Wojskowa Akademia Techniczna

Instytut Optoelektroniki

Warszawa, dn. 4.09.2024 r.

Prof. dr hab. inż. Waldemar ŻENDZIAN
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna

**Recenzja rozprawy doktorskiej**
**mgr inż. Doroty Tomaszewskiej-Rolli**
**pt:**
**"Techniques of generation of the optical frequency comb in the mid-infrared region for laser spectroscopy"**
Techniki generacji optycznego grzebienia częstotliwości w zakresie średniej podczerwieni dla spektroskopii laserowej

Rozprawa autorstwa mgr inż. Doroty Tomaszewskiej-Rolli zrealizowana została w Katedrze Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki Wydziału Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej pod opieką promotora dr. hab. inż. Grzegorza Sobonia, prof. PWr i promotora pomocniczego dr hab. inż. Karola Krzempka, prof. PWr.

## 1. Cel badań (tezy rozprawy).

Przedłożona do recenzji rozprawa Pani mgr inż. Doroty Tomaszewskiej-Rolli wpisuje się w badania laserów generujących optyczne grzebienie częstotliwości w zakresie średniej podczerwieni i ich wykorzystania w fourierowskiej spektroskopii laserowej gazów. Lasery generujące ultrakrótkie impulsy są już powszechnie stosowane zarówno w nauce, jak i przemyśle. Szczególnie te bazujące na włóknach są szczególnie atrakcyjne ze względu na ich kompaktowość, brak konieczności justowania i potencjalnie niskie koszty. Jednak ze względu na zjawiska nieliniowe powodowane dużymi mocami szczytowymi impulsów w rdzeniu światłowodowym o małej średnicy projektowanie takich systemów laserowych jest znacznie skomplikowane i wymaga zarówno badań eksperymentalnych jak i teoretycznych. W pracy Doktorantka przeprowadziła badania systemu laserowego generującego impulsy ultrakrótkie w zakresie średniej podczerwieni, wstępnie wzmacniając impulsy z lasera iterbowego we wzmacniaczu światłowodowym, w reżimie tzw. zarządzania nieliniowością przez wzmocnienie (GMN), następnie generując solitony przesunięte częstotliwościowo w światłowodzie nieliniowym, a na końcu wykorzystując generację różnicową w przetworniku nieliniowym PPLN. W pracy Doktorantka również zademonstrowała wykorzystanie grzebieni częstotliwości w spektroskopii gazów wykorzystując nowe rozwiązanie komórki gazowej



RDN AEETK/150/2024

w postaci fotonicznego światłowodu ARCHF z rdzeniem wypełnianym badanym gazem. Praca ma charakter eksperymentalny wsparty wykorzystaniem modelu teoretycznego. Rozdziały zasadnicze pracy 4 i 5 zawierają szczegółową dyskusję otrzymanych wyników, które ponadto porównano z najlepszymi wynikami dotychczas raportowanymi w literaturze.

Autorka sformułowała dwie tezy:

1. "It is possible to generate short laser pulses with high power, whose spectral bandwidth reaches beyond the gain profile of the active medium by using amplification in the gain-managed nonlinear regime"

Możliwe jest generowanie krótkich impulsów laserowych o dużej mocy szczytowej, których pasmo widmowe wykracza poza profil wzmocnienia ośrodka czynnego, poprzez zastosowanie wzmocnienia w reżimie zarządzania nieliniowością przez wzmocnienie.

2. "Optical frequency combs converted to the mid-infrared region by nonlinear effects enable absorption spectroscopy of narrow- and broadband absorption lines using antiresonant-hollow-core-fiber-based absorption cell, with parameters comparable to the ones obtained with a multipass cell of similar length"

Optyczne grzebienie częstotliwości przekonwertowane nieliniowo w zakres średniej podczerwieni umożliwiają spektroskopię absorpcyjną, wąsko- i szerokopasmowych linii absorpcyjnych, z wykorzystaniem komórki absorpcyjnej w postaci światłowodu ARHCF z wynikami porównywalnymi z uzyskiwanymi z wykorzystaniem komórki wieloprzejściowej o podobnej długości oddziaływania.

