na str. 36, na rys. 24 zaproponowany został podział „metod i rodzin technik pomiarów spektroskopowych”, który w mojej ocenie jest niekonsekwentny i użyte są nieprawidłowe pojęcia, dzieli „Laserową spektroskopię gazów” na „Metody oparte na pomiarze spadku intensywności fali optycznej” oraz

„Metody oparte na efektach pośrednich wynikających z absorpcji”, podczas gdy większość tych metod wykorzystuje zjawisko absorpcji. Zawiera także nieścisłości takie jak np. zaliczenie CRDS do pierwszej grupy, albo że spektroskopia Ramana jest metodą absorpcyjną.

- na str. 51 opisano zasadę działania fotodetektora (wraz z rys. 33), która jest zbyt mocno uproszczona i nie uwzględnia zasadniczych zjawisk, w tym kwestii polaryzacji.
- 2) W pracy jest kilka układów eksperymentalnych, które są zasadniczym elementem rozprawy, dlatego moim zdaniem uzasadnienie wyboru poszczególnych komponentów tych układów powinno być bardziej szczegółowo przedstawione, np. jakie jest uzasadnienie (także pod względem utylitarnym) rozwiązania z dwoma laserami i dwoma wzmacniaczami światłowodowymi, w którym zastosowany jest laser o mocy 2,3 W. Pominięto dyskusję wyboru elementów i parametrów układów, analizę częstotliwościową, szumową (zakłóceń), czy chociażby aspekty metrologiczne przeprowadzonych pomiarów, np. wpływ stosowania ciśnień gazów wynoszących ok 1 atm. lub diody laserowej utrzymującej polaryzację na osiągi układu WMS, dlaczego do detekcji promieniowania MWIR zastosowano detektor fotonowy, który był optymalizowany na 8 μm , co skutkuje stosunkowo małą wykrywalnością znormalizowaną dla 3 μm (poniżej $2 \times 10^9 \text{ (cm} \cdot \text{Hz}^{1/2})/\text{W}$), w wypadku układów LITES nasuwa się pytanie o wpływ tzw. drgań symetrycznych i niesymetrycznych rezonatora QTF (zakłóceń) na SNR.
 - 3) Wartościowe byłoby przybliżenie aspektów związanych z przestrajaniem i modulacją długości promieniowania lasera w powiązaniu z propagacją w wybranych światłowodach, a także doboru długości odcinków tych światłowodów do poszczególnych eksperymentów.
 - 4) W niektórych układach stosowany był generator częstotliwości różnicowych DFG i pojawia się pytanie o ewentualne niepożądane składowe promieniowania wyjściowego, poza pasmem absorpcji badanych gazów, jak minimalizowano ich wpływ, zwłaszcza w zakresie SWIR. Ważnym zagadnieniem wydaje się także sposób rozwiązania jednoczesnego spełnienia wymagań wynikających z przestrajania i modulacji długości fali lasera (jak np. w układzie WMS) oraz warunków pracy generatora DFG.

- 5) Pewne wątpliwości pojawiają się w opisie wyznaczania SNR układu do wykrywania etanu z 30 metrowym światłowodem ARHCF, wskazane byłoby uszczegółowienie opisu pomiarów gęstości napięcia szumu zaprezentowanego na rys.73, omówienie pod kątem SNR rezultatów przedstawionych na rys. 73, 74 oraz 75, czy uzasadnienie wyboru sposobu obliczania granicy wykrywalności na podstawie tzw. kryterium 1σ ?
- 6) W rozprawie zaprezentowano dużo różnego rodzaju rezultatów pomiarów, ale nie uwzględniono analizy niepewności pomiarowych, np. stężeń mieszanin gazowych czy związanych z pomiarem napięć na wyjściach układów. W pracy wielokrotnie używa się określenia „kalibracja” np. str. 41: „będąca odpowiednikiem kalibracji wielopunktowej detektora” – rozumiem, że chodzi tutaj o czujnik gazu a nie o detektor promieniowania, dobrze byłoby wyjaśnić pojęcie kalibracji, gdyż często w artykułach anglojęzycznych ma ono inne znaczenie, niż w obszarze pomiarów i metrologii.

