

Warszawa, 04. 09. 2020

Prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz  
Instytut Fizyki Doświadczalnej  
Wydział Fizyki  
Uniwersytetu Warszawskiego  
02-093 Warszawa, ul. Pasteura 5

**Recenzja pracy doktorskiej mgr Aleksandry Sierant pt.**  
*Tailored optical near field potentials for cold atoms*

Plazmony to kwanty oscylacji o częstości plazmowej gazu elektronowego w objętości przewodnika. W przypadku, gdy oscylacje plazmy zachodzą na powierzchni metal – dielektryk, mówi się o plazmonach powierzchniowych. Gdy następuje ich sprzężenie z falą elektromagnetyczną, nazywa się je polarytonami. Są to kwazicząsteczki składające się z fotonów i fononów kolektywnych oscylacji elektronów przy powierzchni styku metalu i dielektryka. Skuteczne wzbudzenie polarytonów następuje przy zapewnieniu dopasowania fazowego pola elektromagnetycznego i drgań plazmy. Długość ich fali jest zazwyczaj dużo mniejsza od długości fali światła o tej samej częstotliwości.

Plazmony powierzchniowe znajdują zastosowania w bardzo wielu dziedzinach. Między innymi pozwalają na koncentrację energii świetlnej w bardzo małych objętościach i uzyskiwanie lokalnych natężeń przekraczających natężenia wiązek wzbudzających nawet o dwa rzędy wielkości. Uzyskiwanie w takich warunkach wysokich gradientów natężeń otwiera pole dla wielu nowych zastosowań. Na przykład, gdy atomy znajdują się w polu takiej fali przy odstrojeniu jej częstości ku falom krótszym w stosunku do częstości przejścia atomowego pojawia się potencjał odpychające je. Daje to możliwość budowy optycznego lustra dipolowego i innych nanomanipulatorów dla chłodnych atomów. W rozprawie doktorskiej mgr Aleksandry Sierant dyskutowane jest zagadnienie potencjałów bliskiego pola związanych z plazmonami powierzchniowymi – polarytonami wytwarzanymi w sąsiedztwie siatek metalicznych odbiciowych i transmisyjnych, przede wszystkim dla takich zastosowań.

Poza wstępem, zakończeniem i dodatkami główna część dysertacji jest podzielona na dwie części. Pierwsza z nich dotyczy siatek odbiciowych. Prace nad tym problemem prowadzone są w zespole *Laboratorium zimnych atomów przy powierzchni* Zakładu Optyki Atomowej Instytutu Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Jagiellońskiego od wielu lat. Między innymi zrealizowano tam po raz pierwszy na świecie optyczne lustro dipolowe z wykorzystaniem plazmonów powierzchniowych generowanych na siatce dyfrakcyjnej. Autorka brała udział w tych badaniach jeszcze przed uzyskaniem dyplomu magistra. Następnym krokiem w działaniach zespołu było wykorzystanie do tego celu siatek

powstałych na bazie dysków optycznych DVD-R i DVD-RW. Mgr A. Sierant dokonała charakteryzacji dysku, jego pomiarów, analizy wyników. Współpracowała przy opracowaniu metody przygotowania płyty DVD do takich zastosowań polegającej na odpowiednim jego rozwarstwieniu – co jest techniką trudną, nie dającą powtarzalnych wyników; dobre próbki uzyskuje się tylko w niektórych przypadkach. Określono dla jakich długości fal, jakich kątów i z jaką wydajnością generowane są w takich siatkach plazmony. Zmierzono i dokonano modelowania rozkładów pól promieniowania. Siatki tego rodzaju, aby charakteryzowały się dobrą wydajnością, należy pokryć warstwą złota – co wykazały pomiary przeprowadzone przez mgr A. Sierant. W badaniach doktorantka stosowała mikroskop sił atomowych. W celu uzyskania silnych gradientów natężenia promieniowania naturalną tendencją jest zwiększanie mocy lasera. Autorka, wykazała, stosując analizę za pomocą kamery termowizyjnej, że to podejście ma swoje ograniczenia: już przy mocach rzędu kilku miliwatów następuje kilkudziesięciostopniowy wzrost temperatury siatki prowadzący do spadku wydajności wytwarzania plazmonów i mogący zniszczyć strukturę. Przewidziano, że efekty te w przypadku lustra optycznego można ograniczyć stosując wzbudzenie impulsowe, które dodatkowo przeciwdziała adsorpcji atomów rubidu na powierzchni złota.

