

dr hab. inż. Jarosław Sotor, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki
50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27
tel. 71 320 48 32
e-mail: jaroslaw.sotor@pwr.edu.pl

Wrocław 22.07.2020r

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani Anupamaa Rampur pt.:

„Coherently seeded broadband ultrafast fiber amplifiers”

Recenzowana praca doktorska pt. „Coherently seeded broadband ultrafast fiber amplifiers” została zrealizowana w Zakładzie Optyki Informacyjnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod promotorską opieką dr. hab. Mariusza Klimczaka i dr. Tomasza Stefaniuka, który sprawował funkcję promotora pomocniczego. Przeprowadzony program badań dotyczy aktualnych zagadnień zawierających się w takich dziedzinach jak fotonika i technika laserowa, które formalnie kwalifikują się do dyscypliny fizyka. W ramach rozprawy doktorantka przeprowadziła pionierskie badania nad wykorzystaniem promieniowania supercontinuum generowanego w światłowodach fotonicznych o dyspersji normalnej do zasiewania wzmacniaczy światłowodowych w zakresach spektralnych 1550 i 1950 nm. Badania te miały na celu w głównej mierze określenie wpływu charakteru promieniowania supercontinuum na parametry szumowe wzmacniaczy światłowodowych. W trakcie ich realizacji przeprowadzono kompleksową eksperymentalną charakteryzację dyspersji komercyjnie dostępnych włókien o wysokiej aperturze (UHNA) oraz rozwinęto metody szerokopasmowej charakteryzacji impulsów laserowych z wykorzystaniem technik spektralno-czasowych. Należy podkreślić, że przeprowadzone badania nie ograniczają się do zagadnień czysto akademickich i podstawowych, ale mają duże znaczenie dla rozwoju światłowodowych systemów laserowych generujących ultrakrótkie impulsy światła powszechnie stosowanych w laboratoriach badawczych i przemyśle.

Zasadnicza część rozprawy liczy 120 strony podzielone na 5 głównych rozdziałów, które zostały, poprzedzone wprowadzeniem i domknięte podsumowaniem. Całość pracy dopełniają: streszczenie w języku angielskim i polskim, spis akronimów oraz licząca 202 pozycje literaturowe bibliografia. Zgodnie z danymi zawartymi w bazie Web of Science doktorantka jest współautorką 8 indeksowanych prac (7 prac z listy JCR w czasopismach o uznanej renomie min. Optics Express, JOSA B, w tym 4 prace bezpośrednio związane z tematyką rozprawy, a w 2 z nich doktorantka jest pierwszą autorką), które były cytowane 17 razy (na dzień 21.07.2020r). Praca została zrealizowana w szeroko zakrojonej współpracy pomiędzy ośrodkami badawczymi krajowymi i zagranicznym. W sposób jednoznaczny określony został wkład poszczególnych współpracowników w przedstawionych w rozprawie pracach eksperymentalnych i teoretycznych. Efektywna współpraca w tak dużym gronie świadczy o bardzo dobrych kompetencjach organizacyjnych i komunikacyjnych doktorantki. Nie podlega jednak wątpliwości fakt, że doktorantka miała wiodący wkład w powstanie tej pracy.

Charakterystyka i merytoryczna ocena pracy.

We wprowadzeniu doktorantka przedstawiła zwięzły przegląd literaturowy dotyczący wzmacniaczy światłowodowych zasiewanych sygnałem supercontinuum generowanym w zakresie dyspersji anomalnej z analizą ograniczeń tego podejścia. Uzasadnia tutaj zasadność podjęcia prac nad wykorzystaniem do koherentnego zasiewania wzmacniaczy promieniowaniem supercontinuum generowanym w zakresie dyspersji normalnej. Na podstawie przeprowadzonej analizy zdefiniowane zostały główne cele natury poznawczej i inżynierskiej oraz sformułowano główne tezy pracy:

“The thesis of the dissertation is that utilizing coherent, polarized supercontinuum pulses as seed signals in thulium-doped or erbium-doped amplifier systems or their simultaneously seeded tandems, enables:

- a) post-amplification temporal compression down to around 100 fs using available single mode or polarization maintaining fibers,
- b) significantly reduced relative intensity noise characteristics, compared to state-of-the-art soliton-driven ultrafast fiber amplifier systems,
- c) nonlinear mixing of a tandem of ultrafast fiber amplifiers, seeded from a common coherent signal, with the relative intensity noise of the mixing product not exceeding the level of state-of-the-art ultrafast fiber amplifiers.”

Podjęcie tej tematyki uważam za w pełni uzasadnione i stanowi ono nowe podejście rozwiązania problemu koherentnego, szerokopasmowego zasiewania wzmacniaczy światłowodowych.

