

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

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY WYDZIAŁU FIZYKI UNIWERSYTETU WARSZAWSKIEGO**

Tytuł rozprawy: Wytwarzanie i dynamika ultrakrótkich impulsów w laserach światłowodowych z normalną dyspersją

Autor rozprawy: mgr inż. Jan Szczepanek

- 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. Jana Szczepanka skoncentrowana jest na zagadnieniach generacji ultrakrótkich impulsów laserowych w układach laserów włóknowych.

Wydaje się, że najważniejszym celem rozprawy jest opracowanie i zbadanie właściwości nowych konstrukcji całkowicie światłowodowych oscylatorów laserowych. Autor nie zadowolą się tak postawionym celem, wskazując również na trzy cele szczegółowe, zacytowane poniżej:

- opracowanie i zbadanie właściwości sztucznych nasycalnych absorberów możliwych do realizacji we wnękach światłowodowych zbudowanych ze światłowodów PM pracujących w reżimie impulsów definiowanym przez całkowicie normalną dyspersję światłowodowej wnęki laserowej;
- budowa i charakteryzacja opracowanych światłowodowych źródeł ultrakrótkich impulsów laserowych, w tym pomiar fazy spektralnej generowanych impulsów
- analiza teoretyczna i eksperymentalna dynamiki propagacji i parametrów impulsu w zbudowanych źródłach, z wyszczególnieniem zmian parametrów impulsu zależnie od zastosowanej filtracji spektralnej

Autor formułuje również dwie tezy rozprawy (a właściwie cztery, bo pierwsza składa się z trzech), stwierdzając że:

1. możliwe jest wykorzystanie nieliniowego optycznego lustra pętlowego (NOLM) jako sztucznego nasycalnego absorbera w całkowicie światłowodowych laserach zbudowanych z włókien PM pracujących w obszarze normalnej dyspersji, oraz że (1.2) funkcja opisująca transmisję filtra spektralnego wykorzystywanego we wnęce oscylatora światłowodowego z wyłącznie normalną dyspersją istotnie wpływa na rozkład natężenia w widmie i profilu czasowym impulsów, a także, że (1.3) proces wymuszonego rozpraszania Ramana w obszarze normalnej dyspersji powoduje zaburzenia w widmie i rozkładzie natężenia impulsu w czasie.

2. możliwe jest opracowanie sztucznego nasycalnego absorbera dla ultrakrótkich impulsów o szerokim widmie, bazującego na zjawisku nieliniowej ewolucji polaryzacji (NPE), wykorzystując wyłącznie włókna dwójtłomne oraz element polaryzacyjny.

Zarówno wymienione przez Autora cele, jak i liczne tezy rozprawy sprawiają wrażenie pewnej nadmiarowości, a poprzez sposób ich sformułowania („możliwe jest wykorzystanie ...”, „możliwe jest opracowanie...”) również pewnej oczywistości – niemniej jednak jasno i dokładnie definiują zagadnienie badawcze, analizowane i z pełnym sukcesem rozwiązywane przez Autora.

W rozprawie dominują wątki konstrukcyjno-eksperymentalne, uzupełnione analizami teoretycznymi i wynikami modelowania. Jej praktycznym wynikiem jest cały szereg konstrukcji oscylatorów laserowych generujących ultra-krótkie impulsy, wykonanych w technologii całkowicie światłowodowej.

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?

Główne wprowadzenie teoretyczne do rozprawy stanowią rozdziały 2-4, w których Autor omawia najważniejsze zagadnienia związane z generacją i propagacją ultra-krótkich impulsów laserowych w strukturach światłowodowych. Rozdział 2 stanowi rodzaj przewodnika po najważniejszych zjawiskach fizycznych związanych z propagacją ultra-krótkich impulsów w układach światłowodów włóknowych. Autor zwięźle charakteryzuje zjawiska liniowe (dyspersję modową, chromatyczną i polaryzacyjną, tłumienność) oraz nieliniowe (jak samomodulacja fazy, wzajemna modulacja fazy, rozproszenie Ramana, samostromienie impulsu, optyczne załamania fali). Wprowadza również czytelnika w wykorzystywane w dalszej części rozprawy modele matematyczne. W rozdziale 3 przedstawia Autor podstawowe techniki generacji ultra-krótkich impulsów laserowych w laserach włóknowych, omawiając szczegółowo techniki synchronizacji modów, dyskutując parametry impulsów i tryby pracy impulsowej. Rozdział 4 poświęcony jest nasycalnym absorberom do zastosowań w laserach światłowodowych z synchronizacją modów. Autor prezentuje podstawowe typy absorberów nasycalnych, wyróżniając absorbery materiałowe oraz absorbery bazujące na efektach nieliniowych - zwierciadło NOLM (nonlinear optical loop mirror) oraz absorber wykorzystujący efekt nieliniowej ewolucji polaryzacji NPE (nonlinear polarization evolution).

