



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI



Gdańsk, dn. 14 lutego 2025

prof. dr hab. inż. Małgorzata Szczerska
Katedra Metrologii i Optoelektroniki
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Pauliny Czarneckiej - Treła

**pt. „Światłowody pokryte warstwami diamentowymi z centrami NV
jako platforma do kwantowej magnetometrii”**

Promotor:

prof. dr. hab. Wojciecha Gawlika

Promotor pomocniczy:

oraz dr. hab. Adama Wojciechowskiego

Recenzję rozprawy doktorskiej sporządzono na prośbę Przewodniczącego Rady Dyscypliny NAUKI
FIZYCZNE Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, prof. dr hab. Jacka Golaka, wyrażoną
w piśmie RPW/51171/2024 z dnia 21 listopada 2024 r.

1. Opis rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska to obszerne opracowanie, składające się z 82 stron oraz cyklu czterech publikacji. Zawiera aktualny przegląd literatury, obejmujący 120 pozycji bibliograficznych.

Praca składa się z dziewięciu rozdziałów, które w kompleksowy sposób poruszają zagadnienia badawcze. Rozdział 7. zawiera spis rysunków zamieszczonych w pracy, natomiast rozdział 9. to zbiór opublikowanych prac Autorki rozprawy. Rozprawa została uzupełniona streszczeniem napisanym w języku polskim i angielskim.

2. Zagadnienie naukowe

Przedłożona rozprawa doktorska, choć nie zawiera explicite sformułowanej tezy, koncentruje się na istotnym i aktualnym problemie badawczym, jakim jest *"wykazanie możliwości przestrzennego obrazowania pola magnetycznego za pomocą nowej platformy opartej o centra barwne NV w nanodiamentach oraz światłowody"*. Tak zdefiniowany cel badawczy został sformułowany poprawnie i wpisuje się w nurt ważnych, współczesnych badań naukowych.

W ramach niniejszej rozprawy doktorskiej, Autorka podjęła się zadania skonstruowania nowego typu detektora kwantowego do magnetometrii, opartego o nanodiamenty z centrami azot-wakancja (ang. *nitrogen-vacancy* NV) oraz technologie światłowodowe. Realizacja tego celu wymagała przeprowadzenia szeregu prac badawczych, skupionych wokół dwóch głównych wyzwań. Pierwszym było opracowanie efektywnej metody osadzania jednorodnych pokryć nanodiamentowych na powierzchniach szklanych. Drugim, opracowanie procedury pozwalającej na uzyskanie jednorodnego pokrycia czoła światłowodu warstwą nanodiamentów z centrami NV, o właściwościach umożliwiających ich wykorzystanie do pomiaru pola magnetycznego.

W toku badań, Autorka szczegółowo analizowała różne rodzaje zawiesin diamentowych oraz osadów powstałych na skutek odparowania rozpuszczalnika. Badała właściwości optyczne zawiesin oraz parametry sygnałów rezonansu magnetycznego wykrywanego optycznie (*ODMR* ang. *optically detected magnetic resonance*) dla skupisk przypadkowo

zorientowanych centrów NV w nanodiamentowych osadach. Przeprowadziła optymalizację znanej metody wytwarzania kowalencyjnych pokryć diamentowych na powierzchniach szklanych, w celu osadzania nanodiamentów na czole światłowodów i przetestowała ją do wytworzenia pokryć diamentowych na powierzchniach wykonanych z różnych typów szkła. Ponadto, Autorka zaproponowała i przetestowała metodę wyznaczania indukcji zewnętrznego pola magnetycznego na podstawie rezonansów ODMR filmów nanodiamentowych, wykorzystując sygnały ODMR z pokryć nanodiamentowych osadzonych na czole światłowodu. Umożliwiło to rejestrację rezonansów pochodzących od skupisk centrów NV o nieskorelowanej orientacji i wykazało możliwość zmierzenia gradientu pola magnetycznego. Dzięki optymalizacji układu pomiarowego oraz zastosowaniu metod analizy danych, możliwe było uzyskanie przestrzennego obrazowania pola magnetycznego na podstawie przeprowadzonych pomiarów.

Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny, łącząc zagadnienia inżynierii materiałowej z fizyką. Jej eksperymentalny charakter podkreśla nowatorskie podejście do wytwarzania specyficznych warstw na czole światłowodu oraz szeroki zakres prac związanych z charakteryzacją opracowanych obiektów badawczych.

Wydaje się, że uzyskane wyniki, mogą mieć istotne znaczenie w rozwoju diagnostyki medycznej i stanowić obiecującą bazę do dalszego rozwoju kwantowych detektorów pola magnetycznego opartych na technologii światłowodowej.

3. Analiza aktualnego stanu wiedzy

W pracy przedstawiono wyniki pogłębionej analizy źródeł. Rozprawa zawiera 120 pozycji najnowszej literatury w przedmiocie. W zdecydowanej większości są to anglojęzyczne artykuły naukowe. Znalazła się tam również jedna pozycja w języku polskim, akurat ta pozycja nie zawiera pełnego opisu bibliograficznego umożliwiającego jej wyszukanie.