Wiele wysiłku mgr A. Sierant włożyła w modelowanie procesów plazmonowych zachodzących w siatkach uzyskanych z płyt DVD. Stosowała metody analizy fal ściśle sprzężonych (RCWA) i technikę różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD). Pozwoliło to określić kąty wydajnego pojawiania się plazmonów dla długości fal 633, 780 i 1068 nm oraz znaleźć przestrzenne rozkłady natężenia promieniowania, przy czym dla 780 nm rezonanse te charakteryzują się wydajności dochodzącą do 95%. Obserwowano rekordowe lokalne wzmocnienia pola o czynnik 220. Wyniki symulacji są zgodne z wynikami pomiarów.

W rezultacie prac ze znaczącym udziałem doktorantki w *Laboratorium zimnych atomów przy powierzchni* udało się skonstruować optyczne zwierciadło dipolowe wykorzystujące siatki wykonane z płyt DVD i pokazać w eksperymencie jego użyteczność w „odbijaniu” atomów pochodzących z pułapki magnetoptycznej. Zimne atomy rubidu odbijane były ze sprawnością 100%.

Druga część pracy dotyczy generacji polarytonów w siatkach transmisyjnych. Nie zostały one jeszcze wykorzystane do konstrukcji optycznego lustra dipolowego, jednak zainteresowanie nimi wynika stąd, że ich ewentualne użycie wiąże się taką z geometrią tego doświadczenia, w której nie dochodzi do oświetlenia pułapki optycznej wiązką lasera wzbudzającego plazmony. Dzięki temu unika się dodatkowych rozprożeń fotonów i

podgrzewania tą drogą atomów w pułapce. Mgr A. Sierant miała w przypadku opracowania tych siatek rolę wiodącą. Przeprowadziła ich modelowanie i określiła, jakie powinny być optymalny okres, wysokość i szerokość metalicznych prążków siatki dla promieniowania o długości fali 780 nm (użytecznego dla doświadczeń z Rb). Na tej podstawie w wyspecjalizowanym laboratorium UJ wytworzono siatki i dokonano ich badań. Modelowanie przeprowadzone przez doktorantkę wyjaśniło, że rozbieżność między założonymi a osiągniętymi parametrami wynika z chropowatości jej struktury, nie do uniknięcia w procesie wytwarzania. Dla tych siatek określiła, że wydajność sprzężenia plazmonów z wiązką wzbudzająca osiąga wartość 68%, a lokalne natężenia pola wytwarzanego mogą być 50 razy większe niż natężenia promieniowania wzbudzającego. Przeprowadziła obserwacje natężenia pola od plazmonów za pomocą mikroskopu skanującego bliskiego pola (NSOM). Ujawniła procesy rozwoju i propagacji plazmonów. Określiła rozkłady natężenia w przypadku pobudzenia światłem o polaryzacji TM i TE. Wyniki obserwacji były zgodne z wynikami symulacji.

