



**Wojskowa
Akademia
Techniczna**
im. Jarosława Dąbrowskiego

**Instytut
Optoelektroniki** 

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Bielecki

Warszawa, 05.09.2022r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DISCYPLINY NAUKOWEJ
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

**Tytuł rozprawy: Wieloprześciowe komórki odbiciowe do zastosowań
w spektroskopii laserowej i do spektralnego poszerzania
ultrakrótkich impulsów światła**

Autor rozprawy: mgr inż. Arkadiusz Hudzikowski

Podstawą do sporządzenia niniejszej recenzji była Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej z dnia 11 lipca 2022 r.

Recenzja została sporządzona zgodnie z art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm.).

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Arkadiusz Hudzikowskiego, dotyczy badań nad układami komórek wieloprześciowych oraz metod ich projektowania w wyniku których opracowano nowy rodzaj komórki wieloprześciowej, która charakteryzuje się długą ścieżką optyczną oraz małymi wymiarami i objętością w porównaniu z komórkami dostępnymi komercyjnie.

Autor sformułował następującą tezę pracy:

Zastosowanie trzech lub większej liczby zwierciadeł sferycznych pozwala na realizację kompaktowej komórki wieloprześciowej z astygmatycznym wzorem odbić i efektywny pomiar śladowych ilości gazów.

Praca doktorska mgr. inż. Arkadiusz Hudzikowskiego ma charakter doświadczalny z podaniem metod analitycznych i numerycznych umożliwiających projektowanie komórek wieloprześciowych. Składa się ona z 9. rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, bibliografii oraz wykazu najważniejszych osiągnięć Autora.

W rozdziale pierwszym, będącym wstępem do niniejszej pracy, podano informacje dotyczące zakresu przeprowadzonych badań, tezę oraz cele pracy.

W rozdziale drugim Doktorant zawarł wprowadzenie do laserowej spektroskopii absorpcyjnej gazów z zastosowaniem komórek wieloprześciowych. Dokonał przeglądu źródeł laserowych stosowanych w technikach spektroskopowych oraz omówił podstawowe techniki pomiarowe, które są powszechnie stosowane w laserowej spektroskopii absorpcyjnej gazów.

W rozdziale trzecim przedstawiono metody symulacji biegu wiązki laserowej w komórkach wieloprześciowych oraz metody umożliwiające optymalizację geometrii układów optycznych tych komórek.

W rozdziale czwartym Autor przedstawił metody zwiększenia długości interakcji promieniowania laserowego z badanym gazem za pomocą komórek wieloprześciowych. Doktorant omówił podstawowe rodzaje tych komórek (White'a i Herriotta) oraz ich późniejsze, ulepszone warianty. Podano równania, które umożliwiają obliczenie głównych parametrów komórek takich jak: długość ścieżki optycznej, liczby odbić, odległości między zwierciadłami, kąta i pozycji wiązki wejściowej. Wskazano zalety i wady dla każdego rodzaju komórki. Autor przedstawił nowy rodzaj komórki wieloprześciowej ze zwierciadłami sferycznymi umożliwiającymi uzyskanie astygmatycznego wzoru odbić, a także porównał różne typy komórek stosowanych w praktyce z komórką opracowaną w ramach tej pracy.

W rozdziale piątym zawarto analizę zastosowania algorytmów genetycznych do optymalizacji komórek wieloprześciowych. Przedstawiono kluczowe parametry tych algorytmów, rodzaje operatorów i przedstawiono weryfikację ich skuteczności. Zawarto także opis oprogramowania stosowanego do symulacji i optymalizacji układów optycznych oraz przedstawiono opis oprogramowania do projektowania komórek wieloprześciowych, których autorem jest Doktorant.

W rozdziale szóstym omówiono proces wyboru najlepszej konfiguracji geometrycznej komórki wieloprześciowej (MPC) zaproponowanej przez Doktoranta, następnie jej symulację i proces optymalizacji. Przedstawiono także opis praktycznej realizacji dwóch komórek na bazie czterech zwierciadeł sferycznych o drodze optycznej 23,8 m. Podano również wyniki pomiarów weryfikujących poprawność działania MPC, w tym rzeczywistą długość drogi optycznej. W celu potwierdzenia możliwości praktycznego zastosowania opracowanej komórki wykonano pomiary spektroskopowe (pomiar CO₂ za pomocą bezpośredniej spektroskopii absorpcyjnej oraz z zastosowaniem techniki WMS).

