



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński

Wydział Fizyki

Uniwersytet Warszawski

Ul. Pasteura 5

02-093 Warszawa

e-mail: ryszard.buczynski@fuw.edu.pl

Tel. + 48 22 5532023

Recenzja rozprawy doktorskiej

"Spectral conversion of ultrashort laser pulses in nonlinear optical fibers"

mgr inż. Olgi Szewczyk

Rozprawa doktorska jest poświęcona badaniom nad konwersją częstotliwości krótkich impulsów propagujących się w układach światłowodowych. Praca obejmuje szeroko zakrojony zakres prac eksperymentalnych i numerycznych związanych z opracowaniem i implementacją całkowicie światłowodowych systemów do otrzymania impulsów w wybranym zakresie widma przy optymalizacji ich charakterystyk czasowych, wydajności konwersji, mocy oraz ograniczeniu szumu. Praca powstała pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Grzegorza Sobonia na Wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej.

W rozprawie Autorka podejmuje ważny i aktualny problem braku efektywnych energetycznie, odpornych na wpływy środowiska pracy, prostych w obsłudze, przestrajalnych źródeł światła w bliskiej podczerwieni w zakresie długości fal 1,6 – 2,0 mikronów. Jako optymalne rozwiązanie zapewniające bezobsługowość i komfort użytkownika, którym zazwyczaj nie jest specjalista od laserów tylko biolog, technik pomiarowy lub inżynier produkcji przyjmuje się konstrukcje całkowicie światłowodowe. Jednym z podstawowych problemów w budowie światłowodowych źródeł światła w części widma bliskiej podczerwieni, w szczególności w zakresie długości fal 1,1 – 1,5 oraz w okolicach 1,7 mikrometra, jest brak ośrodków aktywnych emitujących fotony lub brak odpowiednich



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

półprzewodnikowych źródeł światła umożliwiającą efektywne pompowanie światłowodów domieszkowanych jonami ziem rzadkich m.in. w zakresie 1,6 – 1,9 μm . W rozprawie doktorskiej Autorka przedstawia oryginalne rozwiązania pozwalające ominąć powyższe ograniczenia wykorzystując zjawiska optyki nieliniowej oraz unikalne właściwości dyspersyjne ośrodków falowodowych.

Rozprawa doktorska mgr inż. Olgi Szewczyk zawiera wyniki badań opublikowane w latach 2021-2023 w trzech artykułach naukowych w renomowanych czasopismach naukowych w dziedzinie optyki z współczynnikiem IF: w *Optics Express*, *Journal of Lightwave Technology* oraz *Optics and Lasers Technology*. Doktorantka jest pierwszym autorem we wszystkich powyższych pracach, co świadczy o jej wiodącej roli w przeprowadzonych badaniach. W pracy „*Spectral compression and amplification of ultrashort pulses tunable in the 1650 – 1900 nm wavelength range*” opublikowanej w *Optics & Laser Technology* w 2023 roku przedstawiono wyniki dotyczące budowy całkowicie światłowodowego systemu laserowego przestrajalnego w zakresie 1,6–1,9 μm z układem wzmacniacza. W pracy „*All-normal dispersion supercontinuum vs frequency-shifted solitons pumped at 1560 nm as seed sources for thulium-doped fiber amplifiers*” opublikowanej w *Optics Express* w 2021 roku przedstawiono porównanie właściwości dwóch rodzajów światłowodowych źródeł femtosekundowych emitujących impulsy o długości fali 2 μm , wykorzystujących różne zjawiska nieliniowe: generację koherentnego supercontinuum oraz samoprzesunięciem częstotliwości solitonu (soliton self frequency shift SSFS – tłum. za M. Karpierz, E. Wejnert-Rączka „Nieliniowa optyka światłowodowa”, WNT, 2009). Oba rodzaje wiązek sygnałowych wzmocniono przy zastosowaniu wzmacniacza światłowodowego domieszkowanego tulem i zbadano wpływ wzmocnienia na koherencję i szum w wiązce wyjściowej. Trzecia praca zatytułowana „*Dual-wavelength pumped highly birefringent microstructured silica fiber for widely tunable soliton self-frequency shift*” została opublikowanych w *Journal of Lightwave Technology* w 2021 roku i dotyczyła zastosowania nowo opracowanego światłowodu fonicznego do częstotliwościowego przestrajanego impulsu pompującego w zakresie bliskiej podczerwieni przy zastosowaniu zjawiska samoprzesunięcia częstotliwości solitonu dla dwóch typowych pomp światłowodowych o długościach fali 1,04 μm i 1,55 μm .



