



Toruń, 10.06.2019

Prof. dr hab. Roman Ciuryło  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Romana Panasia pt. : „Zimne atomy w bliskim polu optycznym”.**

Mgr Roman Panaś skoncentrował swoje wysiłki na konstrukcji optycznego lustra dipolowego dla atomów i temu poświęcił swoją rozprawę doktorską. Prace te mieściły w szerokiej tematyce badań własności ultrazimnych atomów przy powierzchni zainicjowanej i rozwijanej przez profesora Tomasza Dohnalika i promotora tej rozprawy dr. hab. Tomasza Kawalca. Ze względu na bogatą historię badań nad ultrazimnymi atomami, które w Polsce zaczęły się na Uniwersytecie Jagiellońskim doktorant mógł korzystać z świetnego otoczenia naukowego i szeregu osiągnięć starszych kolegów. Pozwoliło to skutecznie włączyć się w bardzo konkurencyjny i aktualny nurt światowych badań w dziedzinie inżynierii kwantowej fal materii. Praca ta jest eksperymentalną demonstracją wykorzystującą przypowierzchniowe plazmony do konstrukcji nowego rodzaju lustra dipolowego dla fal materii. Czerpie z uprzednio zaproponowanych w rozprawie doktorskiej dr Dobrosławy Bartoszek-Bober podejść do opisu plazmonów powierzchniowych i z sukcesem implementuje je podczas interpretacji danych doświadczalnych.

Przedstawiona do oceny rozprawa została opatrzona wstępem, w którym zarysowano tematykę oraz układ pracy doktorskiej. Zasadnicza część rozprawy zaczyna się od rozdziału drugiego zawierającego wprowadzenia podstawowych pojęć i metod opisu badanych zjawisk. Autor wykorzystuje podejście klasyczne do opisu oddziaływania pola elektromagnetycznego z metalami. Zwraca szczególną uwagę na plazmowy model metali podany przez Drudego. W drugiej części tego rozdziału definiuje kluczowe dla tej rozprawy polarytyny plazmonów powierzchniowych. Opisuje relacje dyspersji plazmonów powierzchniowych, ich tłumienie, długość propagacji jak i głębokość wnikania. Sporo uwagi poświęcono metodom generacji plazmonów powierzchniowych oraz ich detekcji. Rozdział ten zawiera niezbędny zestaw informacji opisujących podstawy fizyczne



umożliwiający wykorzystanie plazmonów powierzchniowych do obijania atomów. Główna zasada działania tego typu luster zasadza na zwiększeniu zależnego od czasu pola elektromagnetycznego przy powierzchni metalu a co za tym idzie również jego gradientu. W przypadku atomu znajdującego się w takim polu o częstotliwości istotnie wyższej od częstotliwości rezonansu atomowego pojawia się siła wypychająca atom z obszaru zmiennego pola elektromagnetycznego. Wzmocnienie pola elektromagnetycznego przy powierzchni dzięki wzbudzeniu plazmonów powierzchniowych pozwala na zwiększenie efektywności tego rodzaju lustro oraz użycie znacznie niższych natężeń światła. Efekty te zależne są od struktury, w której wzbudzone są plazmony a także od kąta padania i polaryzacji światła je wzbudzające.

Główne wyniki doświadczalne rozprawy zostały przedstawione w rozdziale trzecim. W pierwszej części tego rozdziału został przedstawiony eksperyment, w którym wykorzystano odbiciową siatkę dyfrakcyjną. Złota siatka dyfrakcyjna spojona tytanem z podłożem krzemowym została wykonana z wykorzystaniem elektronowej litografii. Tak wykonana siatka miała wymiary liniowe ograniczone do 100  $\mu\text{m}$ . Aby uzyskać siatkę o wymiarach niezbędnych dla planowanego eksperymentu konieczne było jej złożenie z wielu elementów, w tym przypadku trzydziestu dwu. Zimne atomy rubidu zostały przygotowane w pułapce magneto-optycznej. Diagnozując chmurę ultrazimnych atomów otrzymano wartości ich temperatury równe kilkudziesięciu mikrokelwinom. Kombinując ze sobą obie wyrafinowane techniki przeprowadzono pierwszy eksperyment z odbiciem ultrazimnych atomów od lustro dipolowego generowanego przez plazmony na powierzchni złotej odbiciowej siatki dyfrakcyjnej. Wyniki te zostały opublikowane w prestiżowym *Optics Letters* w roku 2014. Przedstawione podejście jednak miało dość istotne wady zwłaszcza jeśli chodzi o kosztowną produkcję siatki dyfrakcyjnej. Rozwiązaniem okazało się wykorzystanie odpowiednio spreparowanej płyty DVD+R. Druga część tego rozdziału jest poświęcona demonstracji działania dipolowego lustro plazmonowego generowanego na płycie DVD. Takie podejście umożliwia tańsze otrzymanie siatki dyfrakcyjnej o większym rozmiarze. W rozprawie doktorskiej przedstawiono wyniki obrazowania procesu odbicia atomów od lustro. Podczas analizy danych uwzględniono krótkozasięgowe oddziaływanie van der Waalsa. Wspomniane były też efekty retardacyjne. Sprawdzone również na ile podgrzewanie siatki dyfrakcyjnej podczas generacji plazmonów miało znaczenie dla otrzymywanych wyników. Wykazano, iż w przypadku stosowanego cyklu pomiarowego nie miało to znaczenia. Również te wyniki zostały opublikowane, tym razem w *Plasmonics* w roku 2017.

