

Bydgoszcz 16 czerwca, 2017

Prof. dr hab. Kazimierz Fabisiak
Instytut Fizyki
Uniwersytet Kazimierza Wielkiego
ul. Powst. Włkp.2, 85-090 Bydgoszcz

Ocena pracy doktorskiej magistra Daniela Stanisława Rudnickiego
nt. „Podłużna relaksacja spinowa w centrach barwnych azot - wakancja w diamencie”
przygotowanej pod opieką naukową prof. dr. hab. Wojciecha Gawlika.

Rozprawa doktorska Pana mgra D.S. Rudnickiego została wykonana w Zakładzie Fotoniki na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Część badań, zamieszczonych w rozprawie doktorskiej, została wykonana we współpracy z fizykami z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley.

Badania podjęte przez Doktoranta mają charakter zarówno eksperymentalny jak i teoretyczno- symulacyjny i koncentrują się na pomiarze czasów spinowej relaksacji podłużnej centrów $N-V^-$ w odpowiednio przygotowanych kryształach diamentu otrzymywanych głównie metodami HP-HT.

Warto podkreślić, że tematyka rozprawy jest bardzo aktualna ze względu na właściwości stowarzyszonego z $N-V^-$ niezerowego spinu elektronowego, który można optycznie wzbudzać i odczytywać. Stwarza to szerokie możliwości aplikacyjne, ze szczególnym uwzględnieniem sond spinowych oraz w kwantowej technologii informatycznej. Fizyczne wdrożenie rejestru kwantowego jest jednak dużym wyzwaniem, ponieważ reżim kwantowy wymaga znacznej redukcji oddziaływania spinu z otoczeniem, a więc ograniczania zjawiska dekoherencji, w wyniku której możliwa jest utrata informacji kwantowej.

Spiny elektronowe fotoaktywnych defektów w diamencie mają duży potencjał zastosowań jako kwantowe bity (qbits) mogących działać w temperaturze pokojowej. Jest to wystarczającą motywacją do podjęcia badań dotyczących pomiarów spinowych czasów relaksacji.

Dysertacja doktorska liczy 98 stron i składa się z ośmiu rozdziałów oraz podsumowania. Należy zauważyć, że pierwsze 5 rozdziałów można uznać właściwie za wprowadzenie pozwalające lepiej zrozumieć cel badań będących tematem rozprawy doktorskiej. Zgodnie z ogólnymi zasadami, przedmiotem dwóch pierwszych rozdziałów jest krótki opis właściwości diamentu oraz wprowadzenie do opisu struktury i formowania się centrów barwnych N-V⁻ w sieci krystalicznej diamentu.

Rozdział 3 zawiera opis struktury energetycznej centrum barwnego azot-wakancja i stanowi podstawę do zrozumienia widma emisji centrum pod wpływem wzbudzenia światłem laserowym o długości 532 nm.

Rozdział 4 to wprowadzenie i definicje relaksacji spinowej. Tutaj autor skupił się głównie na czasie relaksacji poprzecznej T_2 traktując dość marginalnie czas relaksacji podłużnej T_1 .

Rozdział 5 to bardzo oszczędny opis metody ODMR oraz zjawiska oscylacji Rabiego.

Rozdział 6 jest rozdziałem najbardziej obszernym i dotyczy pomiarów spinowej relaksacji podłużnej w funkcji temperatury i wielkości indukcji magnetycznej. Autor przedstawił w nim wyniki pomiarów czasu T_1 dla 3-ech wybranych próbek i porównał je z wynikami otrzymanymi przez innych badaczy.

W rozdz.7 doktorant przedstawił model opisujący szybkość relaksacji populacji stanów stosując tzw. równania kinetyczne (stosowane również w teorii laserów). Przedstawiono tu również wyniki symulacji relaksacji populacji w układzie trójpoziomowym. Jest to model wykorzystany później do uzasadnienia procedury pomiaru czasu T_1 .

W rozdz. 8 dokonano opisu standardowej metody pomiaru czasu relaksacji T_1 oraz przedstawiono alternatywną metodę pomiaru tego czasu będącą oryginalnym pomysłem doktoranta.

Z obowiązku recenzenta muszę wskazać na pewne niedoskonałości recenzowanej rozprawy.

Uwagi natury merytorycznej:

Część rozprawy nazwana Motywacją, jest w istocie jej streszczeniem. Doktorant wspomina o celach badań i motywujących Go do pracy możliwych zastosowaniach centrów N-V⁻, jednak nie precyzuje, jakie to zastosowania, a przecież można było- bo warto- wymienić je explicite. Zapewne również w przyjętej kolejności omawianych rozdziałów jest jakaś logika, jednak naturalnym jest konstruowanie streszczenia zgodnie z układem rozprawy.

Uważam, że rozdz. 1 jest nazbyt oszczędny –składa się z jednej strony. Brakuje chociażby struktury pasmowej diamentu i pokazania, gdzie w przerwie energetycznej

powstają stany domieszkowe (akceptory, donory), ze szczególnym uwzględnieniem domieszki azotowej, co stanowi przecież temat rozprawy.