Uważam, że pierwsza teza jest zbyt ogólna i właściwie jest udowodniona w pracach grupy F. Wize np. w publikacji [9]. Teza ta powinna być sformułowana bardziej szczegółowo w odniesieniu do badań przeprowadzonych w pracy, pokazujących zmianę charakterystyk wzmacniacza iterbowego pracującego w trybie GMN w funkcji wyboru pasma pompowania, mocy pompującej czy też częstotliwości powtarzania wzmacnianych ultrakrótkich impulsów. Teza druga jest precyzyjna i sformułowana prawidłowo. Z przekonaniem stwierdzam, że postawione tezy są wynikiem dogłębnej analizy publikacji z zakresu pracy. W celu ich udowodnienia Doktorantka postawiła sobie do zrealizowania trzy cele badawcze:

1. Opracowanie źródła pompującego dużej mocy, generującego optyczny grzebień częstotliwości w zakresie bliskiej podczerwieni z wykorzystaniem wzmacniacza pracującego w trybie GMN.
2. Jednoczesną detekcję metanu i etanu z wykorzystaniem spektroskopii fourierowskiej i optycznego grzebienia częstotliwości z zakresu średniej podczerwieni z nieliniowego generatora częstotliwości różnicowych.
3. Porównanie zastosowania komórek absorpcyjnych wieloprzejściowych i komórek w postaci włókien antyrezonansowych w spektroskopii laserowej gazów z szerokimi i wąskimi liniami absorpcyjnymi.

Tematyka podjęta w rozprawie jest bardzo aktualna, a duże zainteresowanie nią wynika z faktu poszukiwania praktycznych rozwiązań źródeł generujących optyczne grzebienie częstotliwości w zakresie średniej podczerwieni, które można wykorzystać m.in. w spektroskopii laserowej cząstek gazów, które w tym zakresie charakteryzują się licznymi silnymi liniami absorpcyjnymi. We wszystkich tych zastosowaniach wymagane są wysoka moc szczytowa, wysoka stabilność mocy i częstotliwości zębów grzebienia, niskie szumy, wysoka

koherencja oraz odpowiednie charakterystyki czasowe i widmowe generowanych ultrakrótkich impulsów. Badania zaprezentowane w pracy są badaniami podstawowymi, są istotnym wkładem Doktorantki w dziedzinę źródeł generujących optyczne grzebienie częstotliwości i ich zastosowań w spektroskopii laserowej.

## 2. O pracy doktorskiej, charakter rozprawy.

Praca doktorska mgr Doroty Tomaszewskiej-Rolli ma charakter eksperymentalny. Składa się ona z 6 rozdziałów i trzech dodatków w postaci spisu najważniejszych akronimów wykorzystywanych w pracy, listy osiągnięć naukowych uzyskanych przez Autorkę w trakcie studiów doktoranckich, streszczenia w języku polskim i angielskim i wykazu literatury. Rozprawa liczy 114 stron. Jest napisana w języku angielskim.

Autorka po zaprezentowaniu w rozdziale 1 celów, tez i struktury pracy, w rozdziale 2 bardzo merytorycznie wprowadziła czytelnika w obszar prowadzonych badań. Opisała ideę generacji ultrakrótkich impulsów laserowych w laserach z synchronizacją modów wzdłużnych oraz metody nieliniowej konwersji ich widma głównie w zakres średniej podczerwieni, uzasadniając wybór generacji różnicowej w swoich badaniach. W rozdziale tym również wyjaśniła podstawowe różnice wzmacniania ultrakrótkich impulsów metodą CPA i metodą wykorzystującą zarządzanie nieliniowością GMN. Podkreślając, że metoda GMN umożliwia uzyskanie wzmocnionych impulsów o znacznie poszerzonym widmie wykraczającym poza widmo wzmocnienia, z chirpem dodatnim, umożliwiającym ich skompresowanie do impulsów prawie ograniczonych transformacyjnie. Rozdział ten kończy krótki opis metod detekcji oraz opis opracowanego przez doktorantkę spektrometru fourierowskiego o nominalnej rozdzielczości 75 MHz, wykorzystywanego w badaniach eksperymentalnych opisanych w rozdziale 5 pracy. Rozdział ten ma duże walory dydaktyczne.

