



Warszawa, 11.11.2024

Dr hab. inż. Ryszard Piramidowicz, prof. PW  
Politechnika Warszawska  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych  
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki

**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

**1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza pracy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Łukasza Pajewskiego, zrealizowana pod opieką promotorską prof. dr. hab. inż. Sławomira Sujeckiego, dotyczy zagadnień projektowania i konstruowania laserów światłowodowych na bazie włókien fluorkowych, generujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni (ang. mid-infrared, mid-IR). Główną tezą postawioną w rozprawie jest, że 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 stawia również dwie hipotezy badawcze, stanowiące, że możliwe jest skonstruowanie lasera impulsowego przy zastosowaniu modulacji wzmacnienia, który wykorzystuje jako medium aktywne włókno  $\text{Dy}^{3+}$ :ZBLAN oraz że zastosowanie szybkich modulatorów dobroci umożliwi skonstruowanie lasera impulsowego przy zastosowaniu modulacji dobroci, który wykorzystuje jako medium aktywne włókna  $\text{Dy}^{3+}$ :ZBLAN i osiąga moc szczytową ponad 100 W oraz szerokość impulsu mniejszą niż 100 ns.

Na całość rozprawy składa się pięć rozdziałów, zawierających wprowadzenie teoretyczne, wyniki analiz numerycznych i eksperymentów generacyjnych przeprowadzonych w układzie lasera erbowego (nb. nie wspomnianego w tezie i hipotezach badawczych) i dysprozowego, zakończone podsumowaniem.

Praca ma zdecydowanie charakter eksperymentalny (choć niepozbawiony elementów modelowania numerycznego) i wpisuje się w nurt prac badawczych nad nowymi źródłami promieniowania koherentnego, generującymi promieniowanie w trudno dostępnym dla typowych rozwiązań zakresie spektralnym średniej podczerwieni.

WPLYNĘŁO

26-11-2024

ASW-IT / 445 / 2024

**2. Czy w rozprawie przeprowadzono analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) w sposób właściwy, świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Wstęp teoretyczny rozpoczyna Autor od rozdziału pt. Wprowadzenie, w którym definiuje zakres widmowy średniej podczerwieni, a następnie przedstawia wybrane zastosowania źródeł światła z tego zakresu, dyskutując zwięźle obszary spektroskopii optycznej, zastosowań medycznych, aplikacje wojskowe oraz nowoczesną telekomunikację.

Kolejno, przedstawia i dyskutuje Autor układy laserowe wykorzystywane do generacji promieniowania z zakresu około 3  $\mu\text{m}$ . Nieco zaskakująco, Autor ogranicza przegląd rozwiązań jedynie do laserów światłowodowych, omawiając najważniejsze prace dotyczące akcji laserowej w zakresie średniej podczerwieni w układach włókien fluorkowych domieszkowanych jonami erbu holmu i dysprozu, nie wspominając o rozwiązaniach wykorzystujących klasyczne dielektryczne lasery objętościowe czy o układach z efektami nieliniowymi (generatory supercontinuum czy oscylatory parametryczne). Zaskakujący jest również brak odniesień do półprzewodnikowych laserów kwantowych wewnątrzprasmowych (QCL) i międzypasmowych (ICL), będących obecnie typowo stosowanymi źródłami półprzewodnikowymi dla tego zakresu spektralnego.

W dalszej części omawia Autor podstawowe metody uzyskiwania pracy impulsowej w układach laserowych - modulację wzmocnienia, dobroci oraz technikę synchronizacji modów podłużnych (ang. mode locking). Rozdział wprowadzający kończy Autor podsumowaniem z obszernym zestawieniem laserów światłowodowych generujących promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni, wykorzystujących wyżej wskazane metody uzyskiwania pracy impulsowej, oraz sformułowaniem tezy rozprawy.

W rozdziale 2, zatytułowanym „Wstęp teoretyczny”, omawia Autor ośrodki aktywne laserów na zakres średniej podczerwieni (konsekwentnie ograniczając się do materiałów szklanych). Analizuje wpływ energii fononów na właściwości transmisyjne, konkludując, że dla zakresu spektralnego ok. 3  $\mu\text{m}$  najlepszym wyborem będą włókna na bazie szkła fluorkowych. Omawia i analizuje geometrie włókien aktywnych (a w szczególności włókien dwupłaszczowych), wspomina lakonicznie o technologii wytwarzania, a następnie omawia zjawiska absorpcji, emisji spontanicznej i emisji wymuszonej oraz procesy odpowiedzialne za przejścia optyczne w zakresie około 3  $\mu\text{m}$  w układach laserów holmowych, erbowych i dysprozowych na bazie szkła fluorkowych. Nawiasem mówiąc, fragment ten pozostawia czytelnika z wrażeniem pewnego niedosytu poznawczego, związanego z brakiem bardziej szczegółowego omówienia procesów, takich jak np. absorpcja ze stanu wzbudzonego, transfer energii, relaksacja skrośna (niezbędnych do dobrego zrozumienia dalszej części pracy). Cennym uzupełnieniem części teoretycznej byłoby również wprowadzenie czytelnika w formalizm opisu procesów prowadzących do uzyskania akcji laserowej, z którego korzysta Autor kilkanaście stron dalej, w części poświęconej modelowaniu numerycznemu.

