



**Recenzja rozprawy doktorskiej
dla Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne
Politechniki Wrocławskiej**

Tytuł rozprawy: *Laserowa spektroskopia gazów z użyciem antyrezonansowych światłowodów z pustym rdzeniem oraz detekcji heterodynowej*

Autor rozprawy: *mgr inż. Grzegorz Gomółka*

1. Podstawa wykonania recenzji

Podstawą do wykonania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne Politechniki Wrocławskiej, nr 542/40/RDND11/2021-2024 z dnia 09.04.2024, w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Gomółki na temat: „Laserowa spektroskopia gazów z użyciem antyrezonansowych światłowodów z pustym rdzeniem oraz detekcji heterodynowej”, która została zrealizowana pod kierunkiem Promotora dr. hab. inż. Michał Nikodem, prof. uczelni.

2. Struktura i treść rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Grzegorza Gomółki jest napisana w języku polskim, liczy 103 strony, w tym 91 stron tekstu zasadniczego, poprzedzonego spisami treści i ważniejszych skrótów, a w części końcowej zawierającej podziękowania, wykaz dorobku publikacyjnego Autora (tj. 8 artykułów, jednego patentu, 17 wystąpień konferencyjnych) oraz bibliografię (rozdział 7). Strukturę dzieła należy uznać za przejrzystą, a pod względem graficznym za opracowanie przygotowane ze szczególną starannością. Zasadnicza część rozprawy zawiera wprowadzenie, które jest numerowane jako pierwszy rozdział, 4 kolejne rozdziały (2, 3, 4 i 5) poświęcone wybranym przez Autora problemom badawczym oraz rozdział 6, w którym Autor przedstawił konkluzje.

Rozprawa doktorska dotyczy badań prowadzonych nad czujnikami gazów bazującymi na wybranych metodach spektroskopii laserowej oraz światłowodach z pustym rdzeniem tzw. światłowodach antyrezonansowych (ang. anti-resonant hollow-core fiber, AR-HCF). W opracowaniu nie sformułowano bezpośrednio tez oraz zadań badawczych. Natomiast na podstawie opisu przedstawionego **w rozdziale pierwszym** pt. „Wprowadzenie”, można zidentyfikować dwa główne cele badawcze przyjęte przez mgr. inż. Grzegorza Gomółkę:

- 1) badania „nad różnymi konfiguracjami pomiarowymi oraz ocena, w których z nich uzyskuje się korzyści z zastosowania AR-HCF, a także identyfikacja oraz rozwiązanie problemów skojarzonych z tym nowym typem komórek gazowych”,
- 2) „wykorzystanie optycznej detekcji heterodynowej (ang. optical heterodyne detection, OHD) do zademonstrowania nowych możliwości w laserowej detekcji gazów”.

W dziewięciostronicowym **rozdziale drugim**, zatytułowanym „Właściwości absorpcyjne gazów”, omówione zostały fundamentalne zagadnienia związane z zastosowaniem zjawiska absorpcji promieniowania optycznego do detekcji gazów, w tym prawo Lamberta-Beera, pojęcie linii absorpcyjnych i mechanizmy ich poszerzenia, profil Voigta, widma rotacyjne, oscylacyjne i elektronowe.

W **rozdziale trzecim**, pt. „Laserowa spektroskopia absorpcyjna gazów w podczerwieni”, zawierającym 16 stron, scharakteryzowano układy do bezpośredniej spektroskopii absorpcyjnej (DAS) oraz wykorzystujące lasery przestrajalne (TDLAS) i spektroskopię modulacji długości fali (WMS), opisano światłowody z pustym rdzeniem oraz dokonano przeglądu ich zastosowań w laserowej detekcji gazów.

W **rozdziale czwartym**, pt. „Nowe zastosowania technik absorpcyjnych do detekcji gazów we włóknach antyrezonansowych z pustym rdzeniem”, na 33 stronach w formie dwóch podrozdziałów przedstawiono zagadnienia związane z laserową detekcją gazów w światłowodach typu AR-HCF. W pierwszym podrozdziale Autor opisał badania w zakresie tzw. średniej podczerwieni polegające na zastosowaniu układów DAS oraz TDLAS do wykrywania metanu i pary wodnej. Omówił także wpływ długości światłowodu na czułość i szybkość działania układu oraz efekty związane ze zmianami