Opublikowane prace pokrywają w pełni zakres badań stanowiących ocenianą rozprawę doktorską. To oznacza, że wszystkie części rozprawy zostały już zweryfikowane przez niezależnych recenzentów pod kątem oryginalności i wartościowego wkładu w rozwój dziedziny. Zgodnie z bazą danych Web of Science publikacje związane z rozprawą doktorską były dotychczas cytowane 10 razy, z czego wszystkie są to cytowania obce i tylko jedno jest cytowaniem przez współautorów prac. Niewielka liczba cytowań jest związana z krótkim czasem jaki upłynął od ich publikacji.

Doktorantka jest także pierwszą autorką 2 publikacji w wydawnictwach pokonferencyjnych z serii EPJ Web of Conferences oraz współautorką jednego wniosku patentowego krajowego zatytułowanego „Pasywny nieliniowy moduł światłowodowy”, który został zgłoszony do UPRP w 2022 roku. Na uznanie zasługuje także aktywny udział doktorantki w konferencjach krajowych i międzynarodowych. Mgr inż. Olga Szewczyk jest współautorką 13 prezentacji konferencyjnych na prestiżowych konferencjach m.in. EOSAM Rzym w 2022 r., EUROPHOTON w 2020 i 2022 roku, z czego w 11 przypadkach osobiście prezentowała wyniki badań w formie ustnej lub na sesji plakatowej. Za swoją prezentację na konferencji OPTICA IONS Ireland w 2021 roku Doktorantka otrzymała nagrodę ‘Best Oral Presentation Award’. Ponadto mgr inż. Olga Szewczyk otrzymała i realizuje od 2023 roku prestiżowy grant NCN dla młodych naukowców PRELUDIUM „*Spectral compression of ultrashort laser pulses tunable in the biological window of 1600-1800 nm*”. Wszystkie powyższe osiągnięcia świadczą o zaangażowaniu i wysokiej jakości prac badawczych prowadzonych przez doktorantkę.

W swojej rozprawie doktorskiej Doktorantka postawiła 2 tezy badawcze, które w tłumaczeniu na język polski będą brzmiały ;

1. Spektralnie przesunięte solitony wygenerowane w reżimie anomalnej dyspersji charakteryzują się równie dobrą stabilnością, jak supercontinuum generowane w reżimie całkowicie normalnej dyspersji, i mogą być używane jako sygnał zasiewający do wzmacniaczy światłowodowych domieszkowanych talem.
2. • Zjawisko samoprzesunięcia częstotliwości solitonu (SSFS) umożliwia generowanie solitonów o wąskiej linii spektralnej i przesuniętym widmie.



Na podstawie analizy przedłożonej rozprawy stwierdzam, że wszystkie elementy też zostały systematycznie zbadane przed Doktorantką i pozytywnie zweryfikowane.

Praca doktorska mgr inż. Olgi Szewczyk jest napisana w języku angielskim i składa się z 6 rozdziałów. Rozdziały 1 i 2 stanowią wprowadzenie merytoryczne do pracy obejmujące motywację podjęcia tematu oraz wprowadzenie podstawowych pojęć. Główna część pracy, obejmująca rozdziały od 3 do 5 oraz wnioski końcowe zawarte w rozdziale 6, przedstawiają oryginalne wyniki prac badawczych wykonanych przez Doktorantkę.