Dwa kolejne rozdziały mają znaczenie zasadnicze, opisują one badania eksperymentalne Doktorantki związane ściśle z udowodnieniem tez pracy. Zasadnicza część rozdziału 4 poświęcona jest badaniom wzmacniania w trybie GMN w światłowodzie iterbowym. Dla dwóch częstotliwości repetycji impulsów zadających, z dwóch różnych laserów iterbowych (30 i 125 MHz) i dwóch pasm pompowania wzmacniacza iterbowego (918 nm i 976 nm) Doktorantka scharakteryzowała generowane impulsy w funkcji mocy pompującej. Zmierzyła widma impulsów, czasy trwania, charakterystyki czasowe natężenia i fazy impulsów m.in. przy wykorzystaniu techniki FROG. Pokazała, że wykorzystywany model teoretyczny wzmocnienia ultrakrótkich impulsów w trybie GMN opracowany przez R. Lindberga [196] jest poprawny i może być wykorzystywany do optymalizacji takich systemów laserowych. Wykorzystując ten model pokazała ewolucję czasową i widmową impulsu w trakcie jego propagacji w światłowodzie aktywnym. W przypadku źródła o dużej częstotliwości 125 MHz uzyskała impulsy o czasie trwania 51 fs, o szerokości widma 67 nm ($\lambda_c$=1078 nm) i mocy szczytowej 420 kW, a źródła o małej częstotliwości powtarzania 30 MHz impulsy o czasie trwania 33 fs, o szerokości pasma 120 nm ($\lambda_c$ = 1100 nm) i mocy szczytowej 2.29 MW. Doktorantka również przeprowadziła badania zbudowanego źródła dla różnych temperatur włókna wzmacniającego, częściowo wyjaśniając odstępstwa wyników eksperymentalnych szerokości widma generowanych impulsów od przewidywań teoretycznych, wzrostem temperatury włókna dla dużych mocy pompujących. Zarówno dla impulsów wejściowych jak i wyjściowych wzmacniacza iterbowego w trybie GMN pomierzyła coraz powszechniej wykorzystywany w technice laserowej szum względny natężenia RIN w zakresie 10 Hz – 430 kHz. Dla źródła o małej częstotliwości całkowity RIN dla impulsów wejściowych i wyjściowych po kompresji

był odpowiednio równy 0.145% i 0.575%, a dla źródła o dużej częstotliwości był dużo mniejszy, odpowiednio 0.078% i 0.231%. Źródło o dużej częstotliwości wykorzystała w dalszych badaniach jak źródło zadające.

Uzyskiwane z tego źródła impulsy z zakresu bliskiej podczerwieni konwertowano w zakres średniej podczerwieni wykorzystując generację częstotliwości różnicowej w krysztale nieliniowym PPLN mieszając w nim impulsy z tego źródła z impulsami sygnałowymi. Jako impulsy sygnałowe Doktorantka wykorzystała solitony przesunięte częstotliwościowo SSFS generowane w światłowodzie nieliniowym, do którego wprowadzano część promieniowania ze wzmacniacza GMN. Doktorantka zbadała charakterystyki generowanych solitonów dla 4 rodzajów światłowodów nieliniowych, ostatecznie wybierając światłowód opracowany i wykonany w Laboratorium Światłowodów Optycznych w Lublinie, dla którego uzyskała generację impulsów solitonowych ze sprawnością około 20% przesuniętych częstotliwościowo w zakres 1423 nm dla maksymalnej mocy pompującej 250 mW. Rozdział 4 kończą badania impulsów generowanych z kryształu PPLN i podsumowanie. Ostatecznie w pracy uzyskano generację ultrakrótkich impulsów w zakresie średniej podczerwieni 3372 nm – 4902 nm. Dla centralnej długości fali 3752 nm maksymalna moc wyjściowa zbudowanego źródła wyniosła 95.5 mW, przy mocy wiązki pompującej 2.4 W i wiązki sygnałowej 50 mW.

