

Dr hab. Krystyna Kolwas,
Profesor w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk,
Al. Lotników 32/46, 05-806 Warszawa

Warszawa, 30 kwietnia 2019r.

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

Przedstawiona mi do recenzji praca doktorska pana mgr. Romana Panasia pod tytułem „Zimne atomy w bliskim polu optycznym”, wykonana pod opieką promotorską dr hab. Tomasza Kawalca jest kolejną z cyklu prac doktorskich i magisterskich poświęconych najbardziej wyrafinowanym problemom współczesnej fizyki atomów, podejmowanych w Laboratorium Zimnych Atomów przy Powierzchni.

Praca ma przejrzysty układ i napisana jest precyzyjnym, klarownym językiem. Poprzedza ją Wstęp, oraz następujące po nim Wprowadzenie. Rozdział 3 zawiera materiał dotyczący podstaw zjawisk plazmonowych oraz działania optycznych lusterek dipolowych na bazie dyfrakcyjnej siatki odbiciowej i spreparowanej płyty DVD, opis lusterek dipolowych na bazie polarytonów plazmonów powierzchniowych zastosowanych w przeprowadzonych doświadczeniach, opis tych doświadczeń oraz opis dalszych kroków eksperymentalnych zapoczątkowanych przez autora. Rozdz. 4 zawiera szczegółowy opis rozwijanego w trakcie trwania doświadczeń symulatora lustra dipolowego, zaś Rozdz. 5 zawiera podsumowanie pracy. Dodatek A ma na celu uzasadnienie zaniedbania efektów wynikających ze struktury nadsubtelnej linii D_2 w atomach rubidu. Praca zawiera liczne odnośniki do trafnie wybranych 103 pozycji literaturowych.

Badane w pracy zagadnienia związane z optycznymi lustrami dipolowymi dla atomów rubidu znakomicie mieszczą się w zakresie określonym tytułem pracy stanowiąc zbiór węższy niż zbiór zagadnień sugerowany tym tytułem.

Wszystkie cele określone w pracy jako budowa budowa lusterek dipolowych dla atomów rubidu na bazie polarytonów plazmonów powierzchniowych, zostały pomyślnie zrealizowane. Przy ich pomocy wykonano szereg niezwykle wyrafinowanych doświadczeń nad chmurą atomów rubidu schłodzonych w pułapce magneto-optycznej, a następnie odbijanych od lusterek dipolowych na bazie siatki odbiciowej i spreparowanej płyty DVD. Powodzenie tych finezyjnych doświadczeń świadczą o najwyższych umiejętnościach i szerokiej wiedzy wykonującego je eksperymentatora. Przeprowadzone badania pozwoliły wyznaczyć parametry początkowe chmury atomowej oraz opisać dynamikę obrazowanego procesu odbicia. W szczególności:

- znaleziono rozkład przestrzenny atomów oraz ich liczbę w pułapce magneto-optycznej z wykorzystaniem obrazowania fluorescencyjnego,

