

dr hab. Inż. Rafał Kasztelanic
Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki
Pasteura 5, 02-093 Warszawa
Tel. 608 234 335
e-mail: kasztel@igf.fuw.edu.pl

Ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Sylwii Majchrowskiej pt.: „Badanie dynamiki wybranych zjawisk nieliniowych zachodzących w światłowodach wielomodowych”

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Sylwii Majchrowskiej została wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Karola Tarnowskiego w Katedrze Optyki i Fotoniki na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Badania przeprowadzone w ramach rozprawy były częściowo finansowane w ramach projektu NCN SONATA BIS 8 „Zjawiska nieliniowe w światłowodach wielomodowych – solitony wielomodowe i konwersja częstotliwości,” gdzie Pani Sylwia Majchrowska była stypendystką.

Rozprawa składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, z 8 rozdziałów, listy skrótów, zestawienia osiągnięć naukowych, spisu rysunków oraz bibliografii (102 pozycje) i liczy łącznie 118 stron. W dodatku B, Autorka przedstawiła spis własnych publikacji związanych z tematyką pracy, który składa się z 4 współautorskich artykułów w czasopismach z listy JCR (Opt. Lett – 3, J. Opt. Soc. Am. B), przy czym w dwóch artykułach Autorka rozprawy jest pierwszym autorem.

We wstępie (Rozdział 1) Autorka przedstawia główny cel rozprawy, jakim jest zbadanie dynamiki wybranych zjawisk nieliniowych zachodzących w wielomodowych światłowodach krzemionkowych. Stawia również tezę, że *przebieg wybranych zjawisk nieliniowych, w tym w szczególności dyskretnej emisji stożkowej, pułapkowania solitonów w światłowodach dwójłomnych oraz międzymodowego-wektorowego mieszania czterofalowego, zależy istotnie od kompozycji modowej pobudzenia*. Rozdział 1 zamyka wykaz 4 publikacji oraz 5 wystąpień konferencyjnych autorki rozprawy.

Kolejne trzy rozdziały, o objętości 34 stron, poświęcone są wprowadzeniu w tematykę rozprawy. Przedstawiono w nich informacje o światłowodach wielomodowych (Rozdział 2), o modelowaniu zachodzących w nich zjawiskach nieliniowych (Rozdział 3) oraz dokonano przeglądu różnych efektów liniowych i nieliniowych zachodzących w światłowodach wielomodowych (Rozdział 4).

Zasadnicza część rozprawy o objętości 44 stron zawarta jest w rozdziałach od 5 do 7 i prezentuje oryginalne wyniki badań dotyczące modelowania wybranych zjawisk nieliniowych: dyskretnej emisji stożkowej (Rozdział 5), pułapkowania solitonów w światłowodach dwójłomnych (Rozdział 6) oraz międzymodowego-wektorowego mieszania czterofalowego (Rozdział 7). Proporcja między długością części wstępnej i części autorskiej jest prawidłowa.

Przechodząc do szczegółowego omówienia pracy stwierdzam, że praca jest napisana w sposób spójny i logiczny. Wprowadzenie, wraz z własnymi przykładami poszczególnych zjawisk nieliniowych i późniejsze ich włączanie lub wyłączenie przy analizie bardziej złożonych zagadnień świadczy o ich dobrej znajomości przez Autorkę. Podejście takie pozwala również czytelnikowi na lepsze zrozumienie i połączenie w spójną całość opisywanych zagadnień.

Co do układu pracy jedynie podrozdział 6.3 poświęcony modelowaniu propagacji nieliniowej bardziej pasowałby do rozdziału 3 lub 4, które poświęcone są zagadnieniom związanym z modelowaniem i propagacją impulsów we włóknach wielomodowych.

Pewnym problemem w śledzeniu uzyskanych wyników w rozdziałach 5-7 i porównaniu siły występujących efektów nieliniowych jest ciągła zmiana parametrów pobudzenia (długość impulsu, długość fali). Może dlatego występujące w rozprawie analizy i podsumowania dotyczą tylko cząstkowych wyników. Brakuje za to w tych rozdziałach podsumowań dotyczących całości rozpatrywanego efektu.

Poniżej przedstawiam bardziej szczegółowe uwagi techniczne dotyczące poszczególnych rozdziałów.