Rozdział ten charakteryzuje się wnikliwą analizą otrzymanych wyników i prawidłową ich interpretacją. Doktorantka udowodniła w nim pierwszą tezę rozprawy.

Rozdział 5 Doktorantka poświęciła pokazaniu potencjału wykorzystania grzebieni optycznych w zakresie średniej podczerwieni w fourierowskiej spektroskopii laserowej. W badaniach jako źródło podstawowe wykorzystała system laserowy, z generacją częstotliwości różnicowych bazujący na laserze erbowym z synchronizacją modów wzdłużnych za pomocą modulatora grafenowego, opracowany przez promotorów Jej pracy. W pracy przedstawiła zasadnicze charakterystyki tego źródła podkreślając, że cechuje się ono aktywną stabilizacją mocy wyjściowej, częstotliwości powtarzania impulsów i obwiedni widma impulsów co jest bardzo istotne w zastosowaniach spektroskopowych. W pierwszym eksperymencie Doktorantka pokazała na przykładzie dwóch gazów metanu i etanu, że fourierowska spektroskopia laserowa z wykorzystaniem grzebieni częstotliwości umożliwia jednoczesną detekcję kilku gazów. W pracy zastosowana metoda umożliwiła rozróżnienie i pomiar współczynników absorpcji dla etanu i metanu. Uzyskany parametr $NEA = 4\times10^{-6}\ cm^{-1}\ Hz^{-1/2}$ jest porównywalny z wynikami literaturowymi dla komórek gazowych jednoprzejściowych. W celu zmniejszenia współczynnika NEA Doktorantka zastosowała nowe rozwiązanie dla komórki gazowej, a mianowicie antyrezonansowy światłowód ARHCF z rdzeniem, który można wypełniać badanym gazem. W rozdziale tym Doktorantka scharakteryzowała stosowany światłowód ARHCF i przedstawiła zmierzone widma absorpcyjne czterech węglowodorów charakteryzujących się wąskimi (metan, etan) i szerokimi (butan, pentan) pasmami absorpcyjnymi, którymi wypełniała zarówno światłowód ARHCF o długości 26.15 m jak i komórkę wieloprzejściową MPC o efektywnej długości oddziaływania 31.23 m. Wykazała, że dla porównywalnych długości oddziaływania komórka absorpcyjna ARHCF w porównaniu z komórką wieloprzejściową ma większą czułość (mniejszy parametr $NEA\ 8.3\times10^{-8}\ cm^{-1}\ Hz^{-1/2} < 2.3\times10^{-7}\ cm^{-1}\ Hz^{-1/2}$), mniejsze straty transmisyjne (8 dB < 11 dB) i znacznie mniejszą objętość (0.77 mL <<850 mL). Obliczone stężenia gazów z widm absorpcyjnych dla tych dwóch rodzajów komórek absorpcyjnych były zgodne. Wyniki rozdziału 5 są dowodem drugiej tezy pracy.

## 3. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł. Sposób sformułowania wniosków z analizy.

Załączony wykaz cytowanej literatury jest bardzo duży i obejmuje 235 pozycji. Cytowana bibliografia jest reprezentatywna dla rozważanego zakresu pracy. Z pracy wynika, że Doktorantka bardzo szczegółowo zapoznała się z cytowaną literaturą i poddała ją wnikliwej analizie, co potwierdzają uzyskane wyniki jak również ich odniesienia literaturowe.

