

Recenzja Rozprawy Doktorskiej
mgr inż. Sylwii Majchrowskiej
Badanie dynamiki wybranych zjawisk nieliniowych
zachodzących w światłowodach wielomodowych

Rozprawa doktorska mgr inż. Sylwii Majchrowskiej została wykonana pod kierunkiem dra hab. inż. Karola Tarnowskiego, profesora uczelni, na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Dotyczy ona symulacji wybranych zjawisk nieliniowych w światłowodach wielomodowych. W szczególności oryginalne badania Doktorantki skupiają się na trzech aspektach: dyskretnej emisji stożkowej, pułapkowaniu solitonów w światłowodach dwójłomnych oraz między-modowym mieszaniu czterofalowym.

Jak zostało opisane we wstępie do pracy, zjawiska nieliniowe w światłowodach były dotąd — w przeważającej większości — badane w światłowodach jednomodowych. Uwzględnienie wzajemnych interakcji wielu modów w światłowodach wielomodowych skutkuje, z jednej strony, pojawieniem się nowych zjawisk fizycznych, a z drugiej ogromnym wzrostem złożoności obliczeniowej algorytmów ich modelowania. Z tego powodu podjęty problem badawczy jest aktualny i ambitny. Jego realizacja wymaga zaawansowanych narzędzi numerycznych. Wyniki zaprezentowane w rozprawie zostały uzyskane za pomocą takich narzędzi, które albo zostały w całości opracowane przez Doktorantkę, albo powstały w oparciu o publicznie dostępny kod (na zasadach *open source*), który został przez nią zmodyfikowany i rozszerzony.

Deklarowana teza rozprawy brzmi *przebieg wybranych zjawisk nieliniowych, w tym w szczególności dyskretnej emisji stożkowej, pułapkowania solitonów w światłowodach dwójłomnych oraz między-modowego i wektorowego mieszania czterofalowego, zależy istotnie od kompozycji modowej pobudzenia*. Jednakże przedstawione wyniki jedynie częściowo dotyczą teże tezy. Prezentują one badane zagadnienia w znacznie szerszym zakresie i niekoniecznie skupiają się na znaczeniu kompozycji modowej pobudzenia. Powyższa teza została w rozprawie zilustrowana i udowodniona, ale w mojej ocenie najważniejszym osiągnięciem pracy jest numeryczna analiza interakcji pomiędzy różnymi modami światłowodu w reżimie nieliniowym. Ponadto, autorka kilkakrotnie wspomniała, że dane wyniki uzyskała za pomocą samodzielnie opracowanego lub rozbudowanego oprogramowania. To też uważam za bardzo istotne dokonanie i szkoda, że zostało ono przedstawione w rozprawie w sposób marginalny.

Opracowane narzędzia numeryczne zostały zebrane na końcu pracy, w dodatku B.4. Dotyczą one rozwiązania uogólnionego nieliniowego równania Schrödingera zaprezentowanego w rozprawie. Wyniki przeprowadzonych badań zostały opublikowane w czterech publikacjach naukowych przedstawionych w dodatku B.1, których Doktorantka jest współautorką :

1. K. Stefańska, S. Majchrowska, K. Gemza, G. Soboń, J. Sotor, P. Mergo, K. Tarnowski, T. Martynkien, Soliton trapping and orthogonal Raman scattering in a birefringent microstructured fiber, *Opt. Lett.* 47, 4183-4186 (2022),

2. S. Majchrowska, K. Żołnacz, W. Urbańczyk, K. Tarnowski, Multiple intermodal-vectorial four-wave-mixing bands generated by selective excitation of orthogonally polarized LP_{01} and LP_{11} modes in a birefringent fiber, *Opt. Lett.* 47, 2522–2525 (2022),
3. K. Tarnowski, S. Majchrowska, P. Béjot, B. Kibler, Numerical modelings of ultrashort pulse propagation and conical emission in multimode optical fibers, *J. Opt. Soc. Am. B* 38, 732 (2021),
4. S. Majchrowska, J. Pabisiak, T. Martynkien, P. Mergo, K. Tarnowski, Influence of attenuation on self-organized second-harmonic generation in a germanium-doped microstructured silica fiber, *Opt. Lett.* 43, 2791–2794 (2018).