ciśnienia podczas pompowania gazu do wnętrza światłowodów. Ponadto dokonał oceny stabilności układu i limitu detekcji metanu za pomocą wariacji Allana oraz zastosował opracowany układ do długoczasowych pomiarów stężenia pary wodnej i metanu w powietrzu atmosferycznym, realizowanych przez 7 dni. W drugim podrozdziale skupił się na badaniach mających na celu rozwiązanie zaobserwowanych ograniczeń tego rodzaju czujników gazów. Dotyczyły one opracowania metody szczelnego łączenia światłowodów AR-HCF, zmniejszenia czasu odpowiedzi tego rodzaju czujników, określenia sposobu wyznaczania kształtu linii absorpcyjnych w warunkach gradientu ciśnienia wzdłuż włókna oraz minimalizacji interferencji modów wyższych rzędów. Swoje dokonania spuentował w formie dwóch syntetycznych podsumowań po pierwszym i drugim podrozdziale.

W **rozdziale piątym**, pt. „Nowe zastosowania detekcji heterodynowej oraz technik nieabsorpcyjnych w laserowej detekcji gazów”, liczącym 25 stron, Autor zaprezentował badania związane z zastosowaniem detekcji heterodynowej do spektroskopii absorpcyjnej i dyspersyjnej, obejmujące układ spektroskopii dyspersyjnej z użyciem przestrajalnych diod laserowych (CLaDS), światłowodowy odbiciowy układ do heterodynowej detekcji metanu w bliskiej podczerwieni oraz układ do dyspersyjnej spektroskopii różnicowej (DODiS) tlenu w zakresie promieniowania widzialnego, o dużym zakresie linowości niezależnym od mocy źródła. Następnie w ramach podrozdziału pt. „Nowe metody i konfiguracje pomiarowe w spektroskopii fotothermalnej wykorzystujące detekcję heterodynową” przedstawił rezultaty badań nad heterodynowymi układami do interferometrii fotothermalnej ze źródłem w bliskiej podczerwieni umożliwiającym wykrywanie metanu w światłowodzie AR-HCF oraz z kwantowym laserem kaskadowym (QCL) jako źródłem optycznego grzebienia częstotliwości i spektrometrem fourierowskim (FTIR) jako modulatorem do detekcji tlenku diazotu (N_2O) w komórce wieloprześciowej, które Autor realizował podczas półrocznego stażu naukowego na Uniwersytecie Princeton (USA). W podsumowaniu rozdziału mgr. inż. Grzegorz Gomółka podkreślił, że dzięki zastosowaniu metody optycznej detekcji heterodynowej oraz spektroskopii fotothermalnej zbudował nowe i ulepszone względem literatury układy, w których skutecznie rozwiązywał problemy ograniczające ich możliwości.

W **rozdziale szóstym** – „Konkluzje”, Autor dokonał podsumowania swojej pracy badawczej nad wykorzystaniem światłowodów antyrezonansowych z pustym rdzeniem oraz detekcji heterodynowej w czujnikach gazów. Zaakcentował zadania badawcze, które pozwoliły na przyswojenie niezbędnej wiedzy i umiejętności w obszarze spektroskopii absorpcyjnej, dyspersyjnej, fototermlanej, a w rezultacie na opracowanie rozwiązań problemów badawczych opisanych w rozdziale czwartym i piątym.

W **rozdziale siódmym** – „Bibliografia” przedstawiony został wykaz cytowanej literatury, który obejmuje 197 pozycji. W większości są to anglojęzyczne artykuły z prestiżowych czasopism naukowych oraz kilka monografii, w tym jedna polskojęzyczna. Niespełna 17% z nich to publikacje wydane w ciągu ostatnich czterech dekad ubiegłego wieku, natomiast 30% stanowią źródła literaturowe opublikowane w ostatnich pięciu latach. Zostały one dobrane starannie do poruszanej w rozprawie tematyki i świadczą o bogatej i aktualnej wiedzy Autora z zakresu merytorycznego rozprawy.

3. Zaprezentowana problematyka badawcza

Recenzowana rozprawa dotyczy badań nad układami do spektroskopii absorpcyjnej, dyspersyjnej i fototermlanej, w których Autor dla polepszenia wybranych parametrów stosował antyrezonansowe światłowody z pustym rdzeniem oraz detekcję heterodynową. Porusza trudne i ważne zagadnienia, zarówno pod względem naukowym jak i aplikacyjnym. Tematyka zaprezentowanych badań wpisuje się w najnowsze trendy rozwoju technik światłowodowych oraz czujnikowych, które są rozwijane w wielu ośrodkach naukowych na świecie, w tym także w Politechnice Wrocławskiej.

