



Wrocław, 21 sierpnia 2023 r.

Ocena osiągnięć i dorobku naukowego dr. Adama Wojciechowskiego w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego

Podstawą przedstawionego mi do zaopiniowania wniosku habilitacyjnego pana dr. Adama Wojciechowskiego jest osiągnięcie naukowe w postaci cyklu 12 powiązanych tematycznie publikacji opatrzonych wspólnym tytułem „Charakteryzacja i zastosowania centrów barwnych typu azot-wakancja w diamencie do pomiarów i obrazowania pól magnetycznych”, i dotyczących rozwoju metodologii i przyrządów czujnikowych opartych na pomiarze optycznie wykrywanego rezonansu magnetycznego (*ang. Optically Detected Magnetic Resonance - ODMR*) z zastosowaniem dodatkowo promieniowania mikrofalowego o częstotliwości dopasowanej do wybranych przejść elektronowo-spinowych w ujemnie naładowanych centrach NV w diamencie.

Praca A1 dotyczy badań nad centrami NV za pomocą ODMR, gdzie obserwuje się zmiany intensywności fluorescencji, pobudzonej i mierzonej w obszarze widzialnym, wskutek zmiany populacji w elektronowym stanie podstawowym takiego defektu wywołane przez rezonansowe pola mikrofalowe (dla dwóch bliskich częstości dopasowanych do wybranych przejść spinowych i próbkowanie wąskich rezonansów związanych z efektem „hole burning” na tle pików poszerzonych wskutek lokalnych niejednorodności kryształu w różnych położeniach liczego zbioru centrów). Praca dotyczy szczególnego, niebadanego wcześniej przypadku, gdy oba pola (wiązki pompującej i próbującej) dopasowane są spektralnie do tego samego przejścia spinowego w polu magnetycznym. Rezultaty zostały wyjaśnione poprzez zjawisko oscylacji populacji danego stanu, co ma też pewne konsekwencje praktyczne w kontekście wykorzystania takiego procesu jako metody wyznaczania charakterystycznych czasów życia/relaksacji (tutaj na przykładzie stanów spinowych stanu podstawowego ujemnie naładowanych centrów NV). Praca jest właściwie kontynuacją badań prowadzonych już wcześniej w Zakładzie Fotoniki UJ. Wkład Kandydata polegał głównie na udziale w modelowaniu uzyskiwanych doświadczalnie widm fluorescencji, włączyny w to oryginalne, autorskie elementy (metoda uśredniania sygnałów o różnych fazach). Nie jest natomiast jasny wkład dr. Wojciechowskiego w prace doświadczalne, o którym wspomina w Autoreferacie, ale który nie jest wymieniony w jego oświadczeniu.

Celem pracy A2 (badania przeprowadzone w trakcie stażu podoktorskiego w DTU) było wykorzystanie eksperymentu analogicznego do powyższego i jego zoptymalizowanie



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Zachodni WBK S.A.
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



pod kątem wykrywania niewielkich pól magnetycznych i konstrukcji wysokoczułych diamentowych magnetometrów na bazie pomiarów fazoczułych zbioru centrów NV o niedużej gęstości (jako kompromis pomiędzy wzrostem czułości i poszerzania linii ze wzrostem gęstości centrów). Monitorowanie intensywności fluorescencji (wzbudzonej nierezonansowo przy 532 nm) przy jednoczesnym pobudzaniu układu mikrofalami o częstotliwościach w zakresie najsilniejszych zmian (nachylenia) widma fluorescencji odpowiadającego elektronowym rezonansom spinowym (struktury nadsubtelnej) pozwala wnioskować o obecności i zmianach pola magnetycznego. Gdzie czułość pomiaru jest proporcjonalna do pochodnej optycznego rezonansu magnetycznego, zależnego od parametrów modulacji. Praca koncentruje się na zbadaniu zależności tego nachylenia od modulacji sterującego pola mikrofalowego (znalezieniu modulacji maksymalizującej pochodną). W szczególności pokazano, że gdy stosunek poszerzania i separacji linii struktury przekracza $\frac{1}{4}$ to modulacja przebiegiem prostokątnym daje największą czułość na pole magnetyczne. Rola Habilitanta w tej pracy była głównie pomocnicza w zakresie modelowania odpowiedzi fazoczułej z modulacją częstotliwościową. Tutaj również, podobnie jak to miało miejsce w przypadku artykułu A1, pojawia się rozbieżność co do jego udziału w badaniach doświadczalnych.

