

Białystok, dnia 2.08.2024 r.

dr hab. inż. Piotr Miluski, prof. PB
Politechnika Białostocka
Wydział Elektryczny
Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Światłowej
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, Polska
e-mail p.miluski@pb.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka techniczna i Telekomunikacja Politechniki Wrocławskiej

Tytuł rozprawy: Lasery impulsowe wykonane w oparciu o technologię światłowodów fluorkowych na zakres średniej podczerwieni

Autor rozprawy: mgr inż. Łukasz Pajewski

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Sławomir Sujecki

Podstawą recenzji jest Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Wrocławskiej z dn. 26.06.2024 o powołaniu mnie przez Radę na recenzenta rozprawy doktorskiej pt. „Lasery impulsowe wykonane w oparciu o technologię światłowodów fluorkowych na zakres średniej podczerwieni” autorstwa mgr. inż. Łukasza Pajewskiego.

1. Zakres rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Łukasza Pajewskiego pt. „Lasery impulsowe wykonane w oparciu o technologię światłowodów fluorkowych na zakres średniej podczerwieni” przedstawia nowe konstrukcje układów laserowych generujących promieniowania optyczne z zakresu średniej podczerwieni w szczególności 3 μ m. Lasery operujące na tych długościach fal znajdują zastosowania w spektroskopii, medycynie, przemyśle i telekomunikacji. Praca zawiera szeroki przegląd konstrukcji układów laserowych. Autor skupia się na układach laserowych do pracy ciągłej i impulsowej wykorzystujących włókna fluorkowe domieszkowane jonami erbu i dysprozu. Celem badawczym dysertacji jest analiza teoretyczna warunków akcji laserowej i opracowanie konstrukcji nowych układów laserowych opartych o emisje jonów erbu i dysprozu. Układy te zostały fizycznie zrealizowane przez Autora dysertacji i poddane charakteryzacji ich właściwości emisyjnych.

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej

Oceniana rozprawa została zawarta na 124 stronach. Treść pracy przedstawiona została w 6 rozdziałach. Struktura i układ pracy jest czytelny. Wszystkie opisy eksperymentów poprzedzone

zostały szerokim wstępem teoretycznym. Wyraźnie oddzielona jest część własnej pracy Doktoranta.

Wprowadzenie zawiera obecnie znane zastosowania laserów generujących w zakresie średniej podczerwieni (MIR) w chirurgii laserowej jak również w badaniach i obróbce polimerów w tym włókien światłowodowych. Autor skupia się na absorpcji promieniowania $3\mu\text{m}$, umożliwiającą precyzyjną ablację bez nagrzewania otoczenia obszaru obróbki co jest szczególnie korzystne w chirurgii i obróbce materiałów. Zastosowania laserów o emisji w zakresie $>2,5\mu\text{m}$ obejmują także obszary militarne i telekomunikację. Autor przedstawia widma emisyjne pierwiastków ziem rzadkich (Er^{3+} , Ho^{3+} , Pr^{3+} oraz Dy^{3+}). W rozdziale drugim analizuje matryce szkieł fluorkowych (ZBLAN, InF_3 (IFG)) pod kątem ich możliwości wykorzystania w układach laserów $3\mu\text{m}$, koncentrując się na tłumienności spektralnej i konstrukcji światłowodu (typu podwójny płaszcz). Rozdział trzeci dotyczy analizy numerycznej laserów Er^{3+} :ZBLAN i ich parametrów. Rozdział czwarty przedstawia analizę układów laserów Dy^{3+} :ZBLAN, techniki modulacji dobroci i wzmocnienia. Przedstawia również opracowane konstrukcje laserów do pracy ciągłej i impulsowej z różnymi konfiguracjami wnęk rezonansowych (w tym z zastosowaniem akustooptycznego modulatora AOM). Każdy z rozdziałów zawiera podsumowanie uzyskanych efektów pracy. Rozprawa kończy się analizą wyników i osiągnięć opracowanych konstrukcji laserów emitujących w zakresie $3\mu\text{m}$ w odniesieniu do obecnie znanych rozwiązań, dyskusję oraz wnioski. W końcowej części zawarta jest bibliografia.

3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Wykorzystane w rozprawie doktorskiej piśmiennictwo tworzą 102 pozycje. Stanowi ono zestaw w głównej mierze artykułów naukowych uzupełnionych o wydawnictwa książkowe oraz strony internetowe dotyczący poruszanych w rozprawie zagadnień. Źródła literaturowe nie budzą zastrzeżeń merytorycznych. Znacząca ich część to artykuły opublikowane w międzynarodowych czasopismach.