W dodatku do doktoratu Autorka zaprezentowała swój cały bardzo duży jak na obecny etap jej rozwoju naukowego dorobek naukowy. Z zakresu tematycznego pracy, jest ona współautorem 3 artykułów w czasopismach z listy filadelfijskiej, 3 artykułów konferencyjnych oraz 14 ustnych i plakatowych prezentacji konferencyjnych. Z poza zakresu tematycznego pracy, jest ona dodatkowo współautorem 6 artykułów w czasopismach z listy filadelfijskiej, 10 artykułów konferencyjnych oraz 4 ustnych i plakatowych prezentacji konferencyjnych. Ponadto jest laureatką 9 wyróżnień i stypendiów naukowych. Wiedzę i doświadczenie badawcze zdobywała realizując trzy projekty badawcze (w jednym jako kierownik), biorąc udział w 7 szkołach badawczych i 4 stażach, w tym 2 zagranicznych na Uniwersytecie Umea. Analiza cytowanych źródeł świadczy o biegłości Doktorantki w tematyce prezentowanej w rozprawie. Autorka demonstruje bardzo dobre przygotowanie ogólne i szeroką wiedzę teoretyczną i praktyczną z optyki nieliniowej, laserów światłowodowych z synchronizacją modów wzdłużnych, propagacji ultrakrótkich impulsów w światłowodach nieliniowych i aktywnych, spektroskopii laserowej oraz technik pomiarowych wykorzystywanych w wymienionych dziedzinach.

## 4. Rozwiązanie postawionego zadania, właściwość przyjętych metod i założeń.

Doktorantka przyjęte do realizacji pracy zadania badawcze konsekwentnie zrealizowała. Przeprowadziła i udokumentowała badania, których wyniki w pełni potwierdzają tezy pracy. Odnośnie I tezy w rozdziale 4 przeprowadziła pełne badania wzmacniania ultrakrótkich impulsów w opracowanym wzmacniaczu iterbowym pracującym w trybie GMN. Dla maksymalnej mocy pompującej 7.9 W uzyskała generację impulsów o czasie trwania 33 fs i mocy szczytowej 2.29 MW, a więc o parametrach lepszych niż dotychczas uzyskano przy tym trybie wzmocnienia. Generowane impulsy charakteryzowały się pasmem 120 nm ($\lambda_c$ = 1100 nm) znacznie przekraczającym pasmo wzmocnienia iterbu 60 nm ($\lambda_c$ = 1030 nm). Co najważniejsze charakteryzowały się one chirpem dodatnim, co umożliwiło ich skompresowanie do czasu trwania bliskiego ograniczeniu transformacyjnemu wynoszącemu 29 fs. Pokazała również, że zastosowana metoda wzmacniania w trybie GMN wymaga dalszych badań, w szczególności w innych zakresach spektralnych.

W celu udowodnienia drugiej tezy Doktorantka wykorzystała optyczne grzebienie częstotliwości z zakresu średniej podczerwieni do spektroskopii czterech węglowodorów przy wykorzystaniu dwóch komórek gazowych, a mianowicie po raz pierwszy światłowodu ARHCF oraz komórki wieloprzejściowej. W obu przypadkach pomierzyła stężenia badanych gazów, wyznaczyła współczynniki NEA i w ten sposób wykazała przewagę zastosowania światłowodu ARHCF w stosunku do komórki wieloprzejściowej o porównywalnej długości oddziaływania z jego długością.

