

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Adama Leszczyńskiego

Oceniana przeze mnie rozprawa doktorska „Przestrzenna modulacja fazy jako nastawny mechanizm transferu informacji między światłem, a pamięcią kwantową” napisana została przez mgra Adama Leszczyńskiego pod opieką dr hab. Wojciecha Wasilewskiego w Centrum Nowych Technologii Uniwersytetu Warszawskiego. Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych.

Nie ma wątpliwości, że badania nad utworzeniem i rozwojem wydajnej i pojemnej pamięci kwantowej są bardzo ważnym kierunkiem badań na świecie. Rozwijany przez doktoranta układ to optyczna pamięć kwantowa, oparta na spulapkowanych zimnych atomach, gdzie informacja jest zapisywana i odczytywana za pomocą światła. W celu zapisu i odczytu wykorzystywany jest proces rozpraszania Ramana, polegający na absorpcji fotonu sygnałowego przy jednoczesnej emisji fotonu do silnej wiązki laserowej (nazywanej wiązką sprzęgającą). W wyniku takiego procesu, wytwarzane jest kolektywne wzbudzenie chmury zimnych atomów, tzw. fale spinowe, które kodują informację wysłaną w świetle sygnałowym. Po absorpcji fotonów sygnałowych, wiązka sprzęgająca jest wyłączana. Ponowne jest włączenie spowoduje odwrócenie działania interfejsu i emisję sygnału – następuje odczyt informacji.

Mówiąc precyzyjniej informacja kodowana jest w koherencji atomowej pomiędzy dwoma stanami atomów – stanem podstawowym i stanem wzbudzonym. Koherencja ta jest funkcją przestrzenno-czasową – w różnych punktach przestrzeni i czasu może ona przybierać różne wartości. W idealnej sytuacji fala sygnałowa przechodząc przez chmurę atomów będzie całkowicie zaabsorbowana. W tym momencie wiązką sprzęgającą jest wyłączana. W wyniku procesu absorpcji, powstanie niezerowa koherencja atomowa, zadana funkcją przestrzenną. Ponowne włączenie wiązki sprzęgającej spowoduje przejście atomów ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego. Spowoduje to efektywnie zamianę koherencji atomowej na wyświecane światło.

Proces zapisu w pewien sposób „zamraża” nam impuls świetlny. Mając uwięzione w przestrzeni światło możemy próbować „nałożyć” na taki impuls fazę przestrzenną. Symulowałoby to działanie hologramu przestrzennego - jakiegoś medium materialnego którego współczynnik załamania albo grubość zależą od położenia w przestrzeni. W wyniku przejścia fali płaskiej przez taki hologram otrzymywalibyśmy fazę zależną od położenia na płaszczyźnie prostopadłej do kierunku propagacji fali. Najprostszym przykładem takiego hologramu jest soczewka – fala otrzymuje fazę proporcjonalną do kwadratu odległości od środka soczewki.

Aby w opisywanym układzie zrealizować hologram soczewki, potrzebujemy nałożyć przestrzenną fazę na funkcję koherencji atomowej. Doktorant wykorzystuje w tym celu efekt ac-Starka. Ten efekt prowadzi do efektywnego rozsunienia poziomów podstawowego i wzbudzonego, co powoduje nadanie koherencji atomowej, fazy proporcjonalnej do natężenia dodatkowej wiązki laserowej oświetlającej atomy mnożonej przez czas działania tej wiązki na atomy. Proces ten efektywnie zamienia natężenie dodatkowej wiązki na przestrzenną fazę funkcji koherencji atomowej. Modulując przestrzennie natężenie dodatkowej wiązki laserowej otrzymujemy przestrzenną modulację koherencji atomowej. W rozdziale czwartym autor rozprawy opisuje wytworzenie, za pomocą efektu ac-Starka, wspomnianą wyżej kwadratową fazę przestrzenną, wytwarzając hologram soczewki. Eksperyment ten pokazuje możliwość nadania fazy przestrzennej koherencji atomowej.

Kluczową cechą pamięci kwantowej powinna być wierność przechowywanej informacji. Informacja nie może „psuć” się w trakcie jej przechowywania. To pytanie wydaje się być motywacją eksperymentu opisanego w podrozdziale piątym rozdziału czwartego. Przechowywaną informacją jest globalna faza płaskiej fali świetlnej zapisanej w pamięci kwantowej. Po zapisaniu następują dwa odczyty fazy, oddzielone od siebie okienkiem czasowym. Zgodność pomiędzy odczytami informuje o wierności przechowywanej informacji.

W rozdziale piątym autor wprowadza dodatkowe „narzędzia” zwiększające możliwości przekształceń wchodzących impulsów. W rozdziale czwartym opisana jest metoda umożliwiająca przestrzenną modulację fazy koherencji atomowej. Zostało to uzyskane za pomocą rozsunienia poziomów podstawowego i wzbudzonego. Wielkość rozsunienia poziomów zależna była od położenia w przestrzeni. W rozdziale piątym rozprawy, autor opisuje użycie mechanizmu rozsunienia poziomów energetycznych zarówno w przestrzeni jak i w przełączanie tej zależności w czasie. Celem eksperymentu opisanego w tym rozdziale jest konstrukcja spektrometru - czyli realizacja doświadczenia transformaty fouriera na wchodzącym impulsie. W tym celu, w procesie zapisu zastosowano liniową zależność rozsunienia poziomów energetycznych w kierunku propagacji impulsu. Po zapisie, rozsuniecie poziomów energetycznych jest zmieniane liniowo w czasie, a następnie nakładana jest jeszcze dodatkowa faza zależna od kwadratu współrzędnej w kierunku propagacji impulsu. Autor w przejrzysty sposób pokazuje jak złożenie tych wszystkich procesów prowadzi do transformaty fouriera impulsu sygnałowego.

Od pamięci oczekujemy możliwości odczytania tylko jej części (np. wybranych modów). Dodatkowo, dobrze by było, by odczytany sygnał świetlny został wprowadzony do światłowodu – tak aby w łatwy sposób można go przekazać dalej. Te zagadnienia są treścią rozdziału szóstego rozprawy. W opisanym tam doświadczeniu, w wyniku procesu spontanicznego rozpraszania Ramana, otrzymywane są pary foton-fala spinowa. Rejestracja rozporoszonych fotonów umożliwia określenie kierunków, zapisanych w pamięci atomowej, fal spinowych. Odczyt wybranej fali spinowej wymaga, aby tylko dla tej jednej fali spełniony był warunek dopasowania fazowego i aby dla wszystkich innych fal, warunek dopasowania był „tak bardzo niespełniony” że nie zostaną odczytane. Ponieważ światłowód nie jest przekręcany w czasie doświadczenia, odczytuje on tylko jeden wybrany kierunek fali spinowej. Stały kierunek ma też wiązka sprzęgająca. W związku z tym potrzebujemy mechanizmu który będzie „wybierał” fale spinowe, które chcemy odczytać. W doświadczeniu opisanym w rozdziale szóstym, autor rozprawy projektuje doświadczenie, w którym realizuje

potrzebny mechanizm, za pomocą modulacji fazy przestrzennej pomiędzy zapisem a odczytem sygnału. Jednak proces ten powoduje, że w warunkach dopasowania może znajdować się więcej niż jedna fala spinowa. W związku z tym, wykorzystana jest pierścieniowa wnęka rezonansowa, która powoduje, że tylko jedna fala spinowa jest odczytywana. Proces odczytu wygląda więc następująco. Na początku odczytywane są kierunki rozproszonych fotonów, z nich wyznaczone są kierunki fal spinowych. Następnie wybierana jest fala spinowa, wytwarzana jest odpowiednia modulacja przestrzenna, i w końcu włączana jest wiązka sprzęgająca – dokonywany jest konwersja wybranej fali spinowej na foton który wpada do światłowodu. Analizując układ autor konkluduje, że zaprezentowana sekwencja pozwoliłaby na odczyt do kilkudziesięciu różnych fal spinowych.

W rozprawie przedstawione są równania opisujące dynamikę koherencji wraz z dynamiką pola elektromagnetycznego propagującego się w chmurze atomowej. Autor w przejrzysty sposób prezentuje rozwiązania przedstawionych równań korzystając z rachunku zaburzeń. Pozwala to na stosunkowo proste omówienie głównych procesów mających miejsce w chmurze. W szczególności, autor kładzie duży nacisk na analizę strat, oraz na analizę różnego rodzaju niedoskonałości układu, prowadzących do zaniku oraz zaszumienia odczytywanego sygnału.

Część teoretyczną pracy oceniam bardzo dobrze. Widać że autor rozprawy posiada wiedzę oraz umiejętności na teoretyczną analizę układu doświadczalnego. Bardzo dobrze oceniam też umiejętność wykonywania przez autora skomplikowanych symulacji numerycznych oraz wysnuwania z nich wniosków.

Ponieważ nie jestem fizykiem doświadczalnym ciężko mi wypowiedzieć się na temat technik doświadczalnych wykorzystywanych w eksperymentach. Jednakże widzę jasno celowość doboru doświadczeń. Jest dla mnie jasne, że początkowe doświadczenia służą sprawdzeniu czy chmura atomowa zachowuje się w sposób jaki się spodziewamy (czyli w sposób jaki pokazują symulacje numeryczne). Np. że mechanizm modulacji fazy przestrzennej działa w przewidywany sposób. Jak rozumiem pokazuje to że w układzie nie ma nieznanymi nam procesów (albo znanych procesów których nie wzięliśmy pod uwagę) które istotnie zaburzają układ. Doświadczenia z analizą przechowywania sygnału oraz odczyt wybranych modów demonstrują poprawność działania podstawowych własności pamięci kwantowej, a więc wierność przechowywania informacji, oraz możliwość odczytu wybranej części pamięci. Poszczególne doświadczenia tworzą spójny obraz wykorzystania układu jako pamięci. Doświadczenie opisane w rozdziale piątym pokazuje wykorzystanie układu do zupełnie innych celów niż pamięć. Wykorzystując opracowane techniki modulacji fazy przestrzennej i czasowej zrealizowany został wysokiej jakości spektrometr.

Autor w jasny sposób opisuje doświadczenia, opisując w skrócie kluczowe wyniki eksperymentów. Z lektury wnioskuję, że autor doskonale rozumie procesy zachodzące w układzie, oraz dokonuje świadomych wyborów wykorzystania technik doświadczalnych w celu otrzymania zamierzonych celów eksperymentalnych.

Rozprawa posiada kilka drobnych niedociągnięć, które chciałbym po krótko omówić.

W rozdziale 4.5 autor omawia stabilność fazy. Na rysunku 4.6 b) pojawia się faza w funkcji czasu. Nie jest wyjaśnione w funkcji jakiego czasu. W schemacie mamy parę następujących po sobie odczytów. Można założyć że „czas” przedstawiony na rysunku 4.6 b

prawdopodobnie numeruje jakoś kolejne pary odczytów. Jeżeli tak jest, to zamiast czasu na rysunku 4.6 lepiej byłoby umieścić numer odczytu (albo precyzyjnie opisać co ten „czas” oznacza)

W rozdziale 5.2.1 w drugim akapicie autor tłumaczy dlaczego w pamięci gradientowej, przebieg czasowy pola padającego impulsu, odwzorowuje się na rozkład koherencji atomowej w przestrzeni pędów. Czytając to kilka razy nie byłem w stanie zrozumieć dlaczego tak się dzieje. Opis jest zbyt skrótowy.

W tym samym rozdziale w czwartym akapicie autor pisze, że dodanie pola magnetycznego sprawia, że pamięć kwantowa zapamiętuje funkcję Wignera impulsu. To zdanie wygląda na jakiś skrót myślowy. Autor prezentuje wykresy koherencji atomowej w przestrzeni pędów, ale to nie są wykresy funkcji Wignera. Nigdzie w pracy nie pojawiają się też pomiary eksperymentalne funkcji Wignera.

W rozdziale 6.2.1 autor opisuje rozmywania się fal spinowych spowodowanych ruchem termicznym atomów. Przedstawione tam model i rachunki są opisane w tak skrótowy sposób, że w praktyce uniemożliwiają jego zrozumienie.

Chciałbym jeszcze zasugerować możliwy kierunek rozwoju metod teoretycznych opisujących układ.

W opisie teoretycznym autor zakłada że atomy są nieruchome. Interesujące byłoby wprowadzenie do opisu teoretycznego ruchu atomów spowodowanych niezerową temperaturą chmury.

Autor stosuje klasyczny opis pola elektromagnetycznego oraz jednocząstkowy opis chmury atomowej. Interesujący byłoby omówienie przejścia od opisu wielociałowego (mamy przecież fotony i atomy) do stosowanego opisu jednocząstkowego.

Wspomniane powyżej drobne niedociągnięcia nie rzutują na bardzo dobrą ocenę rozprawy doktorskiej mgra Adama Leszczyńskiego.

Jednocześnie warto podkreślić, że przedstawione badania nie mają wcześniejszych odpowiedników w literaturze i zostały wykonane na unikalnym układzie doświadczalnym.

Chciałbym jeszcze dodać, że nie prowadziłem nigdy badań nad tego typu układem. Lektura tej rozprawy była dla mnie okazją to dokładnej analizy zjawisk tam zachodzących, co było dla mnie osobiście bardzo interesujące.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia, wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668).

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z dziedziny optyki kwantowej, a także świadczy o ogólnej wiedzy Kandydata w tym zakresie oraz o jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wnoszę o dopuszczenie mgra Adama Leszczyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.