



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
“Lasery impulsowe wykonane w oparciu o technologię
światłowodów fluorkowych na zakres średniej podczerwieni”
mgr inż. Łukasza Pajewskiego

Recenzja została przygotowana na wniosek Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Stosowana i Telekomunikacja Politechniki Wrocławskiej

Rozprawa doktorska jest poświęcona badaniom nad budową laserów światłowodowych emitujących w zakresie średniej podczerwieni. Praca obejmuje szeroko zakrojony zakres prac eksperymentalnych i numerycznych związanych z opracowaniem i implementacją układów światłowodowych opartych na aktywnych włóknach fluorkowych domieszkowanych erbem i dysprozem. prof. dr. hab. inż. Sławomira Sujeckiego na Wydziale Informatyki i Telekomunikacji Politechniki Wrocławskiej.

W rozprawie Doktorant podejmuje ważny i aktualny temat opracowania laserów światłowodowych emitujących w zakresie średniej podczerwieni w zakresie długości fal 2,5 – 3,5 mikrometra. Badania dotyczące laserów w tym zakresie są prowadzone na świecie od 30 lat. Jednak postęp technologiczny w opracowaniu wysokiej jakości światłowodów aktywnych wykonanych ze szkła fluorkowych pozwolił na znaczący wzrost zainteresowania tą tematyką i rozwój laserów w ostatnich 8-10 latach co umożliwiło wprowadzenie pierwszych laserów światłowodowych tego typu na rynek. Obecnie są prowadzone w laboratoriach uniwersyteckich oraz przemysłowych badania nad optymalizacją ich konstrukcji pod kątem otrzymywania laserów na wybranych długościach fal z zakresu średniej podczerwieni, niezawodności konstrukcji, optymalizacji ich kosztów oraz dostosowania parametrów laserów (m.in. długość fali, długość i energia impulsów, moc szczytowa, repetycja) do wybranych

WPLYNĘŁO

15-11-2024

RDN-III/412/2024



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

zastosowań w szczególności w medycynie, ochronie środowiska. Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Pajewskiego doskonale się wpisuje w tę aktualną tematykę badawczą. Jednym z podstawowych problemów w budowie światłowodowych laserowych źródeł światła w części widma średniej podczerwieni jest dobór odpowiednich jonów ziem rzadkich do wytworzenia włókien aktywnych oraz schematów i źródeł pompujących, aby zapewnić wydajną, stabilną pracę laserów. W rozprawie doktorskiej Doktorant przedstawia oryginalne rozwiązania dla światłowodów fluorkowych domieszkowanymi jonami dysprozu, które nie są jeszcze dogłębnie zbadane, oraz rozwiązania systemów pompujących dla otrzymywania laserów impulsowych.

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Pajewskiego zawiera wyniki badań opublikowane w latach 2020-2023 w trzech artykułach naukowych w czasopismach naukowych w dziedzinie optyki ze współczynnikiem IF: w *Journal of Lightwave Technology*, *Journal of Physics - Photonics* oraz *Photonic Letters of Poland*. Doktorant jest pierwszym autorem we wszystkich powyższych pracach, co świadczy o jej wiodącej roli w przeprowadzonych badaniach. W pracy „*Experimental investigation of actively Q-switched Dy³⁺ doped fluoride single mode fiber laser operating near 3 μm*” opublikowanej w *Journal of Lightwave Technology* w 2023 roku przedstawiono wyniki dotyczące budowy i właściwości opracowanych impulsowych laserów światłowodowych wykorzystujących włókna fluorkowe domieszkowane dysprozem i pompowane laserami światłowodowymi o długości fali 1,1 μm. W pracy „*Gain-switched Dy³⁺:ZBLAN fiber laser operating around 3 μm*” opublikowanej w *Journal of Physics – Photonics* w 2020 roku przedstawiono konstrukcje impulsowego fluorkowego lasera światłowodowego domieszkowanego jonami dysprozu z wykorzystaniem mechanizmu modulacji wzmocnienia. Trzecia praca zatytułowana „*Experimental investigation of a mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser*” została opublikowanych w *Photonic Letters of Poland* w 2020 roku i dotyczyła budowy i charakteryzacji lasera światłowodowego wykorzystującego włókno fluorkowe domieszkowane jonami erbu.

