



# UNIWERSYTET MIKOŁAJA KOPERNIKA INSTYTUT FIZYKI

ul. Grudziądzka 5/7 87-100 TORUŃ

<http://www.fizyka.umk.pl/>

Tel. centr. (48 56) 611 33 10

Sekretariat: (48 56) 622 63 70

Fax (48 56) 622 53 97

e-mail: [ifiz@fizyka.umk.pl](mailto:ifiz@fizyka.umk.pl)



Dr hab. Daniel Lisak  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika,  
Instytut Fizyki  
ul. Grudziądzka 5,  
87-100 Toruń

Toruń, 5.04.2018

## **Recenzja pracy doktorskiej pani Ady Umińskiej pt. „Non-linear Optics Experiments with Rubidium-filled Fibre-optics Structures”.**

Rozprawa doktorska poświęcona jest liniowej i nieliniowej spektroskopii atomów rubidu umieszczonych wewnątrz światłowodu fotonicznego z rdzeniem powietrznym. W szczególności celem prac było doświadczalne zbadanie możliwości zastosowania tego typu układu fizycznego do realizacji optycznego przełącznika światła, wykorzystującego absorpcję dwufotonową oraz elektromagnetycznie indukowaną przezroczystość ośrodka do sterowania prędkością grupową światła. Podjęta tematyka doktoratu jest ciekawa i aktualna w kontekście badań światowych. Optyczne przełączniki sterowane światłem mogą znaleźć zastosowanie m.in. w konstrukcji kwantowych bramek logicznych, a więc potencjalnie w przyszłych komputerach kwantowych. Z tego względu tematyką tą zajmuje się wiele renomowanych grup na świecie, w tym zespół z Krakowa. Nowe rodzaje światłowodów fotonicznych pozwalają na budowę wydajnych układów doświadczalnych cechujących się dużą gęstością mocy promieniowania oddziałującego z atomami, a więc umożliwiających badania zjawisk optyki nieliniowej.

Rozprawa doktorska podzielona jest na 6 rozdziałów łącznie ze wstępem i podsumowaniem. Wstęp obejmuje krótkie omówienie optyki nieliniowej i jej potencjalnych zastosowań w komunikacji kwantowej, oraz omówienie idei światłowodów fotonicznych z mikrostrukturą.

W rozdziale drugim przedstawiono podstawy spektroskopii gazów, opisano podstawowe równania spektroskopii absorpcyjnej, związek między absorpcją i dyspersją i podstawowe efekty decydujące o kształcie atomowych linii widmowych, a następnie przybliżono warunki doświadczalne dla spektroskopii nasyceniowej rubidu oraz szczegółowo opisano poszczególne rodzaje światłowodów z mikrostrukturą, używanych w doświadczeniu. Teoria jest opisana prosto i zrozumiale, choć mam tutaj małą uwagę konkluzji na stronie 16 „...a Voigt profile, which includes both: the natural linewidth and any inhomogeneous broadening.” – w tym ogólnym rozdziale warto by dodać, że szerokość jednorodna wynika nie tylko z rozszerzenia naturalnego, ale również, a czasami przede wszystkim z rozszerzenia zderzeniowego. Niemniej jednak w opisanych w kolejnych rozdziałach badaniach faktycznie dominująca była szerokość naturalna, ze

względem na niskie koncentracje gazu. Podrozdziały 2.4 *Experimental Challenges* i 2.5 *Absorption Spectroscopy in MOFs* uważam za bardzo wartościowe. Opisane są w nim unikalne szczegóły doświadczalne, trudności i sposób ich rozwiązywania, dotyczące wprowadzenia pożądanej ilości rubidu do rdzenia powietrznego światłowodu oraz jego diagnostyki za pomocą układu laserowego o stabilizowanej częstotliwości. Mam tutaj kilka uwagi odnośnie opisu:

- str. 30 „*The probe beam was double passing an acousto-optic modulator (AOM)*” – jednak na Rys. 2.8 mamy pojedyncze przejście wiązki laserowej przez modulator;
- str. 37 zdanie „*Optical depth (OD) is a more convenient and accurate quantity to describe atomic concentrations inside the fibre than the number of atoms per volume.*” jest chyba skrótem myślowym, bo liczba atomów na objętość jest bezpośrednio koncentracją;
- str. 38 rys. 2.11(b) – nie jest dla mnie jasne, dlaczego prezentowana koncentracja atomów w światłowodzie spada ze wzrostem natężenia światła.

Rozdział trzeci poświęcono zagadnieniu desorpcji atomów z powierzchni światłowodu pod wpływem światła. Proces ten wykorzystywany jest do uzyskania zadanej koncentracji rubidu, jednak z drugiej strony utrudnia on utrzymanie stabilnej koncentracji w przypadku badań zjawisk nieliniowych, wymagających znacznych gęstości mocy promieniowania. W szczególności zbadano zależność desorpcji rubidu, mierzonej za pomocą gęstości optycznej ośrodka, od energii i czasu trwania impulsu laserowego, gdzie zgodnie z oczekiwaniami zaobserwowano wzrost desorpcji przy wzroście mocy promieniowania. W wyniku tej analizy opracowano metodę sekwencyjnej desorpcji krótkimi impulsami światła, pozwalającą uzyskać stabilną koncentrację rubidu w rdzeniu światłowodu na zadanym poziomie. Do rozdziału 3 mam dwie małe uwagi:

- analizując rysunek 3.7 wydaje się, że prezentowane słupki błędów danych doświadczalnych są niedoszacowane.
- w podsumowaniu rozdziału (str. 56) w zdaniu “... *from the point of view of LIAD, it is intensity not power of the desorbing light that controls the amplitude of the process ...*” powinno chyba być “*energy*” zamiast “*power*”.

