



Toruń, 24.11.2024

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

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Zuzanny Orzechowskiej pt. : „Magnetic resonance spectroscopy at the nanoscale utilizing nitrogen-vacancy centers in diamond”.

Mgr Zuzanna Orzechowska w swoich badaniach zainteresowała się technikami wykorzystania centrów barwnych w diamentach do pomiaru szeregu wielkości fizycznych (indukcja pola magnetycznego, temperatura) charakteryzujących warunki panujące w różnych próbkach w nanoskali.

Centra barwne w diamentach stanowią przykład otrzymywanie relatywnie dobrze izolowanych pojedynczych układów kwantowych o relatywnie długim czasie koherencji w temperaturze pokojowej. Te własności czynią je bardzo atrakcyjnymi obiektami do badań podstawowych jak ich zastosowań. Dzięki czułości struktury energetycznej centrów barwnych na warunki panujące w ich otoczeniu takie jak: indukcja pola magnetycznego, natężenie pola elektrycznego, temperatura, naprężenia w kryształach, świetnie nadają się do metrologii tych wielkości fizycznych. Dodatkową zaletą tych obiektów jest ich trwałość i odporność na zmianę warunków. Nie dziwi więc duże zainteresowanie, którym się cieszą i pomysłami wykorzystania centrów barwnych nie tylko w metrologii czy diagnostyce medycznej ale i do otrzymywania stanów splątanych oraz obliczeń kwantowych. Jest to obecnie szalenie aktualny obszar badań.

Integralną częścią rozprawy doktorskiej są cztery prace opublikowane w latach 2021-2024 w uznanych w tej dziedzinie recenzowanych czasopismach: *Advanced Quantum Technologies*, *Photonics Letters of Poland*, *Journal of Applied Physics*, *ACS Applied Nano Materials*. Wszystkie prace są wieloautorskie: od czterech do dziewięciu współautorów. W dwóch pracach mgr Zuzanna Orzechowska jest pierwszym współautorem. Na szczególne podkreślenie zasługuje pierwsza z nich opublikowana w renomowanym *Advanced Quantum Technologies*.



Powyższe prace zostały opatrzone przewodnikiem liczącym 50 stron i złożonym z czterech rozdziałów. Pierwszy z nich to wprowadzenie, drugi poświęcony jest defektom NV (nitrogen-vacancy) w diamentach, trzeci opisuje zastosowane techniki doświadczalne, w końcu bardzo zwięzły pięciostronicowy rozdział czwarty w syntetyczny sposób opisuje i podsumowuje uzyskane wyniki opublikowane w załączonych czterech publikacjach. Oprócz załączonych czterech prac bibliografia tego przewodnika rozłożona na poszczególne rozdziały obejmuje 107 dalszych pozycji. Tak skonstruowany przewodnik stanowi świetne wprowadzenie i uzupełnienie załączonych prac [1-4]. Z jednej strony pozwala na szersze wprowadzenie tematyki z drugiej bardziej pogłębione przedstawienie technik doświadczalnych czego zazwyczaj nie umieszcza się w pracach raportujących konkretne wyniki fizyczne. Przewodnik jest bardzo dobrze napisany i jest bardzo pomocny przed przeczytaniem prac [1-4] zwłaszcza dla osób, które na co dzień nie pracują z centrami barwnymi w nanodiamentach.

Bardzo ważnym elementem przygotowania rozprawy doktorskiej przez mgr Zuzannę Orzechowską była konstrukcja układu doświadczalnego. Autorka zbudowała układ doświadczalny mikroskopu do obrazowania próbek umożliwiający jednocześnie wzbudzanie centów barwnych w nanodiamentach wiązką laserową oraz optyczną detekcję rezonansów mikrofalowych. Systemem nerwowym każdego układu doświadczalnego jest system jego sterowania. To od systemu sterowania i przetwarzania pojawiających się w eksperymencie sygnałów zależy czy w pełni zostaną wykorzystane możliwości używanych instrumentów badawczych. Autorka i na tym polu odegrała kluczową rolę oprogramowując w LabView synchronizację obrazowania za pomocą kamery sCMOS oraz włączania i wyłączania pola mikrofalowego. Zbudowany był wykorzystany w pracach [1-4]. Wymagało to od Autorki opracowania szeregu rozwiązań mechanicznych, które umożliwiały umieszczenie próbki możliwie blisko źródła mikrofal w różnych konfiguracjach eksperymentalnych. Zbudowany układ doświadczalny charakteryzuje się dużą elastycznością. Jest on w rozprawie dobrze opisany i nie budzi żadnych wątpliwości, że jego konstrukcja i zastosowanie w różnych sytuacjach fizycznych jest istotnym osiągnięciem Autorki.

Cała rozprawa doktorska jest dobrze napisana i trudno mi było znaleźć istotne uwagi godne odnotowania. Nie mniej jednak przygotowując się do obrony rozprawy doktorskiej Autorka mogłaby zwrócić większą uwagę na podkreślenie podobieństw i różnic zbudowanego układu doświadczalnego w porównaniu do wcześniej uruchamianych układów tego typu, na tematy, których istnieje bogata literatura również wspomniana w tej rozprawie.