W części teoretycznej stanowiącej rozdział drugi dysertacji zawarto podstawowe informacje dotyczące światłowodów aktywnych i fotonicznych oraz mechanizmów generacji promieniowania supercontinuum w światłowodach fotonicznych. Doktorantka dokonała tutaj również przeglądu wykorzystywanych metod charakteryzacji impulsów ze szczególnym uwzględnieniem technik: FROG i XFROG. W stopniu minimalnym przedstawione zostały zagadnienia związane z szumami w układach światłowodowych i metody ich charakteryzacji.

W części eksperymentalnej pracy (rozdziały od 3 do 6) przeprowadziła liczne prace badawcze, których najistotniejszymi wynikami są:

- kompleksowa analiza dyspersji światłowodów o dużej aperturze numerycznej (UHNA) stosowanych powszechnie przez środowisko światłowodowe i laserowe. Przeprowadzono charakteryzację w szerokim zakresie spektralnym od 1200-2400 nm z wykorzystaniem technik interferencyjnych. Wyniki te porządkują stan wiedzy i szczątkowe doniesienia innych grup badawczych odnośnie dyspersji światłowodów UHNA firmy Nufern. Zostały opublikowane i stanowią swoistą bazę wiedzy dla innych grup badawczych o czym świadczy znacząca liczba cytowań (14 na 21.07.2020 wg WoS),
- charakteryzacja spektralnego profilu dyspersji światłowodów fotonicznych ze szkieł wieloskładnikowych i krzemionkowych wykorzystanych w dysertacji do generacji promieniowania supercontinuum w zakresie dyspersji normalnej i anomalnej,
- adaptacja techniki XFROG do charakteryzacji spektralno-czasowej szerokopasmowego promieniowania supercontinuum. Szczególnie istotne jest tutaj zastosowanie czasowego algorytmu ptychograficznego do odtwarzania profilu czasowego i spektralnego badanych impulsów światła w układzie XFROG. W wyniku czego możliwa była analiza profilu czasowego tych impulsów z rozdzielczością kilku fs i zaobserwowanie oscylacyjnego charakteru profilu czasowego supercontinuum, co na drodze symulacji numerycznych zostało powiązane z nieidealnym kształtem impulsu sygnałowego. Wyniki te stanowią wartość dodaną w badaniach nad generacją supercontinuum (opublikowane w Optics Express),
- przeprowadzenie podstawowej optymalizacji układu wzmacniacza światłowodowego na bazie włókien domieszkowanych jonami tulu i zasiewanego koherentnym sygnałem supercontinuum. W wyniku tej optymalizacji uzyskano generację impulsów o czasach trwania 96 fs i energii 3.5 nJ w zakresie spektralnym ~1900 nm,
- Wykorzystanie koherentnego sygnału supercontinuum do równoległego zasiewania wzmacniaczy na bazie włókien domieszkowanych erbem (53 fs, 2nJ) i tulem (120 fs, 2nJ) z zachowaniem koherencji po wzmocnieniu. Zachowanie koherencji zademonstrowano poprzez generację sygnału sumy częstotliwości w zakresie spektralnym 830 nm,
- Potwierdzenie, że wykorzystanie koherentnego promieniowania supercontinuum umożliwia wzmocnienie impulsów laserowych do poziomu kilku nJ z bardzo niskim względnym szumem intensywności (RIN) poniżej 0,08% (lepszym niż dla dotychczas raportowanych układów pracujących z supercontinuum generowanym w zakresie dyspersji anomalnej).

W mojej ocenie jako szczególnie istotne dla globalnego środowiska naukowego są: kompleksowa analiza dyspersji światłowodów UHNA (stanowi ona swego rodzaju kompendium i dane źródłowe dla eksperymentów wykorzystujących te światłowody) oraz wykorzystanie techniki XFROG z czasowym algorytmem ptychograficznym do wysokorozdzielczej analizy ultrakrótkich impulsów światła. Prace badawcze przeprowadzono wykorzystując prawidłowe metody badawcze. **Uznaję, że postawione tezy zostały udowodnione a cele praktyczne zostały osiągnięte.**

Pomimo realizacji ciekawego programu badawczego i uzyskania istotnych wyników, w przygotowanej rozprawie doktorskiej doktorantka nie ustrzegła się błędów merytorycznych. Redakcyjna strona rozprawy, a w szczególności dbałość o przedstawianie szczegółowych i pełnych opisów przeprowadzonych eksperymentów powinna być jednak na wyższym poziomie. Najważniejsze uwagi krytyczne i niedociągnięcia rozprawy (w ujęciu chronologicznym) są następujące:

- W rozdziale drugim pada stwierdzenie, że zaletą zastosowania ośrodka wzmacniającego w postaci światłowodu domieszkowanego w porównaniu do ośrodków objętościowych pozwala na poprawę jakości generowanej wiązki. Stwierdzenie to nie jest prawdziwe, gdyż systemy objętościowe z powodzeniem pozwalają na generację wiązek laserowych o wysokiej jakości i M^2 ograniczonemu dyfrakcyjnie,
- W tym samym rozdziale przedstawiony został bardzo zwięzły opis podstawowych światłowodów aktywnych stosowanych w zakresie bliskiej podczerwieni tj. domieszkowanych jonami iterbu, erbu i tulu. Poziom ogólności tych opisów jest zbyt daleko idący. Przykładowo: nie przedstawiono najczęściej stosowanych długości fali wzbudzania jonów iterbu, w sposób niejednoznaczny zdefiniowano spektralny zakres wzmocnienia światłowodów domieszkowanych erbem (w odległości kilku linii pojawia się informacja, że jest to 1480-1620 nm, a następnie 1520-1570nm), w przypadku światłowodu domieszkowanego tulem całkowicie pominięto najważniejszy i najbardziej efektywny mechanizm pompowania na długości fali 793 nm.
- Bardzo ważnym zagadnieniem jakie zostało podjęte w pracy jest zbadanie wpływu charakteru promieniowania supercontinuum na parametry szumowe wzmacniaczy zasiewanych z ich wykorzystaniem. Tym bardziej dużym mankamentem części teoretycznej pracy jest brak wnikliwej analizy podstawowych składowych szumu w układach wzmacniaczy światłowodowych, jak również parametrów szumowych samego promieniowania supercontinuum. Metodyka pomiaru względnego szumu intensywności (RIN) (str. 32) została przedstawiona bardzo pobieżnie bez żadnego odniesienia do literatury czy norm technicznych. Nie przedstawiono schematu żadnego układu pomiarowego stosowanego do pomiaru RIN. Dodatkowo w pracy bardzo często pojawia się jest stwierdzenie „ultra-low noise” - nigdzie nie można znaleźć jednak informacji co w rozumieniu autorki to stwierdzenie oznacza.
- W rozdziale 3 w sposób kompleksowy scharakteryzowano parametry dyspersyjne prawie wszystkich włókien wykorzystanych następnie do konstrukcji wzmacniaczy światłowodowych. Nie przeprowadzono jednak charakterystyki istotnego dla procesu kompresji impulsów włókna PM1550. Zastanawiające jest również dlaczego na rys. 3.5 spektralną zależność dyspersji trzeciego rzędu przedstawiono jedynie dla włókna UHNA7.
- Wyniki pomiaru i symulacji dwójłomności grupowej przedstawione na rys. 3.14b zostały skomentowane jako pozostające w bliskiej zgodności. W rzeczywistości obserwujemy tutaj wyraźne odstępstwo pomiędzy symulacją a eksperymentem. Ta sama sytuacja ma miejsce w przypadku zależności zaprezentowanych na rys. 3.15a. Z czego wynika ta różnica? Jaki jest błąd pomiaru dwójłomności grupowej w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 3.13?
- Zmierzona wartość dwójłomności grupowej dla światłowodów NL46 i NL48, która wynosiła ok. $4,5 \cdot 10^{-4}$ (na podstawie rys. 3.14a i 3.14b) na długości fali 1900 nm w rezultacie pozwoliła na wygenerowanie supercontinuum o współczynniku ekstynkcji polaryzacji (PER) na poziomie

odpowiednio 8 dB (rys. 4.4) i 17dB (rys. 4.7). Taka znacząca różnica PER przy takiej samej wartości dwójłomności grupowej została pozostawiona bez komentarza ze strony doktorantki.