Rozdział 2 zawiera opis podstawowych pojęć i modeli związanych zjawiskami nieliniowymi występującymi w światłowodach ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk samoprzesunięcia częstotliwości solitonu oraz generacji supercontinuum w reżimach dyspersji anomalnej i normalnej, które są wykorzystywane w dalszych pracach badawczych. Rozdział zawiera także syntetyczny opis metod numerycznych stosowanych do modelowania zjawisk nieliniowych oraz metody eksperymentalnych stosowanych do badania charakterystyk krótkich impulsów w światłowodach. Rozdział jest napisany w przystępny sposób i wprowadza wszystkie niezbędne pojęcia potrzebne do zrozumienia dalszej części rozprawy. Szczególnie wartościowy jest rozdział 2.7, w którym Doktorantka bardzo przejrzyście opisała techniki eksperymentalne pozwalające na charakteryzację parametrów ciągów impulsów pod kątem ich koherencji, szumu i stabilności.

W rozdziale 3 Doktorantka przedstawiła wyniki prac eksperymentalnych dotyczących zastosowania światłowodu fotonicznego do przestrajania długości fali solitonu wykorzystując zjawisko samoprzesunięcia częstotliwości solitonu. Zastosowany światłowod został opracowany i wytworzony we współpracy z Laboratorium Technologii Światłowodów UMCS w Lublinie oraz firmą Fibrain. Jako źródła pompujące została użyta para femtosekundowych laserów światłowodowych domieszkowanych odpowiednio erbem i iterbem emitująca typowe długości fal 1,55 μm oraz 1,040 μm . Doktorantka zbudowała układ i zademonstrowała przesunięcie długości fali wygenerowanych solitonów w zakresie 1,41 - 1,67 μm za pomocą zmiany mocy impulsu pompującego, gdy nieliniowy światłowod fotoniczny był pompowany za pomocą lasera iterbowego oraz analogicznie w zakresie 1,71 - 1,95 μm przy użyciu lasera erbowego. Otrzymana wydajność konwersji jest wyższa lub zbliżona do najlepszych



podobnych laserów przestrajalnych w oparciu o mechanizm SSFS publikowanych przez inne grupy badawcze. Natomiast otrzymany układ wyróżnia się rekordowo szerokim pasmem przestrajania. Po raz pierwszy Doktorantka wykazała możliwość otrzymania przestrajalnego źródła solitonowego przy zastosowaniu pojedynczego włókna nieliniowego w zakresie od 1,42 do 1,95 μm przy zastosowaniu dwóch typowych pomp laserowych femtosekundowych, które mogą być zintegrowane w przyszłości w jednym układzie światłowodowym. Doktorantka przeprowadziła pomiary koherencji i wyznaczyła współczynnik wygaszania polaryzacji (PER). Badania wykazały, że dzięki zastosowaniu relatywnie krótkiego odcinka światłowodu utrzymującego stan polaryzacji możliwe jest zachowanie wysokiej koherencji i utrzymanie polaryzacji impulsów, co pozwala na praktyczne wykorzystanie zaproponowanych przestrajalnych źródeł solitonowych w systemach metrologicznych i telekomunikacyjnych. Rozdział zawiera kompletny i bardzo szczegółowy opis prac eksperymentalnych zakończonych sukcesem, natomiast brakuje odniesienia do wyników modelowania przedstawionych na rys. 3.5. Z wykresu można otrzymać informację dotyczącą zgodności eksperymentu z modelem, podczas gdy opisu modelu i przebiegu prac symulacyjnych Doktorantka nie przedstawiła. W rozdziale także brakuje informacji na temat kryteriów wyboru światłowodu nieliniowego. Można odnieść wrażenie, że dowolny światłowód nieliniowy zastosowany w przedstawionym układzie eksperymentalnym pozwoli efektywnie na uzyskanie podobnych wyników, co raczej nie jest prawdą. Oczekiwałbym od Doktorantki analizy jakie efektywne parametry włókna nieliniowego są istotne dla uzyskania szerokopasmowego przestrajania wykorzystującego zjawisko samoprzesunięcia częstotliwości solitonu. Ponadto w przypadku rozprawy doktorskiej wartościowym elementem np. w podsumowaniu rozdziału byłoby bardziej szczegółowe porównania otrzymanych wyników z wynikami opublikowanymi w przytoczonych pracach [58, 150-152] oraz wskazanie najważniejszych cech zaproponowanych przez doktorantkę rozwiązań, które umożliwiły osiągnięcie lepszych wyników w zakresie przestrajania niż w pracach opublikowanych przez inne grupy badawcze.