Praca A3, opublikowana w *Review of Scientific Instruments*, pomimo że bardzo techniczna to wartościowa, w której wkład merytoryczny Habilitanta był bardzo istotny na wszystkich etapach prac, włączywszy elementy koncepcyjne. Artykuł omawia czynniki wpływające na czułość pomiaru i obrazowania niewielkich pól magnetycznych za pomocą ODMR z centrów NV⁻ diamentu, koncentrując się na parametrach fotodetektora wielokanałowego (kamery) mierzącego emisję w zakresie widzialnym modyfikowaną polem mikrofalowym (jak w poprzednich pracach). Pokazano, między innymi, że ponieważ największą czułość uzyskuje się maksymalizując iloczyn FMC (*ang. full well capacity*) pojedynczego piksela i FPS (*ang. frames per second*), to najwyższe czułości uzyska się stosując kamery z matrycami CMOS wytworzone w technologii „deep-well”. Natomiast dodatkowe zalety może przynieść zastosowanie kamer w wersji „time-of-flight”, które pozwalają na detekcję fazoczułą dla każdego z pikseli, co jest oryginalną propozycją Habilitanta w zastosowaniu do czujników pola B na bazie centrów barwnych.

Kolejne prace cyklu można podzielić na dwie grupy: (i) dotyczące rozwoju samych materiałów, technologii wytwarzania oraz poprawy wydajności czujników diamentowych opartych w działaniu na pomiarze ODMR (głównie w kontekście magnetometrii, ale też potencjalnie innych zastosowań czujnikowych) – prace A6 i A8 do A12; oraz (ii) przykładów kolejnych (oprócz magnetometrii) zastosowań sensorów na bazie centrów barwnych w diamentu – prace A4, A5 i A7.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Zachodni WBK S.A.

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



I tak, praca A8 skupia się na technologii generowania centrów NV w diamencie za pomocą implantacji protonami (próbki były dodatkowo wygrzewane w próżni). Badano wpływ parametrów technologicznych procesu na spinowe czasy relaksacji w centrach barwnych dla kryształów diamentu z dużą zawartością azotu. Głównym rezultatem pracy było badanie fluorescencji i kontrastu ODMR, oraz czasów relaksacji T1 i T2, w zależności od dawki protonów, aż do poziomu degradacji materiału. Analogicznej charakteryzacji dokonano w pracy A9 dla diamentów potraktowanych wiązką elektronową celem wytworzenia obszarów o różnej koncentracji centrów NV. Przestrzenne zmiany własności charakteryzowano za pomocą pomiarów fotoluminescencji i ODMR. Na podstawie zależności przestrzennej naprężeń (określonych z ODMR) stwierdzono, że zwiększenie odkształceń zwiększa poszerzenie niejednorodne, co zaś przekłada się na zmianę szybkości relaksacji podłużnej i poprzecznej. Te ostatnie skalowały się liniowo z koncentracją centrów barwnych (do pewnego poziomu), co powiązano z oddziaływaniem dipol-dipol istotnym przy dużych gęstościach, sugerowanym także we wcześniejszej literaturze. Dane z ODMR umożliwiły również wyznaczenie zależności przestrzennej czułości magnetometrycznej (zależności od koncentracji centrów).