To wprowadzenie, choć interesujące i potwierdzające biegłość Autora w tematyce rozprawy, w zasadzie nie zawiera usystematyzowanej analizy stanu wiedzy (i jego krytycznej oceny) w zakresie laserów z synchronizacją modów, które stanowią główny przedmiot badań. Te elementy Autor wprowadza przy okazji dyskusji wyników własnych badań, co samo w sobie nie jest oczywiście wadą, ale może nieco utrudniać czytelnikowi zrozumienie wagi osiągnięć prezentowanych w rozprawie na tle wyników światowych.

Pomimo tego nieco nietypowego podejścia analizę źródeł uważam za przeprowadzoną w sposób wszechstronny i wyczerpujący, świadczący o głębokiej wiedzy i kompetencjach Autora. Warto podkreślić obszerny zbiór przywołanych źródeł bibliograficznych (w rozprawie Autor odnosi się do ponad 220 pozycji), potwierdzający dobre rozeznanie i biegłą znajomość opisywanej tematyki.

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

Rozwiązanie postawionych zagadnień naukowych przedstawione jest w rozdziale piątym i szóstym, skoncentrowanych odpowiednio na zagadnieniach konstrukcji i badania laserów z nieliniowym optycznym zwierciadłem pętlowym oraz laserów z absorberem bazującym na efekcie nieliniowej ewolucji polaryzacji w światłowodach PM.

W rozdziale 5 Autor przedstawia wyniki własnych prac nad konstrukcjami laserów włóknowych domieszkowanych jonami iterbu (zakres spektralny pracy ok. 1030 nm) z nieliniowym zwierciadłem pętlowym NOLM, jako nasycalnym absorberem. Badania koncentrowały się na układach z wyłącznie normalną dyspersją, zestawionych ze światłowodów utrzymujących polaryzację (PM), w konfiguracji rezonatora pierścieniowego. Prace miały na celu optymalizację jakości impulsu przy zachowaniu możliwie prostej i niezawodnej konstrukcji całego urządzenia. Osobne zagadnienie badawcze stanowiły pomiary parametrów impulsów (co jest zagadnieniem nietrywialnym przy pracy z ultra-krótkimi impulsami) oraz ich symulacje numeryczne. We wszystkich zaprojektowanych i zbadanych konfiguracjach Autor uzyskał pracę w trybie impulsów femtosekundowych (poniżej 230 fs) ze stosunkowo wysoką energią na poziomie pojedynczych nanodżuli. Zastosowane rozwiązania (w tym zastosowanie włókien PM) pozwoliło na opracowanie konstrukcji, wedle słów Autora „o doskonałej dojrzałości użytkowej”. Prawdę mówiąc, patrząc na wyniki testów urządzenia, które przetrwało znaczące narażenia mechaniczne i termiczne bez istotnego pogorszenia parametrów generowanego promieniowania, trudno się z tą oceną nie zgodzić.

W rozdziale 6 przedstawione są wyniki prac nad alternatywną konstrukcją lasera z nasycalnym absorberem wykorzystującym efekt nieliniowej ewolucji polaryzacji w światłowodach dwójłomnych (PM), co jest, jak się zdaje, rozwiązaniem niespotykanym wcześniej w literaturze przedmiotu. Autor nie tylko zaproponował i przetestował z sukcesem nowy rodzaj nasycalnego absorbera, ale przeprowadził również staranną optymalizację parametrów pracy układu (poprzez wprowadzenie odpowiedniej segmentacji światłowodów) i zestawiał dwie konstrukcje oscylatorów wykorzystujące nowy absorber (pracujący w układzie transmisyjnym i odbiciowym). W obu przypadkach uzyskał znakomite parametry użytkowe urządzenia, a wyniki badań eksperymentalnych uzupełnił modelowaniem numerycznym, potwierdzającym dogłębne rozumienie zjawisk odpowiedzialnych za obserwowane efekty.