Podsumowując, uzyskane rezultaty udowadniają postawione tezy. Doktorantka znakomicie opanowała warsztat doświadczalny badań i wiedzę w zakresie wzmacniania impulsów laserów światłowodowych z synchronizacją modów wzdłużnych, w szczególności w trybie GMN,

propagacji ultrakrótkich impulsów w światłowodach nieliniowych oraz wykorzystania optycznych grzebieni częstotliwości w spektroskopii gazów. Doktorantka wykazała się dużą sprawnością w realizacji i dokumentacji pracy naukowej. Zaprezentowana rozprawa stanowi zamkniętą całość w zakresie celów, sposobu analizy problemu i formułowanych w niej wniosków. W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę na różnorodność technik zastosowanych w badaniach oraz umiejętności eksperymentatorskie Autorki. Doktorantka przeprowadziła kompleksowe badania zbudowanych układów laserowych wykorzystując samodzielnie zestawione stanowiska pomiarowe np. do pomiaru szumów RIN, do pomiarów spektroskopowych. Pokazała również umiejętność wykorzystania w badaniach techniki FROG, która umożliwia pełną charakteryzację ultrakrótkich impulsów światła.

**5. Oryginalność rozprawy; samodzielny dorobek autora; pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy ( poziomu techniki) prezentowanego w literaturze światowej.**

W rozprawie przedstawione są wyniki własnych prac doświadczalnych dotyczących generacji optycznych grzebieni częstotliwości w zakresie średniej podczerwieni i ich wykorzystania w spektroskopii fourierowskiej gazów. Wyniki badań Doktorantki zostały poddane weryfikacji przez liczne prezentacje konferencyjne oraz publikacje w czasopismach naukowych z obszaru laserów i ich zastosowań. Zgodnie z wykazem literatury publikacje [71], [118], [164] są ściśle związane z badaniami przedstawionymi w rozdziałach zasadniczych pracy, odpowiednio 4 i 5. Moim zdaniem na oryginalność rozprawy oraz dorobek Autorki składają się znaczące wyniki badań do których zaliczam:

1. Opracowanie i pełną charakteryzację wzmacniacza iterbowego optycznych grzebieni częstotliwości pracującego w trybie GMN.
2. Wykazanie, że wykorzystywany w pracy model teoretyczny wzmocnienia ultrakrótkich impulsów w trybie GMN opracowany przez R. Lindberga [196] jest poprawny i może być wykorzystywany do optymalizacji takich systemów laserowych.
3. Badania solitonów przesuniętych częstotliwościowo SSFS w światłowodach nieliniowych dostępnych komercyjnie jak również w światłowodzie krajowym.
4. Pokazanie eksperymentalne, że spektroskopia fourierowska z wykorzystaniem optycznych grzebieni częstotliwości umożliwia jednoczesny pomiar widm absorpcyjnych kilku gazów.
5. Pierwszą literaturową demonstrację eksperymentalną wykorzystania komórki absorpcyjnej na bazie fotonicznego włókna antyrezonansowego ARHCF w spektroskopii fourierowskiej i porównanie jej z komórką wieloprzejściową.

**6. Poprawność przedstawienia uzyskanych wyników.**

Rozprawa została zredagowana w sposób przejrzysty, napisana poprawnym językiem naukowym i technicznym w języku angielskim. Wyniki prezentowane w pracy są przejrzyście zredagowane i zrozumiale zinterpretowane. Każdy rozdział Autorka podsumowuje bardzo staranną dyskusją otrzymanych wyników. Najlepsze swoje wyniki eksperymentalne porównuje z wynikami literaturowymi wykazując w ten sposób swój wkład w badania optycznych grzebieni częstotliwości. Strona edytorska rozprawy jest bardzo staranna. Pracę oceniam bardzo wysoko, czytałem ją z dużym zainteresowaniem i z przyjemnością. Recenzowana praca doktorska potwierdza nie tylko wysokie indywidualne

predyspozycje i dojrzałość naukową Doktorantki, ale również wystawia znakomite świadectwo zespołom naukowym, w których realizowała swoje badania.