Kolejny, niewielki fragment analizy stanu wiedzy znajduje się, nieco zaskakująco dla czytelnika, w rozdziale czwartym (punkt 4.1. Stan wiedzy dotyczący laserów  $\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$ ) – Autor wymienia w nim najważniejsze (i nieliczne) dotychczasowe osiągnięcia zespołów naukowych w obszarze uzyskiwania akcji laserowej w zakresie średniej podczerwieni w szklach ZBLAN domieszkowanych jonami dysprozu.

Podsumowując, analiza stanu wiedzy, choć nieco chaotyczna i ograniczona jedynie do światłowodów włóknowych odnosi się do prawie 100 pozycji literaturowych, co, biorąc pod uwagę stosunkowo nieliczne publikacje w obszarze tematyki rozprawy, wydaje się być przeglądem wyczerpującym.

Pomimo pewnych trudności w nawigowaniu po rozprawie w poszukiwaniu rozproszonych informacji, analizę źródeł uznaję za przeprowadzoną w sposób poprawny, potwierdzający bardzo dobrą orientację Autora w literaturze światowej definiującej stan wiedzy w tematyce rozprawy.

### 3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Rozwiązanie postawionych zadań badawczych i jednocześnie potwierdzenie tez rozprawy zawierają rozdziały trzeci i czwarty.

Rozdział trzeci, zatytułowany „Analiza eksperymentalna oraz numeryczna układów laserowych  $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN”, oprócz kolejnego mini-fragmentu z analizą stanu wiedzy, zawiera wyniki modelowania numerycznego pracy lasera  $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN pobudzanego promieniowaniem o długości fali 975 nm oraz eksperymentalne wyniki badań generacji w tym układzie.

Bazując na równaniach bilansu i równaniach propagacji Autor sformułował model opisujący najważniejsze zjawiska zachodzące w układzie lasera włóknowego  $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN, który pozwolił na przeprowadzenie wszechstronnych numerycznych analiz akcji laserowej w trybie CW, uwzględniając wpływ parametrów spektroskopowych, geometrycznych, pobudzania optycznego oraz układu rezonatora. Wyniki modelowania pozwoliły na optymalizację parametrów konstruowanego przez Autora układu lasera włóknowego, opisywanego w dalszej części rozdziału trzeciego.

W zestawionym układzie eksperymentalnym Autor wykorzystał trzymetrowy odcinek dwupłaszczyznowego włókna  $\text{Er}^{3+}$ :ZBLAN z rezonatorem zdefiniowanym przez zewnętrzne zwierciadło wysoko-odbijające oraz odbicie fresnelowskie od drugiego końca włókna aktywnego. W takim układzie Autor uzyskał generację promieniowania o długości fali z zakresu między 2,791  $\mu\text{m}$  a 2,799  $\mu\text{m}$  (w zależności od poziomu mocy wejściowej) i mocy maksymalnej na poziomie ponad 2 W.

Rozdział czwarty „Analiza eksperymentalna układów laserowych  $\text{Dy}^{3+}$ :ZBLAN” zawiera wyniki prac Autora nad konstrukcją i badaniami parametrów lasera włóknowego ze szkła ZBLAN domieszkowanego jonami dysprozu. W odróżnieniu od poprzedniego rozdziału, ten nie zawiera modelu lasera ani wyników analiz numerycznych, co konstatuję z pewnym rozczarowaniem, bo wydaje się, że z tych dwóch systemów ten jest znacznie słabiej zbadany i opisany.

Do zestawienia układu Autor zdecydował się skonstruować samodzielnie laser pompujący na bazie włókna domieszkowanego iterbem z rezonatorem zdefiniowanym przez siatkę braggowską i odbiciem fresnelowskie, co pozwoliło uzyskać pracę na długości fali 1,1  $\mu\text{m}$  z mocą wyjściową do 8W. Laser  $\text{Dy}^{3+}$ :ZBLAN został zestawiony w trzech testowych konfiguracjach do pracy CW – z odbiciami Fresnela na obu końcach włókna aktywnego oraz z pojedynczym odbiciem Fresnela i zwierciadłem zewnętrznym (przylegającym lub odsuniętym od końca włókna). W dwóch ostatnich udało się uzyskać generację promieniowania o długości fali ok. 3  $\mu\text{m}$  (niestety Autor nie podaje dokładnej wartości, ani nie bada jej zależności od mocy pompującej, tak jak w przypadku lasera  $\text{Er}$ :ZBLAN), z mocą maksymalną ok. 150 mW i sprawnością (slope efficiency) na poziomie 8-9 %, przy dość wysokiej wartości mocy progowej, na poziomie ok. 2 W.

