



prof. dr hab. inż. Zygmunt Mierczyk
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna

Warszawa, 12-11-2023 r.

RECENZJA
rozprawy doktorskiej pt.

**„Wykrywanie śladowych ilości formaldehydu i etanu w powietrzu
metodami spektroskopii laserowej”**

Autor: mgr inż. Mateusz Winkowski
Promotor: prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz

Recenzja została sporządzona na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne, Uniwersytetu Warszawskiego, prof. dr. hab. Wojciecha Satuły (pismo nr BRN-XII/531/59/2023 z dnia 14 września 2023 r.).

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Winkowskiego pt.: „Wykrywanie śladowych ilości formaldehydu i etanu w powietrzu metodami spektroskopii laserowej” ma z jednej strony charakter monografii, w której można znaleźć kompendium wiedzy na temat wykrywania śladowych ilości gazów w zastosowaniach medycznych do oznaczania markerów chorobowych w wydychanym powietrzu, z drugiej strony zawiera oryginalne wyniki badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych dotyczących praktycznego zastosowania laserowej spektroskopii wieloprzełściowej do detekcji śladowych koncentracji formaldehydu oraz etanu.

Prace te dotyczą interdyscyplinarnych obszarów naukowo-badawczych, jakimi są: fotonika, spektroskopia, optyka stosowana i metrologia optyczna. Obszary te wpisują się w szeroko rozumianą dyscyplinę - nauki fizyczne.

1. Ogólna charakterystyka tematyki rozprawy

W ostatnich latach obserwuje się rosnące zainteresowanie środowisk naukowych badaniami nad nieinwazyjnymi metodami diagnozowania stanów chorobowych z zastosowaniem biomarkerów. Problem ten jest tematem intensywnych badań na całym świecie, szczególnie ze względu na rosnące zapotrzebowanie na diagnostykę chorób nowotworowych. W przypadku powietrza wydychanego substancje endogenne powstające podczas różnych procesów biochemicznych zachodzących w organizmie człowieka, przedostają się do krwi, a następnie są uwalniane w płucach. Detekcja tych substancji w wydychanym powietrzu może dostarczyć cennych informacji o prawidłowości lub zaburzeniu procesów metabolicznych zachodzących w organizmie. Analiza oddechu jest nieinwazyjna, bezbolesna i może dać szybką odpowiedź o istnieniu danego schorzenia. Ponadto proces pobrania próbki odbywa się komfortowo zarówno dla pacjenta, jak i personelu medycznego.

Analizując tematykę recenzowanej rozprawy doktorskiej warto zaznaczyć, że ciągły postęp technologiczny w zakresie fotoniki sprzyja poszukiwaniu nowych metod diagnostycznych w medycynie. Mając powyższe na uwadze należy stwierdzić, że problematyka badawcza zawarta w recenzowanej rozprawie mgr. inż. Mateusza Winkowskiego jest w pełni aktualna i w pełni przydatna dla rozwoju nauk fizycznych. W szczególności obejmuje zastosowanie nowoczesnych metod ultraczułej absorpcyjnej spektroskopii laserowej w celu wykrywania śladowych koncentracji substancji stanowiących markery stanów chorobowych w organizmie człowieka. Oprócz celów czysto utylitarnych, takie badania wnoszą istotny wkład zarówno w poznanie struktury widm absorpcyjnych, w wyniku symulacji numerycznych i pomiarów charakterystyk spektroskopowych w zakresie podczerwieni gazów stanowiących biomarkery, a także przyczyniają się do rozwoju nowych metod pomiarowych w zakresie optymalizacji budowy czułych sensorów gazów do zastosowań medycznych.

2. Analiza rozprawy doktorskiej

Rozprawa zawiera 81 stron i składa się ze wstępu, części wprowadzającej, części eksperymentalnej, podsumowania z wnioskami, dodatku z informacjami dotyczącymi prototypów sensorów formaldehydu i etanu oraz bibliografii zawierającej 190 pozycji literaturowych.

Część pierwsza rozprawy stanowi aktualny przegląd literatury, w tym wprowadzenie w problematykę dotyczącą wykrywania śladowych ilości gazów różnymi metodami analizy instrumentalnej w zastosowaniu do oznaczania markerów chorobowych.

Omówione zostały konwencjonalne oraz optyczne metody pomiaru stężenia biomarkerów. W szczególności skupiono się na metodach wykorzystujących absorpcyjną spektroskopię laserową. Przedstawiono techniki charakteryzujące się zwiększoną czułością, które umożliwiają wykrywanie gazów w ilościach rzędu pojedynczych cząstek na miliard (ppb). Skupiono się również na omówieniu widm cząsteczek wybranych gazów w podczerwieni. Zaprezentowano wyniki szczegółowej analizy – z wykorzystaniem bazy danych HITRAN – widm absorpcji światła przez etan i formaldehyd pod kątem ich detekcji w wydychanym powietrzu. Uwzględniono zakłócenia wywołane przez inne związki gazowe występujące w ludzkim wydechu oraz wpływ ciśnienia w próbce gazu na kształt widm.