- wyznaczono temperaturę chmury atomów metodą pomiaru czasu przelotu TOF (ang. Time of Flight) po uwolnieniu atomów z pułapki na podstawie przeprowadzonej oceny zmian rozmiarów chmury w kierunku prostopadłym do działania siły grawitacji,
- zademonstrowano możliwości wykorzystania siatki odbiciowej jako optycznego lustra dipolowego dla atomów po uwolnieniu chmury atomów z pułapki MOT, oraz oszacowano procent odbijanych przez lustro atomów z chmury,
- wyznaczono średnią wysokość nad powierzchnią siatki, dla której zachodzi odbicie atomów (400 nm), trajektorie atomów w pobliżu lustra dipolowego oraz rozkład ich położenia i prędkości po odbiciu,
- zademonstrowano możliwości wykorzystania spreparowanej płyty DVD+R do generowania plazmonów powierzchniowych uzyskując relatywnie dużą powierzchnię lustra dipolowego dla atomów rubidu w tani i szybki sposób. Lustro dipolowe na bazie plazmonów powierzchniowych z użyciem struktur dyfrakcyjnych użyte w doświadczeniach i opisywanych w rozprawie górują kompaktowością i większymi możliwościami kształtowania potencjału niż lustro dipolowe z pryzmatem pokrytym cienką warstwą metalu, które użyto w poprzednich realizacjach doświadczalnych. Należy podkreślić, że realizacja optycznego lustra dipolowego z wykorzystaniem płyty DVD była pierwszą tego typu realizacją lustra, nikt też wcześniej nie zakończył sukcesem takiej realizacji na bazie płyty CD.
- powtórzono eksperyment odbicia chmury atomów rubidu od lustra dipolowego na bazie spreparowanej płyty DVD+R po odpowiedniej modyfikacji układu zastępując odbiciową siatkę dyfrakcyjną płytą DVD+R, usunięto niedogodność związaną z niecentralnym spadkiem chmury atomów na powierzchnię lustra z poprzedniego doświadczenia. W efekcie uzyskano większą liczbę odbitych atomów oraz możliwość oceny wpływu oddziaływań typu van der Waalsa między atomami a pokrytą złotem powierzchnią płyty DVD+R na procent odbijanych atomów,
- wyznaczono potencjału lustra dipolowego na podstawie obliczonego rozkładu natężenia pola elektrycznego na przekroju siatki w płaszczyźnie prostopadłej do linii siatki (czyli rowków płyty DVD) oraz obliczono rozkładu całkowitego natężenia promieniowania pola elektromagnetycznego,
- przeprowadzono szereg symulacji numerycznych, które pozwoliły zoptymalizować warunki przeprowadzonych doświadczeń oraz odtworzyć z dobrą dokładnością otrzymane wyniki. W szczególności stworzony został elastyczny numeryczny symulator działania lustra dipolowego dla atomów rubidu, który uwzględniał wszystkie najważniejsze parametry doświadczenia, zarówno te związane z potencjałem dipolowym (odstrojenie od rezonansu, rozkład przestrzenny i wartość natężenia) jak i parametry chmury odbijanych atomów (ich położenie względem lustra w momencie wypuszczenia z pułapki MOT oraz temperaturę). W miarę rozwoju doświadczeń symulator rozbudowano stosownie do potrzeb uwzględniając potencjał van der Waalsa oraz profil wiązki dipolowej. Przy pomocy uzyskanego narzędzia możliwa była:
 - symulacja początkowych rozkładów atomów (położenia, prędkości) na podstawie analizy zdjęć fluorescencyjnych chmury atomów
 - symulacja ruchu atomów w potencjale lustra dipolowego (trajektorie ruchów atomów z uwzględnieniem parametrów początkowych oraz grawitacji, obliczenie wysokości nad powierzchnią lustra, na jakiej atomy ulegają odbiciu),

- dokonano oceny efektu termo-plazmonowego na płycie DVD+R w warunkach próżni i wykorzystano ten efekt dla odwrócenia niekorzystnych skutków adsorpcji atomów rubidu na powierzchni lustra,
- sformułowano kierunek dalszych zmian w układzie doświadczalnym, które pozwoliłyby obniżyć temperaturę chmury atomów nad powierzchnią lustra i uzyskać odbicie dla mniejszych natężeń wiązki laserowej,
- uzyskano dalsze obniżone temperaturę chmury dzięki zastosowaniu skrzyżowanych pułapek dipolowych do około 5 μK przy czasie życia wynoszącym 60 ms z temperatury 40 μK uzyskanej w pierwszym eksperymencie lustra dipolowego na bazie siatki odbiciowej oraz 30 μK w doświadczeniu z wykorzystaniem lustra dipolowego na bazie płyty DVD.

Sukces wykonanych doświadczeń i finezja uzyskanych wyników zasługuje na najwyższą ocenę.

Pozostając przy takiej ocenie merytorycznej wykonanych doświadczeń i ich interpretacji, mam kilka uwag, które nie obniżają wartości osiągniętych przez autora wyników, a dotyczą rozdziałów wprowadzających. Zamieszczam je z obowiązku recenzenckiego.

Rozdział wstępny zatytułowany przez autora „Zagadnienia teoretyczne” w niektórych fragmentach (np. w Rozdz. 2.3) wydaje się zawierać zbyt elementarny materiał dostępny w opracowaniach książkowych. W szczególności przytoczone wnioskowanie (dół strony 12) na temat spadku współczynnika załamania metali (który jest wielkością mierzoną) jako skutek zmian z częstością funkcji dielektrycznej wynikającej z bardzo uproszczonego modelu jest zabiegiem czysto akademickim w niekorzystnym znaczeniu tego słowa i w kontekście pracy jest zbędnym nieporozumieniem.