Pierwsza z powyższych pozycji oznaczona jest w rozprawie jako *w recenzji*, lecz obecnie jest już ona opublikowana. Wszystkie publikacje potwierdzają, że wyniki przedstawione w rozprawie zostały wcześniej zweryfikowane przez niezależnych recenzentów. Doktorantka jest pierwszą autorką dwóch spośród czterech wymienionych publikacji, wobec czego uznaję, że w ich przypadku jej wkład jest dominujący. Ponadto, zaprezentowała ona 6 wystąpień ustnych oraz 4 plakaty na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych.

Sama rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów. Rozdział pierwszy stanowi wstęp prezentujący przedmiot i zakres przedstawionych badań. W mojej opinii mógłby on być bardziej rozbudowany i w szerszym zakresie prezentować znaczenie oraz zastosowania analizowanych konstrukcji i zjawisk. W tym rozdziale przedstawiona jest także teza pracy, lecz — tak jak napisałem wcześniej — nie odzwierciedla ona dokładnie zawartości merytorycznej doktoratu.

Rozdział drugi stanowi zwięzłe przedstawienie teorii propagacji światła w światłowodach. W sekcji 2.1 zamieszczone są podstawowe równania — począwszy od równań Maxwella, po zależność dyspersyjną Hondrosa-Debye'a. Sekcja 2.2 prezentuje charakterystykę różnego rodzaju wielomodowych włókien światłowodowych. Przedstawione są w niej zarówno światłowody o skokowej zmianie współczynnika załamania jak i typu GRIN oraz światłowody dwójłomne i foniczne. Cały rozdział ma zawierać informacje podstawowe, jednak jest on potrzebny dla zakreślenia tematyki dla czytelnika niebędącego specjalistą w dziedzinie światłowodów.

Znacznie bardziej zaawansowana teoria opisana jest w rozdziale trzecim, który dotyczy modelowania zjawisk nieliniowych w światłowodach wielomodowych. W rozdziale tym pojawia się wielomodowe uogólnione nieliniowe równanie Schrödingera oraz opisane są jego poszczególne człony — liniowy człon dyspersji oraz nieliniowe człony opisujące zjawisko Kerra oraz rozpraszanie Ramana. Równanie to jest istotne, gdyż to właśnie ono jest rozwiązywane w dalszej części pracy. Poza standardową postacią skalarną równania, pozwalającą na uwzględnienie różnych modów przestrzennych, w rozdziale tym — w sekcji 3.2 — opisano efekty wektorowe związane z oddziaływaniem modów o różnych polaryzacjach. W szczególności, przedstawiono układ równań (3.14) opisujących propagację pojedynczego modu mogącego występować w dwóch różnych polaryzacjach.

Rozdział czwarty poświęcony jest analizie propagacji impulsów w światłowodach wielomodowych. Jak Doktorantka sama przyznaje, przedstawione w nim wyniki nie są oryginalne i są dobrze znane z literatury. Jednakże, odtworzenie ich pozwala na weryfikację przeprowadzonych obliczeń oraz na określenie znaczenia poszczególnych procesów dla propagacji światła. W pierwszej kolejności przedstawiono zachowanie impulsu, uwzględniając jedynie czysto liniową dyspersję i będące jej efektem poszerzenie impulsu świetlnego. Następnie zbadano zjawiska samomodulacji fazy, wzajemnej modulacji fazy oraz samoogniskowania wynikające z efektu Kerra. Zjawiska te, wraz z rozpraszaniem Ramana, pozwoliły na uformowanie się i propagację solitonów, których warunki powstawania i za-

chowanie było kolejnym zagadnieniem poruszonym w tym rozdziale. Ostatnim zademonstrowanym efektem było międzymodowe mieszanie czterofalowe.

Oryginalne osiągnięcia Doktorantki zostały opisane w rozdziałach piątym, szóstym i siódmym. Każdy z nich dotyczy innego zjawiska mającego miejsce w wielomodowych światłowodach nieliniowych. Jednocześnie, każdemu z nich odpowiada jedna publikacja z dorobku Doktorantki.

Rozdział piąty poświęcony jest zjawisku dyskretnej emisji stożkowej [*J. Opt. Soc. Am. B* 38, 732 (2021)]. Modelowane jest ono za pomocą dwóch metod numerycznych: wielomodowego uogólnionego nieliniowego równania Schrödingera oraz wielomodowej jednokierunkowej propagacji impulsu. Pierwsze podejście opiera się na oryginalnym wkładzie Doktorantki. Drugie natomiast pochodzi od grupy zewnętrznej z Dijon. Nie jest dla mnie jasne jaki jest udział tej grupy: czy dostarczyła ona własne wyniki symulacji w ramach współpracy z Politechniką Wrocławską, czy są to wyniki opublikowane, czy grupa ta jedynie udostępniła oprogramowanie, zaś obliczenia wykonała Doktorantka? Na plus należy jednak zaliczyć wnikliwe porównanie wyników uzyskanych obiema metodami, co pozwoliło na identyfikację przyczyn rozbieżności oraz na określenie ograniczeń stosowanej metody obliczeniowej.