W ostatniej części prac eksperymentalnych Autor skoncentrował się na zagadnieniach uzyskiwania pracy impulsowej w układach z modulacją wzmocnienia i modulacją dobroci (z wykorzystaniem modulatora akusto-optycznego). W obu przypadkach uzyskał generację impulsów o rekordowo krótkim czasie trwania 183 ns (dla układu z modulacją wzmocnienia) i 74 ns (dla układu z modulacją dobroci), co przekłada się na moce szczytowe na poziomie odpowiednio 3,8 W i 183 W, wyznaczające nowe rekordy parametrów dla laserów tego typu.

**4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

Oryginalność rozprawy doktorskiej Pana Łukasza Pajewskiego nie podlega dyskusji, a oryginalnego dorobku (gdyby go nieco szerzej opisać) wystarczyłoby prawdopodobnie na więcej niż jedną dysertację. Do najważniejszych elementów zaliczyłbym przede wszystkim uzyskanie akcji laserowej w zakresie średniej podczerwieni (ok. 2,8-3,0  $\mu\text{m}$ ) w dwóch różnych systemach laserowych – włóknach ZBLAN domieszkowanych jonami erbu o wysokiej koncentracji oraz włóknach ZBLAN z domieszką jonów dysprozu. W pierwszym przypadku Autor skoncentrował się na uzyskaniu pracy ciągłej (CW), uzupełniając wyniki eksperymentalne dobrze zaprojektowanym oryginalnym modelem numerycznym, pozwalającym na optymalizację parametrów konstruowanego lasera, co uważam za dodatkową wartość pracy. W drugim przypadku Autor wprawdzie zrezygnował z modelowania (nad czym ubolewam), ale zaprojektował i przeprowadził znacznie szersze eksperymenty laserowe, uzyskując zarówno generację zarówno w trybie CW, jak i impulsowym (w dwóch wariantach – z modulacją wzmocnienia i modulacją dobroci), osiągając parametry ustanawiające nowe rekordy czasu trwania impulsu i mocy szczytowej, tym samym kontrybuując istotnie do stanu wiedzy w dziedzinie.

Te w pełni oryginalne wyniki, potwierdzone publikacjami w czasopismach o cyrkulacji międzynarodowej, stanowią zdecydowanie najsilniejszą część rozprawy, skutecznie kompensując jej wszelkie mankamenty.

**5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?**

Rozprawa jest zredagowana poprawnie i przygotowana stosunkowo starannie pod względem edycyjnym. Nie mogę jednak nie zwrócić uwagi na kilka mankamentów, utrudniających czytelnikowi nawigowanie po jej tekście i skoncentrowanie się na warstwie merytorycznej.

Wydaje się, że sama struktura pracy nie została do końca przemyślana, być może z powodu pośpiechu, którego znamiona noszą niektóre jej fragmenty. W szczególności dotyczy to wzmiankowanej wyżej nieco rozproszonej analizy stanu wiedzy, braku wprowadzenia czytelnika w stosowane w dalszej części formalizmy, bardzo głęboko rozbudowanych podpunktów (aż cztery poziomy rozwinięcia) i jakości rysunków, z których prawie wszystkie są nieco niewyraźne, sprawiając wrażenie skopiowanych z plików jpg.

Pewne zastrzeżenia budzi również warstwa językowa pracy – Autor często posługuje się określeniami żargonowymi albo nadmiernymi skrótami myślowymi, co skutkuje lekkim brakiem profesjonalizmu sformułowań. Żeby nie być gołosłownym pozwolę sobie przytoczyć kilka przykładów:

„... systemy laserowe, które generują spektrum w zakresie...”, str. 16;

„Jako fale wzbudzające wykorzystano długość 1150 nm generowaną przez laser iterbowy”, str. 33;

„... układ laserowy jest w stanie generować emisję spontaniczną”, str. 37;

„Dzieje się tak ze względu na możliwość zwinięcia włókna”, str. 46;

„...foton wygenerowany przez jon...”, str. 61;

„Opis wnęki rezonansowej (...) jest zależny od rozkładu poziomów energetycznych...”, str. 66;

„... wstęgi boczne spowodowane obecnością drugiego szczytu laserowego”, str. 88;

## 6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Od strony naukowej nie widzę istotnie słabszych stron tej rozprawy – uważam, że jest to znakomite osiągnięcie w bardzo wymagającej i trudnej dziedzinie laserów na zakres średniej podczerwieni. Autor poradził sobie świetnie z wyzwaniem badawczym, dowodząc postawionej hipotezy w spektakularnych eksperymentach generacyjnych.