W każdym z rozdziałów Autorka zawarła „Kontekst badawczy rozdziału”, co w zdecydowany sposób umożliwiło jej wyeksponowanie znaczenia jej badań na tle aktualnego stanu wiedzy.

W zdecydowanej większości zastosowana strategia cytowania, choć poprawna, mogłaby zostać wzbogacona o bardziej szczegółowe omówienie przywoływanych prac. W obecnej

formie, w większości przypadków, cytowania ograniczają się do ogólnego wskazania na dane źródło, bez pogłębionej analizy jego treści i odniesienia do specyfiki własnych badań. Niemniej, dobór pozycji bibliograficznych oraz ich wykorzystanie w tekście rozprawy nie budzą zasadniczych zastrzeżeń.

4. Rozwiązanie postawionego problemu

Postawiony przed Autorką rozprawy cel badawczy, czyli *"wykazanie możliwości przestrzennego obrazowania pola magnetycznego za pomocą nowej platformy o centra barwne NV w nanodiamentach oraz światłowodach"*, jest zadaniem nowym i wymagającym, którego nie odnotowano w aktualnej literaturze przedmiotu. Rozwiązanie tego problemu wymagało od Doktorantki obszernej wiedzy z zakresu przedmiotu, a sukces był możliwy dzięki opiece Promotora i Promotora pomocniczego, którzy są wybitnymi ekspertami w dziedzinie.

W ramach przeprowadzonych badań, Autorka z sukcesem opracowała i zoptymalizowała efektywną metodę osadzania jednorodnych pokryć nanodiamentowych na powierzchniach szklanych. Ponadto, Autorka opracowała procedurę pozwalającą na uzyskanie jednorodnego pokrycia czoła światłowodu warstwą nanodiamentów z centrami NV, o właściwościach umożliwiających ich wykorzystanie do pomiaru pola magnetycznego.

Przeprowadzona przez Autorkę szczegółowa charakteryzacja właściwości optycznych i magnetycznych wytworzonych warstw, w tym analiza sygnałów ODMR, pozwoliła na dogłębne zrozumienie mechanizmów detekcji pola magnetycznego. Zaproponowana i przetestowana przez Autorkę metoda wyznaczania indukcji zewnętrznego pola magnetycznego na podstawie rezonansów ODMR filmów nanodiamentowych stanowi istotny wkład w rozwój technik pomiarowych.

Najważniejszym osiągnięciem rozprawy jest uzyskanie przestrzennego obrazowania pola magnetycznego dzięki optymalizacji układu pomiarowego oraz zastosowaniu zaawansowanych metod analizy danych. Ten kluczowy rezultat podkreśla innowacyjny charakter pracy i jej potencjał aplikacyjny w wielu dziedzinach, takich jak diagnostyka medyczna czy badania materiałowe.

Autorka wykazała się wysokim poziomem wiedzy i umiejętności, realizując badania obejmujące projektowanie i wytwarzanie elementów platformy, ich charakteryzację oraz opracowanie metod pomiarowych i algorytmów analizy danych. Rozprawa doktorska stanowi znaczący wkład w rozwój dziedziny czujników kwantowych i otwiera nowe perspektywy dla precyzyjnego pomiaru i obrazowania pola magnetycznego.

5. Oryginalność rozprawy

Oryginalność przedstawionej do oceny rozprawy wynika przede wszystkim z nowego podejścia eksperymentalnego do konstrukcji czujnika magnetometrii kwantowej opartego o technikę światłowodową. Autorka rozprawy z sukcesem osadziła warstwę nandiamentowa z centrami NV na czole światłowodu. Proces osadzania warstwy był na tyle efektywny, że pozwolił na wytworzenie światłowodowej sondy pomiarowej do pomiarów pola magnetycznego. Autorka rozprawy wykorzystała opracowany przez siebie czujnik do wykonanie przestrzennego pomiaru pola magnetycznego wokół przewodnika z prądem. Nie było to badanie banalne, gdyż operowała wiązką światłowodową składającą się z włókien o średnicy rdzenia 2,8 μm . Warto również podkreślić, że zaproponowana procedura kowalencyjnego osadzania filmów diamentowych stanowi tanią i stosunkowo prostą metodę funkcjonalizacji światłowodów. Za pomocą opracowanego czujnika Autorka rozprawy zarejestrowała rezonanse pochodzące od skupisk centrów NV o nieskorelowanej orientacji oraz wykazała możliwości pomiaru gradientu pola magnetycznego. Przedstawione badania dowodzą możliwości skonstruowania nowego typu sensora do wysokorozdzielczej przestrzennej magnetometrii kwantowej.