4. Ocena celu pracy doktorskiej

Tematyka generacji akcji laserowej w zakresie $3\mu\text{m}$ jest bardzo atrakcyjna w odniesieniu do możliwości nowych aplikacji. Wybrany przez Doktoranta zakres spektralny pozwala na uzyskanie szeregu korzyści (np. precyzja ablacji) w odniesieniu do obecnych konstrukcji układów laserowych. W nawiązaniu do tezy badawczej iż możliwa jest konstrukcja impulsowego układu laserującego generującego w zakresie długości fal zbliżonych do $3\mu\text{m}$ z wykorzystaniem włókien ZBLAN domieszkowanych jonami dysprozu Autor formułuje cel badań jako opracowanie konstrukcji lasera impulsowego przy zastosowaniu modulacji wzmocnienia oraz modulacji dobroci. Celem wykorzystania szybkich modulatorów dobroci było zwiększenie mocy szczytowej i skrócenie czasu generowanych impulsów.

5. Ocena rozprawy

We „Wprowadzeniu” Pan mgr inż. Łukasz Pajewski przedstawia dziedzinę zastosowań układów generujących promieniowanie laserowe z zakresu obszaru średniej podczerwieni (MIR) ze szczególnym uwzględnieniem ich zastosowań (badania, obróbka polimerów, obróbka włókien światłowodowych, chirurgia laserowa). Szczególną uwagę Autor skupia na aspekt absorpcji promieniowania z zakresu $3\mu\text{m}$ i impulsową pracę umożliwiającą precyzyjną ablację bez nagrzewania większych objętości zarówno materiałów polimerowych jak i tkanek miękkich. Dla

tego zakresu spektralnego znacząco zmniejsza to obszar uszkodzeń dla tkanki miękkiej (poniżej $10\mu\text{m}$). Kolejną wskazywaną dziedziną zastosowań laserów generujących fale z zakresu $>2,5\mu\text{m}$ są zastosowania militarne (w systemach przechwytyjących broń nuklearną, lasery neutralizujące broń naprowadzaną termicznie), telekomunikacja w przestrzeni otwartej (zakres $3-5\mu\text{m}$, uważany jest za zakres promieniowania bezpieczny dla wzroku). Dodatkowo, rozdział ten zawiera omówienie widm emisyjnych najpopularniejszych pierwiastków ziem rzadkich oraz przegląd konstrukcji układów laserowych przeznaczonych do pracy ciągłej (Er^{3+} , Ho^{3+}) i impulsowej (Er^{3+} , $\text{Ho}^{3+}:\text{Pr}^{3+}$, Dy^{3+}). Szczególną uwagę Doktorant zwraca na dobór matrycy (ZBLAN, InF_3) jako kluczowy aspekt w konstrukcji laserów światłowodowych. Kolejnym parametrem laserów impulsowych jest zmiana parametrów układu laserowego umożliwiających generację impulsów. Spośród obecnie znanych metod Autor opisuje modulację wzmocnienia wnęki rezonansowej, modulację dobroci wnęki rezonansowej oraz synchronizację modów podłużnych. W końcowej części rozdziału Autor, bazując na wcześniejszym wprowadzeniu teoretycznym, stawia tezę oraz proponuje hipotezy badawcze:

Teza:

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

Hipotezy badawcze:

- „Możliwe jest skonstruowanie lasera impulsowego przy zastosowaniu modulacji wzmocnienia, który wykorzystuje jako medium aktywne włókno $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$.
- Zastosowanie szybkich modulatorów dobroci umożliwia 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 .”