Reasumując, Autor rozwiązał postawione zagadnienia badawcze w sposób nie budzący najmniejszych zastrzeżeń, osiągając z nadmiarem wszystkie postawione cele i dowodząc postawionych tez. Nie mam najmniejszych wątpliwości co do poprawności założeń oraz metod przyjętych do rozwiązania problemu naukowego. Wątpliwości nie budzą również zastosowane rozwiązania, szczególnie, że pozwoliły na uzyskanie spektakularnych rezultatów użytkowych.

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?

Znakomita większość wyników przedstawionych w rozprawie doktorskiej mgr. inż. Jana Szczepanka na charakter w pełni oryginalny. Wśród najważniejszych wskazałbym przede wszystkim opracowanie w pełni dojrzałej technologicznie konstrukcji femtosekundowego lasera włóknowego ze zwierciadłem NOLM jako nasycalnym absorberem, bazującej na włóknach utrzymujących polaryzację o znakomitych parametrach użytkowych i odporności na narażenia mechaniczne (wibracje) i termiczne. Wydaje się, że jest to pierwsza tego typu konstrukcja na świecie. Drugą najważniejszą pozycję stanowi z pewnością nowy sposób realizacji nasycalnego absorbera wykorzystujący proces nieliniowej ewolucji polaryzacji w światłowodach PM i zastosowanie go w konstrukcji lasera femtosekundowego pozwalającego na uzyskanie impulsów

o szerokim widmie i krótkim czasie trwania. Również ten wynik wydaje się mieć wymiar światowy, kontrybuując w sposób znaczący do stanu wiedzy w dziedzinie laserów światłowodowych generujących ultra-krótkie impulsy.

Ważnym i stosunkowo rzadko spotykanym wynikiem rozprawy jest wytworzony zestaw demonstratorów w pełni funkcjonalnych urządzeń laserowych o znakomitych parametrach użytkowych i wymiernej wartości komercyjnej.

Dodatkowym potwierdzeniem oryginalności wyników przedstawionych w rozprawie są publikacje naukowe i zgłoszenia patentowe, będące wynikiem realizacji pracy. W swoim dotychczasowym dorobku mgr inż. Jan Szczepanek może się pochwalić współautorstwem trzech publikacji naukowych w recenzowanych renomowanych czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej (we wszystkich jest pierwszym autorem) oraz siedmiu publikacji pokonferencyjnych z konferencji międzynarodowych. Dorobek uzupełniają trzy współautorskie zgłoszenia patentowe.

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

Rozprawa została zredagowana w sposób przejrzysty, z dużą dbałością o poprawność językową tekstu oraz układ graficzny i detale rysunków. Pomimo bardzo dobrego wrażenia z pierwszego czytania rozprawy, jej bardziej wnikliwa analiza pozwala na wskazanie całego szeregu usterek językowych, chyba nieuniknionych w przypadku tak obszernego tekstu. Co ciekawe, usterki te nie są rozmieszczone równomiernie w tekście, wskazując na fragmenty, które prawdopodobnie były pisane w większym pośpiechu. Aby nie być gołosłownym, poniżej przedstawiam kilka przykładów:

Na stronie 66 – „...impulsy propagujące się w obszarze anomalnej dyspersji, podczas której profil czasowy i widmo impulsu ulegają jedynie niewielkim zmianom”

Na stronie 91 – „Wprowadzając impuls (...) stan polaryzacji impulsu zmienia się zależnie od wartości natężenia...” oraz „Efekt ten jest spowodowany głównie ze względu na występowanie optycznego efektu Kerra...”

Na stronie 122 – „...przeprowadzono testy lasera zapakowanego w obudowę...”

Na stronie 147 – „...laser przedstawiony w pracy [150] zbudowany na standardowych światłowodach, wciąż pozostawiał szerokie pole możliwości zaprezentowania nowych konstrukcji i pomysłów.”

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

Trudno jest wskazać wyraźnie słabsze merytorycznie strony rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jana Szczepanka – to bardzo dobra praca, szczegółowo opracowana i prezentująca imponujące wyniki badawcze. Abstrahując jednak od jej wymiaru merytorycznego chciałbym wskazać na trzy nieco słabsze elementy.

Pierwszym z nich jest objętość rozprawy – od pierwszych stron (a rozprawa liczy ich ponad 200) czytelnik może mieć wrażenie nadmiaru celów, tez, informacji, rozwiązań i wyników. Pozostając pod wrażeniem pracowitości Doktoranta i wymagań Jego promotora mam nieodparte wrażenie, że bez szkody dla jakości rozprawy (a z pożytkiem dla jej przejrzystości i toku narracji) można było nieco ograniczyć jej zawartość.