Podstawową zaletą zaproponowanego rozwiązania jest wykorzystanie światłowodu, co eliminuje konieczność separacji próbki z jej otoczenia i umieszczania jej w układzie mikroskopowym. Przedstawione w rozprawie rozwiązanie jest oryginalne w porównaniu do wcześniej stosowanych metod, gdyż pozwala na wytworzenie czujnika pola magnetycznego zbudowanego z warstwy nanodiamentowej otrzymanej na czole światłowodu szklanego. To bardzo nowatorskie podejście, bowiem w znanej mi literaturze przedmiotu nie przedstawiono wyników takich badań.

Zaprezentowana w pracy oryginalna metoda wytwarzania światłowodowego czujnika pola magnetycznego z warstwą nanodiamantową prezentuje innowacyjne podejście, a wyniki prac mogą z powodzeniem zostać zaadoptowane przez inne ośrodki badawcze.

6. Sposób przedstawienia wyników

Praca została napisana i zredagowana z dużą starannością. Koncepcja prezentacji „Kontekstu badawczego rozdziału” w każdym rozdziale znacząco wpłynęła na spójność rozprawy. Język pracy jest generalnie poprawny, choć miejscami pojawiają się drobne niedociągnięcia, wynikające z użycia nieprecyzyjnych określeń (np. „zależność jest nieznaczna...”, „...bardzo silna...” czy „budowa skokowa” w odniesieniu do światłowodów o skokowym profilu współczynnika załamania światła). Sporadycznie występują również kolokwializmy.

Lektura pracy byłaby znacznie przyjemniejsza, gdyby Autorka zamieściła spis skrótów i oznaczeń, tym bardziej, że w tekście pojawiają się akronimy, których znaczenie nie zostało wyjaśnione.

Należy jednak podkreślić bardzo dobrą formę prezentacji wyników. Zarówno ich sposób przedstawienia, umieszczenie w tekście, jak i opisy są czytelne i podkreślają wartość przeprowadzonych badań. Wyjątek stanowi rysunek 11., gdzie na osi OY umieszczono wartości znormalizowane, ale w różnych zakresach dla każdego z sześciu prezentowanych wykresów, co utrudnia porównanie mierzonych wartości.

7. Uwagi krytyczne dotyczące rozprawy

Poniżej przedstawiam kilka uwag dotyczących rozprawy doktorskiej:

7.a. W przypadku badań wykorzystujących źródło laserowe i włókna światłowodowe, prosiłabym o podanie mocy impulsu optycznego na wyjściu ze źródła oraz gęstości mocy. Te parametry mogą być istotne ze względu na potencjalne nieliniowe efekty zachodzące w światłowodach o małych średnicach rdzenia. Proszę również o oszacowanie, czy te wartości mogły mieć wpływ na obserwowane zjawiska podczas transmisji sygnału optycznego.

7.b. Na rysunku 23 prezentowane są wyniki pomiarów jako „kontrast ODMR”. Proszę o podanie definicji tej wielkości, aby umożliwić pełne zrozumienie prezentowanych danych.

7.c. W rozdziale 5.2. Autorka stwierdza, że prowadziła promieniowanie laserowe „poprzez wnętrza rdzeni”. Proszę o dokładne wyjaśnienie, w jaki sposób wiązka laserowa była sprzęgana z rdzeniami o średnicy $2,8\ \mu\text{m}$ oraz w jaki sposób weryfikowano, że transmisja zachodziła w rdzeniu, a nie w płaszczu światłowodu.

7.d. W rozdziale 5.2. Autorka opisuje zastosowanie metody uśredniania sygnału pomiarowego w celu redukcji wpływu szumów. Proszę o wyjaśnienie, czy nie brano pod uwagę alternatywnych metod eliminacji szumów, takich jak filtracja pasmowa lub inne techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów. Uśrednianie sygnału, choć skuteczne w redukcji szumów, może również prowadzić do utraty istotnych informacji zawartych w sygnale.

7.e. W rozdziale 5.2. Autorka wspomina o wykorzystaniu metod uczenia maszynowego do analizy danych. Proszę o szczegółowe opisanie, w jaki sposób pozyskano dane do zbudowania i przetestowania modelu. W szczególności, proszę o podanie informacji na temat wielkości zbioru danych, zastosowanych algorytmów uczenia maszynowego oraz sposobu walidacji modelu.

8. Wnioski końcowe

Autorka rozprawy osiągnęła cel badawczy i wykazała, że istnieje „*możliwości przestrzennego obrazowania pola magnetycznego za pomocą nowej platformy opartej o centra barwne NV w nanodiamentach oraz światłowody*”.

W związku z czym można stwierdzić, że recenzowana praca stanowi opis oryginalnego rozwiązania problemu naukowego wykonanego przez Autorkę rozprawy, jak również wykazuje jego ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej FIZYKA oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa Pani mgr inż. Pauliny Czarneckiej - Treli spełnia wymagania *Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym”*.

Mając na uwadze osiągnięte wyniki oraz obowiązujące przepisy prawa wnoszę do Rady Dyscypliny NAUKI FIZYCZNE Uniwersytetu Jagiellońskiego o dopuszczenie Pani mgr inż. mgr inż. Pauliny Czarneckiej - Treli do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



prof. dr hab. inż. Małgorzata Szczerska