Rozdział drugi szczegółowo przedstawia obecnie wykorzystywane w technice światłowodowej matryce z uwzględnieniem ich istotnych parametrów pod kątem uzyskania akcji laserowej ($3\mu\text{m}$). Swoją uwagę Pan mgr inż. Łukasz Pajewski skupia na grupie szkieł fluorkowych: szkło fluorocytrkonianowe ZFG ($53\% \text{ZrF}_4$ $20\% \text{BaF}_2$ $4\% \text{LaF}_3$ $3\% \text{AlF}_3$ $20\% \text{NaF}$) nazywane inaczej ZBLAN oraz szkło fluoroindowe IFG ($40\% \text{InF}_3$ $20\% \text{ZnF}_2$ $20\% \text{SrF}_2$ $20\% \text{BaF}_2$). W wyniku porównania tłumienności spektralnej powyższych szkieł w zakresie do $3,65\mu\text{m}$ i wybrany zakres spektralny generacji Doktorant typuje jako matrycę ZBLAN do nowych konstrukcji laserów włóknowych. W dalszej części przedstawione zostały wady i zalety rozwiązań światłowodowych laserów, cechy konstrukcji typu podwójny płaszcz oraz jej modyfikacje zwiększające absorpcję pompy we włóknie światłowodowym. Dodatkowo skrótowo opisana została metoda wytwarzania światłowodów fluorkowych metodą ciągnięcia. W rozdziale 2.4 Autor przedstawia podstawy teoretyczne pracy układów laserujących opartych o szkła fluorkowe i omawia schematy energetyczne i możliwości wzbudzenia jonów domieszek aktywnych (holm, erb, dysproz). Rozdział trzeci stanowi analizę numeryczną układu laserowego $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ pracującego w reżimie pracy ciągłej. Wyniki symulacji i optymalizacji parametrów konstrukcji lasera (m.in. długość włókna aktywnego, odbiciowość wnęki rezonansowej) wykorzystane zostały do zaprojektowania i skonstruowania lasera CW $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$. Opracowana konstrukcja pozwoliła na określenie warunków pracy lasera i poznanie problemów technicznych towarzyszących laserom włóknowym ZBLAN (nagrzewanie się czoła włókna aktywnego, odprowadzanie ciepła powierzchnią boczną, konstrukcja zwierciadeł wnęki rezonansowej, zabezpieczenie czoła światłowodu przed wpływem atmosfery). Należy tutaj zauważyć, że szkła fluorkowe są znacznie bardziej wymagające od krzemionki pod względem dopuszczalnej gęstości mocy i zagrożone

degradacją na skutek wilgoci. W wykonanym układzie Autor uzyskał akcję laserową: niski próg rozpoczęcia akcji laserowej ok. 100mW, sprawność kwantowa ok. 24%, maksymalna moc wyjściowa 2,09W. Autor przeanalizował również wpływ mocy pompy na generowane widmo laserowe. Badania te zostały opublikowane w manuskrypcie „Experimental investigation of a mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser“, Photonics Letters of Poland, 2020, vol. 12, nr 3, s. 73-75 oraz “Experimental investigation of actively Q-switched Er³⁺:ZBLAN fiber laser operating at around 2.8 μm“, Sensors, 2020, vol. 20, nr 16, art. 4642, s. 1-11. Rozdział czwarty dotyczy analizy eksperymentalnej układów laserowych Dy³⁺:ZBLAN. Zawiera on przegląd obecnie znanych laserów wykorzystujących jony dysprozu do uzyskania akcji laserowej. Autor zwraca uwagę na fakt, że niewiele obecnie znanych konstrukcji wykorzystuje techniki modulacji dobroci i wzmocnienia. Technika modulatorem dobroci została wykorzystana w dalszej części pracy w układzie lasera CW Dy³⁺:ZBLAN. Konstrukcja lasera domieszkowanego dysprozem może zostać wzbudzana długością fali 1,1μm oraz 2,8μm. Lasery wzbudzone promieniowaniem o długości fali 2,8μm umożliwiają uzyskanie wyższej efektywności (do 60%), jednak wymagają one znacznie droższych źródeł promieniowania wzbudzającego. Dlatego też Autor dysertacji zdecydował się na budowę własnego źródła promieniowania pompującego emitującego długość fali 1,1μm. Optymalizując konstrukcje lasera, Pan mgr inż. Łukasz Pajewski, poddał testom trzy konfiguracje wnęki laserowej (rezonator utworzony przez wykorzystanie odbić Fresnela, układ wykorzystujący zjawisko odbicia Fresnela od strony wzbudzającej oraz przylegające złote zwierciadło jako zakończenie rezonatora oraz układ wykorzystujący zjawisko odbicia Fresnela od strony wzbudzającej oraz oddalone złote zwierciadło jako zakończenie rezonatora). W pierwszym przypadku (odbicia Fresnela na obu zakończeniach rezonatora) nie możliwe było uzyskanie akcji laserowej. W pozostałych dwóch przypadkach Doktorant porównał uzyskane parametry akcji laserowej. Każda z konstrukcji posiadała pewne charakterystyczne cechy. Dla układu wykorzystującego przylegające złote zwierciadło jako zakończenie rezonatora uzyskano maksymalną moc wyjściową 157mW przy ok. 8% efektywności kwantowej (próg laserowania 2850mW). Dla układu z oddalonym zwierciadłem i soczewką sferyczną natomiast moc wyjściową 149mW przy ok. 9% nachyleniu zbocza (próg laserowania 2950mW). Autor planując wykorzystanie w kolejnych konstrukcjach modulatora akustooptycznego zbadał poziom strat wprowadzanych przez modulator w trybie transmisji we wnęce rezonansowej. W przypadku układu CW Dy³⁺:ZBLAN z umieszczonym we wnęce rezonansowej modulatorem dobroci Doktorant uzyskał maksymalną moc wyjściową ok. 125mW (próg akcji laserowej 3150mW, nachylenie zbocza wyniosło 8,5%). W rozdziale 4.3 opisana została opracowana konstrukcja lasera impulsowego Dy³⁺:ZBLAN z modulacją wzmocnienia generujący falę o długości 2,943μm. Pan mgr inż. Łukasz Pajewski dokonał pełnej charakteryzacji układu (pomiar wpływu mocy pobudzającej i kształtu impulsu na parametry wyjściowe lasera). Doktorant wykazał, że kształt impulsów wyjściowych nie jest zależny od kształtu impulsów pobudzających. Najkrótszy uzyskany czas trwania impulsu (o profilu Gaussowskim) wyniósł 183ns przy pobudzeniu o mocy 534mW. Zbadana została również zależności średniej mocy układu generującego do średniej mocy układu pobudzającego. Sprawność kwantowa osiągnęła 12% a stosunek sygnał szum (SNR) 61,31dB co potwierdza wysoką jakość sygnału laserowego. Zmieniając długość światłowodu aktywnego (1,4m) Doktorant uzyskał zmianę długości generowanej fali (3,002μm) i wzrost szerokości impulsu do 492ns. Rezultaty prac zostały opisane w publikacji „Gain-switched Dy³⁺:ZBLAN fiber laser operating around 3μm,“ Journal of Physics Photonics. 2020, vol. 2, nr 1, s. 1-7. Szczególnie atrakcyjnym pod względem możliwości uzyskania pracy impulsowej jest zastosowanie aktywnej modulacji dobroci rezonatora z wykorzystaniem szybkiego modulatora akustooptycznego AOM z niskimi stratami wtarceniowymi. Układy te były pobudzane iterbowym