W pracy A6 zaproponowano wykorzystanie materiałów diamentowych wytwarzanych w tańszych technologiach w postaci warstwy nanodiamentów pozyskanych z osuszenia zawiesiny w roztworze. Pokazano, iż pomimo naturalnej niejednorodności takiego układu (w związku z losową orientacją nanokrystalitów w stosunku do kierunku wektora indukcji magnetycznej) pomiar czy nawet obrazowanie pola nadal jest możliwe. Co jest zresztą głównym rezultatem tej pracy, tj. opracowanie metody pomiarów pola magnetycznego na podstawie ciągłego (poszerzonego) widma ODMR. Zaproponowano także, i wstępnie scharakteryzowano, bardzo ciekawą wersję czujnika wykorzystującego warstwę takich nanodiamentów osadzoną na jednym z końców wiązki światłowodowej (wg autorskiej koncepcji Habilitanta), czego główną zaletą była wysoka apertura numeryczna (powyżej 0.5) kolekcji emisji z centrów barwnych. Ostatnie trzy prace cyklu są właściwie kontynuacją tego wątku. W pracy A10 badano własności cienkich warstw z nanodiamentami wytwarzanych chemicznie na podłożach szklanych jak również na zakończeniu pojedynczego światłowodu wielomodowego o dużej średnicy rdzenia albo obrazowodu (wiązki światłowodowej). Pokazano dobrą jednorodność takich warstw (za pomocą pomiarów AFM i mapowania luminescencji) oraz możliwość detekcji sygnału ODMR z pojedynczego włókna wiązki obrazowodu, czyli pojedynczego piksela. Rezultaty wskazały na perspektywy aplikacyjne takiego rozwiązania jako wielokanałowego czujnika pola magnetycznego z możliwością natychmiastowego odczytu, do równoległego mapowania w czasie i do odczytu informacji z wielu pikseli z wysoką czułością, do potencjalnego wykorzystania w biodiagnostyce (np. endoskopii). Praca A11 traktuje o



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-gaa.org

Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Zachodni WBK S.A.
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



metodzie jednorodnej inkorporacji nanodiamentów z centrami NV do objętości rdzenia światłowodu, którego krótkie odcinki mogą służyć jako czujniki detekcji pola magnetycznego. Koncepcję takiego przyrządu zweryfikowano za pomocą pomiarów sygnału ODMR z asystą mikrofal, ale też samej fluorescencji. W pracy A12 zaś, opisano oryginalne podejście domieszkowania nanodiamentami światłowodów z rdzeniem „zawieszonym”. Taka konstrukcja światłowodu zapewnia większy w stosunku do tradycyjnych światłowodów kontrast współczynników załamania pomiędzy rdzeniem, a płaszczem powietrznym, co zaś przekłada się na wysoką aperturę numeryczną. Zaobserwowano po raz pierwszy detekcję sygnału ODMR z nanodiamentów poprzez taki światłowód.

Istotnym elementem badań dr. Wojciechowskiego nad centrami NV w diamentach oraz rozwoju magnetometrów na nich opartych są przykłady potencjalnych zastosowań. W pracy A5 zademonstrowano schemat modulacji mikrofal w pomiarze ODMR, który pozwala na jednoczesny pomiar niewielkich zmian temperatury i pola magnetycznego. Pokazano, że ponieważ zmiany temperatury na poziomie milikelwinów zmieniają energii stanów spinowych centrum NV⁻ w zakresie zbliżonym do zmiany pola magnetycznego o nanotesle, to dla precyzyjnych i jednoczesnych pomiarów zarówno pola B i jak i T, konieczna jest dokładna znajomość częstotliwości obu aktywnych przejść spinowych. Przedstawiono protokół pozwalający to wyznaczać w czasie niemal rzeczywistym, a uzyskane czułości wyniosły $1.4 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ i $430 \text{ } \mu\text{K/Hz}^{1/2}$, odpowiednio. W pracy A4 zaś, opisano możliwość obrazowania pól magnetycznych pochodzących od tkanki mózgowej (na przykładzie struktury wybranego obszaru wewnątrz hipokampu gryzoni) za pomocą sensora diamentowego – magnetometru na bazie centrów NV jak opisywano w innych pracach Habilitanta. Wyniki symulacji komputerowych, w których modelowano warunki pobudzenia komórek z różnymi opóźnieniami (ich rozkładami w czasie), pokazały możliwość wygenerowania i rejestracji pól o indukcji rzędu 1 nT. Dodatkowo, dokonano oszacowań przestrzennej zdolności rozdzielczej oraz wymaganych parametrów sensora, które pozwalałyby na zarejestrowanie potencjałów czynnościowych z wysoką przestrzenną zdolnością rozdzielczą. Wreszcie, praca A7 omawia pierwszy przykład zastosowania czujnika diamentowego pola magnetycznego do pomiaru *in vitro* sygnału biologicznego (potencjałów czynnościowych) tkanki mięśniowej żywej myszy. Dzięki zastosowaniu materiału diamentowego z dwudziestokrotnie grubszą warstwą centrów NV, co pozwoliło na generację znacznie silniejszej fluorescencji w porównaniu do czujników omawianych w innych pracach cyklu (kosztem pogorszenia rozdzielczości przestrzennej), osiągnięto czułość pola magnetycznego na poziomie $50 \text{ pT/Hz}^{1/2}$.