Opublikowane prace pokrywają w pełni zakres badań stanowiących ocenianą rozprawę doktorską. Stanowi to dodatkową weryfikację oryginalności i wartościowego wkładu w rozwój dziedziny wykonaną przez niezależnych recenzentów. Zgodnie z bazą danych Web of Science publikacje związane z rozprawą doktorską były dotychczas cytowane 20 razy, z czego 17 to cytowania obce. Jest to znacząca liczba cytowań biorąc pod uwagę krótki czas od ich opublikowania i świadczy o zainteresowaniu środowiska wynikami prac badawczych doktoranta i współautorów.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Doktorant jest także współautorem 8 innych prac niezwiązanych bezpośrednio z rozprawą doktorską, opublikowanych w czasopiśmie z współczynnikiem IF oraz 13 wystąpień konferencyjnych na konferencjach krajowych i międzynarodowych. Doktorant prezentował osobiście wyniki tylko na jednej konferencji krajowej, na XII Sympozjum Techniki Laserowej w 2018 roku. Świadczy to o niewielkiej aktywności w osobistym udziale w upowszechnianiu wyników badań w stosunku liczby prac i prezentacji konferencyjnych, których jest współautorem oraz w porównaniu z dorobkiem innych doktorantów na tym samym etapie kariery. Doktorant nie przedstawił także osiągnięć w prowadzeniu projektów badawczych oraz ochronie własności intelektualnej w postaci zgłoszeń patentowych.

W swojej rozprawie doktorskiej Doktorant postawił główną tezę badawczą o brzmieniu:

„Możliwa jest konstrukcja impulsowego układu laserującego generującego w zakresie długości fal zbliżonych do $3\mu\text{m}$ z wykorzystaniem włókien ZBLAN domieszkowanych jonami dysprozu”,

oraz dwie dodatkowe hipotezy badawcze:

1. *„Możliwe jest skonstruowanie lasera impulsowego przy zastosowaniu modulacji wzmocnienia, który wykorzystuje jako medium aktywne włókno $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ ”*
2. *„Zastosowanie szybkich modulatorów dobroci umożliwi skonstruowanie lasera impulsowego przy zastosowaniu modulacji dobroci, który wykorzystuje jako medium aktywne włókna $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ i osiąga moc szczytową $>100\text{W}$ oraz szerokość impulsu mniejszą niż 100ns ”*.

Wszystkie tezy zostały jasno i precyzyjnie zdefiniowane, umożliwiając ich jednoznaczną weryfikację. Na podstawie analizy przedłożonej rozprawy stwierdzam, że wszystkie elementy tez zostały systematycznie zbadane przed Doktoranta i pozytywnie zweryfikowane.

Praca doktorska mgr inż. Łukasza Pajewskiego składa się z 6 rozdziałów. Rozdziały 1 i 2 stanowią wprowadzenie merytoryczne do pracy obejmujące motywację podjęcia tematu, wprowadzenie podstawowych pojęć oraz dogłębną analizę stanu wiedzy w dziedzinie laserów światłowodowych emitujących w zakresie średniej podczerwieni. Główna część pracy obejmująca oryginalne wyniki prac badawczych wykonanych przez Doktoranta jest zawarta w rozdziałach 3 i 4. W rozdziale 5 przedstawiono wnioski końcowe i podsumowanie pracy wraz z odniesieniem do tezy rozprawy.