Rozdział 4 zawiera oryginalne wyniki prac eksperymentalnych Doktorantki nad porównaniem koherencji generowanych impulsów oraz szumu typu RIN generowanego w



dwóch rodzajach światłowodów nieliniowych zastosowanych jako sygnały zasiewające w światłowodowych wzmacniaczach tulowych. W wielu wcześniejszych publikacjach wskazywano na zalety supercontinuum generowanego we włóknach nieliniowych z anomalną dyspersją. Takie supercontinuum charakteryzuje się wysoką koherencją impulsów i niskim szumem może być z powodzeniem użyte do budowy przestrajalnych źródeł wzmacnianych w światłowodowych wzmacniaczach tulowych w pasmie $2 \mu\text{m}$. Natomiast dotychczas były opublikowane tylko pojedyncze prace, min. autorstwa promotora mgr Szewczyk, wskazujące na możliwość zastosowania światłowodów nieliniowych z anomalną dyspersją i wykorzystania zjawiska samoprzesunięcia częstotliwości solitonu występującego do otrzymania koherentnych i niskoszumowych przestrajalnych źródeł światła w zakresie $1,8 - 2,1 \mu\text{m}$ z możliwością wzmacniania we włókach domieszkowanych talem oraz współdomieszkowanych holmem i talem. Doktorantka przeprowadziła eksperymentalne badania porównawcze i wykazała możliwość otrzymania podobnych wysokich wartości koherencji oraz niskiej wartości szumu wzmocnionych impulsów w szerokim pasmie przestrajania częstotliwości dla obu mechanizmów generacji impulsów: supercontinuum w światłowodach z dyspersją normalną oraz światłowodach z anomalną dyspersją wykorzystujących mechanizm SSFS. Otrzymane wyniki mają duże znaczenie praktyczne, gdyż można oczekiwać znacznie wyższej efektywności konwersji częstotliwości w przypadku światłowodów przestrajalnych z wykorzystaniem zjawiska samoprzesunięcia częstotliwości solitonu niż w przypadku supercontinuum, co może mieć wpływ na uproszczenie budowy źródeł światła i ich powszechne wykorzystanie w metrologii m.in. w OCT. Prace eksperymentalne oraz analiza wyników zostały bardzo dobrze i szczegółowo opisane. Jedynie chciałbym zwrócić uwagę na brak wyjaśnienia dlaczego w przypadku zjawiska samoprzesunięcia częstotliwości solitonu nie obserwujemy szumu charakterystycznego dla innych zjawisk nieliniowych, które pojawiają się w przypadku propagacji krótkich impulsów w nieliniowych światłowodach z dyspersją anomalną.

Rozdział 5 poświęcony jest kompresji spektralnej impulsów przy zastosowaniu koncepcji włókna o zmiennym profilu dyspersji wzdłuż jego długości. Ze względu na ograniczenia technologiczne w wytwarzaniu światłowodów nie jest obecnie możliwe



wytworzenie włókna o określonej arbitralnie zmiennej dyspersji. Powyższą koncepcję można zrealizować stosując w włókno o „grzebieniowym” profilu dyspersji, co w praktyce oznacza wytworzenie światłowodu hybrydowego z powtarzającej się wielokrotnie sekwencji dwóch włókien o różnych profilach dyspersyjnych i różnej długości odcinków. W ramach prac badawczych doktorantka przeprowadziła optymalizację profilu dyspersji i opracowała profil włókna grzebieniowego. Następnie wytworzyła docelowe włókno hybrydowe o zaprojektowanej strukturze i scharakteryzowała parametry spektralne impulsu na wyjściu takiego układu światłowodów. Ostatnim etapem przeprowadzonych prac było zintegrowanie wzmacniacza tulowego i wzmocnienie otrzymanego impulsu laserowego. Doktorantka wykazała, że zaproponowane i wytworzone włókno hybrydowe pozwala na kompresję impulsów w rozważanym zakresie przestrajania solitonów 1,6 – 1,9 μm . Uzyskany stopień kompresji wyniósł 0.43-0.11 nm w zależności od położenia spektralnego solitonów. Oznacza to osiągnięcie współczynnika kompresji na poziomie 37 razy, co stanowi rekordową wartość w porównaniu z raportami innych grup badawczych na świecie.