W mojej ocenie, przedstawione osiągnięcie habilitacyjne dr. Adama Wojciechowskiego spełnia zarówno ustawowe jak i zwyczajowe wymogi i stanowi znaczny



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Zachodni WBK S.A.

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Politechnika Wrocławska

Katedra Fizyki Doświadczalnej

wkład w rozwój dyscypliny. Artykuły na nie się składające wnoszą istotnie nową wiedzę do obszaru badań nad własnościami centrów barwnych w diamencie, co w szczególności dotyczy rozwoju metodologii opartej na pomiarach ODMR celem ich praktycznego zastosowania w magnetometrii, i czujnikach innych wielkości fizycznych oraz biosensorach. Wkład Habilitanta do większości tych prac jest bardzo znaczący i kluczowy do osiągnięcia rezultatów końcowych, a w niektórych przypadkach rola dr. Wojciechowskiego była wręcz wiodąca czy kierownicza. Dotyczy to szczególnie okresu poczynawszy od pracy A8, czyli od jego powrotu do jednostki macierzystej na UJ ze stażu podoktorskiego, kiedy to został liderem zespołu i znacząco rozbudował laboratorium zajmujące się spektroskopią optyczno-mikrofalową centrów barwnych, a także nawiązał współpracę z Instytutem Fizyki Jądrowej PAN, co pozwoliło rozszerzyć prowadzone badania o nowe możliwości technologiczne. Wkład dr. Wojciechowskiego był nieco mniej znaczący w pracach A1, A2 i A4, i w tym sensie włączanie ich do cyklu być może nie było konieczne, choć są one z nim spójne merytorycznie.

W kontekście wymogów ustawowych należy podkreślić, iż pan dr Wojciechowski może pochwalić się istotną aktywnością naukową realizowaną w innych jednostkach, także zagranicznych. Poza stażami jakie odbył jako student, a później doktorant, najistotniejszy był wspomniany staż podoktorski w duńskim DTU. Pozwoliło to Habilitantowi rozwinąć warsztat badawczy dotyczący badań centrów barwnych w diamencie jako czujników magnetycznych, co zaś stało się podstawą jego obecnej działalności naukowej i nawiązania współpracy z grupami technologicznymi z Uniwersytetów w Ulm i w Lipsku, oraz CNRS we Francji, z której jego zespół korzysta do dziś. Innym wymiernym efektem pobytu naukowego w DTU jest kilka publikacji z tego okresu (niektóre z nich stały się częścią cyklu składającego się na osiągnięcie habilitacyjne).

Warto dodać, że spora część badań pana dr. Wojciechowskiego, również spoza omawianego powyżej cyklu prac, realizowana była w ramach projektów finansowanych z różnych agencji krajowych i zagranicznych – łącznie kilkanaście projektów, w 6 spośród których pełnił on rolę kierownika lub lidera zespołu badawczego. Obecnie realizuje 4 granty z MEiN, FNP i NCN, gdzie w tym ostatnim przypadku kieruje projektami konkursów OPUS LAP oraz QuantERA. Badania prowadził lub prowadzi we współpracy z wieloma ośrodkami z kraju i zagranicy, nie tylko akademickimi. Ma też na swoim koncie współpracę z firmą ORCA Computing z Wielkiej Brytanii w zakresie rozwijania nowatorskiej platformy światłowodowej do budowy atomowych pamięci kwantowych, z którą ma też już wspólną publikację.