W rozdziale czwartym opisano teoretyczne podstawy nieliniowej spektroskopii, w szczególności przeanalizowano zachowanie prędkości grupowej w pobliżu przejścia absorpcyjnego oraz przypadek absorpcji dwufotonowej. Opis teoretyczny jest i zrozumiały i zawiera wiele pożytecznych odniesień do wcześniejszych badań. Tu zauważyłem, że we wzorze (4.28) powinno być  $v_z/c$  zamiast  $v_c/c$ , a także podpis rysunku 4.4 „*A narrow Lorentzian profile (red dashed line) is convolved with a broad Gaussian function (blue dashed line)*” niezbyt odpowiada jego treści, gdzie mamy inne kolory i jednakowe szerokości profili.

Po części teoretycznej opisany został układ doświadczalny zbudowany do badań absorpcji dwufotonowej Rb w światłowodzie HC-PCF. Dzięki zastosowaniu detekcji fazoczułej układ doświadczalny umożliwił jednoczesny pomiar absorpcji i dyspersji, czyli zespolonego współczynnika załamania ośrodka. Uzyskano sygnał dwufotonowej absorpcji o amplitudzie zależnej od natężenia wiązki kontrolnej, a więc prostą realizację przełącznika optycznego w światłowodzie. Zaobserwowano również przyspieszenie i spowolnienie impulsu światła w ośrodku, odpowiadające ujemnemu i dodatniemu grupowemu współczynnikowi załamania. Wyniki dobrze zgadzają się z teorią w przypadku małego natężenia promieniowania i znacznie gorzej dla dużego natężenia  $0.64 \text{ W/cm}^2$ . Rozważane przyczyny tej niezgodności obejmują zmianę

kształtu impulsu spowodowaną jego skończoną szerokością spektralną i dyspersją prędkości grupowej oraz występowanie oscylacji Rabiiego. W tym celu przedstawiono szczegółowo teorię oscylacji Rabiiego i zaobserwowano je w doświadczeniu. Choć kierunek poszukiwań wydaje się jak najbardziej uzasadniony nie doprowadziły one ostatecznie do wyjaśnienia różnic między teorią i doświadczeniem z rysunku 4.16(b). Do rozdziału czwartego mam jeszcze dwie uwagi:

- w podpisie pod rysunkiem 4.25 „*The error bars for the measured points are smaller than the point size*”, co wydaje mi się mocno zaniżone, jeśli częstotliwości te są wyznaczone z sygnałów podobnych do przedstawionego na rysunku 4.24(b);
- w podsumowaniu rozdziału 4, na str. 105 „*The Rabi oscillations were implemented into the data analysis of the fast-light experiment. This correction for the measured pulse shape deepened the discrepancy between measured and theoretically predicted pulse advancement (Fig. 4.16b).*” Nie mam powodu by nie wierzyć, ale nie znalazłem tego porównania w rozprawie.

Rozdział piąty obejmuje poszukiwanie efektów związanych z kwantową interferencją w układzie trójpoziomowym. W szczególności analizowana jest możliwość obserwacji efektów elektromagnetycznie indukowanej przezroczystości (EIT) oraz rozszczepienia Autlera-Townesa (ATS) w wypełnionym parami rubidu światłowodzie HC-PCF. Po dobrze napisanym wstępie teoretycznym przedstawione są wyniki doświadczenia dla układu kaskadowego i układu typu V w rubidzie. Uzyskano wyraźne okno przezroczystości wynikające z rozszczepienia AT, natomiast obserwacja efektu EIT okazała się niemożliwa ze względu na nieoptymalną koncentrację rubidu. Wydaje się, że przy dalszej optymalizacji układu doświadczenia uzyskanie EIT byłoby możliwe. Potencjalne modyfikacje układu opisano w konkluzjach i warto by je w przyszłości zrobić. Do rozdziału 5 mam jedną uwagę – str. 125 „*... theoretical and experimental values are in good agreement*” – warto by pokazać to porównanie.

Podsumowując, rozprawa doktorska pani Ady Umińskiej stanowi cenne źródło wiedzy na temat realizacji eksperymentów optyki nieliniowej w światłowodzie z rdzeniem powietrznym i trudności doświadczenia, jakich należy się spodziewać. Większość celów naukowych udało się zrealizować, a w innych osiągnięto znaczący krok do przodu i uzyskano oryginalne wyniki. Rozprawa jest dobrze napisana, widać bardzo dobrą orientację autorki w tematyce. Drobne błędy, jakie udało mi się znaleźć nie umniejszają wysokiej wartości naukowej rozprawy. W moim przekonaniu praca spełnia wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim z fizyki. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie pracy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

  
Daniel Lisak