laserem impulsowym generującym sygnał o długości fali $1,1\mu\text{m}$. Uzyskana została znacząca poprawa parametrów pracy układu laserowego w stosunku do doniesień literaturowych. Autor zbadał układ z wykorzystaniem dwóch światłowodów o różnym poziomie domieszkowania dysprozem (2000ppm oraz 1000ppm). W pierwszym układzie (światłowod $0,9\text{m}$, średnica rdzenia $12,5\mu\text{m}$, poziom domieszki dysprozu 2000ppm) uzyskano czas trwania impulsu 74ns , energię impulsu $13,6\mu\text{J}$ oraz moc szczytową 183W . Warto podkreślić bardzo dobre parametry układu laserowego (wysoka moc szczytowa i krótki czas trwania impulsu) przekraczające prezentowane obecnie znane z doniesieniach literaturowych. Zastosowanie włókna o większej średnicy rdzenia (światłowod o długości $1,1\text{m}$, średnicy rdzenia $15\mu\text{m}$, poziom domieszki dysprozu 1000ppm) pozwoliło na osiągnięcie wyższej energii pojedynczego impulsu, wynoszącej $17\mu\text{J}$ co przy czasie trwania impulsu $84,5\text{ns}$ przekłada się na 201W mocy szczytowej. Wynik ten jest znaczącym osiągnięciem. Emitowana długość fali lasera (2912nm) pokrywa się z pasmem absorpcyjnym wody obecnej w tkankach ludzkich wskazując potencjał do zastosowania opracowanych laserów włóknowych $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ np. w chirurgii laserowej. Wyniki zostały opublikowane w publikacji „Experimental investigation of actively Q-switched Dy^{3+} doped fluoride single mode fiber laser operating near $3\mu\text{m}$ ”, *Journal of Lightwave Technology*, 2023, vol. 42, nr 2, s. 809-813. W dalszej części rozprawy Autor zawarł całościową analizę rezultatów uzyskanych w rozprawie doktorskiej oraz podsumował osiągnięcia prac nad nowymi konstrukcjami laserów emitujących w zakresie $3\mu\text{m}$. Rozprawę kończy bibliografia.