Analiza literatury posłużyła Autorowi do sformułowania celu i zakresu pracy, a także przyjęcia metodologii eksperymentów naukowych, pomiarów aparaturowych, symulacji numerycznych oraz kompleksowych badań eksploatacyjnych w warunkach laboratoryjnych i w warunkach klinicznych.

W kolejnej części, która zawiera rozdziały eksperymentalne stanowiące zasadniczy wkład naukowo-badawczy rozprawy doktorskiej, Autor przedstawił wyniki analiz teoretycznych, symulacji numerycznych, badań spektroskopowych charakterystyk absorpcyjnych formaldehydu i etanu w warunkach rzeczywistych oraz przeprowadził badania laboratoryjne wpływu różnych czynników, w tym zakłóceń aparaturowych, na dokładność oznaczania stężenia tych gazów.

W wersji prototypowej opracowanych systemów oznaczania śladowych ilości formaldehydu i etanu Autor zastosował metodę laserowej spektroskopii wieloprzejęściowej. Zapewnia ona wysoką stabilność i odporność na zewnętrzne zakłócenia, a więc przydatność także poza badaniami laboratoryjnymi. W metodzie laserowej spektroskopii wieloprzejęściowej istotną rolę odgrywa konstrukcja komórki wieloprzejęściowej. W ramach pracy doktorskiej, mgr inż. Mateusz Winkowski uczestniczył w opracowaniu oprogramowania służącego do symulacji i optymalizacji takiej konstrukcji.

W eksperymentalnej części rozprawy, autor przedstawił analizę powstawania różnych zakłóceń pomiarowych związanych między innymi z szumami optycznymi wynikającymi z niepożądanych interferencji promieniowania laserowego, wpływu innych gazów (interferentów) oraz w przypadku formaldehydu, występowania efektu polimeryzacji i depolimeryzacji tego gazu. Zaprezentowana została autorska metoda redukcji szumów optycznych w wyniku modulacji długości fali generowanej przez laser kaskadowy.

W następnych podrozdziałach opisana została aparatura doświadczalna oraz metodyka pomiarowa. Omówione zostały układy do detekcji formaldehydu oraz etanu, wraz z ich szczegółowymi cechami wynikającymi ze specyfiki badanych gazów. Na koniec opisano eksperyment mający na celu detekcję kilku gazów za pomocą jednego źródła światła podczerwonego.

Rozprawę kończy podsumowanie z wnioskami dotyczącymi uzyskanych rezultatów oraz wykaz 5 publikacji w recenzowanych czasopismach naukowych bezpośrednio związanych z rozprawą doktorską. Autor zestawiał również wykaz artykułów naukowych i prezentacji konferencyjnych, w których rozwiązania opracowane w ramach pracy doktorskiej zastosowane zostały w innych układach detekcyjnych i badaniach eksperymentalnych, w których autor dysertacji brał udział.

W dodatku do rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusz Winkowski przedstawił konstrukcję urządzeń przeznaczonych do testów klinicznych. Zbudowane zostały dwa prototypowe układy do pomiaru formaldehydu i etanu. Pozwalają one na przeprowadzenie testów klinicznych poprzez bezpośredni pomiar tych biomarkerów w powietrzu wydychanym z płuc przez pacjentów. Automatyzacja procesu pomiarowego i odpowiednie oprogramowanie sensora oraz procedura badawcza zostały opracowane pod kątem możliwości obsługi przez personel medyczny. Dwa takie urządzenia zostały skonstruowane w ramach współpracy z firmą typu start-up Wahaf Pharma i zostały poddane badaniom klinicznym w szpitalu Uniwersyteckiego Centrum Klinicznego WUM w Warszawie.

Rozprawę kończy wykaz literatury zawierający 190 pozycji, w tym monografie, podręczniki akademickie, artykuły przeglądowe oraz publikacje naukowe, w tym publikacje z prac własnych Autora, w których opublikowana została większość wyników badań i analiz zaprezentowanych w doktoracie.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu merytorycznym Autora, jego pomysłowości i interdyscyplinarnej wiedzy praktycznej. Na podkreślenie zasługuje bardzo szeroki zakres przeprowadzonych analiz i dojrzałość badawcza, co świadczy o dużym zaangażowaniu i pracowitości Doktoranta, wynikającym z aktywności naukowo-badawczej w zakresie fotoniki, spektroskopii laserowej i metrologii optoelektronicznej.

Do najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych przedstawionych w rozprawie doktorskiej mgr. inż. Mateusza Winkowskiego należy zaliczyć:

1. Przeprowadzenie szczegółowej analizy widm absorpcyjnych w podczerwieni analizowanych gazów, w wyniku której wskazane zostały optymalne linie absorpcyjne pod kątem czułości i selektywności pomiaru.
2. Zastosowanie technik poprawiających czułość i selektywność metody laserowej spektroskopii absorpcyjnej z zastosowaniem komórki wieloprześciowej i redukcją szumów pomiarowych, co umożliwia wykrywanie biomarkerów chorobowych w wydychanym powietrzu w czasie rzeczywistym.
Dzięki zastosowaniu tych metod Autor uzyskał czułość detekcji 6,6 ppb dla formaldehydu oraz 1 ppb dla etanu.
3. Opracowanie autorskiego oprogramowania służącego do symulacji, analizy i optymalizacji komórek wieloprześciowych. Za jego pomocą zaprojektowane zostały konstrukcje rezonatora służące do wykrywania śladowych ilości biomarkerów.
4. Przeprowadzenie analizy zakłóceń optycznych i mechanizmów ich powstawania. Opracowana i przetestowana została metoda tłumienia tych szumów poprzez dodatkową modulację długości fali lasera z amplitudą dopasowaną do widmowej separacji prążków interferencyjnych tworzących zakłócenia optyczne. Metoda umożliwia ponadto uśrednianie sygnałów pomiarowych.
5. Opracowanie skutecznej metody pomiaru śladowych ilości formaldehydu w próbkach gazu z uwzględnieniem efektów polimeryzacji i depolimeryzacji, które prowadzą do osadzania się na ściankach urządzenia pomiarowego osadu zakłócającego pomiar. Ten sposób może być zastosowany podczas detekcji innych gazów o podobnych właściwościach chemicznych, jak np. amoniak.
6. Przedstawienie możliwości techniki pomiaru z modulacją długości fali lasera mającej zastosowanie w przypadku użycia laserów wykazujących silną nieliniowość. Pokazano również możliwość detekcji kilku gazów za pomocą jednego układu pomiarowego.
7. Skonstruowanie przenośnych w pełni funkcjonalnych prototypów urządzeń służących detekcji biomarkerów chorobowych w wydychanym powietrzu w warunkach klinicznych. Zawierają one autorskie komórki wieloprześciowe, jak również układ pneumatyczny służący do automatyzacji ich pracy. Ponadto konstrukcje elektroniczne służące do kontroli prądu i temperatury, a w konsekwencji generowanej długości fali przez laser kaskadowy zostały opracowane w całości przez autora pracy.

Rozprawa doktorska jest zredagowana starannie, co obok przejrzystej struktury merytorycznej, ułatwia korzystanie z dużej ilości zawartych w niej cennych informacji i wyników analiz. Wszystkie kroki eksperymentalne poprzedzone zostały wnikliwą analizą teoretyczną oraz symulacjami numerycznymi. Na podstawie analizy tekstu rozprawy nie stwierdziłem błędów merytorycznych.

Do niedoskonałości rozprawy należy zaliczyć brak wskazania *explicite* tezy rozprawy. Dla oceny rozprawy doktorskiej kluczowe znaczenie ma jej teza, bowiem wysiłek wkładany w przygotowanie rozprawy doktorskiej winien zmierzać w kierunku udowodnienia postawionej tezy lub weryfikacji trafności hipotezy badawczej.

Prezentowane w rozprawie wyniki badań laboratoryjnych oraz analizy mają charakter interdyscyplinarny i obejmują prace z zakresu spektroskopii optycznej, laserowo wzbudzanej luminescencji, metrologii i inżynierii materiałowej. Potwierdzają ogólną wiedzę teoretyczną Autora dotyczącą metod badawczych w zakresie badań spektroskopowych. Świadczą również o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, w tym w specjalistycznych obszarach fotoniki, optoelektroniki i elektroniki kwantowej.

3. Ocena końcowa z uzasadnieniem

Doktorant poprawnie sformułował problem naukowy, istotny z punktu widzenia projektowania, na podstawie badań widm absorpcyjnych formaldehydu i etanu, ultraczułych systemów pomiarowych stosowanych do oznaczania biomarkerów chorobowych. Efektem praktycznym rozprawy są oryginalne rozwiązania w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej i społecznej, w postaci prototypów urządzeń

Biorąc pod uwagę powyższe fakty oraz wysoki poziom merytoryczny uzyskanych wyników, które były prezentowane na konferencjach naukowych oraz publikowane w czasopismach naukowych (między innymi: Biomedical Optics Express, Optics Communications, Ukrainian Journal of Physical Optics, Acta Physica Polonica A, Metrology and Measurement Systems, Sensing and Bio-Sensing Research i Scientific Reports), rozprawę oceniam pozytywnie i nie mam wątpliwości, że zawarte w niej wyniki prac naukowych z interdyscyplinarnego obszaru badań, jakim jest absorpcyjna spektroskopia laserowa, stanowią istotny wkład Autora w zakresie nauk fizycznych.

Wg danych SCOPUS (listopad 2023) publikacje te były cytowane 318 razy. Indeks Hirscha mgr. inż. Mateusza Winkowskiego wynosi 5.

Rozprawę doktorską mgr. inż. Mateusza Winkowskiego pt.: „Wykrywanie śladowych ilości formaldehydu i etanu w powietrzu metodami spektroskopii laserowej” oceniam pozytywnie, jako spełniającą wymagania z wyraźnym nadmiarem.

Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Autora w dyscyplinie nauki fizyczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.

Ostatecznie stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Winkowskiego pt.: „Wykrywanie śladowych ilości formaldehydu i etanu w powietrzu metodami spektroskopii laserowej”, spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1 i ust. 2, Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668, z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



prof. dr hab. inż. Zygmunt Mierczyk