Rozdziały 1 i 2 poza opisem podstawowych pojęć dotyczących tematyki pracy zawierają bardzo dogłębne i dobre opisy rozważanych w stanie wiedzy światłowodów aktywnych



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

domieszkowanych jonami ziem rzadkich, metod modulacji laserów światłowodowych oraz obszarów zastosowań systemów opartych na promieniowaniu laserowym średniej podczerwieni. Rozdziały mają wysoki walor dydaktyczny i świadczą o głębokiej i szerokiej wiedzy Doktoranta w dziedzinie systemów średniej podczerwieni. Szczególnie interesujący jest rozdział 2.5, w którym Doktorant przedstawia aktualny stan wiedzy rozwoju włókien aktywnych dla średniej podczerwieni domieszkowanych różnymi jonami ziem rzadkich oraz odnosi się do ich zalet i ograniczeń. Doktorant powinien rozważyć opublikowanie informacji zawartych w rozdziałach 1 i 2 jako osobnej publikacji przeglądowej.

Rozdział 3 zawiera opis modelu mesmerycznego lasera światłowodowego wykorzystującego światłowód ze szkła fluorkowego ZBLAN domieszkowanego jonami erbu oraz opis konstrukcji i charakterystyki takiego lasera zbudowanego przez Doktoranta. Zastosowanie modelu numerycznego pozwoliło na zbudowanie lasera na podstawie zasymulowanych parametrów. Charakterystyka zbudowanego lasera wykazała zgodność wyników eksperymentalnych z przewidywanymi przez model, co zweryfikowała poprawność opracowanego modelu numerycznego lasera. Zbudowany laser pracy ciągłej emitował fale o długości $2,8 \mu\text{m}$ i osiągnął sprawność kwantową na poziomie 24% oraz moc wyjściową 2 W. Otrzymane parametry sprawności kwantowej i długości fali emisji nie odbiegają od typowych wyników otrzymywanych przez inne grupy badawcze, natomiast moc wyjściowa jest stosunkowo niska. Niska moc wyjściowa jest związana z degradacją termiczną końcówek włókna ZBLAN. Doktorant przedstawił w pracy metody ograniczenia degradacji włókna i zwiększenia mocy na podstawie badań literaturowych.

Rozdział 4 zawiera oryginalne wyniki prac eksperymentalnych Doktoranta dotyczących budowy laserów pracy ciągłej oraz impulsowych opartych na aktywnych włóknach fluorkowych domieszkowanych dysprozem i wykorzystujących modulacje dobroci oraz wzmocnienia. Ten rozdział przedstawia najważniejsze osiągnięcia naukowe Doktoranta opisane w dysertacji oraz opublikowane w dwóch publikacjach w czasopiśmie ze współczynnikiem IF. Doktorant szczegółowo omówił konstrukcje 3 typów laserów: lasery pracy ciągłej, z modulacją wzmocnienia oraz modulacją dobroci. Ponadto przedstawił wyniki szczegółowej charakterystyki generowanego promieniowania obejmujące długości generowanej fali, energię impulsu, moc wyjściową i szczytową oraz analizę sprawności kwantowej i prognozy akcji laserowej. W analizie zostały uwzględnione także wpływy częstotliwości repetycji na parametry wyjściowe badanych laserów oraz analizę czynników wpływających na ograniczenia proponowanych konstrukcji. Przedstawione wyniki mają



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

wysoką wartość naukową i praktyczną, Doktorant przedstawił konstrukcje laserów o rekordowej mocy szczytowej w przypadku zastosowania modulacji dobroci oraz o rekordowo krótkich impulsach w przypadku zastosowania modulacji wzmocnienia.

Ostatni Rozdział 5 zawiera szczegółowe podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych w odniesieniu do stanu wiedzy i wykazanie pozytywnej weryfikacji tez rozprawy doktorskiej. Doktorant w Rozdziale 5 zawarł także krótkie podsumowanie ograniczeń przedstawionych konstrukcji i zaproponował także metody ich rozwiązania. Pewien niedosyt budzi brak podsumowania konstrukcji laserów w formie tabeli zawierających również dla porównania wyniki osiągnięte przez inne grupy badawcze. Pozwoliłoby to jasno przedstawić oryginalny wkład Doktoranta w rozwój dziedziny.