Szkoda, że poświęcając sporo miejsca na szczegółowe omówienie pojęć elementarnych autor nie zdecydował się na podobne omówienie pojęć w Rozdziale 3.2, które są zdecydowanie bardziej istotne z punktu widzenia pracy. Autor zadowolił się jedynie odnośnikami do prac szczegółowych, które nie zawsze dostarczają wyczerpującej informacji na temat pochodzenia zależności i cytowanych w pracy związków. Pełniejsze omówienie pojęć takich jak prędkości tłumień, potencjał oddziaływania wytworzonego momentu dipolowego z natężeniem pola elektrycznego, częstość rozpraszania fotonów, warunek natężeń promieniowania poniżej nasycenia i jego związek z prędkościami tłumienia, związek optycznego potencjału dipolowego z natężeniem, uwzględnienie czynników Clebscha–Gordona i skutki tej czynności dla wzoru 3.6 dla przejścia D_2 w rubidzie (publikacje [62, 57] tego nie wyjaśniają) czy prawdopodobieństwo rozproszenia fotonu na atomie podczas odbicia od lustra stworzyłyby unikalne kompendium wiedzy podnoszące wartość spisanej wersji pracy.

Brak jest odnośnika do źródła, z którego czerpał autor informacje na temat danych dla złota cytowanych w różnych miejscach pracy takich jak: koncentracja elektronów (str.1), częstość tłumienia (str.10), częstość plazmowa (str.10), wielkość ϵ_∞ (str.14).

str. 4. Zdanie „Dla większych energii promieniowania z zakresu UV pojawiają się międzypasmowe wzbudzenia związanych elektronów skutkujące absorpcją światła” jest nieściśle, gdyż dla złota próg absorpcji związany z przejściami międzypasmowymi pojawia się dla 1.8eV (dla długości fali krótszych niż 660nm) czyli w widzialnym przedziale widmowym (na podstawie P. B. Johnson and R. W. Christy, *Phys. Rev. B* 6, 4370 (1972), patrz wykresy w pracach *J. Chem. Phys.* 125, 164705 (2006); doi: 10.1063/1.2360270 czy *Plasmonics* 1, 941(2016); doi 10.1007/s11468-015-0128-7).

Drobne uwagi edycyjne:

str.1. „Cechami charakterystycznymi bliskiego pola jest brak emisji promieniowania” – sformułowanie niezręczne

str.15 „Zaburzenie propaguje wzdłuż granicy ośrodków...” – powinno być „...propaguje się..”

str. 20 „Obszar wzbroniony, w którym rzeczywista część przenikalności elektrycznej metalu jest większa od ujemnej wartości przenikalności elektrycznej dielektryka...” jest niezręczne, gdyż przenikalność elektryczna dielektryka jest dodatnia. Może lepiej byłoby „jest większa od wartości przenikalności elektrycznej dielektryka z minusem...”

str.22, tekst legendy i opis osi jest mało czytelny (zbyt mała czcionka)

str. 23, w tekst „Długość propagacji definiuje się jako odległość, po której energia plazmonu zmaleje do $1/e$ swojej wartości początkowej” wkradł się błąd. Powinno być „...propagujące się pole elektryczne plazmonu stłumione zostanie e razy”

str.25, Rys. 2.8. Brak informacji na temat przyjętych do rachunku parametrów modelu Drudego oraz ich źródła

str.28, Do Rys. 2.11 - 2.13 zabrakło odnośników w tekście

str. 29, „Z racji bliskopolowego charakteru plazmonów powierzchniowych, cechującego się brakiem promieniowania” – sformułowanie niezręczne, szczególnie gdy podmiotem jest „charakter”

Zebrany w recenzowanej pracy doktorskiej materiał dokumentuje talent eksperymentatorski oraz wysokie umiejętności interpretacyjne jej autora, olbrzymią ilość wykonanej pracy oraz zgromadzonej wiedzy która umożliwiła wywiązanie się z założonych zadań. Rozprawa w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Z przyjemnością wnoszę o dopuszczenie pana mgr Romana Panasia do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Krzysztof Kowalski