Dzieło naukowe mgr. inż. Grzegorza Gomółki dotyczy dość szeroko ujętej problematyki wykrywania gazów za pomocą wybranych metod optycznych oraz adekwatnie dobranych technik i narzędzi badawczych. Autor umiejętnie opisuje ich podstawy teoretyczne w rozdziałach 2 i 3. Następnie w rozdziałach 4 i 5 definiuje zakres problematyki badawczej oraz prezentuje stosowne rozwiązania. W tych dwóch rozdziałach poruszono wiele zagadnień dotyczących dziewięciu najważniejszych dla pracy układów eksperymentalnych wykorzystujących różne kombinacje światłowodów i komórek absorpcyjnych, w powiązaniu z wyżej wymienionymi metodami i w różnych zakresach spektralnych promieniowania optycznego, do zademonstrowania

praktycznych możliwości pomiaru widm absorpcyjnych i stężeń metanu, pary wodnej, tlenu i tlenu diazotu. Należy podkreślić, że gazy te są niezwykle istotne dla zdrowia i jakości życia ludzi, problemów klimatycznych, a także wielu innych aspektów związanych z bezpieczeństwem i gospodarką.

Zasadnicza część badań eksperymentalnych została opisana na zadawalającym poziomie. Parametry poszczególnych układów zostały dobrane metodycznie, z uwzględnieniem literatury oraz obliczeń i badań własnych Autora. Jednak niektóre z badań cząstkowych wzbudzają pewne wątpliwości ze względu na małą szczegółowość opisów, co zostało szerzej omówione w kolejnym punkcie. Jako przykład można podać brak głębszej analizy teoretycznej przepływu gazu i doboru długości włókien w wielosegmentowym układzie do detekcji gazów opisanym w rozdz. 4.2.2 czy wybór liczby segmentów i uśrednianie w nich ciśnienia w rozdz. 4.2.3. Można odnieść wrażenie, że Autor świadomie zastosował pewną ogólność niektórych opisów, aby zapewnić balans pomiędzy liczbą poruszonych zagadnień potwierdzających Jego wiedzę oraz umiejętność prowadzenia pracy naukowej w zdefiniowanej strukturze tego rodzaju opracowania naukowego. Moim zdaniem lepszym rozwiązaniem byłoby organicznie liczby opisanych eksperymentów i bardziej szczegółowe ich zaprezentowanie.

Niewątpliwe do zrealizowania założonych celów pracy mgr inż. Grzegorz Gomółka, posługując się różnymi metodami badawczymi, rozwiązał szereg wyzwań naukowych z obszaru fizyki, przetwarzania sygnałów i analiz numerycznych, które w konsekwencji doprowadziły do niżej wymienionych wymiernych efektów będących podstawą jednego zagranicznego patentu oraz istotnym wkładem w pięciu współautorskich artykułach w renomowanych czasopismach naukowych:

- 1) opracowanie czujnika ze światłowodem AR-HCF i modulacją długości fali lasera ICL, którego limit detekcji dla metanu wyniósł 1,4 ppb oraz jego praktyczne zastosowanie do atmosferycznych pomiarów stężenia metanu oraz pary wodnej, – badania opublikowane we współautorskiej pracy¹;
- 2) opracowanie złączy do szczelnego łączenia światłowodów AR-HCF umożliwiających doprowadzenie gazu oraz techniki równoległego napełniania

¹ Grzegorz Gomółka, Grzegorz Stępniewski, Dariusz Pysz, Ryszard Buczyński, Mariusz Klimczak, Michał Nikodem. "Highly sensitive methane detection using a mid-infrared interband cascade laser and an anti-resonant hollow-core fiber". *Optics Express* 31(3), 3685-3697 (2023). DOI: 10.1364/OE.479963 (bib. [31]).