Przedstawioną przez mgr inż. Łukasza Pajewskiego rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Praca zawiera nowe, wartościowe wyniki dotyczące opracowania nowych konstrukcji impulsowych laserów światłowodowych opartych na włóknach fluorkowych domieszkowanych dysprozem. Doktorant wykazał, że możliwe jest zbudowanie lasera z modulacją dobroci opartego na pompowaniu znanym powszechnie układem lasera światłowodowego emitującego na długości fali 1,1 mikrometra. Pomimo ograniczonej wydajności kwantowej przy pompowaniu laserami o długości fali 1.1 mikrometra (8-12%) Doktorant wykazał, że konstrukcja takiego lasera jest stosunkowo prosta do realizacji i praktyczna, gdyż opiera się na komercyjnie dostępnych komponentach, a jego praca jest stabilna i potencjalnie pozwala na otrzymywanie laserów o wybranej długości fali z zakresu 2,8 – 3,4 mikrometra poprzez zmianę parametrów wnęki i mocy pompującej. Niestety praktyczna demonstracja ogranicza się do pokazania pracy lasera dla dwóch długości fal 2,91 oraz 3,00 mikrona. Znacznie więcej pracy Doktorant poświęcił analizie możliwości modyfikacji długości impulsów przy zastosowaniu modulacji dobroci oraz wzmocnienia. Są to znane metody otrzymywania nanosekundowej pracy impulsowej w laserach światłowodowych, natomiast do tej pory istniało niewiele prac badawczych dedykowanych ich zastosowaniom w przypadku włókien fluorkowych domieszkowanych dysprozem. Doktorant wykazał, że przy zastosowaniu modulacji dobroci i optymalizacji mocy i częstotliwości reperacji możliwe jest otrzymywanie impulsów w zakresie 74 – 200 ns przy utrzymaniu energii impulsu w zakresie 4 – 12 μJ . Pozwoliło to uzyskać w badanych układach rekordową moc szczytową 183 W, w porównaniu z wcześniej raportowanymi w literaturze podobnymi układami.

Na szczególną uwagę zasługują jednak prace badawcze Doktoranta nad zastosowaniem modulacji wzmocnienia w impulsowych laserach światłowodowych opartych na szklach



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

fluorkowych domieszkowanych dysprozem. Konstrukcja takich laserów jest znacznie prostsza niż w przypadku zastosowania modulacji dobroci, gdyż modulator akustooptycznych znajduje się w tym przypadku poza rezonatorem laserowym, ale jednocześnie otrzymywane moce szczytowe są niższe, a długości impulsu dłuższe. Doktorant zoptymalizował układ lasera z modulacją wzmocnienia otrzymując rekordowo krótki impuls 183 ns przy utrzymaniu mocy szczytowej na poziomie 3,8 W dla układów stosujących pompowanie laserem o długości fali 1,1 μm . Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że wykonane przez Doktoranta konstrukcje światłowodów charakteryzują się ograniczoną mocą wyjściową w stosunku do najlepszych wyników raportowanych literaturze. Doktorant przeanalizował w pracy to organicznie i wskazał na sposoby rozwiązania tego problemu.

Praca jest wyróżniająca pod względem metodologicznym i technologicznym. Praca bardzo precyzyjnie prezentuje przebieg i wyniki wszystkich przeprowadzonych eksperymentów zawierając opisy metodologii pomiarów oraz rodzaj aparatury użytej w trakcie badań. Pozwala to na dogłębną ocenę metodologii użytej przez Doktoranta i stwierdzenie, że Doktorant użył w pracy właściwych metod badawczych, a przedstawione wyniki są wiarygodne. Przedstawione analizy i wnioski są oparte na solidnych podstawach naukowych. Sposób przygotowania rozprawy świadczy o bardzo wysokich umiejętnościach badawczych i wiedzy zdobytej przez Doktoranta. Dodatkowo na uznanie zasługują prace technologiczne Doktoranta związane z przygotowaniem włókien fluorkowych do pracy w układach laserowych. Włókna fluorkowe mają odmienne właściwości mechaniczne od światłowodów krzemionkowych, dlatego prawidłowe opracowanie ich cieciska prostego i kąowego, jak również justowanie układów światłowodowych względem elementów optyki objętościowej wymagało od Doktoranta opanowania wysokich umiejętności technicznych w tym zakresie.