Rozdział 2:

- Akapit pierwszy: ... *choć oczywiście istnieją także światłowody ze szkieł chalcogenkowych oraz polimerów*. Są też włókna z innych rodzajów szkieł więc bezpieczniej byłoby napisać o włóknach z innych rodzajów szkieł i polimerów.
- Podrozdział 2.1: Przy wprowadzaniu różnych wielkości brak wprowadzenia oznaczeń. Niektóre oznaczenia pojawiają się później, ale często ukryte w tekście więc trudno je wyłapać. Niektóre nie są w ogóle zdefiniowane jak np. k_0 (równanie 2.18). Nie podano też, że wielkości **E**, **H**, **B**, **D**, **P**, **M** pisane pogrubieniem oznaczają pola wektorowe.
- Błędnie podano równanie 2.24 (J_m zamiast K_m w mianownikach).

Rozdział 3:

- Gdy opisywany jest sposób rozwiązywania równania 3.1 mowa jest o dyskretyzacji. Nie podano jednak czy i jak prowadzony był test zbieżności rozwiązań.
- Podrozdział 3.1.1, zdanie: *Kolejny człon równania 3.2 ...* – powinno być równania 3.1.
- Jest: *Różnicowa szybkość nieliniowej akumulacji fazy ...* – powinno być: Różnicowa szybkość nieliniowej akumulacji przesunięcia fazy.
- Ponieważ praca ma charakter numeryczny i bazuje na rozwiązywaniu równania 3.1. Brakuje trochę dokładniejszego opisu zastosowanej metody rozdzielonego kroku z transformatą Fouriera. Dwa akapity na ten temat w podrozdziale 3.1 to, moim zdaniem, za mało, a zagadnienie przedstawione jest zbyt ogólnikowo.

Rozdział 4:

- Zdanie: *Efekt Kerra opisuje zależność współczynnika załamania światła od natężenia pola elektrycznego impulsu* można uzupełnić o wzór, lub dodać w zdaniu, w której potęgze występuje natężenie pola.
- Rys. 4.5 jest: ... *na odległość 15 nm* ... - powinno być 15 μm .
- Przydałyby się trochę dłuższe opisy pod Rys. 4.6 i 4.7. Obrazek składa się z 6 pod-obrazów a nie są one opisane.
- Przy okazji opisu mieszania czterofalowego, na Rys. 4.8, 4.11 i 4.13 na osi pionowej częstotliwość podana jest w THz. W pozostałej części pracy mamy odniesienie do długości fali, np. Rys. 6.5.

Rozdział 5:

- Przy wprowadzeniu pojęcia fali X-kształtnej, O-kształtnej i rybo-kształtnej w zależności od reżimu dyspersji przydałyby się obrazek wyjaśniający te pojęcia.
- Brakuje informacji w jakim układzie współrzędnych mamy do czynienia z wyżej wymienionymi falami. W przypadku fali stożkowej w ośrodku objętościowym mamy przestrzeń k_1 (poprzeczna składowa wektora falowego) oraz ω . Czy w przypadku dyskretnej emisji stożkowej jedyną różnicą jest zmiana współrzędnych na częstość i numeru modu (co wiąże się z k_1 ale nie jest to podane)?
- Brakuje porównania generacji ciągłej fali stożkowej w przypadku nieskończonej liczby modów (materiał objętościowy) z generacją dyskretnej fali stożkowej. W przypadku ciągłym, efektem generacji fali stożkowej są pojawiające się kolorowe pierścienie. Czy w przypadku włókna wielomodowego i dyskretnej fali stożkowej też możliwa będzie obserwacja takich pierścieni? Jak wyglądałby obraz dla światłowodu kilku modowego? W szczególności, brakuje obrazka, który tłumaczyłby emisję stożkową (kolorowe pierścienie) i który pokazywał by różnicę między wersją ciągłą a dyskretną fali stożkowej.
- Brakuje odnośnika lub wzoru potwierdzającego zdanie: ... *ponieważ rozważany światłowód jest symetryczny kołowo, współczynniki sprzężenia są niezerowe tylko dla modów typu $LP_{0,n}$* ...
- Przy okazji Rys. 5.4 pojawia się określenie ognisko nieliniowe. Nie zostało to pojęcie wytłumaczone.
- Podrozdział 5.2.2: w tekście jest mowa o poszerzeniu na odcinku 8 mm, natomiast na Rys. 5.5 poszerzenie przedstawione jest po propagacji na odcinku 7 mm.
- Rysunek 5.5: w podpisie do obrazka jest mowa o 3 panelach (górny, środkowy i dolny) a tylko 2 panele są na wykresie.
- Rysunek 5.6: w podpisie do obrazka jest mowa o propagacji impulsu na dystansie 1 mm, w głównym tekście jest mowa o propagacji na dystansie 10 cm.
- Rysunki 5.10-12 dla włókna typu GRIN: ewolucję fali przedstawiono w inny sposób niż dla wcześniej przedstawionego włókna typu step-index. Propagacja jest też na innym dystansie, przez co trudno porównać oba wyniki. Brakuje też takiego porównania w pracy. Opisy i przedstawione

wyniki symulacji koncentrują się raczej na pokazaniu, że dane zjawisko – generacja dyskretnej fali stożkowej – zachodzi w różnego typu włóknach niż na próbie jego uogólnienia czy porównania.