- odcinków tychże światłowodów w celu skrócenia czasu odpowiedzi czujnika i metody wyznaczania kształtu linii absorpcyjnej w wypadku gradientu ciśnienia wzdłuż linii światłowodowej zbudowanej z takich odcinków,
- badania opublikowane w patencie i współautorskiej pracy^{2,3};
- 3) opracowanie modelu do numerycznej analizy wpływu zginania światłowodów na propagację modów oraz zastosowanie w praktyce uzyskanych rozwiązań do redukcji interferencji międzymodowej w laserowych czujnikach gazu ze światłowodami AR-HCF i osiągnięcie limitu detekcji 155 ppb dla metanu,
- badania opublikowane we współautorskiej pracy⁴;
- 4) minimalizacja wpływu pasożytniczych interferencji w czujniku światłowodowym z zewnętrznym zwierciadłem odbijającym, w układzie CLaDS z detekcją heterodynową, umożliwiającym skrócenie czasu badania próbek pobieranych z trudno dostępnych miejsc np. podczas diagnostyki medycznej,
- badania opublikowane we współautorskiej pracy⁵;
- 5) opracowanie interferometrycznego układu z dwiema komórkami wieloprześciowymi do różnicowej spektroskopii dyspersyjnej DODiS, o szerokim zakresie liniowej odpowiedzi, umożliwiającego monitorowanie i wykrywanie kierunku zmian stężenia tlenu w powietrzu atmosferycznym względem próbki odniesienia oraz pośrednio stężeń innych gazów np. wyciekających i rozrzedzających zawartość tlenu w powietrzu;
- 6) opracowanie interferometrycznego układu ze światłowodem AR-HCF z zastosowaniem metody detekcji heterodynowej do spektroskopii fotothermalnej i pierwsza demonstracja tego rodzaju układu do wykrywania metanu za pomocą linii absorpcyjnej dla fali o długości 1651 nm,
- badania opublikowane we współautorskiej pracy⁶;

² G. Gomółka and M. Nikodem, "Złącza do łączenia światłowodów z przyłączem do napełniania światłowodu mikrostrukturalnego", U.S. patent P.440724 (November 14, 2023), (bib. [125]).

³ Grzegorz Gomółka, Adam Filipkowski, Dariusz Pysz, Ryszard Buczyński, Michał Nikodem. "Fast response multi-segment anti-resonant hollow-core fiber methane sensor at 1687 nm". *Optical Fiber Technology* 84, 103744, 1-7 (2024). DOI: 10.1016/j.yofte.2024.103744 (bib. [126]).

⁴ Grzegorz Gomółka, Patrycja Gronowicz, Adam Filipkowski, Ryszard Buczyński, Michał Nikodem. "Suppression of Optical Fringes in Gas Spectroscopy Inside Anti-Resonant Hollow-Core Fibers by Fiber Bending". *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 30(6), 5600508 (2024). DOI: 10.1109/JSTQE.2024.3367272 (bib. [141]).

⁵ Grzegorz Gomółka, Dariusz Pysz, Ryszard Buczyński, Michał Nikodem. „Dual-pass hollow-core fiber gas spectroscopy using a reflective configuration with heterodyne-based signal detection”. *Journal of Lightwave Technology* 41(18), 6094-6101 (2023). DOI: 10.1109/JLT.2023.3272308 (bib. [147]).

- 7) poprawa stosunku mocy sygnał do mocy szumu w szerokopasmowym układzie z detekcją heterodynową do spektroskopii fototermałnej z laserem QCL wytwarzającym grzebień częstotliwości i spektrometrem fourierowskim (FTIR) oraz jego praktyczne zastosowanie do pomiarów widma absorpcyjnego tlenku diazotu (N_2O) w zakresie fal o długości od 7,7 μm do 8,2 μm .

4. Słabe strony rozprawy i zagadnienia dyskusyjne

Do słabych stron rozprawy doktorskiej, zaliczam przede wszystkim nieuporządkowany sposób prezentacji przyjętych założeń, celów i zadań naukowych. Kolejnym aspektem jaki chciałbym w tym punkcie poruszyć, to zasygnalizowane wcześniej pobieżne opisy pewnych zagadnień, wobec których nasuwają się pytania. Do ważniejszych zaliczam poniższe, które obok wyżej wymienionych proponuję do dyskusji:

- 1) zaliczenie do rozwoju laserów półprzewodnikowych czterech dekad oraz wymienionych zakresów widmowych: *„Dużą zasługę w jej upowszechnieniu mają półprzewodnikowe źródła i detektory światła. Blisko cztery dekady rozwoju tej technologii zaowocowały bardzo bogatym wyborem laserów pracujących w szerokim zakresie bliskiej i średniej podczerwieni”* (str. 5);
- 2) podział zakresu podczerwieni na str. 17, który bazuje na monografii z 1995 roku pomimo bardziej aktualnych, np. prof. Rogalskiego i Chrzanowskiego z 2014 (10.2478/mms-2014-0057);
- 3) stwierdzenie na str. 19: *„Choć lasery ICL i QCL formalnie nie są diodami laserowymi, to z praktycznego punktu widzenia zazwyczaj są tak traktowane, stąd też nazwa TDLAS stosowana jest także do układów wykorzystujących lasery kaskadowe”* – wymienione typy laserów różnią się strukturą, zasadą działania i tym samym parametrami oraz sposobem użycia. Na tej samej stronie jest mowa także o zastosowaniu *„przestrajalnych jednoczęstotliwościowych diod laserowych”* oraz *„prostej fotodiody”* – dlaczego wypowiedź została zawężona do tych przyrządów oraz proszę o wyjaśnienie znaczenia drugiego z określeń;
- 4) kwestia składowej wolnozmiennnej w równaniu 32 (str. 22) oraz wybór zbrocza tego sygnału w dalszej części pracy;
- 5) na str. 25 zaprezentowany jest układ, co do którego pojawia się pytanie o sposób dostrojenia długości fali promieniowania lasera do wymaganej wartości,

⁶ G. Gomolka, M. Krajewska, A. M. Khegai, S. V. Alyshev, A. S. Lobanov, S. V. Firstov, D. Pysz, G. Stepniewski, R. Buczynski, M. Klimczak, and M. Nikodem, "Heterodyne photothermal spectroscopy of methane near 1651 nm inside hollow-core fiber using a bismuth-doped fiber amplifier," *Appl Opt* 60(15), C84 (2021) (bib. [182]).

a następnie o jej monitorowanie lub stabilizację. Na tej samej stronie jest także sformułowanie wzbudzające wątpliwość o jaką pozostałą część sygnału chodzi: „Pozostała część sygnału niesie informację o amplitudzie mierzonego sygnału o częstotliwości f_m ”;

- 6) stwierdzenie na str. 37, że „długość drogi oddziaływania światła z materią” to „długość włókna optycznego”;
- 7) sposób monitorowania lub stabilizacji warunków pomiarowych np. w czasie badań opisanych na str. 39? Doprecyzowania wymaga także czas odpowiedzi i napełniania, np. na rys. 24a, który jest różny od podanego w tekście dla ciśnienia 1,2 bar;
- 8) sformułowania „tło w kształcie sinusoidalnych prążków” (str. 38) oraz „prążek reprezentowany jest jako funkcja $|\sin_x|$ ” na str. 46 i rys. 29;
- 9) wpływ ciśnienia w eksperymentach z układem WMS prezentowanych na str. 37-43 w odniesieniu do preferowanego dla tego typu układów. Brakuje informacji na temat procedury pomiarowej, której wyniki zaprezentowano na rys. 25c, w tym zastosowanego detektora, ponieważ „MIP-100-250M” to oznaczenie przedwzmacniacza, a także na temat tzw. „kalibracji” lub „skalibrowania”;
- 10) przekształcenia dotyczące zależności nr 78 i 79 względem tekstów źródłowych oraz wpływu parametrów sygnału modulującego;
- 11) rozbieżności pomiędzy sformułowaniami na str. 77: „balansował długość ramion interferometru z dokładnością do kilku centymetrów” i na kolejnej: „komórki muszą mieć identyczną długość drogi geometrycznej, a pozostałe elementy ramion interferometru również muszą mieć tę samą łączną długość dróg optycznych”;
- 12) przesłanki doboru stężeń do badań, np. opisanych na str. 88 „Do pierwszej demonstracji użyto mieszaniny 1000 ppm N_2O w N_2 ” oraz uzyskane wyniki zaprezentowane na rys. 67 c i d.

Do niedociągnięć mniejszej wagi zaliczam brak lub nieprecyzyjne stosowanie odnośników do literatury, szczególnie w rozdziale 2.2, w tym także do równań, w rozdziale trzecim np. do fragmentu na str. 17: „Od pierwszego momentu zastosowania lasera do detekcji gazów, zaczęto mówić o laserowej spektroskopii gazów”, na str. 22 do prezentowanych równań i wniosków w ostatnim akapicie, na str. 29 do równań 44-46, na str. 30 do fragmentu dot. metody CRDS, którą niefortunnie

nazwano: „*techniką pulsacyjnej spektroskopii zaniku wnęki optycznej*”, w rozdziale czwartym na str. 37 do sformułowania „*obserwuje się odstępstwo od liniowości zależności absorpcji od stężenia, co jest spodziewane dla absorpcji większych niż ~10%*”, na str. 38 „*może dodatkowo redukować poziom tła w obserwowanych sygnałach absorpcyjnych*”, czy w rozdziale piątym do równania 73 na str. 73.