Moją generalną uwagę krytyczną do pracy stanowi brak dyskusji nad zastosowaniem wyników badań doktoranta do konstrukcji laserów całkowicie światłowodowych. Jednym z głównych motywacji rozwoju laserów światłowodowych jest możliwość konstruowania laserów bezobsługowych, kompaktowych odpornych na wstrząsy, kurz i inne warunki zewnętrzne – a to jest w stanie zapewnić tylko konstrukcja całkowicie światłowodowa bez użycia objętościowych elementów optycznych. W dyskusji wyników całkowicie pominięto ten niezwykle istotny aspekt, pominięto wyzwania związane z opracowaniem sprzęgaczy, modulatorów dla włókien fluorkowych oraz integracji światłowodów krzemionkowych i fluorkowych.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Dodatkowo w pracy w sposób bardzo ograniczony omówiono możliwość konstrukcji laserów w zakresie 3,0 – 3,4 mikrona, co jest największą motywacją do stosowania dysprozu jako aktywnej domieszki w szklach fluorkowych. Prace Doktoranta w tym zakresie ograniczają się do bardzo krótkiego opisu i demonstracji lasera emitującego fale o długości fali 3004 nm, czyli niewiele dłuższej od lasera emitującego 2940 nm, któremu poświęcono większość rozprawy. Nie omówiono w rozprawie parametrów konstrukcji proponowanych laserów z modulacją wzmocnienia i dobroci które pozwoliłyby na budowę laserów o emisji na dłuższych falach niż 3 μm .

Pewien niedosyt budzi także brak eksperymentalnej weryfikacji zastosowania endcapów do poprawienia parametru mocy wyjściowej w rozważanych konstrukcjach, pomimo że jest to znana metoda i wskazywana w swojej analizie przez Doktoranta jako metoda do podniesienia progu degradacji końcówek światłowodów fluorkowych.

Praca jest bardzo dobra pod względem edycyjnym i formalnym. Jest napisana bardzo starannie, przejrzysto i co istotne prostym językiem pozwalającym na zrozumienie opisywanych zagadnień badaczom, którzy nie są specjalistami w dziedzinie. Praca 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 Doktoranta.

Chciałem zwrócić jednak uwagę na dwa zagadnienia formalne wymagające komentarza Doktoranta:

- Symbol A_{eff} jest opisany w opisie oznaczeń stosowanych we wzorach oraz w tekście rozprawy jako ‘powierzchnia przekroju włókna domieszkowanego’. Powszechnie symbol A_{eff} oznacza w literaturze światłowodowej efektywne pole modowe. Nie jest jasne czy autor rozprawy używa ww. symbolu w innym znaczeniu niż zazwyczaj jest przyjęty w literaturze naukowej, czy raczej jest to kwestia niewłaściwego opisu. W każdym przypadku ta kwestia powinna być zaadresowana w tekście rozprawy.
- W odniesieniu do termicznego trwałego łączenia światłowodów doktorant posługuje się sformułowaniem ‘zgrzewanie’. Powszechnym terminem stosowanym w literaturze polskojęzycznej jest pojęcie ‘spawanie’ jako bezpośrednie tłumaczenie terminu z języka angielskiego ‘splicing’, usankcjonowane także nazwą urządzenia do ich łączenia - ‘spawarka światłowodowa’. Oczywiście proces łączenia termicznego



światłowodów fluorkowych odbywa się w niższych temperaturach niż w przypadku typowych światłowodów krzemionkowych i doktorant ma prawo wprowadzenia własnego nazewnictwa, ale to wymaga merytorycznego uzasadnienia w rozprawie wprowadzenia nowego terminu w zastępstwie powszechnie stosowanego.