Słabsze strony rozprawy to wspomniana już wyżej warstwa strukturalna, językowa i pewien poziom chaosu w prowadzeniu narracji, utrudniający jej percepcję. Praca nosi wyraźne znamiona pośpiechu edycyjnego – stąd zapewne rozproszenie analizy stanu wiedzy, brak solidnego wprowadzenia w zagadnienia procesów promienistych i bezpromienistych kształtujących właściwości jonów aktywnych w matrycach dielektrycznych (wykorzystywanych przecież w formułowaniu modelu i wprowadzanych ad hoc).

Po stronie słabszych stron wskazałbym pewną asymetrię prowadzenia narracji dla układów laserów erbowych i dysprozowych. W przypadku tych pierwszych Autor sformułował elegancki model, przeprowadził analizy numeryczne, a następnie przeszedł do weryfikacji wyników w eksperymentach generacyjnych. Nie bardzo rozumiem, co (oprócz presji czasu) stanęło na przeszkodzie takiemu podejściu w przypadku laserów dysprozowych (szczególnie, że model w tym przypadku wydaje się łatwiejszy).

Nieco konfundująca dla mnie jest też zawartość merytoryczna pracy w zderzeniu ze zdefiniowaną w punkcie 1.3 tezą i hipotezami, odnoszącymi się tylko do laserów dysprozowych, podczas gdy znaczną część zajmują badania laserów erbowych. Uważam to za istotne niedopatrzenie, zniekształcające nieco wymiar tej rozprawy, ale nie odbierające jej w najmniejszym stopniu walorów naukowych.

Pozostałe słabsze strony mają wymiar irytujących drobiazków i niespójności. Kilka pozwolę sobie wymienić poniżej:

- Autor często posługuje się określeniami nietypowymi dla techniki laserowej – w tabelicy 1 umieszcza parametr „efektywność” zamiast typowo stosowanej „sprawności”, zamiennie stosuje określenia poziomy energetyczne i powłoki (a to nie to samo), nadużywa slangowego określenia „widmo” w odniesieniu do charakterystyki spektralnej itp.
- Na stronie 61 wprowadza Autor nieprawidłowy opis procesu ETU, który co do zasady ma charakter rezonansowego i bezpromienistego przekazania energii, nie pojawia się w nim foton, który byłby następnie absorbowany przez drugi jon;
- Na stronie 98 podana wartość „efektywności kwantowej” odnosi się chyba do parametru „slope efficiency”, różnego od „quantum efficiency”;
- Na stronie 110 pisze „Wraz ze wzrostem długości wnęki laserowej rośnie długość fali generowanej przez układ” – w istocie chodzi chyba raczej o długość ośrodka aktywnego, a nie rezonatora (i to tylko w układach 3-poziomowych);

Podkreślam, że te drobiazgi, choć irytujące, nie umniejszają wartości naukowej rozprawy, którą oceniam bardzo wysoko.

## 7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Zagadnienia generacji promieniowania z zakresu średniej podczerwieni stanowią obecnie jeden z najbardziej intensywnie badanych kierunków rozwoju optoelektroniki, a szczególnie fotoniki scalonej. Źródła takie znajdują niezwykle szerokie zastosowania w szeroko rozumianych systemach czujnikowych do zastosowań medycznych, rolniczych, w monitorowaniu środowiska naturalnego, w zastosowaniach wojskowych i wielu innych. Rozprawa, poświęcona w całości zagadnieniom laserów włóknowych na zakres średniej podczerwieni, wpisuje się w najważniejsze priorytety krajowych prac badawczo-rozwojowych, wnosząc istotny i cenny wkład do stanu wiedzy w dziedzinie fotoniki laserowej. Dodatkowo, w pełni ilustruje potencjał polskich zespołów badawczych, zajmujących się tematyką generacji promieniowania laserowego w układach laserów włóknowych, a szczególnie promieniowania z trudno dostępnego zakresu średniej podczerwieni.

W mojej ocenie przesądza to o przydatności recenzowanej rozprawy dla nauk technicznych.

## 8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) Nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b) Wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c) Spełniająca wymagania
- d) Spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e) Wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

## 9. Wnioski końcowe

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Łukasza Pajewskiego spełnia kryteria oryginalności rozwiązania problemu naukowego sformułowane w art. 187 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. 2023, poz. 742 z późn. zm.*

Wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Pajewskiego do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Ryszard Piramidowicz, prof. PW