Podobnie kwalifikuję uchybienia gramatyczne, stylistyczne oraz nieadekwatne lub niepoprawne określenia, stwierdzenia żargonowe, czy skróty myślowe, np.: stosowanie „*detektor*” w odniesieniu do fotodetektorów lub czujników gazów, str. 14: „*molekuła może równolegle wykonywać rotacje*”, str. 17: „*Lasery (...), często dokonując detekcji poprzez pomiar i analizę*”, str. 20: „*Bezwzględne wartości długości fali z kolei otrzymać można poprzez zakotwiczenie wartości względnych*”, str. 26: „*wartość poziomu mocy na detektorze*”, str. 35: „*laser przestrajano za pomocą rampy*”, str. 37: „*jakość, czułość i szybkość detekcji metanu*”, str. 39: „*dopasowania zanikającej eksponenty*”, str. 40: „*gdy odejmie się ciśnienie od wejścia światłowodu*”, „*przy neutralnym ciśnieniu*”, str. 41: „*zatopiony w szumie Stąd też*”, „*pracował na wartości prądu*”, str. 45: „*w celu przeprowadzenia pomiaru spektroskopowego ciśnienie może zostać odjęte*”, str. 58 i równanie 60: „*Zgięcie światłowodu w płaszczyźnie x z promieniem R_b skutkuje liniową zmianą wartości współczynnika załamania n* ”, str. 76: „*dioda musiała być wzmocniona*”, str. 79: „*absorpcja jest proporcjonalna do długości drogi optycznej: $\alpha = A/L$* ”, str. 84 „*z częstotliwością repetycji (odległością między zębami)*”, str. 93 „*niewysyconej absorpcji*”.

Pojawiają się również powtórzenia, najczęściej dotyczące nazewnictwa metod, a także tzw. literówki, które w najmniejszym stopniu spośród wymienionych niedociągnięć wpływają na czytelność pracy, np. str. 5: „*na której zachodzi oddziaływania*”, str. 6: „*użycie jej do zaprezentowanie*”, str. 10: „*jako zależą od czas życia*”, „*wzburzona molekuła*”, str. 26: „*gazu, co przekłada się wzmocnienie absorpcji*”, separatory dziesiętne w postaci kropki zamiast przecinka (na innych stronach także), str. 29: „*hipocykoidy*”, str. 39: „*Podawane wartości ciśnienia podawane będą jako wartości*”, odwołanie do rys. 30c na str. 46, str. 86: „*Michaelsona*”, str. 98: „*[10] Z. (1926-2003). Kęcki*”.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr. inż. Grzegorza Gomółki jest wartościowym opracowaniem naukowym dowodzącym Jego dojrzałości naukowej i będącym istotnym wkładem do dyscypliny naukowej nauki fizyczne. Zaprezentowane osiągnięcia w obszarze zastosowania antyrezonansowych światłowodów z pustym rdzeniem jako komórek gazowych oraz detekcji heterodynowej w celu poprawy stosunku mocy sygnału do mocy szumu wybranych rozwiązań laserowych czujników absorpcyjnych i dyspersyjnych stanowią oryginalne rozwiązania podjętych wyzwań naukowych, charakteryzujące się użytecznością i potencjałem wdrożenia do sfery gospodarczej. Sformułowane uwagi krytyczne oraz pytania nie pomniejszają wartości tych osiągnięć. W mojej opinii rozprawa doktorska mgr. inż. Grzegorza Gomółki spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r., poz. 742 z późniejszymi zmianami).

Mając na uwadze zawarty w rozprawie bogaty materiał naukowy oraz dorobek publikacyjny mgr. inż. Grzegorza Gomółki obejmujący jeden wspólny z Promotorem patent w USA oraz osiem współautorskich artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych i liczne referaty na konferencjach naukowych, wnioskuję o rozważenie wyróżnienia.


dr hab. inż. Jacek Wojtas, prof. WAT