Drugim nieco słabszym elementem jest miejscami nieprecyzyjne lub niestarannie dobrane słownictwo techniczne. Dwa przykłady są szczególnie wyraziste. Autor z upodobaniem stosuje określenie „reżim pracy”, co może nasuwać różnorodne „reżimowe” skojarzenia – wydaje się, że bardziej poprawnym określeniem byłby „tryb”. Zdanie „...laser pracujący w reżimie dyssypujących

solitonów...” brzmi z pewnością niezbyt dobrze. Kolejne nieprecyzyjne określenie, powtarzające się w całej rozprawie to „optyczny analizator widma”, będące niepoprawnym tłumaczeniem angielskiego określenia „optical spectrum analyzer” oznaczającego analizator widma optycznego.

Trzecim wreszcie słabszym elementem jest opis wzmocnienia promieniowania we włóknach aktywnych domieszkowanych jonami iterbu (rozdział 2.3.1), przedstawiony w poetyce efektów występujących w materiałach półprzewodnikowych. Autor odwołuje się w nim do struktury pasmowej, wyróżniając pasmo podstawowe i wzbudzone jonu iterbu, podczas gdy iterb, jak pozostałe jony ziem rzadkich charakteryzuje się dyskretną strukturą poziomów energetycznych (multipletów, ale nie pasm). Podobnie, określenie „rekombinują wzbudzone atomy” jest merytorycznie niepoprawne – atomy nie rekombinują, mogą zmieniać swój stan energetyczny. Rekombinują elektrony i dziury w materiałach półprzewodnikowych. W tym samym (krótkim) rozdziale można znaleźć wzmiankę o nieznanym mi zjawisku „wymuszonej emisji spontanicznej”, co jest chyba zwykłym przejęzyczeniem. Tym niemniej nawarstwienie omyłek sugeruje, że Autor poruszający się z wielką biegłością w skomplikowanych zagadnieniach efektów nieliniowych, czuje się nieco mniej pewnie w opisywaniu znacznie prostszych (choć krytycznych dla uzyskiwania akcji laserowej) mechanizmów oddziaływania promieniowania z jonami aktywnymi.

Podsumowując tę część recenzji chciałbym podkreślić, że wymienione wyżej uwagi krytyczne nie umniejszają wartości rozprawy Pana Jana Szczepanka, którą oceniam bardzo wysoko.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla dyscypliny naukowej?

Badania nad konstrukcjami laserów światłowodowych (zarówno CW, jak i impulsowych) są prowadzone od wielu lat w najlepszych fotonicznych ośrodkach badawczych. Układy laserów całkowicie światłowodowych (a szczególnie laserów generujących ultra-krótkie impulsy) zajmują szczególne miejsce w grupie badanych i rozwijanych rozwiązań. Cieszy bardzo fakt, że polskie zespoły badawcze – a wśród nich zespół, w którym realizował swoją pracę badawczą Pan Jan Szczepanek są w stanie włączyć się w ten nurt badań uzyskując spektakularne wyniki, dostrzegalne nie tylko w świecie nauki ale również w środowiskach biznesowych.

Na szczególną uwagę zasługuje pionierski w skali kraju charakter prowadzonych prac – uzyskane wyniki mają nie tylko wartość naukową i wdrożeniową, ale w mojej ocenie mogą być traktowane jako referencyjne dla pozostałych zespołów krajowych (i nie tylko krajowych), prowadzących prace badawcze w dziedzinie światłowodowych laserów femtosekundowych i mających aspiracje opracowywania i rozwijania własnych rozwiązań.

Rozprawa z całą pewnością stanowi istotny wkład w rozwój techniki laserów światłowodowych, poszerzając znacząco stan wiedzy w tym obszarze. Nie do zakwestionowania jest również przydatność uzyskanych wyników dla dyscypliny naukowej.

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

Nie mam najmniejszych wątpliwości, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska autorstwa mgr. inż. Jana Szczepanka spełnia wszelkie kryteria oryginalności rozwiązania problemu naukowego i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej sformułowane w obowiązujących aktach prawnych. Mając powyższe na uwadze wnoszę o dopuszczenie pracy doktorskiej mgr. inż. Jana Szczepanka do publicznej obrony.

Jednocześnie, z uwagi na unikatową wartość naukową, techniczną i wdrożeniową uzyskanych wyników, wnioskuję do Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego o wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej.

Dr hab. inż. Ryszard Piramidowicz, prof. PW

