



Dr hab. Michał Zawada, prof. UMK
KL FAMO, Instytut Fizyki UMK
zawada@fizyka.umk.pl

Toruń, 01-09-2020

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr Aleksandry Sierant
p.t. „Tailored optical near field potentials for cold atoms”**

Praca doktorska mgr Aleksandry Sierant została wykonana w Zakładzie Optyki Atomowej i Zakładzie Fotoniki Instytutu Fizyki UJ pod kierunkiem dr. hab. Tomasza Kawalca. Zostały w niej przedstawione charakterystyka, pomiary i symulacje numeryczne potencjałów polarytonów plazmonów powierzchniowych. Projekt mgr Aleksandry Sierant skupiał się na wzbudzaniu ich za pomocą odpowiednio preparowanych odbiciowych i transmisyjnych metalicznych siatek dyfrakcyjnych. Praca dokumentuje również demonstrację wykorzystania wytworzonego przez polarytony plazmonów powierzchniowych optycznego potencjału odpychającego jako trampoliny (lub lustra) dla zimnych atomów rubidu, schłodzonych uprzednio w pułapce magneto-optycznej.

Praca doktorska liczy 142 strony, składa się z czterech rozdziałów, z których rozdział pierwszy jest wstępem, a ostatni podsumowaniem, oraz z dwóch aneksów. Bibliografia zawiera 175 pozycji. Pod koniec głównej części pracy mgr Aleksandra Sierant określiła zakres swojego autorskiego wkładu oraz wkładu swoich współpracowników do zadań przedstawionych w dysertacji.

Rozdział pierwszy po krótkim wprowadzeniu opisuje metody chłodzenia neutralnych atomów oraz wprowadza niezbędny aparat matematyczny opisujący oddziaływanie atomów ze światłem, polarytony plazmonów powierzchniowych i potencjały występujące we wspomnianym wcześniej lustrze. Chociaż absolutnie nie jest to istotna część pracy, chciałbym wspomnieć, że podrozdział opisujący metody chłodzenia został napisany miejscami odrobinę zbyt skrótowo, co rodzi pewne niejasności. Opis chłodzenia gradientem polaryzacji w konfiguracji dwóch przeciwnych wiązek spolaryzowanych kołowo sprowadza się do jednego zdania, choć właśnie to on, a nie efekt Syzyfa występuje w pułapce magneto-optycznej używanej przez autorkę. Opis chłodzenia ramanowskiego jest oparty na najwcześniejszych jego realizacjach przy wykorzystaniu sekwencji impulsów trzech różnych wiązek laserowych. Współcześnie często używa się jedynie dwóch różnych wiązek laserowych. Z drugiej zaś strony, być może opis tego typu chłodzenia nie jest w tym



miejscu potrzebny, jako że autorka nie używa chłodzenia ramanowskiego w swoim eksperymencie – to samo dotyczy też opisanego dalej chłodzenia przez odparowanie. Zdanie „The evaporative cooling was first demonstrated in 1996 by Ketterle and van Druten.” jest nieprecyzyjne. Chłodzenie przez odparowanie wody jest znane ludzkości od bardzo dawna, poczynając od wież wiatrowych w starożytnej Persji. Odparowanie ciekłego helu jest standardową techniką kriogeniczną pozwalającą na osiągnięcie temperatury około 1 K. Sądzę też, że autorka niewłaściwie zacytowała tu twórców pomysłu użycia chłodzenia przez odparowanie w fizyce atomowej. Pierwsze kondensaty Bosego-Einsteina zostały wytworzone rok wcześniej, a zastosowanie odparowania do schłodzenia neutralnych atomów utrzymywanych w konserwatywnym potencjale i wytworzenia kondensacji Bosego-Einsteina zostało zaproponowane już w roku 1986 przez Haralda Hessa z MIT (Phys. Rev. B 34, 3476(R), 1986).

Oczywiście, tak jak wcześniej napisałem, nie jest to istotna część pracy i nie rzutuje ona na pozytywną ocenę dysertacji. Niemniej jednak autorka pracy zrobiłaby mi wielką przyjemność, gdyby mogła w czasie publicznej obrony wyjaśnić opisane powyżej niejasności.

Rozdział drugi pracy poświęcony jest wytwarzaniu wzbudzeń polarytonów plazmonów powierzchniowych za pomocą pokrytych złotem kawałków płyt DVD. Rozdział zaczyna się solidnym opisem przygotowania struktur dyfrakcyjnych na kawałkach płyt pochodzących od wielu producentów. Podstawowe charakterystyki fizyczne badanych płyt, zmierzone przez autorkę i jej współpracowników, umieszczone są w tabeli 2.1. Trochę szkoda, że modele płytek są scharakteryzowane jedynie nazwami ich producentów, co nie pozwala na ewentualne powtórzenie lub zweryfikowanie pomiarów żadnej innej grupie doświadczalnej.

Wytworzone struktury zostały następnie użyte do wzbudzenia polarytonów plazmonów powierzchniowych za pomocą trzech różnych długości fal światła laserowego. Rezonanse plazmoneczne badane były przez pomiar współczynnika odbicia od struktur w zależności od kąta padania światła w specjalnie przygotowanym układzie badawczym. Na pochwałę zasługuje dbałość o polaryzację i jednorodną moc padającego światła laserowego. Równolegle, za pomocą kamery czulej na podczerwień, badany był rozkład temperatury na powierzchni struktury. Zmierzone dane zostały następnie porównane z symulacjami numerycznymi wykonanymi przez autorkę. W podrozdziale 2.2.2 i na rysunku 2.1 autorka definiuje dwie klasy próbek jako „sample 1” i „sample 2”, w zależności od tego, czy z płytki została usunięta oryginalna warstwa metalu przed napyleniem warstewki złota. Nie do końca rozumiem oznaczeń „sample 1” do „sample 4” na rysunku 2.8 w tym rozdziale. Ta mała część mnie, która zajmuje się metrologią, sugeruje

też zrezygnowanie przez autorkę z linii łączących punkty doświadczalne. Przy małej liczbie punktów pomiarowych, jak na przykład czerwone kółka na prawej części tego rysunku, prowadzi to nieuprawnionych wniosków na temat położenia rezonansu. Zupełnie inną rzeczą, jak najbardziej uprawnioną, byłoby dopasowanie do punktów teoretycznie przewidzianych funkcji analitycznych. Wady łączenia punktów liniami widać też np. na rysunku 3.7, gdzie część prostych jest wygładzona, a część sztywno na punktach napięta.

Jak widać na rysunkach 2.10 i 2.11, symulacje bardzo przyzwoicie oddają zachowanie punktów doświadczalnych. Jeżeli chodzi o porównanie ilościowe, to ono zawsze jest trudne i dyskusyjne. Oczywiście zawsze można się spierać, czy dwudziestoprocentowa różnica położenia rezonansów na pierwszym z wykresów rysunku to jest już „a very good agreement”, czy jeszcze nie. W odpowiedzi pomogłaby znajomość niepewności punktów pomiarowych tu i na wszystkich innych wykresach w pracy. Chciałbym też zapytać autorkę, czy w symulacjach numerycznych były jakieś wolne parametry dopasowywane do danych, czy też wszystkie warunki początkowe były sztywno założone.

W kolejnej części rozdziału przedstawione są wyniki symulacji numerycznych strat energetycznych, które w przypadku strat cieplnych mogłyby doprowadzić do zniszczenia struktury dyfrakcyjnej. Symulacjom tym towarzyszą wyniki pomiarów rozkładu temperatury wykonanych czułą na podczerwień kamerą. Jako że mierzyliśmy w KL FAMO podobne rzeczy, chciałbym w tym miejscu z ciekawości zapytać autorkę, jakiego czarnego matowego lakieru użyła w trakcie pomiarów, jaką miał (mniej więcej) wysoką emisyjność i jak bardzo był on kompatybilny próżniowo. W tabeli 2.3 przedstawiony jest wyznaczony budżet energetyczny. I znowu, ta część mnie zajmująca się metrologią buntuje się przeciwko przekroczeniu stu procent strat energetycznych wartości z niepewnością próbki B równych 110(9) procent. Jeżeli, tak jak napisała autorka, powodem był jakiś błąd systematyczny odczytu kamery termowizyjnej, należy go scharakteryzować i umieścić w niepewności wyniku, najlepiej oddzielnie od błędu statystycznego. Prosiłbym autorkę o odniesienie się do tego w czasie obrony.

W ostatniej części rozdziału autorka prezentuje niezwykle efektowny przykład zastosowania potencjału dipolowego wytworzonego przez polarytony plazmonów powierzchniowych jako trampoliny dla schłodzonych uprzednio w pułapce magneto-optycznej atomów rubidu. W rozdziale tym szczegółowo jest też opisany skonstruowany przez autorkę wspólnie z Romanem Panasiem układ pułapki magneto-optycznej. Pięć milimetrów pod miejscem wychwytu atomów umieszczona została struktura dyfrakcyjna na DVD, na której wzbudzone były polarytony plazmonów powierzchniowych. Atomy rubidu po schłodzeniu do około 30 μK wypuszczane były z pułapki i w polu grawitacyjnym Ziemi swobodnie opadały w kierunku struktury. Rozmiar lustra określony jest przez



2,58 mm średnicy wiązki gaussowskiej wzbudzającej plazmony. Ze względu na stosunkowo wysoką temperaturę chmury atomów jedynie część atomów uderza w lustro i jest odbijane. Autorka określa wydajność odbicia na 100 procent, czyli że każdy atom, który uderzył w lustro, został odbity. Rozmiar chmury odbitej na zdjęciu 2.29 jest nieco mniejszy niż zadeklarowany rozmiar lustra. Być może można wyznaczyć przekrój poprzeczny chmury, żeby upewnić się, że rozkład odbitych atomów odpowiada wiązce wzbudzającej. Nie zmienia to faktu, że rozdział ten raportuje cenne i efektowne wyniki.

Rozdział trzeci poświęcony jest wytwarzaniu wzbudzeń polarytonów plazmonów powierzchniowych za pomocą transmisyjnych metalicznych siatek dyfrakcyjnych. Na podstawie symulacji numerycznych i projektu autorki, siatki te zostały wykonane na złączu szkło-złoto przez współpracowników autorki z Uniwersytetu Południowej Danii i Zakładu Fizyki Ciała Stałego Instytutu Fizyki UJ. W dalszej części tego rozdziału opisane są skrupulatne symulacje numeryczne wykonane przez autorkę oraz wyniki dwóch wykonanych przez nią pomiarów – obserwacji w bliskim i dalekim polu. Rezonanse plazmoneczne w dalekim polu badane były przez pomiar współczynnika odbicia od struktur w zależności od kąta padania światła. Układ pomiarowy był znacznie uproszczony w stosunku do opisanego w rozdziale drugim. Mierzone struktury nie musiały być umieszczane w komorze próżniowej. Dzięki temu pomiary te mogły odbywać się równocześnie z pomiarami w bliskim polu, wykonywanymi za pomocą komercyjnego skaningowego mikroskopu pola bliskiego. Pomiary porównane są z symulacjami numerycznymi i autorka przedstawia tu cenną obserwację. Wykonane przez nią symulacje potrafią odtworzyć obserwacje wykonane w bliskim polu tylko wtedy, gdy uwzględnimy w nich losowe wady powierzeni siatki i jej skończony rozmiar.

W podsumowaniu, czyli rozdziale czwartym, autorka w bardzo uporządkowany sposób w punktach przedstawiła najważniejsze wyniki pracy, odnosząc je równocześnie do opublikowanych przez nią i przez jej współpracowników artykułów naukowych. Przyznaję, że bardzo mi się ten sposób spodobał. Brakuje mi w podsumowaniu tylko zaznaczenia, jak nowe wyniki przedstawiają się na tle podobnych, wykonanych wcześniej eksperymentów w innych grupach oraz w grupie, w której pracuje autorka.

Przedstawiona do oceny praca jest bardzo dobrze napisana i zredagowana. Nie znalazłem w niej żadnych poważnych błędów. Niemniej jednak z obowiązku recenzenta muszę wymienić te kilka potknięć, które zauważyłem.

- Literówka w równaniu Heisenberga (1.2.3), czyli R napisane jako skalar, zasadniczo zmienia sens i prawidłowość tego równania.
- Odnośniki do cytowań w tekście są napisane w sposób utrudniający czytanie, mimo że intencją autorki było prawdopodobnie ułatwienie czytelnikowi wersji cyfrowej



odniesienie się do spisu literatury. Zgrupowane w danym miejscu odnośniki nie zawsze są posortowane i nigdy nie są pogrupowane w zakresy. Na przykład [85, 21, 86, 87, 15, 19] na stronie 28.

- Akronim DVD, czyli Digital Versatile Discs, jest w pracy definiowany cztery razy, w tym dwa razy na stronie 29.
- Na stronie 30 w tekście wśród wymienionych producentów przebadanych DVD występuje firma Omega, natomiast nie ma o niej nic w tabeli 2.1 z parametrami badanych dysków. Firma ta występuje też w podpisie rysunku B.2, choć na samym rysunku nie ma żadnych odpowiadających tej firmie wyników.
- Na rysunku 2.10 dobór oznaczeń i kolorów punktów na wykresie w zasadzie uniemożliwia rozróżnienie wyników eksperymentu i symulacji FDTD dla polaryzacji TM.
- Na stronie 49 przy opisie „Typu B” autorka pisze, że brak warstwy złota na próbce zapobiega tworzeniu się wzbudzeń plazmonowych, a tymczasem na rysunku 2.16 w odpowiadającej próbce pomiędzy dyskiem a czarnym lakierem jest narysowana warstwa złota.

Podsumowując, uważam, że wyniki przedstawione w pracy są rzetelnym i dobrze napisanym raportem z wykonanych badań. Przedstawione w rozprawie oryginalne wyniki symulacji numerycznych i eksperymentów spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Aleksandry Sierant do publicznej obrony jej rozprawy.