Jednym z głównych wyników tej rozprawy doktorskiej była konstrukcja nowego sensora fotonicznego wykorzystującego pręty ze szkła tellurowego z submikronowymi diamentami. Użyte diamenty zawierały centra barwne NV⁻. Istotnym odkryciem była identyfikacja centrów NVN w stosowanych próbkach poprzez analizę widma fluorescencji w okolicach 520 nm wzbudzonej promieniowaniem laserowym o długości fali 405 nm. Badania prowadzono optycznie obserwując

rezonanse magnetyczne (ODMR - optically detected magnetic resonances). Jako system detekcji wykorzystany został zbudowany przez Autorkę układ mikroskopowego obrazowania próbki wzbudzanej laserem generującym promieniowanie o długości fali 532 nm w obecności przestrajanego pola mikrofalowego. Wraz ze wzrostem pola magnetyczne obserwowano redukcję kontrastu z 6% do około 2%. Analiza położenia obserwowanych rezonansów mikrofalowych pozwoliła na detekcję pola magnetycznego z czułością 10^{-5} T Hz^{-1/2} oraz zmian temperatury z czułością 2.2 K Hz^{-1/2}. Przedstawione w pracy [1] wyniki pokazują że jest to metoda bardzo obiecująca. Warto podkreślić, że praca ta była już trzy razy cytowana przez innych autorów.

Kolejnym osiągnięciem mgr Zuzanny Orzechowskiej było pokrycie ostrzy mikroskopu sił atomowych (AFM - atomic force microscope) submikronowymi diamentami z centrami barwnymi NV oraz NVN. Takie pokrycie w przypadku przezroczystych próbek umożliwia wygodną wizualizację ostrza AFM. Co ważne takie pokrycia umożliwiają też magnetometrię z dużą przestrzenną rozdzielczością. Autorka pokazała, że otrzymane pokrycia umożliwiają czułość detekcji indukcji pola magnetycznego 2.2 nT Hz^{-1/2}. Wyniki tych badań zostały zawarte w pracy [2]. Podobnie jak w przypadku pracy [1] mgr Zuzanna Orzechowska jest pierwszą współautorką pracy [2]. W obu tych pracach Autorka odgrywała wiodącą rolę.

Praca [3] poświęcona jest badaniu wpływu absorpcyjnych domieszek na otrzymywane sygnały ODMR. Domieszki jonów Fe⁺ spowodowały przesunięcie obserwowanych rezonansów mikrofalowych ku czerwieni. Wskazywało to na lokalne ogrzanie próbki diamentowej na skutek zwiększonej absorpcji w obecności domieszkowanych jonów. Wyniki te potwierdzono zanieczyszczając próbki tlenkiem żelaza oraz pyłem grafitowym. Otrzymano wówczas znaczący wzrost przesunięcia rezonansów mikrofalowych ku czerwieni. Obserwowana zmiana położenia rezonansów była liniowa ze zmianą natężenia światła padającego na próbkę.

Równie ciekawa jest praca [4], w której wykorzystano wiązkę światłowodów o końcówkach pokrytych nanodiamentami z centrami NV. Taka konfiguracja eksperymentu umożliwiła pomiar indukcji pola magnetycznego z dużą rozdzielczością przestrzenną ograniczoną średnicą włókna poniżej 3 μm. W tym eksperymencie układ doświadczalny zbudowany przez mgr Zuzannę Orzechowską stanowił punkt wyjścia a jej doświadczenie w pracy ze światłowodami okazało się bardzo pomocne w planowaniu jak i przeprowadzeniu badań. Oczywiście zasadniczą rolę odgrywała tu analiza sygnałów ODMR.

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska jest bardzo interesująca. W czterech pracach [1-4] przedstawiony został układ doświadczalny umożliwiający optyczną detekcję rezonansów magnetycznych centrów barwnych w submikronowych diamentach oraz ich wykorzystania do pomiaru pól magnetycznych i zmian temperatury w różnych konfiguracjach. Mgr Zuzanna Orzechowska podczas swych badań wykazała dużą biegłość eksperymentalną: od planowania eksperymentu, poprzez prace konstrukcyjne i programistyczne po analizę danych. Otrzymane wyniki

mają duży potencjał aplikacyjny. Prace Autorki przecierają ścieżki dla tych ciekawych rozwiązań. Prace wchodzące w skład rozprawy doktorskiej są wieloautorskie a wkład mgr Zuzanny Orzechowskiej jest jasno opisany i jednoznacznie wskazuje na znaczący wkład w każdą z czterech prac [1-4]. Praca doktorska mgr Zuzanny Orzechowskiej w pełni spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane w postępowaniu doktorskim. Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr Zuzannę Orzechowską do publicznej obrony jej pracy doktorskiej.