W rozdziale siódmym zawarto opis kompaktowego sensora do spektroskopii absorpcyjnej metanu w którym Autor zastosował opracowaną komórkę MPC wraz z diodą laserową (DL) oraz moduły: generatora, źródła prądowego DL, kontrolera temperatury i pomiarowy. W ten sposób uzyskano autonomiczny sensor, który może pracować w warunkach pozalaboratoryjnych. Przedstawiono także wyniki pomiarów izotopów metanu za pomocą technik DAS i WMS oraz przeprowadzono pomiar długoterminowy.

Rozdział ósmy zawiera opis metod poszerzania spektralnego i kompresji ultrakrótkich impulsów laserowych wraz z przykładami symulacji. Doktorant przedstawił projekt komórki wieloprześciowej opracowanej z pomocą autorskiego oprogramowania z zastosowaniem algorytmów genetycznych. Zamieścił On wyniki przeprowadzonych symulacji oraz układ eksperymentalny do poszerzenia i kompresji impulsów o różnych wartościach energii, dla kilku gazów.

Rozprawa liczy 172 strony, w tym 20 stron stanowi literatura i wykaz najważniejszych osiągnięć Doktoranta.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadcząca o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Załączony wykaz cytowanej literatury obejmuje 211 pozycji. Analiza źródeł, zarówno krajowych jak i międzynarodowych, została przeprowadzona z dużą starannością. Przedstawione źródła literaturowe są aktualne i ich lektura świadczy o dużej wiedzy Autora z zakresu merytorycznego rozprawy. Wnioski z przeglądu źródeł literaturowych sformułowano właściwie.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i przyjęte założenia są uzasadnione?

Autor niniejszej rozprawy doktorskiej podjął się badań nad komórkami wieloprzejściowymi.

Metodologia prowadzonych przez Autora prac badawczych zakładała:

- opracowanie nowego rozwiązania komórki wieloprzejściowej na bazie zwierciadeł sferycznych, która umożliwi uzyskanie wzoru astygmatycznego,
- opracowanie oprogramowania do projektowania kompaktowych komórek wieloprzejściowych o znanych parametrach tj. długości drogi optycznej, liczby i wymiarów zwierciadeł oraz liczby odbić wewnątrz komórki,
- praktyczną realizację kompaktowej komórki wieloprzejściowej o drodze optycznej powyżej 20 metrów,
- projekt i realizację kompaktowego sensora izotopów metanu wraz z opracowaniem niskoszumowych modułów elektronicznych do zasilania i stabilizacji lasera oraz akwizycji sygnałów,
- zastosowanie opracowanego oprogramowania do projektowania komórek wieloprzejściowych do poszerzania spektralnego w gazach wraz z realizacją układu eksperymentalnego.

Słuszność tezy potwierdzają zatem analizy teoretyczne i badania eksperymentalne opisane w rozdziałach 4-8 rozprawy.

Autor rozwiązał postawione zadania, użył właściwych metod badawczych, a przyjęte założenia są merytorycznie uzasadnione.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć naukowych Autora uznaję:

- opracowanie nowego typu komórki wieloprzejściowej, zgłoszonej do ochrony patentowej,
- skonstruowanie i przebadanie kompaktowej komórki wieloprzejściowej nowego typu, o długości ścieżki optycznej 23,8 m i objętości 80 cm³.
- opracowanie oprogramowania komputerowego do symulacji i optymalizacji komórek wieloprzejściowych za pomocą algorytmów genetycznych,
- zbudowanie kompletnego sensora metanu na bazie skonstruowanej komórki wieloprzejściowej. Dzięki opracowaniu modułów elektronicznych do sterowania laserem, stabilizacji jego temperatury oraz akwizycji, przetwarzania i zapisu danych

pomiarowych, Autor osiągnął całkowitą niezależność od sprzętu laboratoryjnego oraz uzyskał lepszą od dotychczas uzyskiwanych niepewność pomiaru proporcji $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ na poziomie 0,03 ‰ dla metanu o stężeniu 200 ppm i 14 ‰ przy stężeniu 2 ppm.

- zaprojektowanie komórki wieloprześciowej do poszerzania spektralnego ultrakrótkich impulsów laserowych, a następnie ich kompresja do 31,2 fs ze współczynnikiem kompresji 9, co jest wynikiem na światowym poziomie.