**7. Słabe strony rozprawy, jej główne wady.**

Zasadniczo moim zdaniem Autorka uniknęła błędów merytorycznych. Po zapoznaniu się z pracą mam jednak kilka uwag, a mianowicie:

1. Tytuł pracy zobowiązuje do poświęcenia większej uwagi nieliniowej generacji częstotliwości różnicowej, brakuje natomiast w pracy:

a) wyjaśnienia wyboru periodu wykorzystywanych kryształów PPLN (brak warunku synchronizmu fazowego) i ich długości 3 mm,

b) podania periodu kryształu PPLN wykorzystywanego w iterbowym systemie laserowym,

c) podania wymiarów poprzecznych wykorzystywanych przetworników PPLN,

d) informacji czy badania spektroskopowe były prowadzone dla jednego wybranego periodu przetwornika PPLN.

2. Zaskoczeniem dla mnie było wykorzystanie w rozdziale 5 systemu laserowego na bazie lasera erbowego, a nie opracowanego systemu opartego o laser iterbowy. Uzasadnienie Doktorantki powyższego wyboru do udowodnienia drugiej tezy pracy, jest dla mnie wystarczające. Rozumiem, że zbudowany przez Doktorantkę bardzo złożony iterbowy system laserowy w zastosowaniu spektroskopowym wymaga jeszcze opracowania dodatkowych rozwiązań aktywnej stabilizacji jego parametrów wyjściowych (mocy, częstotliwości powtarzania, widma impulsów).
3. Brak wyjaśnienia sposobu wyboru długości włókien iterbowych do wzmacniania w trybie GMN.

W pracy zauważyłem trzy błędy, głównie edytorskie:

1. Rys. 5.17 – w podpisie zamiast a) powinno być b) i odwrotnie,
2. W tabeli 5.1 powinno być [$cm^{-1}Hz^{-1/2}$],
3. Na rys. 4.19 i rys. 5.1 kryształ PPLN powinien być obrócony o 90 stopni (wiązki propagują się prostopadle do domen, a nie równolegle).

Powyższe uwagi jednak w niczym nie umniejszają **bardzo wysokiej wartości pracy**.

**8. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych, przemysłu, obronności kraju itp.**

Uzyskane podczas realizacji pracy wyniki są znaczące. Stanowią istotny wkład w rozwój źródeł generujących optyczne grzebienie częstotliwości i ich wykorzystania w spektroskopii laserowej do wykrywania i pomiaru stężeń gazów chrakteryzujących się zarówno wąskimi jak i szerokimi pasmami absorpcyjnymi w zakresie średniej podczerwieni. Na podkreślenie zasługuje zastosowanie po raz pierwszy w spektroskopii komórki gazowej w postaci światłowodu fotonicznego ARHCF, który z powodzeniem może zastąpić komórki wieloprzejściowe. Spektroskopia wykorzystująca optyczne grzebienie częstotliwości już dzisiaj znajduje zastosowania cywilne i wojskowe.

**9. Zaliczenie rozprawy do jednej z następujących kategorii:**

a. Nie spełnia wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
b. Wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
c. Spełniająca wymagania,

d. Spełniająca wymagania z nadmiarem,
e. **Wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie**

Podsumowując stwierdzam, że praca Pani mgr. Doroty Tomaszewskiej-Rolli stanowi oryginalny wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Jej rozprawa doktorska spełnia kryteria oryginalności rozwiązania problemu naukowego i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.). Doktorantka z powodzeniem osiągnęła cele badawcze i wykazała się bardzo wysokim poziomem wiedzy teoretycznej oraz konstruowania układów laserowych, a także kompetencjami naukowo-badawczymi, co potwierdzone jest wyczerpującymi i przekonującymi analizami otrzymanych wyników.
Mając powyższe na uwadze wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Doroty Tomaszewskiej-Rolli do publicznej obrony. Biorąc pod uwagę otrzymane Zasady wyróżnienia rozpraw doktorskich w Politechnice Wrocławskiej wnioskuję o jej **wyróżnienie**.

Waldemar Żendzian