Ponadto, w pracy można znaleźć kilka niedociągnięć o charakterze edycyjnym i stylistycznym:

- Jakość niektórych rycin w tekście. Uwaga dotyczy m.in. rys. 2, 3, 4, 5, 29, 30, 48, 50 oraz 63. Rysunki są niepotrzebnie powiększone w stosunku do ich oryginalnej wielkości, nie jest to uzasadnione ich treścią, grubości linii i wielkości czcionek na ww. rysunkach oraz w opisie osi wyraźnie odbiegają od pozostałych rysunków i zaburzają spójność stylistyczną pracy.
- Moje wątpliwości budzi sposób odnoszenia się w rozprawie do niektórych rysunków pochodzących z publikacji obcych, które zostały zmodyfikowane przez autora, aby zachować spójność językową rozprawy. Autor postanowił w rysunkach zapożyczonych z anglojęzycznych publikacji zastąpić oryginalny opis osi opisami w języku polskim. Jest to bardzo dobra decyzja, gdyż pozwala na utrzymanie jednorodnego języka w całości rozprawy. Natomiast rysunki są podpisywane bezpośrednią referencją do źródła. Uważam, że ze względu na modyfikację oryginalnego rysunku zamiast bezpośredniej referencji do materiału źródłowego powinien się znaleźć w opisie rysunku odnośnik wskazujący zarówno źródło jak i fakt, że rysunek został zmodyfikowany poprzez np. zmianę języka opisu osi. Odniesienie się do źródła rysunku powinno odbywać się np. w formie 'na podstawie [nr ref.]'. Należy jednak podkreślić, że doktorant prawidłowo odnosi się do materiałów źródłowych odwołując się do nich. Ponadto odnośniki w niektórych zmodyfikowanych rysunkach uważam za prawidłowe np. opisy do rys. 17, 18.
- Rys. 9: brak zdefiniowanej prawidłowo skali na osi Y. Nie wiadomo w jakich jednostkach jest ona podana. Ponadto mam wątpliwości czy prawidłowym opisem osi Y jest transmisja czy raczej powinna to być transmitancja?
- Rys 52: brak jasno opisanej osi Y (poza symbolem).
- Rys. 71, 72 i 74: opis osi Y jako 'sygnał' nie wyczerpuje znamion opisu osi w pracy badawczej, nawet jeśli wartość nie jest istotna dla meritum opisu.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

- Doktorant nie stosuje spacji przy podawaniu wartości i ich wielkości fizycznych, co jest powszechnie stosowane w literaturze naukowej polskojęzycznej i angielskojęzycznej. Nie stanowi to poważnego błędu edycyjnego, ale utrudnia szybkie czytanie tekstu.

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 Doktoranta. Uzyskane wyniki stanowią ważny element aktualnych badań światowych dotyczących budowy laserów światłowodowych w zakresie średniej podczerwieni wykorzystujących szkła fluorkowe.

Uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska oraz dotychczasowy dorobek naukowy mgr inż. Łukasza Pajewskiego spełniają warunki przewidziane ustawą o tytułach i stopniach naukowych i mogą być podstawą do ubiegania się o stopień doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy Pana mgr inż. Łukasza Pajewskiego za jej wysoki poziom naukowy potwierdzony trzema pracami opublikowanymi w czasopiśmie z IF, a w szczególności za opracowanie i demonstrację konstrukcji nanosekundowego fluorkowego światłowodowego lasera domieszkowanego jonami dysprozu z wykorzystaniem modulacji wzmocnienia o rekordowo krótkim impulsie 183 ns pompowanego falą o długości 1,1 μm . Otrzymane wyniki mają istotne znaczenie dla praktycznych implementacji laserów światłowodowych emitujących w zakresie 2,8 – 3,4 μm , ze względu na zaproponowaną prostą konstrukcję i jego pompowanie dostępnymi źródłami laserowymi.

Warszawa, 10.11.2024

Z-CA DYREKTORA
Instytutu Geofizyki
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
Ryszard Buczyński
prof. dr hab. Ryszard Buczyński