Znacząca część uzyskanych przez Autora wyników badań została pozytywnie zweryfikowana przez recenzentów czasopism naukowych z tzw. listy filadelfijskiej oraz spoza tej listy i materiałów konferencyjnych.

Przedstawione osiągnięcia są oryginalne, stanowiące samodzielny dorobek Autora i wnoszące nowe elementy do nauki reprezentowanej w literaturze światowej.

5. Czy autor wykazał umiejętności poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Recenzowana praca została napisana w sposób niezwykle staranny i przekonujący. Układ pracy jest logicznie uzasadniony. Na szczególną uwagę zasługuje bardzo gruntowna analiza źródeł, zarówno krajowych jak i międzynarodowych, podanie metodyki badań i dyskusja otrzymanych wyników.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

W ramach dyskusji poproszę Doktoranta o wyjaśnienie nw. problemów:

1. W jaki sposób uzyskano tak wysoką stałość i niskie szумы autorskiego modułu źródła prądowego i modułu pomiarowego zaprezentowanego w rozdziale 7? Jak te wartości prezentują się w porównaniu z komercyjnie dostępnymi urządzeniami?
2. Proszę o szersze opisanie wnękowej kamertonowej spektroskopii fotoakustycznej (I-QEPAS). Co dokładnie zostało zrealizowane przez Autora w ramach symulacji wnęki? Jaki to ma związek z symulacjami i projektowaniem komórek wieloprześciowych?

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Wyniki badań przedstawione przez Autora rozprawy są wartościowe przede wszystkim z poznawczego punktu widzenia. Praca ma duże znaczenie praktyczne w dobie wytwarzania wysokoczułych sensorów. Tego typu analizy mogą być niezwykle pomocne dla technologów tych przyrządów.

Uważam, że dalsze prace w tej dziedzinie powinny być kontynuowane. Wynikami tej pracy powinni zainteresować się badacze zajmujący się wykrywaniem śladowej ilości materii.

Na podkreślenie zasługuje również fakt, że doktorant publikował wyniki swoich prac w prestiżowych czasopismach z listy JCR takich jak: *Applied Physics B: Laser and Optics*, *IEEE Photonics Technology Letters*, *Journal of Clinical Investigation*, *Journal of Quantative Spectroscopy and Radiative Transfer*, *Opto-Electronics Review*, *Optics Express*, *Nature Photonics*, *Photonics Letters of Poland*, *Sensors*.

Doktorant jest współautorem aż 13 prac z tej listy (w tym pierwszym współautorem jednej pracy) oraz 42. wystąpień konferencyjnych. Trzy prace z listy JCR oraz osiem referatów konferencyjnych są bezpośrednio związane z tematyką rozprawy doktorskiej.

Na uwagę zasługuje fakt, że Autor jest współautorem zgłoszenia patentowego oraz odbył staże zagraniczne w Rice University (Hudson USA) oraz Princeton University

(Princeton, USA). W trakcie tych staży brał udział w projektach z zakresu spektroskopii laserowej, niskoszumowych układów przetwarzania sygnałów, optyki oraz z zakresu spektroskopii fotothermalnej z użyciem komórek wieloprześciowych.

Doktorant brał udział w sześciu projektach badawczych (finansowanych przez NCBiR, MNiSW, NCN i Program Operacyjny Inteligentny Rozwój) oraz w zagranicznych szkołach laserowych. Otrzymał stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia w 2018r., stypendium dla najlepszych doktorantów Politechniki Wrocławskiej (2017, 2018, 2019), nagrodę rektora za uznane osiągnięcia naukowe (dwukrotnie), nagrodę dziekana Wydziału Elektroniki PWr dla najlepszych doktorantów (2017), stypendium projakościowe dla doktorantów PWr (pięciokrotnie) oraz stypendium z Funduszu Własnego Politechniki Wrocławskiej (dwukrotnie).

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c) spełniająca wymagania
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Arkadiusza Hudzikowskiego spełnia wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 219 ust. 1 pkt 2b ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2021 poz. 478 z dnia 1 marca 2021 r.).

Ponadto stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Arkadiusza Hudzikowskiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na wysoki poziom wiedzy z dyscypliny automatyka elektronika i elektrotechnika, a także na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata.

Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej mgra inż. Arkadiusza Hudzikowskiego, a także aktywność naukową Kandydata, wyrażającą się publikacjami w prestiżowych czasopismach i prezentacjami referatów na renomowanych konferencjach wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