6. Uwagi do rozprawy

Tematyka ocenianej rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Łukasza Pajewskiego jest niewątpliwie nowatorska i znacząco poszerza wiedzę z zakresu nowych konstrukcji światłowodowych układów laserowych o emisji w zakresie $3\mu\text{m}$. Autor zawarł w dysertacji szeroki przegląd obecnego stanu wiedzy z zakresu konstrukcji układów laserowych domieszkowanych lantanowcami. Realizując postawiony cel opracował szereg konstrukcji układów laserowych domieszkowanych jonami erbu i dysprozu uzyskując wartościowe rezultaty nie odbiegające od osiągnięć światowych. Warto podkreślić technologiczny i konstrukcyjny charakter rozprawy doktorskiej. Dysertacja zawiera niewielkie i mało znaczące błędy językowe i edycyjne, które nie zmniejszają jej wysokiej wartości merytorycznej. Przeprowadzone prace eksperymentalne i dyskusję oceniam bardzo wysoko. Chciałbym przedstawić kilka pytań i poprosić Pana mgr. inż. Łukasza Pajewskiego o odniesienie się do nich:

1. W rozdziale trzecim Autor dokonał analizy numerycznej laserów $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ i ich parametrów, w tym problemów technicznych przy ich realizacji. Zważywszy na konstrukcję układów laserów $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$, czy analogiczne symulacje były prowadzone dla laserów opartych o światłowody domieszkowane jonami dysprozu? W jakim stopniu rezultaty przeprowadzonych symulacji mogą być ekwiwalentne?
2. Opisując proces ucinania światłowodów ZBLAN Autor stwierdza: „Dobór naprężeń nastąpił na podstawie metody prób i błędów przy oględzinach włókna z wykorzystaniem mikroskopu laboratoryjnego.”, str. 92. Czy możliwe jest zautomatyzowanie tego procesu? Czy zwiększyłyby to powtarzalność uzyskiwanych rezultatów?
3. „Ze względu na brak dostępu do technologii wytwarzania siatek Bragg’a we włóknach ZBLAN oraz brak możliwości spawania włókien ZBLAN z włóknami krzemionkowymi autor zdecydował się na zastosowanie technik związanych z odbiciowymi elementami objętościowymi w celu utworzenia wnęki rezonansowej oraz na zastosowanie nadmuchu

sprężonego powietrza w celu ograniczenia degradacji końca włókna.” str. 93. Czy Autor rozważał osadzenie chemiczne lub metodę naporowania złotego zwierciadła co stanowiłoby dodatkowe zabezpieczenie powierzchni czoła włókna światłowodowego?

4. Doktorant zaproponował w układzie impulsowego lasera Dy^{3+} :ZBLAN światłowody firmy Le Verre Fluoré domieszkowany dysprozem: światłowód 0,9m (średnica rdzenia $12.5\mu m$, poziom domieszki dysprozu 2000ppm) oraz światłowód o długości 1,1m (średnicy rdzenia $15\mu m$, poziom domieszki dysprozu 1000ppm). Jakie były kryteria doboru parametrów włókien aktywnych?
5. W pracy kluczowym elementem konstrukcji impulsowego układu laserowego wykorzystany został modulator akustooptyczny. Warto umieścić w pracy jego kluczowe parametry lub charakterystyki.

7. Wniosek końcowy

Tematyka nowych konstrukcji układów laserowych operujących w zakresie $3\mu m$ jest atrakcyjna i posiada szeroki potencjał aplikacyjny. Rezultaty przedstawione w dysertacji zasługują na szczególne uznanie ze względu na szereg problemów konstrukcyjnych i technologicznych które zostały zlokalizowane i rozwiązane w ramach realizacji rozprawy. Uzyskane rezultaty prac charakteryzuje wysoka wartość naukowa a parametry układów plasują się na światowym poziomie. Przedstawione rozwiązanie potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta. Na podstawie przeprowadzonej analizy rozprawy Pana mgr. inż. Łukasza Pajewskiego pt. „Lasery impulsowe wykonane w oparciu o technologię światłowodów fluorkowych na zakres średniej podczerwieni” stwierdzam, że zaprezentowana w rozprawie analiza **spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim**. Pan mgr inż. Łukasz Pajewski posiada znaczącą i szeroką wiedzę z zakresu konstrukcji światłowodowych układów laserowych w dyscyplinie naukowej **Informatyka Techniczna i Telekomunikacja**. Równocześnie **stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania** określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) i **wnioskuje o jej dopuszczenie do publicznej obrony**. Równocześnie, uwzględniając uzyskane przez Doktoranta rezultaty w tym przedstawione rozwiązania konstrukcyjne układów laserowych **wnioskuje o jej wyróżnienie**.

dr hab. inż. Piotr Miluski, prof. PB