Uzyskanie postępów w pracach doświadczalnych w dziedzinie zimnych atomów wymaga zgranego współdziałania zespołu specjalistów. Takim mianem można określić grupę *Laboratorium zimnych atomów przy powierzchni*. Doktorantka niewątpliwie korzystała z bogatego dorobku IF UJ w dziedzinie chłodnych atomów. W takim wypadku pojawia się zawsze pytanie o samodzielność osiągnięć kandydata do stopnia doktora nauk. W roku 2019 w wymienionym powyżej zespole powstała praca doktorska Romana Panasia pt. *Zimne atomy w bliskim polu optycznym*, o zbliżonej tematyce. Recenzent zapoznał się z tą pracą i stwierdza, że zakresy dysertacji dr. R. Panasia i mgr. A. Sierant są rozdzielone. Tę różnicę dobrze oddaje odmiennosc tytułu rozprawy mgr A. Sierant: *Tailored optical near field potentials for cold atoms*. Działania dr R. Panasia były powiązane przede wszystkim z realizacją doświadczalną optycznego lustra dipolowego i demonstracją jego działania z użyciem chłodnych atomów z pułapki magnetoptycznej, a także z modelowaniem procesu odbicia i konkurencyjnego procesu przyciągania atomów do lustra w wyniku działania sił van der Waalsa. Jednakże mgr A. Sierant brała udział i w tych pracach, a przy tym część z nich (np. obliczenia rozkładu natężenia metodą RCWA) wykonana została tylko przez autorkę. Natomiast zupełnie samodzielne osiągnięcia doktorantki są związane przede wszystkim z pomiarami i charakteryzacją dysku DVD użytego do wytworzenia siatek dla lustra optycznego, jego badaniami za pomocą mikroskopu sil atomowych, badania termoplazmonowymi, obliczeniami rezonansów plazmonowych za pomocą metody RCWA i

FDTD, obliczeniami rozkładów natężenia promieniowania bliskiego pola. Prace te dotyczyły zarówno charakterystyki siatek odbiciowych jak transmisyjnych oraz ich pomiarów, przy czym działania związane z siatkami transmisyjnymi były zupełnie samodzielne.

W rozprawie pokazano, że oba rodzaje siatek są efektywnymi strukturami dla zjawisk plazmonowych, które mogą się stać obiecującymi narzędziami dla doświadczeń z zimnymi atomami. Jednak użyteczność prac wykonanych przez mgr A. Sierant jest znacznie szersza i dotyczy wielu innych zastosowań układów plazmonowych, jak choćby w zakresie ultraczułych sensorów, nanomanipulatorów, czy w biofizyce lub do sterylizacji powierzchni, wreszcie dla obwodów opartych na plazmonach powierzchniowych, modulatorów elektrooptycznych i wielu innych urządzeń.

Mgr A. Sierant jest współautorką 5 publikacji naukowych. Cztery z nich są bezpośrednio związane z tematyką pracy doktorskiej, przy czym w dwóch ostatnich (z roku 2019 i 2020) jest pierwszym autorem.

Praca została napisana dobrą angielszczyzną i poddana starannej redakcji. Recenzent zauważył niewiele drobnych błędów (np. w równaniu nieoznaczonym - między 1.2.3 a 1.2.4 - pomylono operatory  $V_{AR}$  i  $V_{AL}$ ). Jako wadę odbieram brak schematu poziomów energetycznych atomu Rb z zaznaczeniem przejść optycznych i podaniem bezwzględnych wartości długości fal ważnych dla doświadczenia z pułapką atomową. Choć można przyjąć, że pułapka magnetooptyczna dla atomów rubidu jest dziś pewnym standardem dla optyki ośrodków zimnych, to niezamieszczenie takiego schematu i odesłanie czytelnika do literatury utrudnia analizę tekstu. Wydaje mi się też, że w tekście nadużyto skrótów i akronimów w miejsce pełnych nazw, co także nie jest ułatwieniem dla postronnego czytelnika.

Wymienione powyżej nieścisłości, czy też niedociągnięcia nie obniżają wartości pracy, którą oceniam jako bardzo dobrą. Podsumowując stwierdzam więc, że dysertacja mgr Aleksandry Sierant jest ciekawa, nowatorska, pożyteczna i ma dużą wartość naukową. Dotyczy aktualnych, problemów współczesnej fizyki atomowej, ale osiągnięte wyniki mają także istotne znaczenie dla innych zastosowań układów plazmonowych.

Stwierdzam, że rozprawa pt. *Tailored optical near field potentials for cold atoms* spełnia warunki określone w odpowiednich ustawach. Wniosuję o dopuszczenie tej pracy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

  
Tadeusz Stacewicz