W Rozdziale 5 doktorantka bardzo szczegółowo opisuje metodologię prac eksperymentalnych i analizę wyników. Brakuje jednak podstawowych informacji dotyczących metod i narzędzi zastosowanych do modelowania. Nie została opisana metoda optymalizacji sekwencji włókna, a na rys. 5.5. przedstawiono tylko kilka rozważanych przypadków. Ponadto na rys. 5.12b przedstawiono tylko znormalizowane wartości natężenia dla sekwencji przestrajanych solitonów, nie ma natomiast informacji o efektywności konwersji oraz mocy średniej i szczytowej impulsów po kompresji spektralnej, analogicznie do przedstawionej na rys. 12a dla solitonów przed kompresją. W ostatniej części rozdziału 5 (sekcja 5.4.1) Doktorantka zwróciła uwagę na przesunięcie spektralne linii laserowych po przejściu przez wzmacniacz w stosunku do oryginalnie skompresowanego impulsu, natomiast w analizie brakuje wyjaśnienia przyczyn tego zjawiska. Rys. 5.14 przedstawiający powyższe zjawisko jest nieczytelny ze względu na zbyt niską rozdzielczość rysunku po osi X oraz kolory krzywych.

W podsumowaniu całość rozdziału 5 oceniam bardzo wysoko. Rozdział ten stanowi logiczny ciąg badań z pracami przedstawionymi w Rozdziale 3. Doktorantka zrealizowana w



jednym całkowicie światłowodowym układzie funkcje przestrajania impulsów przy wykorzystaniu zjawiska samoprzesunięcia częstotliwości solitonu, kompresji impulsów przy zastosowaniu hybrydowego światłowodu grzebieniowego oraz wzmocnienie impulsów w zintegrowanym wzmacniaczu tulowym. Rozdział 5 stanowi pełną pozytywną weryfikację drugiej tezy rozprawy.

Ostatni Rozdział 6 zawiera krótkie podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych i wykazanie pozytywnej weryfikacji tezy rozprawy doktorskiej. Rozdział niestety nie zawiera analizy wpływu osiągniętych wyników na rozwój przestrajalnych źródeł solitonowych i możliwości jakie daje ich upowszechnienie. W rzeczywistości zawartość tego rozdziału jest w przeważającej części powtórzeniem informacji przedstawionych w Rozdziale 1 oraz w streszczeniu. Doktorantka przedstawiła w rozprawie wyniki swoich prac na światowym poziomie, osiągnięcia są oryginalne i przyczyniają się do rozwoju wiedzy w dziedzinie światłowodowych przestrajalnych źródeł światła. Szkoda, że te wyniki nie znalazły swojego podsumowania w Rozdziale 6. Należy jednak dodać, że Doktorantka przedstawiła oczekiwane aspekty w analizach wewnętrznych znajdujących się w Rozdziałach 3-5, a struktura rozprawy jest zdeterminowana układem logicznym 3 publikacji, w których Doktorantka upowszechniała swoje wyniki.

Przedstawioną przez mgr inż. Olę Szewczyk rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Praca zawiera nowe, wartościowe wyniki dotyczące opracowania nowych przestrajalnych źródeł światłowodowych. Doktorantka wykazała, że zastosowanie zjawiska samoprzesunięcia częstotliwości solitonów może być wykorzystane do wydajnego pod kątem konwersji energii i szerokiego spektralnie przestrajania źródeł solitonowych. Otrzymane charakterystyki źródeł ze względu na wysoką moc szczytową, stabilność czasowa, koherencję i obecność bardzo niskiego szumu predysponują je do wykorzystania w praktycznych zastosowaniach metrologicznych m.in. w optycznej tomografii komputerowej. Co więcej, zakres spektralny objęty przestrajaniem wypełnia lukę technologiczną i dostarcza nowe, efektywne źródła w zakresie pasma 1,7 – 1,8 μm , które są szczególnie istotne przy budowie układów fotonicznych w zastosowaniach biomedycznych.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Praca jest wyróżniająca pod względem technicznym. Praca bardzo precyzyjnie prezentuje przebieg i wyniki wszystkich przeprowadzonych eksperymentów, które następnie są szczegółowo przeanalizowane. Doktorantka doskonale wykorzystała warunki stworzone do prowadzenia prac badawczych przez promotora i zespół Grupy Elektroniki Laserowej i Światłowodowej. Jest to niewątpliwie jedną z najlepszych prac doktorskich pod kątem metodologii, prowadzenia eksperymentu i sposobu analizy danych, które miałem możliwość recenzować w ciągu ostatnich 20 lat. Sposób przygotowania rozprawy świadczy o bardzo wysokich umiejętnościach badawczych i wiedzy zdobytej przez Doktorantkę.