Jak powszechnie wiadomo, czasy relaksacji spinowej centrów N-V⁻ w diamencie zależą od bardzo wielu czynników, takich jak np. ich orientacja krystalograficzna, koncentracja, głębokość położenia etc. Problemy te zasygnalizowane są w rozdz.2, ale w zbyt ograniczonej formie.

Niezbyt zrozumiałe jest zamieszczenie w rozprawie podrozdziału 3.2, który traktuje w sposób niezwykle ogólny o teorii grup. Ogólnie znane są przecież stosowane oznaczenia poziomów energetycznych wynikające z teorii orbitali molekularnych z wykorzystaniem teorii grup.

Rozdział 6, który zawiera, z punktu widzenia doktoranta, najważniejsze wyniki dotyczące jego pomiarów czasu relaksacji T₁, jest właściwie powieleniem artykułu, którego jednym z sześciu współautorów jest mgr D.S. Rudnicki (M. Mrózek, D. Rudnicki, P. Kehayias, A. Jarmola, D. Budker i W. Gawlik, *Longitudinal spin relaxation in nitrogen-vacancy ensembles in diamond*, EPJ Quantum Technology 1, 2 (2015)). Zgodnie z deklaracją zamieszczoną na końcu tego artykułu „wszyscy współautorzy w równych częściach przyczynili się do jego powstania”. Recenzent nie ma tu możliwości oceny zarówno roli, jak i części badań, które wykonał doktorant osobiście. Daje się też wyraźnie zauważyć brak pogłębionej dyskusji otrzymanych wyników - doktorant sam z resztą to przyznaje.

Wydaje się błędem niezamieszczenie choćby tabelarycznej informacji o właściwościach badanych warstw (badania ramanowskie, dyfrakcja, XPS). Opis badanego materiału, uwzględniający jego właściwości, nawet może nieistotne w kontekście badań głównych, jest niezbędny z powodów metodologicznych i bardzo przydatny dla dalszych badań będących kontynuacją prezentowanych wyników. Bez pełnej charakterystyki badanego materiału trudno o wnioski ogólne.

Rozdział 8 to drugi, zdaniem doktoranta, z najważniejszych rozdziałów. Zawiera wynik uzyskany na podstawie badań tylko jednej próbki. Trudno zatem nie zgodzić się ze stwierdzeniem autora rozprawy, które pozwolę sobie zacytować w całości (str. 85): „Opisaną metodę można dopracować w kilku punktach. Dopiero pomiar przeprowadzony na większej liczbie próbek, jak również w funkcji temperatury mógłby pokazać, czy może ona znaleźć powszechne zastosowanie.”

Rozdział 9, Podsumowanie niestety nie omawia istoty uzyskanych w rozprawie dokonań, a jedynie sumuje merytoryczną zawartość recenzowanej pracy. Tekst zajmuje pół strony i w mojej ocenie objętościowo i merytorycznie jest zbyt lakoniczny.

Doktorant nie ustrzegł się również błędów natury technicznej:

- Rysunek 6.7 jest niespójny z opisem, lewy rysunek opisany jako a) zawiera literę b) i konsekwentnie rysunek prawy opisany b) zawiera literę a). Ponadto rysunki prezentują różną liczbę krzywych, co jest niezgodne z opisem. Próbka E8 jest w reprezentacji próbek jedyną syntetyzowaną metodami CVD, pozostałe są zaś metodami HPHT. Pomimo to w rozprawie zaprezentowano tylko jeden wynik eksperymentalny dla tej próbki (Rys. 6.7) i tylko w temperaturze 296K.
- Rysunek 6.9d niepoprawnie oznaczona oś OY.
- Doktorant stosuje też, zdaniem recenzenta, niewłaściwą terminologię np.: str.10-inne zanieczyszczenia, str.13 sąsiednie obiekty (o jakie chodzi?) str.14-15 wysoka (niska), koncentracja, str.16 substrat itp.

Biorąc pod uwagę fakt, że doktorant, mgr D. S. Rudnicki jest współautorem, zgodnie z bazą „Scopus”, pięciu publikacji w czasopismach o zasięgu międzynarodowym indeksowanych przez JCR. Wszystkie te wieloautorskie prace, w których Doktorant tylko raz był pierwszym autorem, związane są ściśle z tematem recenzowanej rozprawy doktorskiej. O jakości i ważności otrzymanych wyników eksperymentalnych świadczy ranga czasopism (wysoki IF), w których zostały opublikowane.

Należy uznać, iż doktorant pracując w bardzo licznym, międzynarodowym zespole doświadczonych badaczy uzyskał wystarczająco szeroką wiedzę fizyczną- zarówno teoretyczną, jak i eksperymentalną- pozwalającą w przyszłości na dużą samodzielność naukową.

Na tej podstawie stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska spełnia wymagania „Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie mgra Daniela, Stanisława Rudnickiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Kazimierz Fabisiak