W rozdziale szóstym opisano badanie zjawiska pułapkowania solitonów w światłowodach dwójłomnych oraz konwersji polaryzacji, czyli sprzęgania się solitonów propagujących się w dwóch modach tego samego rzędu o ortogonalnej polaryzacji [*Opt. Lett.* 47, 4183-4186 (2022)]. Jest to pierwszy z dwóch rozdziałów poświęconych efektem polaryzacyjnym w światłowodach. Drugim takim rozdziałem jest rozdział siódmy, który przedstawia mieszanie czterofalowe w światłowodach dwójłomnych [*Opt. Lett.* 47, 2522– 2525 (2022)]. W odróżnieniu od znanej formy tego zjawiska, która zarysowana została w rozdziale czwartym, w tym przypadku istotną rolę pełnią efekty polaryzacyjne. Jest to jedyny rozdział, w którym zaprezentowane jest bezpośrednie porównanie wyników numerycznych z eksperymentem. W sekcji 7.2 opisane jest skrótowo na czym ten eksperyment polega i jakie narzuca ograniczenia (związane z pobudzaniem różnych kombinacji modów). Jest to duża zaleta pracy, jednakże szkoda, że układ pomiarowy nie został przedstawiony nieco dokładniej, ani nie był zilustrowany na schemacie. Pomimo tego, że Doktorantka była odpowiedzialna za część numeryczną, taka ilustracja pozwoliłaby się lepiej zorientować w całości zagadnienia.

Ostatni rozdział — ósmy — zawiera podsumowanie oraz streszczenie zaprezentowanych wcześniej wyników. Po nim następuje lista skrótów, zestawienie osiągnięć naukowych i popularyzatorskich Doktorantki oraz spis rysunków i bibliografia.

Całość rozprawy pokazuje szeroką wiedzę Doktorantki z zakresu zjawisk nieliniowych w światłowodach oraz ich modelowania numerycznego. Niestety, odniosłem wrażenie, że wiedza ta jest czasami przedstawiona dość chaotycznie. W rozdziale trzecim — opisującym zastosowaną metodykę — zaprezentowane są wykorzystane równania, jednakże brakuje informacji o samym procesie modelowania i zastosowanych algorytmach numerycznych. Także w rozdziale czwartym wyniki podane są skrótowo bez rygorystycznego odniesienia do metodologii i nie zawsze było dla mnie jasne w jaki sposób zostały uzyskane.

Największym mankamentem pracy są ilustracje oraz ich opisy. Wiele wykresów, szczególnie w rozdziałach 5–7, jest zbyt małych i przez to nieczytelnych. Na części wykresów mających postać map kolorystycznych nie jest podane jaka wielkość jest zobrazowana i jak jest ona wyliczona — jako przykłady mogą posłużyć rysunku 4.11, 4.13. Ponadto w treści występują czasami błędy edytorskie, np. w rozdziale szóstym włókno oznaczone jako PCF1 określane jest raz jako mające niższą a raz jako wyższą dwójłomność niż PCF2 (z danych liczbowych wynika, że PCF2 ma wyższą dwójłomność).

Poza powyższymi mankamentami, praca prezentuje się od strony edytorskiej poprawnie. Jej układ nie budzi zastrzeżeń i ogólna struktura pracy jest logiczna i spójna.

Podsumowując, stwierdzam, że Doktorantka wykazała zaawansowaną wiedzę w zakresie fizyki światłowodów i optyki nieliniowej oraz skutecznie zademonstrowała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Sama rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego analizy zjawisk nieliniowych w światłowodach wielomodowych. Zamieszczone w niniejszej recenzji uwagi krytyczne dotyczą w głównej mierze sposobu zaprezentowania osiągnięcia naukowego a nie jego jakości merytorycznej. W związku z tym, potwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Sylwii Majchrowskiej spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Wnoszę o wyróżnienie rozprawy.



dr hab. inż. Maciej Dems, prof. ucz.