Na sumaryczny dorobek naukowy pana dr. Adama Wojciechowskiego składa się blisko 50 publikacji, z czego ok. 35 po doktoracie. Wiele z nich w czasopiśmie wysokiej rangi o uznanej renomie międzynarodowej (i wysoko punktowanych na liście MEiN) jak np.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Zachodni WBK S.A.
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Physical Review A i B (7 prac), Optics Express (3 prace), Optics Letters (2 prace), Advanced Quantum Technologies, Applied Physics Letters, Carbon, Review of Scientific Instruments. Niektóre z nich są licznie cytowane przez innych autorów (ok. 30-40 cytowań), jak chociażby prace A2, A3, A5 i A7 cyklu habilitacyjnego, co potwierdza znaczenie osiągnięć dr. Wojciechowskiego. Łączna liczba cytowań jego wszystkich prac wynosi ponad 500 (bez cytowań własnych), a indeks Hirscha 14. Pan dr Wojciechowski wielokrotnie prezentował też swoje wyniki na konferencjach, w większości międzynarodowych – łącznie ponad 25 wystąpień, w tym 5 wykładów zaproszonych i 2 referaty plenarne.

W zakresie innych aktywności naukowych i związanych z organizacją nauki, dr Wojciechowski był sekretarzem komitetu jednej konferencji, kilkunastokrotnie recenzował artykuły dla różnych wydawnictw (np. ACS, Wiley, Springer, IEEE, AIP, Elsevier, IoP), i był też recenzentem grantu konkursu Perły Nauki MEiN. Uczestniczył również w pracach związanych z zaprojektowaniem, budową i uruchomieniem pierwszego w Polsce mikroskopu wykorzystującego zjawisko wymuszonego rozpraszania Ramana do tworzenia obrazu, za co wraz ze współautorami został wyróżniony Nagrodą Miasta Krakowa w dziedzinie "Nauka i Technika" w 2022 r. Zaś jako swój największy sukces organizacyjny wskazuje stworzenie nowoczesnego laboratorium spektroskopii centrów barwnych NV w diamencie w Instytucie Fizyki UJ.

W ramach działalności dydaktycznej dr Adam Wojciechowski prowadził wiele różnych kursów zarówno z fizyki ogólnej (wykłady i ćwiczenia), laboratoria pracowni fizycznej, jak i kursy specjalistyczne dla studentów drugiego stopnia dotyczące zaawansowanych materiałów, nanotechnologii, fotoniki i mikroelektromechaniki czy systemów czasu rzeczywistego. Muszę z uznaniem przyznać, że jego portfolio dydaktyczne, jak na ten etap kariery akademickiej, jest imponujące. Jest ono dodatkowo wzbogacone opieką nad pracami dyplomowymi, promotorstwem pomocniczym rozprawy doktorskiej oraz szeregiem aktywności związanych z popularyzacją nauki. Kandydat wygłosił wiele referatów w ramach różnych imprez i inicjatyw popularyzatorskich i jest autorem dwóch artykułów w czasopiśmie Foton wydawanym przez Instytut Fizyki UJ i przeznaczonym dla nauczycieli i studentów fizyki oraz uczniów interesujących się fizyką.

W podsumowaniu stwierdzam, iż przedstawione przez dr. Adama Wojciechowskiego osiągnięcia spełniają wymogi określone w art. 219 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” oraz stanowią istotny wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne w obszarze badań nad centrami barwnymi w diamencie i ich praktycznymi zastosowaniami. Pan dr Wojciechowski wykazuje się również w swoim dorobku istotną aktywnością naukową realizowaną w innych ośrodkach, w tym w szczególności zagranicznych. Sumaryczny dorobek naukowy dr. Wojciechowskiego jest znaczący, a wyniki swoje publikuje w uznanych czasopismach (część jego prac jest licznie



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska
Wydział Podstawowych Problemów
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Zachodni WBK S.A.
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Politechnika Wrocławska

Katedra Fizyki Doświadczalnej

cytowana). Bardzo pozytywnie również oceniam jej osiągnięcia w obszarze działalności dydaktycznej, organizacyjnej oraz popularyzujących naukę. W mojej ocenie dr Adam Wojciechowski jest w pełni dojrzałym naukowcem gotowym do samodzielności naukowej, dlatego też jednoznacznie popieram wnioski o nadanie mu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne i wnoszę do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Jagiellońskiego o dopuszczenie go do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Sęk



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-gaa.org

Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79

wppt.kfd@pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Zachodni WBK S.A.

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434