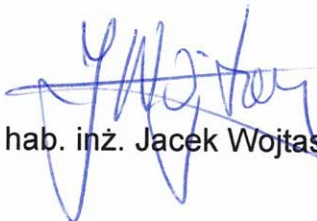
Do niedociągnięć mniejszej wagi występujących w pracy zaliczyłbym wyrażenia żargonowe i skróty myślowe (pkt. 1), szczególnie chciałbym podkreślić tłumaczenie „*induced*” jako indukowany zamiast wywołany/spowodowany, np. „wymiany gazowej indukowanej różnicą ciśnień”, pewne niedopatrzenia edycyjne i tzw. literówki (pkt. 2), a także przyjętą zasadę odnoszenia się do rysunków i tabel w środku zdania z zastosowaniem dużej litery np. „Rys.”. Czytelność pracy poprawiłoby także zastosowanie kursywy do symboli różnych wielkości.

- 1) na przykład: str 21 zamienne stosowanie absorpcja i ekstyncja, str. 23 „amplitudy światła”, „efekty fizyczne generowane przez absorpcję”, str. 29 „wysoki poziom przekrycia dwóch wiązek”, str. 30 „*inhibited copuling*”, str. 37 „zdolność detekcyjna”, „między 2017 a 2018, średnia koncentracja metanu wynosiła”, „zarejestrowanego na piku linii”, str. 44 „sinusoidalne światło... powoduje wygenerowanie”, str 46, „Tak zwana rampa”, „próbkiowanie wzmacniacza”, str. 58 „pomiar gazu”, str. 79 „korelacja symulowanego czasu napełniania”, str. 97 „szum długoterminowy” „ustawienie filtra dolnoprzepustowego na 18dB/oct”, str. 111 „wzmacniacza rezonatora kwarcowego”.
- 2) na przykład: str. 22 podpis rysunku 12 „pomiaru absorpcji innego koncentracji gazu”, str. 25 pierwszy akapit zamiast „w 1987 roku” powinno być „w 1897 roku”,

str. 32 nieczytelny rysunek 21 d, str. 37 pierwszy akapit ostatnie zdanie „W niniejszej pracy opisane zostały... opisanych w niniejszej pracy”, str. 43 wzór 2.8 brak nawiasu, niejednolite indeksy, str. 45 na osi rzędnych wykresu zamiast „Absorpcja” powinno być „Współczynnik absorpcji”, str. 55 ostatni akapit zamiast „wzór 1.20” powinno być „wzór 1.23”, str. 98 rysunek 69 a - zamiast ppbv powinno być ppmv na osi rzędnych, str. 102 na rys 73 „amplituda szumu” natomiast podana jest jednostka gęstości napięcia szumów, str. 102 rys. 74 dotyczy etanu, a w podpisie jest „1 ppmv CH4”, str. 129 brakuje połączeń lasera 1064 nm w układzie na rys. 97.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Bojęsia jest dziełem naukowym, które jest wartościowym wkładem do dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Zaprezentowane osiągnięcia w obszarze udoskonalenia układów laserowej spektroskopii absorpcyjnej oraz aplikacji technologii światłowodów z pustym rdzeniem są wynikiem umiejętnej analiz teoretycznych i złożonych badań eksperymentalnych. Uwypuklone w wyżej przeprowadzonej ocenie rozprawy efekty tych prac świadczą o oryginalności opracowanych przez Doktoranta rozwiązań, a także o ich potencjale aplikacyjnym. W mojej opinii **rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Bojęsia spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** (z późniejszymi zmianami).


dr hab. inż. Jacek Wojtas, prof. WAT