Kolejny rozdział czwarty został poświęcony symulacjom wykorzystywanym w interpretacji danych doświadczalnych. Oprócz obliczania po natężenia pola plazmonów przypowierzchniowych sporo uwagi poświęcono obliczeniom trajektorii ruchu poszczególnych atomów. Istotnym wynikiem tej pracy było przeprowadzenie obliczeń kształtu chmury ultrazimnych atomów odbitej od dipolowego lustro plazmonowego. Posumowanie wyników rozprawy zostało zawarte w rozdziale piątym. Ponadto rozprawa zawiera dodatek dotyczący szacunkom oddziaływania dipolowego w przypadku rozważanych atomów rubidu.

Rozprawa jest starannie zredagowana, napisana klarownym językiem bardzo ułatwiając podążanie za opowieścią snutą przez mgr. Romana Panasia. Przedstawione wyniki jak i kontekst

historyczny jest zilustrowany bardzo dobrze dobranymi pozycjami bibliograficznymi. Obrazują one zarówno dokonania światowe w tej dziedzinie, pojawiające się problemy jak i usytuowanie wyników Autora na tym tle. Czytając rozprawę natrafiłem na drobne usterki, które z obowiązku recenzenta wymienię.

Przedostatnie zdanie ze str. 1 Wstępu: „Cechami charakterystycznymi bliskiego pola jest brak emisji promieniowania i szybki eksponentalny zanik wraz z odległością od źródła, skutkujący dużą gęstością natężenia promieniowania.” powoduje pewne zakłopotanie. Po dalszej lekturze rozprawy można domyślać się co Autor miał na myśli jednak samo w sobie nie było dla mnie jasne. Równania (2.12)-(2.14) ze str. 7 winny się ze sobą ściśle wiązać jednak ze względu na występujący w nich wszystkich minus są ze sobą sprzeczne. Na str. 8 przy wzorze (2.20) pojawia się referencja do klasycznej książki z elektrodynamiki [8] i słusznie choć pewnie wcześniejsze wyrażenie, poczynając od wzoru (2.1) są równie oczywiste lub nieoczywiste i mogły by być opatrzone stosowną referencją. Wielkość  $n$  dotąd oznaczała współczynnik załamania światła jednak we wzorze (2.24) jest już gęstością elektronów. W referencji [56] zabrakło numeru tomu i numeru artykułu: 51, 135005. Pisząc o pułapce dipolowej warto by wspomnieć oryginalną pracę Cooka z 1979 r. W bibliografii dwa razy pojawia się ta sama praca, są to referencje: [76] i [79]. Pewien niedosyt budzi dość odległa pozycja mgr. Roman Panasia na liście autorów prac [57] i [62] zasadniczych dla tej rozprawy.

Z podsumowania rozprawy jasno wynika, iż mgr Roman Panaś był kluczową osobą dla otrzymania prezentowanych w rozprawie wyników. Zwłaszcza pod względem doświadczalnym było to nie banalne przedsięwzięcie. Eksperyment łączył wykorzystanie nietrywialnych nanostruktur z technologią umożliwiającą kontrolę ultrazimnych atomów. Jakby tego było mało doktorant musiał zmierzyć się z przeprowadzką i ponownym odtworzeniem funkcjonalności laboratorium. To zawsze kosztuje wiele czasu ale i znacząco zwiększyło doświadczenie mgr. Roman Panasia.

Konkludując stwierdzam, iż mgr Roman Panaś swoją rozprawą doktorską zademonstrował umiejętnością rozwiązania postawionego przed nim problemu badawczego harmonijnie współpracując z towarzyszącym mu zespołem badawczym. Uważam że rozprawa doktorska mgr. Romana Panasia w wystarczającym stopniu spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zarówno te ustawowe jak i zwyczajowe, dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie doktoranta do publicznej obrony jego rozprawy.