- Dla włókna typu step-index, na wykresach pokazujących fale X-kształtne i rybo-kształtne, na osi pionowej występuje numer modu a w przypadku soczewki GRIN jest k_r . Co prawda wytłumaczono w tekście, że jest to zobrazowanie zwykle uzyskiwane w eksperymentach laboratoryjnych, ale nie ma takich dla step-index.
- W rozdziale porównano wyniki symulacji uzyskanych przy wykorzystaniu dwóch modeli MM-GNLSE oraz MM-UPPE. Zabrakło jednak porównania złożoności obliczeniowej lub chociaż porównania czasów obliczeń.
- Autorka zwraca uwagę na ograniczenia stosowanego modelu MM-GNLSE ze względu na uproszczenia, jakie są w nim uwzględnione i pomijanie niektórych zależności. Związane z tym rozbieżności wyników w stosunku do modelu MM-UPPE i wyników eksperymentalnych pozwalają stwierdzić, że wyniki mają charakter bardziej jakościowy niż ilościowy. Czy istnieje jakiś powód, dla którego stosowanie modelu MM-GNLSE jest uzasadnione? Czy można uzupełnić model MM-GNLSE tak aby możliwe było uzyskanie także zgodności ilościowej?

Rozdział 6:

- Dane o włóknach PCF 1 i CF 2 można było przedstawić w formie tabeli dla wygodniejszego porównania ich parametrów. Przydałyby się również większe obrazy SEM wraz ze skalą.
- Rysunek 6.3: brak skali na obrazie SEM.
- Rysunek 6.5: w głównym tekście jest mowa o panelu lewym i prawym, natomiast wykres podzielony jest na część górną i dolną.
- Rysunek 6.11: ... *względem dystansu* ... ?
- Brakuje w rozdziale 6 podsumowania odnoszącego się ściśle do tezy czyli, że propagacja zależy od kompozycji modowej pobudzenia. Jest dużo wykresów (2 osie pobudzenia, 2 włókna) i wnioski giną w tekście.

Rozdział 7:

- Rysunek 7.1: brak skali dla obrazka SEM.
- Niezręczne formułowanie: ... *dane wysymulowane z COMSOLa* ...
- Rysunek 7.4: powinno być $LP_{0,1}^x$ i $LP_{0,1}^y$ a nie dwa razy $LP_{0,1}^y$.
- Rysunek 7.5: w głównym tekście jest mowa o modach $LP_{0,1}^x$ i $LP_{1,1}^{xe}$ a na wykresie o modach $LP_{0,1}^y$ i $LP_{1,1}^{ye}$.

Podsumowanie:

- Zdanie: *W wielu przypadkach otrzymane wyniki teoretyczne porównywano z wynikami pomiarów, co ostatecznie miało duży wpływ na wprowadzone uproszczenia w stosowanych modelach, zarówno*

członu liniowego, jak i nieliniowego. Uproszczenia wynikały raczej z ograniczeń wykorzystanego modelu MM-GLNSE a nie że to porównywanie wyników wymusiło wprowadzenie uproszczeń.

Przedstawione powyżej uwagi i zastrzeżenia oraz nieliczne błędy gramatyczne i literówki nie wpływają jednak na moją wysoką merytoryczną ocenę recenzowanej rozprawy. Autorka wykazała się dużą wiedzą w zakresie optyki nieliniowej i optyki światłowodowej. Uzyskane przez nią wyniki i opracowane algorytmy stanowią istotny wkład w rozwój metod numerycznych wykorzystywanych do modelowania efektów nieliniowych.

W związku z powyższym stwierdzam, iż zgodnie z obowiązującą ustawą „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. Ustaw z dn. 20.01.2020 r. poz. 85) recenzowana rozprawa doktorska zawiera oryginalne wyniki naukowe i może stanowić podstawę uzyskania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie nauki fizyczne. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr. inż. Sylwii Majchrowską do dalszych etapów postępowania przewodu doktorskiego.



dr hab. inż. Rafał Kasztelaniec