- Podana na str. 70 wartość dwójłomności światłowodów krzemionkowych NLs1 i NLs2 była o rząd mniejsza niż ta zmierzona dla światłowodów ze szkła wieloskładnikowych. Z ich wykorzystaniem zademonstrowano jednak generację promieniowania supercontinuum o PER na poziomie 20-30dB (rys. 4.10 i rys. 4.11), znacznie lepszym niż dla włókien NL46 i NL48. Nie przeprowadzono w pracy jednak żadnej dyskusji nad czynnikami decydującymi o takim charakterze generowanego promieniowania supercontinuum w światłowodach wieloskładnikowych i krzemionkowych,
- Powszechnie wiadome jest, że charakter (m.in. szerokość spektralna) generowanego promieniowania supercontinuum zależy od długości zastosowanego włókna. Z wyjątkiem włókna NLs2 w rozdziale 4 nie przedstawiono żadnych wyników badań prezentujących generację supercontinuum w funkcji zmiany długości badanych światłowodów (dla pomiarów przedstawionych na rys. 4.10 nie podano długości wykorzystanego włókna NLs1). Dodatkowo w eksperymencie opisanym w punkcie 5.2 wykorzystano 15 cm włókna NL46 – nie zaprezentowano jednak widma supercontinuum generowanego w tym włóknie. Na jakiej podstawie zdefiniowana została taka długość włókna jako optymalna do tego eksperymentu?
- Charakterystyka spektralna lasera pompującego zaprezentowana na rys. 5.3 nie pozwala na jednoznaczne określenie stosunku sygnału do szumu zbudowanego wzmacniacza. Nie uwzględnia szumu emisji spontanicznej (ASE) w zakresie spektralnym 1530 nm (należało zaprezentować widmo w szerszym zakresie spektralnym),
- Optymalizacja parametrów opracowanych wzmacniaczy (rozdziały 5 i 6) ograniczała się jedynie do dobrania długości włókna kompresującego PM1550 oraz mocy pompujących poszczególnych wzmacniaczy. W sposób arbitralny przyjęto długości światłowodów rozciągających impulsy (PM2000D) oraz aktywnych podczas gdy, ze względu na kumulowane nieliniowości, ich długości są krytyczne dla uzyskania optymalnych parametrów (najkrótszego czasu trwania impulsu, maksymalnej energii impulsu) w tego typu wzmacniaczach światłowodowych,
- Zmodulowany charakter widma optycznego zademonstrowany na rys. 510c doktorantka tłumaczy obecnością pasożytniczego filtra dwójłomnego, na który w mojej ocenie w głównej mierze wpływa niski PER zastosowanego światłowodu do generacji supercontinuum. Nie jest jasne dlaczego do tego eksperymentu wybrano światłowod o najgorszym PER z pośród tych scharakteryzowanych w rozdziale 4. Znacznie lepszy parametr PER uzyskano dla światłowodu z rys. 6.2 (dla niego z kolei nie przeprowadzono charakteryzacji w rozdziale 4),
- Na str. 91 doktorantka stwierdza, że uzyskała poziom szumu RIN o rząd mniejszy od dotychczas publikowanych wyników powołując się na prace wykorzystujące do zmiany zakresu spektralnego włókna nieliniowe o anomalnej dyspersji [10,60,184,186,187,189]. Nie wzięła jednak pod uwagę, że przytoczone badania dotyczyły systemów laserowych o mocach wyjściowych znacząco przewyższających uzyskane w pracy 350 mW a mianowicie: 60W, 3W, 20W, 5W i 0.5W. Dodatkowo dwie z ostatnich przywołanych prac dotyczą zakresu spektralnego 2.05 μm z wykorzystaniem włókien domieszkowanych jonami holmu. Nie uprawnia to do formułowania tak jednoznacznych stwierdzeń. Porównania należało dokonać na podstawie analizy systemów o zbliżonych parametrach, a najlepiej w jednym układzie eksperymentalnym. Doktorantka miała możliwość jednoznacznie rozstrzygnąć tą kwestię w zbudowanym układzie wykorzystując jako źródło sygnał supercontinuum generowany np. we włóknie NLs2 o anomalnej dyspersji.
- Na str. 87, 103 i 106 doktorantka konkluduje przeprowadzoną optymalizację wzmacniaczy dokładnie takim samym stwierdzeniem, że zastosowanie światłowodów LMA lub zewnętrznego kompresora objętościowego na bazie siatek dyfrakcyjnych lub zwierciadeł GTI są rozwiązaniami bardziej odpowiednimi do kompresji impulsów nawet o wyższej energii. Daje to informację, że jest świadoma

o ograniczeniach opracowanych wzmacniaczy, ale jednak nie podjęła w czasie doktoratu działań zmierzających do uzyskania lepszych wyników stosując przytoczone rozwiązania,

- W podsumowaniu na str. 119 autorka pisze, że we wzmacniaczu na bazie włókna domieszkowanego jonami tulu uzyskała impulsy o mocy średniej 580 mW i czasie trwania 120 fs. W opisie tego eksperymentu na str. 102 znajduje się jednak informacja, że czas trwania impulsu 120 fs został uzyskany dla moc średniej 200 mW,
- Doktorantka nie ustrzegła się również drobnych błędów edytorskich np.: na str. 17 wprowadza skróty GNLSE i NLSE bez ich rozwinięcia, na str. 22 w skrócie OWB przedstawiono kolejność liter, we wzorze 3.13 znak iloczynu umieszczono w podkreśleniu a nie na środku linii, na rys. 4.2 c i b, 6.8 c i d, 6.12 c i d nie umieszczono informacji o szerokości połówkowej widma i czasie trwania impulsu. Niedociągnięcia te nie wpływają jednak znacząco na odbiór pracy i jej bardzo dobry poziom edytorski.

Niezależnie od przedstawionych powyżej uwag moja ogólna ocena rozprawy jest pozytywna. Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska **Pani Anupamaa Rampur** spełnia warunki ustawowe i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.