Praca jest także bardzo dobra pod względem edycyjnym i formalnym. Jest napisana bardzo starannie, nie zawiera istotnych błędów merytorycznych ani formalnych. Wszystkie analizy w rozprawie są poparte odniesieniami do właściwej literatury. Otrzymane wyniki są dogłębnie analizowane i ilustrowane wykresami, które pozwalają na łatwe zrozumienie przedstawionej analizy i wniosków. Świadczy to o bardzo głębokiej wiedzy i zrozumieniu badanych zagadnień przez Doktorantkę.

Moją generalną uwagę krytyczną do pracy stanowi brak jednoznacznego opisu w rozprawie, które prace badawcze i technologiczne zostały wykonane osobiście przez Doktorantkę. Nie mam wątpliwości że wszystkie prace związane z przeprowadzonymi pracami eksperymentalnymi i analizami wyników przedstawione w rozprawie są wykonane samodzielnie przez Doktorantkę, natomiast brakuje informacji o udziale Doktorantki w pracach symulacyjnych, projektowaniu i charakteryzacji światłowodów nieliniowych opracowaniu układów laserowych i wzmacniaczy, itp.

Ponadto od tak dobrej pracy oczekiwałbym także szerszej analizy i umieszczenia otrzymanych wyników w kontekście dotychczasowych osiągnięć raportowanych przez inne grupy badawcze. Jako recenzent, który od wielu lat prowadzi badania w zakresie światłowodów nieliniowych jestem w stanie docenić znaczące osiągnięcia Doktorantki i dopowiedzieć, które wyniki stanowią istotne osiągnięcia na tle stanu wiedzy. Natomiast w rozprawie zabrakło takiego podsumowania oraz wskazania nowych celów i zagadnień badawczych, które warto podjąć. Pozostałe moje krytyczne uwagi zostały zawarte w analizie rozdziałów 3- 6.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

W podsumowaniu, wszystkie krytyczne uwagi dotyczące nielicznych słabszych elementów przedstawionej pracy nie podważają w żaden sposób mojej bardzo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej jako całości oraz ważnych i oryginalnych osiągnięć badawczych Doktorantki.

Uzyskane wyniki stanowią ważny element aktualnych badań światowych dotyczących przestrajalnych światłowodowych źródeł światła laserowego w oparciu o wykorzystanie zjawisk nieliniowych.

Uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska oraz dotychczasowy dorobek naukowy mgr inż. Olgi Szewczyk spełniają warunki przewidziane ustawą o tytułach i stopniach naukowych i mogą być podstawą do ubiegania się o stopień doktora w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy Pani mgr inż. Olgi Szewczyk za wysoki poziom naukowy potwierdzony trzema pracami opublikowanymi w czasopismach z IF, zastosowanie oryginalnych metod badawczych do otrzymania unikalnych źródeł solitonowych przestrajalnych w zakresie 1,4 - 2,0 mikronów oraz eksperymentalne porównanie właściwości impulsowych źródeł światła wykorzystujących zjawiska koherentnego supercontinuum i samoprzesunięcia częstotliwości solitonów. Otrzymane wyniki w tym zakresie mają istotne znaczenie dla zrozumienia mechanizmów zachodzących w światłowodach nieliniowych, ich wpływu na obecność szumu i koherencję impulsów oraz na rozwój przestrajalnych światłowodowych źródeł światła w zakresie bliskiej podczerwieni.

Warszawa, 10.01.2024

Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński